

618.174
102 G

MINISTERUL ÎNVĂȚĂMÂNTULUI
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA

Ing. Valeria Văcărescu

*CONTRIBUȚII LA ELABORAREA
UNEI METODOLOGII UNITARE
PENTRU ÎNCERCAREA
PERFORMANTELOR ROBOTILOR
INDUSTRIALI ȘI A SISTEMELOR DE
FABRICATIE FLEXIBILĂ
ROBOTIZATE*

TEZA DE DOCTORAT

CONDUCATOR ȘTIINȚIFIC
Prof.dr.ing. Kovacs Francisc

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

TIMIȘOARA
-1996-

CUPRINS

CAP. 1 INTRODUCERE	3
1.1. Tendințe actuale și de perspectivă în construcția de roboți industriali	3
1.2. Aspecte ale corelației structura mecanică performanțe ale roboților industriali.....	19
CAP. 2 STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIUL ÎNCERCĂRII ROBOȚILOR INDUSTRIALI ȘI A SISTEMELOR DE FABRICAȚIE FLEXIBILĂ ROBOTIZATE	27
2.1. Clasificarea parametrilor ce caracterizează performanțele roboților industriali.....	27
2.1.1. Clasificare după H. J. Warnecke	28
2.1.2. Clasificare conform normei VDI 2861 [S7].....	29
2.1.3. Clasificare conform normei franceze E61-103, elaborată de AFNOR [S3].....	33
2.1.4. Clasificare conform ISO 9283: 1990 E: Roboți industriali - Criterii de performanță și metode de încercare corespunzătoare [S2]	35
2.2. Definierea principalilor parametri ce caracterizează performanțele roboților industriali	35
2.2.1. Caracteristici de poziție	36
2.2.2. Caracteristici de traiectorie	50
2.2.3. Timpul de deplasare minim	57
2.2.4. Complianța statică.....	57
2.3. Situarea efectorului terminal al robotului. Abateri de situare	58
2.3.1. Exactitatea de situare statică și dinamică	61
2.3.2. Repetabilitatea de situare statică și dinamică	64
2.4. Procedee de încercare a roboților industriali	65
2.4.1. Generalități. Recomandări privind efectuarea încercărilor	65
2.4.2. Definierea pozițiilor și traiectoriilor de încercare în spațiul de lucru al robotului industrial	68
2.4.3. Clasificarea metodelor de măsurare a exactității și/sau repetabilității de situare la roboți industriali	71
2.4.4. Exigențe impuse proceselor de măsurare	74
2.4.5. Exemple de metode-test utilizate pentru determinarea performanțelor roboților industriali	74
CAP. 3 CONTRIBUȚII LA ELABORAREA UNOR METODE ȘI ALGORITMI DE CALCUL A EXACTITĂȚII ȘI REPETABILITĂȚII DE SITUARE A ROBOȚILOR INDUSTRIALI	83

3.1.	Considerații generale	83
3.2.	Metode locale de determinare a exactității și repetabilității de situare la roboți industriali	83
3.2.1.	Metodă și algoritm de calcul pentru determinarea exactității și repetabilității de poziționare, utilizând un corp de probă sferă calibrată	84
3.2.2.	Metodă și algoritm de calcul pentru determinarea repetabilității de situare la roboți industriali,utilizând distribuția $3 \times 2 \times 1$	86
3.2.3.	Metodă și algoritm de calcul pentru determinarea exactității și repetabilității de situare la roboți industriali utilizând distribuția $3 \times 3 \times 3$	93
3.3.	Metode "la distanță" pentru determinarea exactității și repetabilității de situare la roboți industriali	104
3.3.1.	Metodă și algoritm de calcul utilizând doi teodoliți pentru determinarea exactității și repetabilității de situare la roboți industriali (metoda prin intersecții)	104
3.3.2.	Metodă și algoritm de calcul pentru determinarea exactității de situare a roboților industriali,utilizând un telemetru laser	115
3.4.	Concluzii	121
CAP. 4	APLICAREA PROBLEMEI DE SITUARE LA CALIBRAREA ROBOȚILOR	122
4.1.	Exprimarea problemei de calibrare	122
4.2.	Parametri geometrici de erori	125
4.3.	Erori negeometrice	126
4.4.	Modelarea diferențială a erorilor	127
4.4.1.	Modelarea erorilor de situare a efectorului terminal generate de erorile geometrice ale parametrilor de tip Hartenberg-Denavit (HD)	130
4.4.2.	Modelarea erorilor de situare a efectorului terminal considerând și erorile negeometrice generate de jocurile în cuple	132
4.5.	Concluzii	135
CAP.5	APLICAREA PROBLEMEI DE SITUARE ÎN CAZUL SISTEMELOR DE FABRICȚIE FLEXIBILĂ ROBOTIZATE	137
5.1.	Considerații generale	137
5.2.	Problema de situare (poziționare și orientare) în cazul componentelor unui sistem flexibil robotizat	138

5.2.1.	Determinarea erorilor de situare (poziționare și orientare) în cazul unei celule de fabricație flexibilă robotizată	139
5.3.	Studiu de caz pentru celula de sudare cu robotul CLOOS-ROMAT-76	164
5.3.1.	Prezentare generală	164
5.3.2.	Determinarea erorilor de situare ale componentelor celulei de sudare	166
CAP.6	CONTRIBUȚII LA ELABORAREA UNOR SOLUȚII CONSTRUCTIVE DE DISPOZITIVE ȘI STANDURI PENTRU MĂSURAREA EXACTITĂȚII ȘI REPETABILITĂȚII DE SITUARE LA ROBOȚII INDUSTRIALI	172
6.1.	Dispozitive pentru măsurarea caracteristicilor de situare după principiul metodelor locale	172
6.1.1.	Cap de măsurare tridimensional pentru determinarea caracteristicilor de poziționare și orientare după distribuția $2 \times 2 \times 2$	172
6.1.2.	Cap de măsurare tridimensional pentru determinarea caracteristicilor de situare după distribuția $3 \times 2 \times 1$ sau $3 \times 3 \times 3$	175
6.1.3.	Cap de măsurare 2D pentru determinarea caracteristicilor de exactitate și repetabilitate pe traiectorie.....	180
6.2.	Stand de măsurare după principiul metodelor "la distanță"	184
6.2.1.	Stand pentru determinarea exactității și repetabilității de situare la roboți industriali utilizând un ansamblu de 2 teodoliți	184
Cap.7	CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND PERFORMANȚELE DE SITUARE LA ROBOȚII INDUSTRIALI ȘI SISTEME DE FABRICAȚIE FLEXIBILĂ ROBOTIZATE	189
7.1.	Considerații generale	189
7.2.	Calibrarea modelului geometric al robotului REMT 5	189
7.2.1.	Robotul industrial REMT 5 - - prezentare generală	190
7.2.2.	Stabilirea matricilor de transformare aferente modelului geometric direct al robotului REMT 5	192
7.2.3.	Modelul diferențial al erorilor de poziționare	196
7.2.4.	Determinarea efectivă a erorilor parametrilor geometrici $\Delta\alpha_1, \Delta\theta_2, \Delta\alpha_2$, pentru robotul REMT 5 și corectarea acestora	198
7.2.	Concluzii	200

7.3.	Cercetări experimentale privind performanțele de situare ale robotului CLOOS-ROMAT 76	202
7.3.1.	Robotul CLOOS-ROMAT 76. Prezentare generală	202
7.3.2.	Stand pentru determinarea performanțelor de situare la roboți și sisteme de fabricație flexibilă robotizată, utilizând un ansamblu de două tahimetre electronice tip REC-ELTA	207
7.3.3.	Program al cercetărilor experimentale	216
7.4.	Cercetări experimentale privind performanțele de situare pentru componentele celulei de sudare utilizând robotul CLOOS-ROMAT 76	229
7.4.1.	Celulă de sudare. Prezentare generală	229
7.4.2.	Program al cercetărilor experimentale	229
Cap. 8	CONSIDERAȚII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE. APLICAȚII ȘI PERSPECTIVE	236
8.1.	Concluzii finale și perspective ale cercetării în domeniu	236
8.2.	Contribuții teoretice	237
8.3.	Contribuții în domeniul aplicațiilor practice și industriale	239
8.4.	Contribuții în domeniul cercetării și încercărilor experimentale	240
	BIBLIOGRAFIE	243
	ANEXA 1	
	ANEXA 2	
	ANEXA 3	
	ANEXA 4	

Evaluarea caracteristicilor funcționale ale roboților industriali constituie unul dintre aspectele dezvoltării acestora.

Performanțele reale ale acestor mașini sunt încă insuficient cunoscute, întrucât definirea criteriilor de performanță constituie preocupări relativ recente.

Normele internaționale elaborate actualmente nu au răspuns și nu răspund tuturor criteriilor în domeniu, la diverse institute de cercetări și universități de prestigiu, cu preocupări în această direcție, aflându-se în fază de experiment și diferite metode-test pentru determinarea performanțelor roboților industriali.

Utilizarea roboților în diferite tipuri de aplicații industriale, necesită un studiu de detaliu al ansamblului de performanțe ale acestora, în vederea implementării optime a acestor utilaje în aplicații specifice.

Teza de față se înscrie în aceste coordonate, propunându-și să reunească într-un tot unitar ansamblul de metode privind aprecierea performanțelor roboților industriali și să completeze lacune existente.

Rezultatele obținute pot fi valorificate, amplificate și diversificate atât de viitorii cercetători în domeniu, cât și de fabricanții de roboți industriali.

Alegerea subiectului tezei de doctorat o datorez distinsului meu Dascăl și conducător științific, Prof.dr.ing. Kovacs Francisc, a cărui pasiune recunoscută

pentru robotică îl determină să fie permanent la curent cu ultimele noutăți în domeniu.

Pentru înțelegerea și răbdarea cu care m-a sfătuit și m-a îndrumat pe parcursul elaborării tezei îi acord întreg respectul meu și aleasă considerație.

Imi exprim întreaga grațitudine pentru sprijinul pe care , cu înaltul nivel al competenței sale științifice, dl.Prof.dr.ing. Kovacs Francisc mi la acordat în cercetările întreprinse în cadrul acestei lucrări.

Gândurile mele de mulțumire se îndreaptă, de asemenea, spre Dl.Prof.dr.ing. Dan Perju, șeful Catedrei de Organe de Mașini și Mecanisme, care, cu o deosebită bunăvoință, mi-a fost întodeauna un bun sfătuitor, împărtășindu-mi din vasta sa experiență științifică.

De asemenea, doresc să adresez mulțumirile mele D-lor Profesori referenți științifici ai acestei lucrări, pentru bunăvoința și răbdarea de a o parcurge.

Gândurile mele de recunoștință se îndreaptă spre toți Dascălii mei care m-au format ca specialist și mi-au călăuzit pașii în domeniul atât de captivant al tehnicii.

Ajunsă la finele acestei lucrări, care încheie un capitol important din viața mea, gândurile mele se îndreaptă spre cei care au fost zi de zi alături de mine cu gândul și cu sufletul, soțul meu și cele două fetițe, care au așteptat cu nerăbdare finalizarea acestei lucrări.

Ing. Valeria Văcărescu

CAPITOLUL 1

INTRODUCERE

1.1 Tendințe actuale și de perspectivă în construcția de roboți industriali

O societate industrializată avansată presupune o automatizare flexibilă a proceselor de producție, în care manipuloarele și roboții industriali au un rol determinant. Având în vedere faptul că roboții industriali sunt flexibili și versatili, asigurând libertăți de mișcare similare cu cele ale membrului superior (braț mână) al omului, utilizarea lor asigură o serie de avantaje economice și sociale. Intre acestea pot fi menționate: creșterea productivității, umanizarea activității muncii în sectoare grele de producție, prevenirea accidentelor de muncă, creșterea calității produselor și recuperarea mai rapidă a investițiilor.

Avantajele robotizării au condus la creșterea rapidă, atât a numărului, cât și a tipurilor de roboți industriali utilizați actualmente pe plan mondial.

Fenomenul este cert chiar dacă datele statistice publicate sunt uneori contradictorii, variațiile explicându-se prin aceea că nu există un consens în ceea ce privește conceptul de robot industrial și nici un sistem unitar de clasificare internațională a numeroaselor tipuri de roboți industriali existenți.

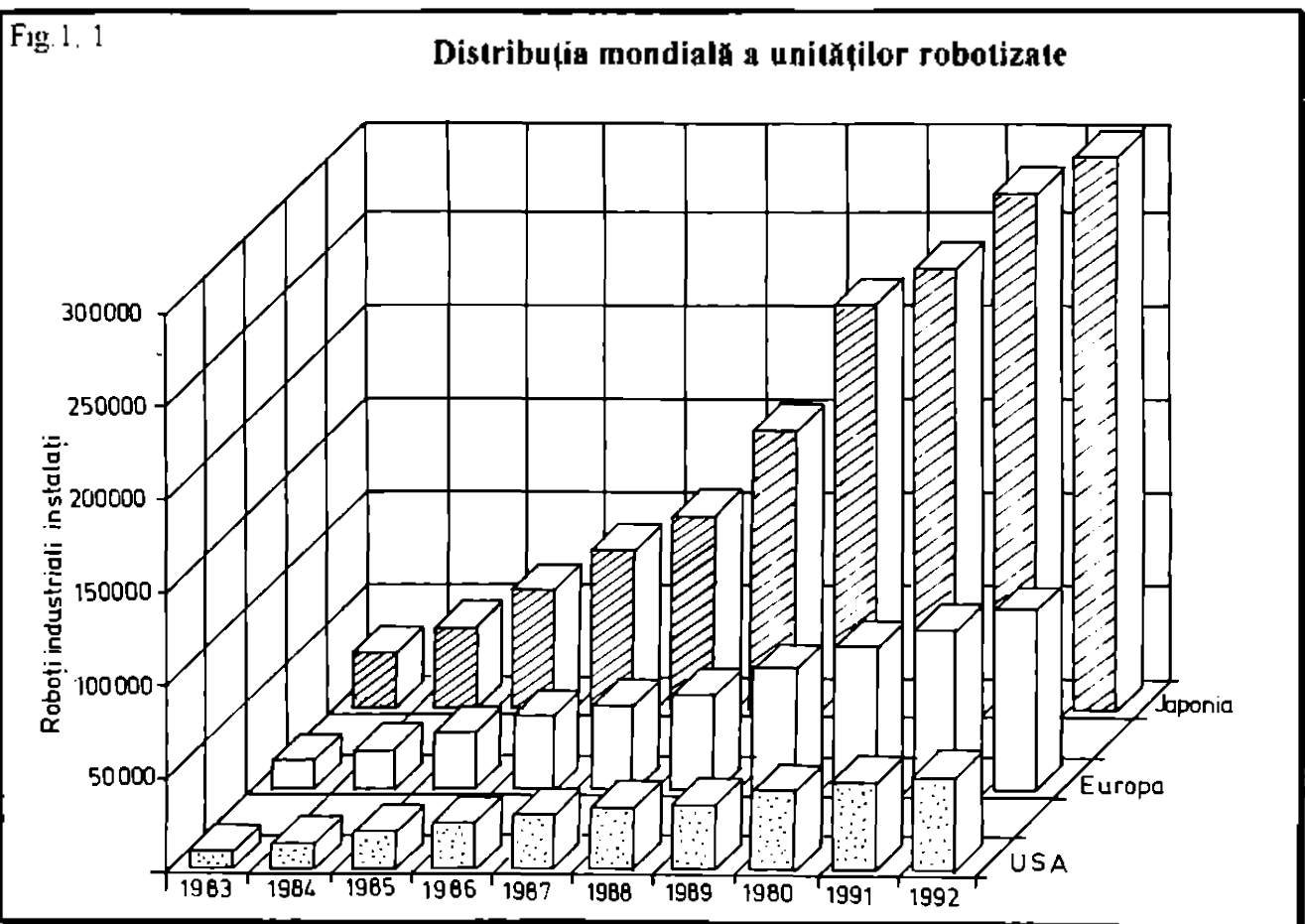
Piața mondială a roboților industriali, în dezvoltare rapidă, explică numărul mare de firme care se ocupă de producerea acestor utilaje și, în mod implicit, numărul mare de tipuri de roboți industriali în fabricație.

Cel mai intens se lucrează în domeniul construcției de roboți industriali în Japonia, S.U.A și țările vest-europene: Suedia, Germania, Franța, Italia, Anglia, etc.

Marile companii au început să plaseze comenzi imense pentru acești „muncitori mecanici”. Numai „General Motors” din S.U.A. a alocat în acest scop peste un miliard de dolari până în 1990, instalând mai mult de 14.000 de roboți noi [C7]. Într-un studiu al Universității Carnegie Mellon, se afirmă că, 4-7% din activitățile fabricilor americane sunt asistate de roboți.

Un studiu efectuat de Asociația Britanică de Robotică (B.R.A.), arată că Japonia ocupă primul loc între țările industrializate în privința producerii și utilizării roboților în industrie, situație confirmată și de Institutul American de Robotică (R.I.A.), care menționează că, excluzând chiar roboții cu manipulare simplă, baza de roboți folosiți de industria japoneză rămâne de trei ori și jumătate mai mare decât cea americană. Numai producția de roboți industriali a firmei „Motoman”, în 1991 era de 500 roboți/săptămână, capacitatea instalată a firmei fiind de 1000 roboți/săptămână.

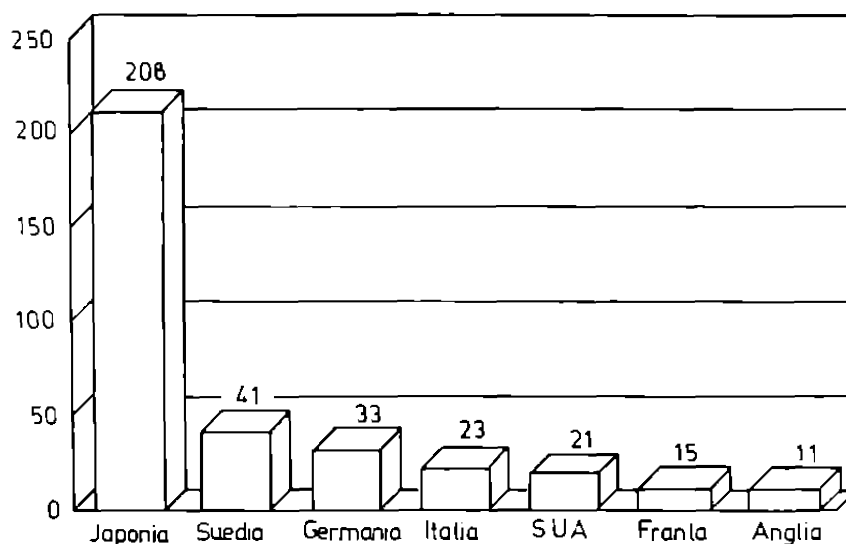
După R.I.A. și B.R.A., numărul de roboți instalați în lume, la nivelul anului 1992, se prezintă ca în figura 1.1 [R9]. Diagrama pune în evidență evoluția implementării roboților industriali, începând cu anul 1983. Se remarcă o puternică tendință ascendentă, în special în Japonia, dar și în Europa.



În figura 1.2 [R5] se poate urmări, comparativ, repartiția roboților industriali instalați, raportați la 10.000 persoane ocupate în producție, în diferite țări, la nivelul anului 1992.

Fig. 1. 2

Roboți industriali la 10. 000 persoane ocupate în producție, la nivelul anului 1992



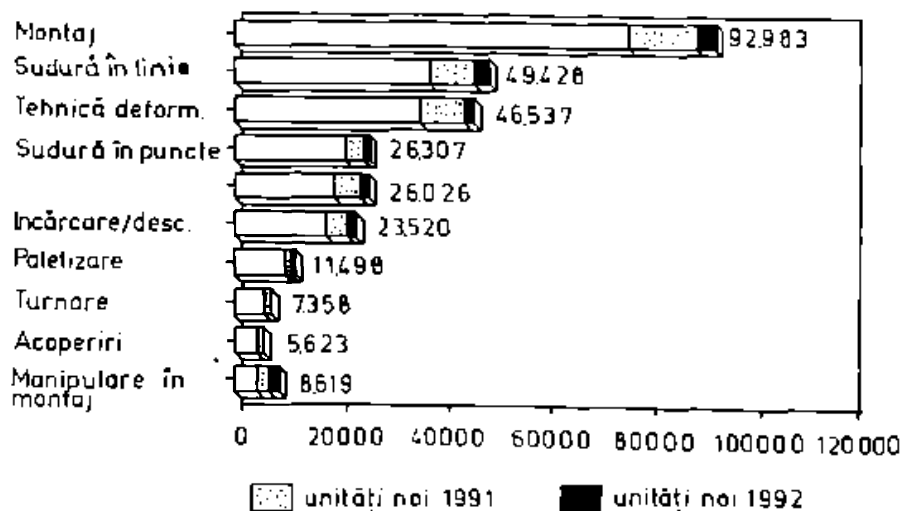
Quellen OECD/IPA

Pe domenii de aplicații industriale la nivelul anului 1992, utilizarea roboților în diferite țări se prezintă după cum urmează [R9]:

- în Japonia, după statisticile J.I.R.A. - histograma din fig. 1.3:

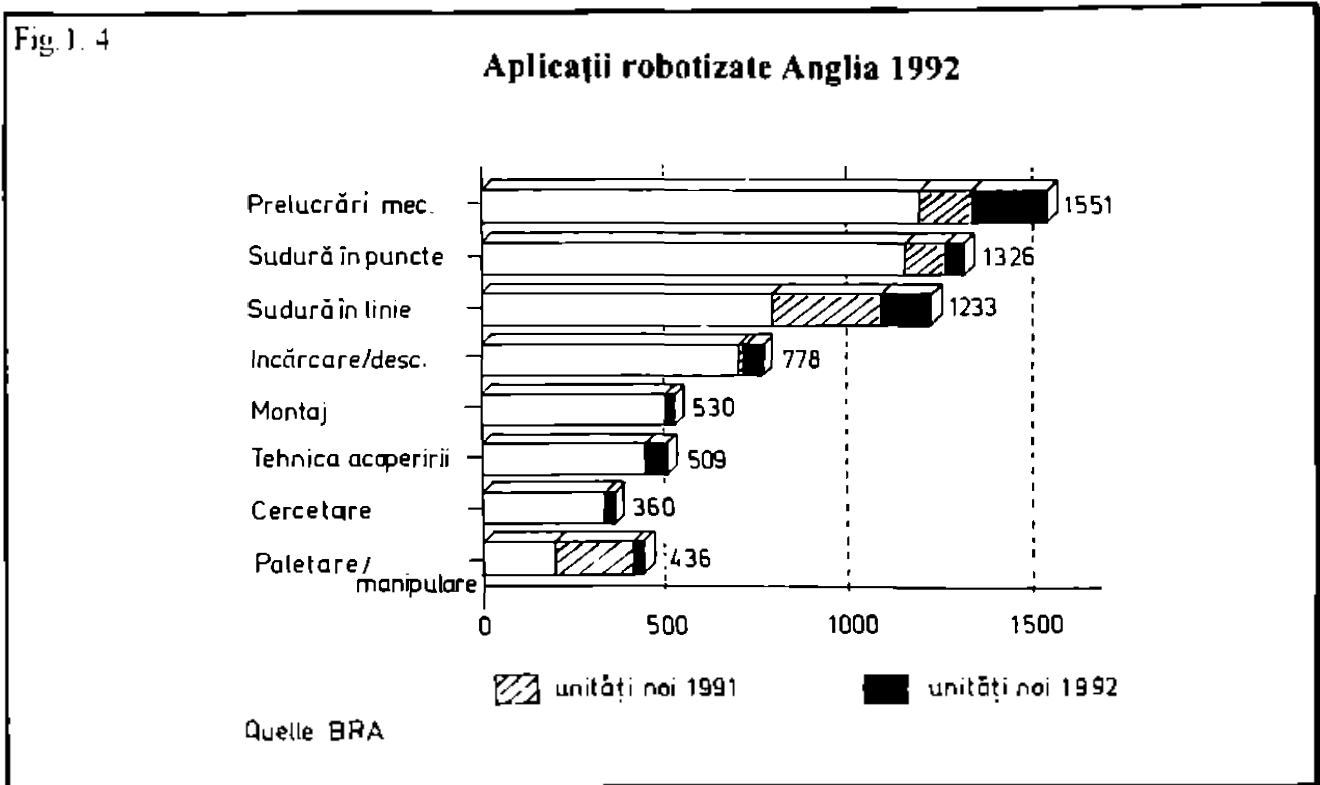
Fig. 1. 3

Aplicații robotizate Japonia 1992

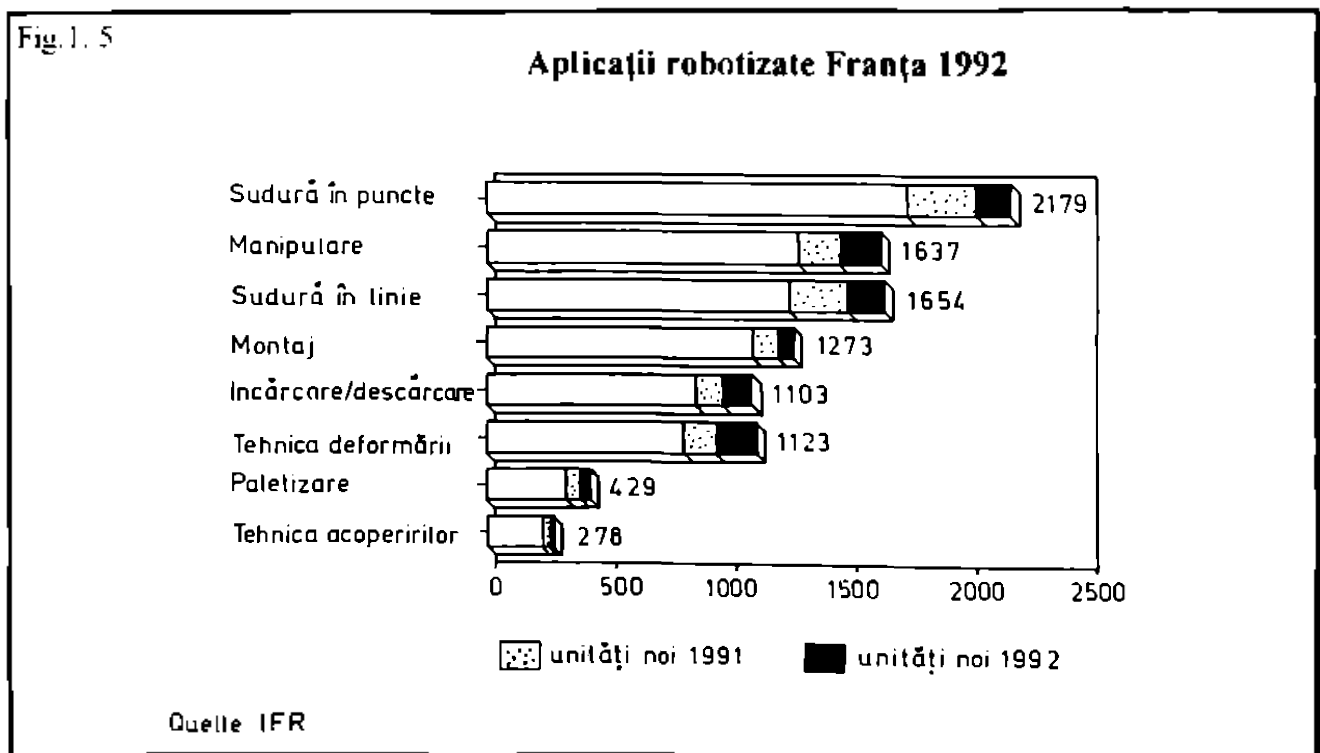


Quelle: JIRA

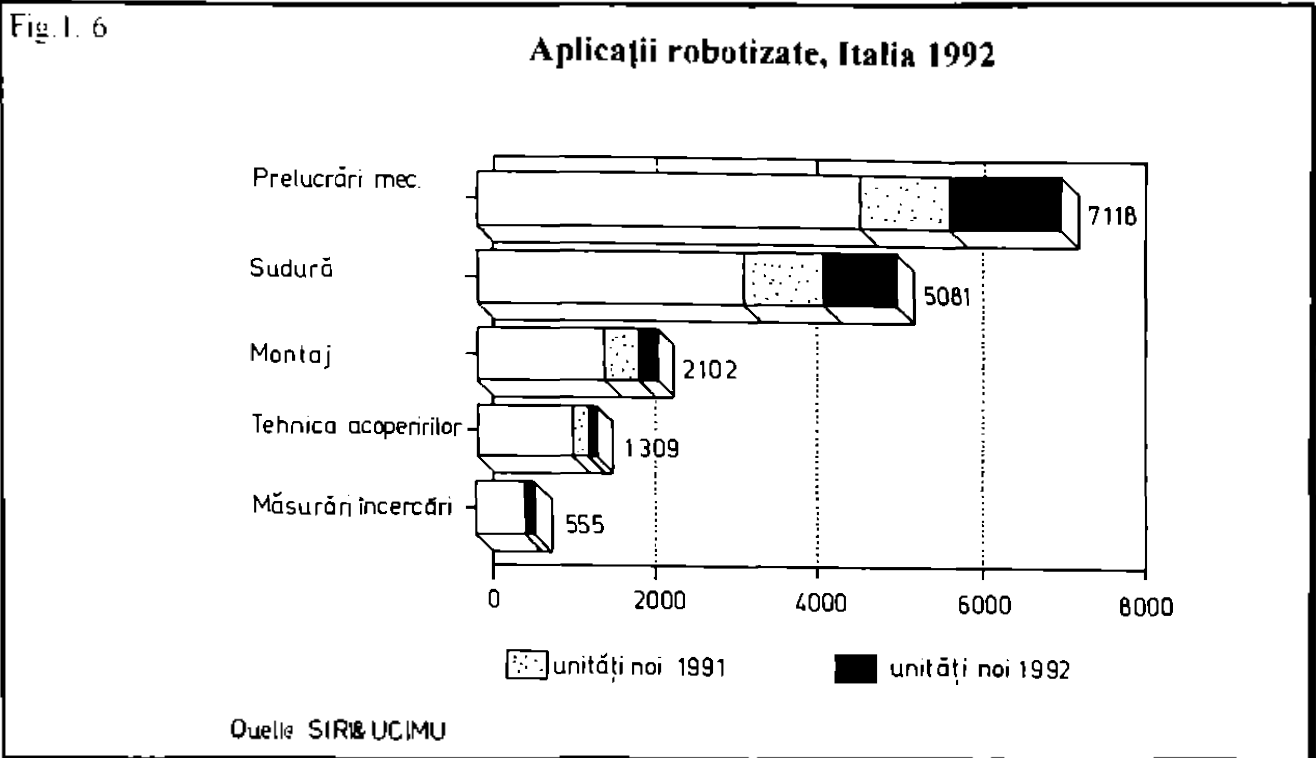
- în Anglia, după statisticile B.R.A. - histograma din fig.1.4;



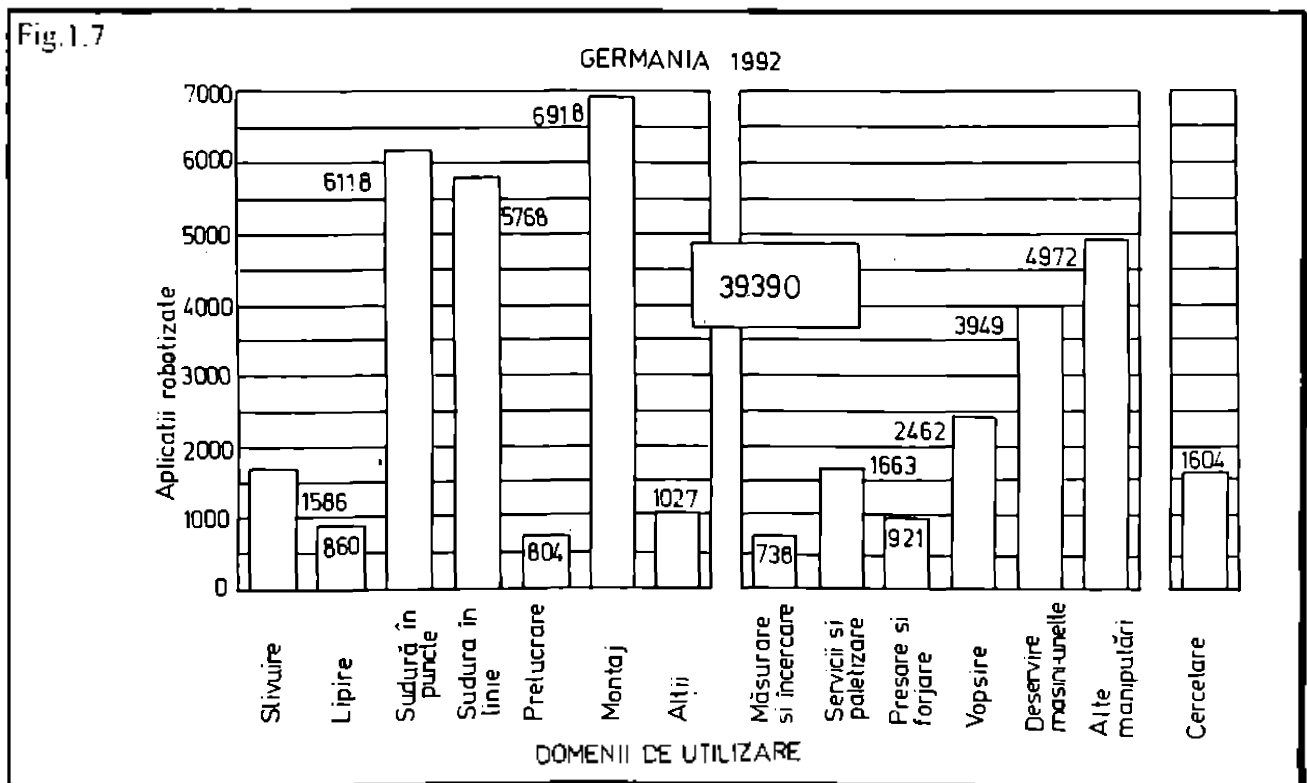
- în Franța, după statisticile I.F.R. - histograma din fig.1.5;



- în Italia, după statisticile S.I.R.I. - histograma din fig.1.6,

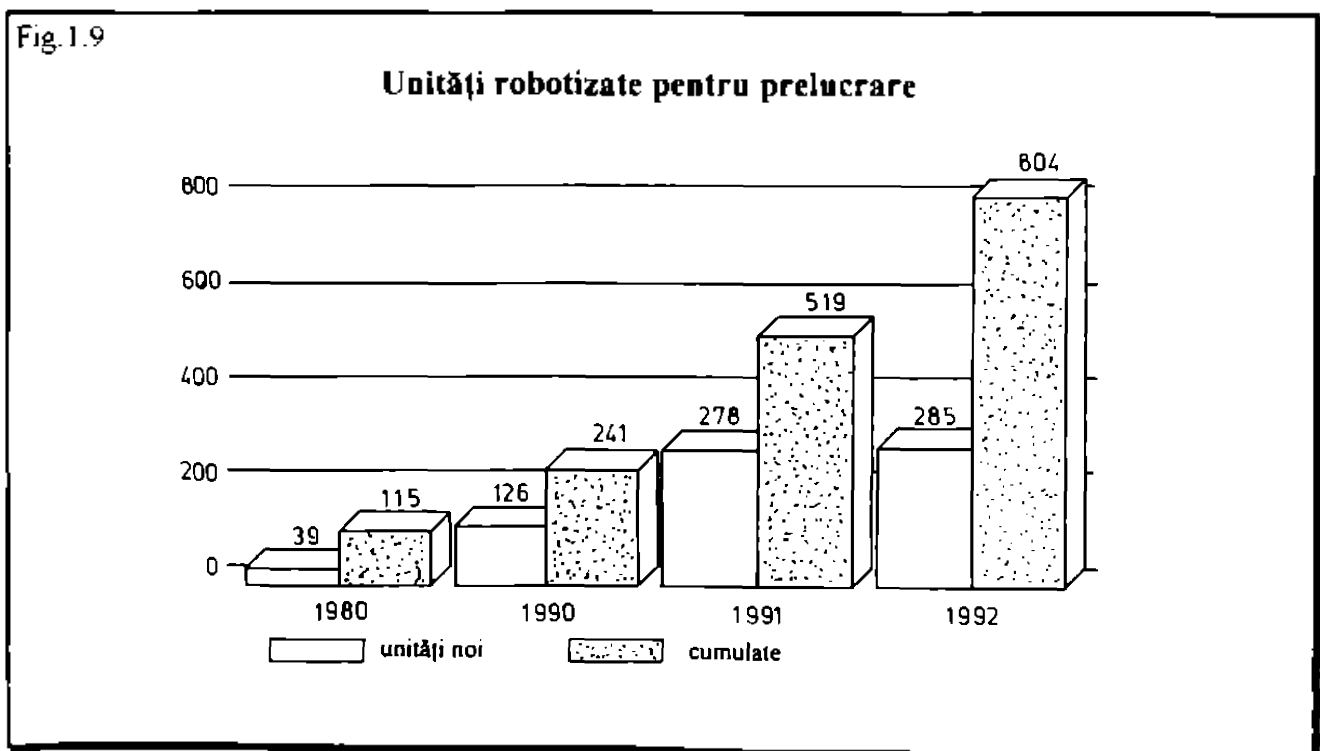
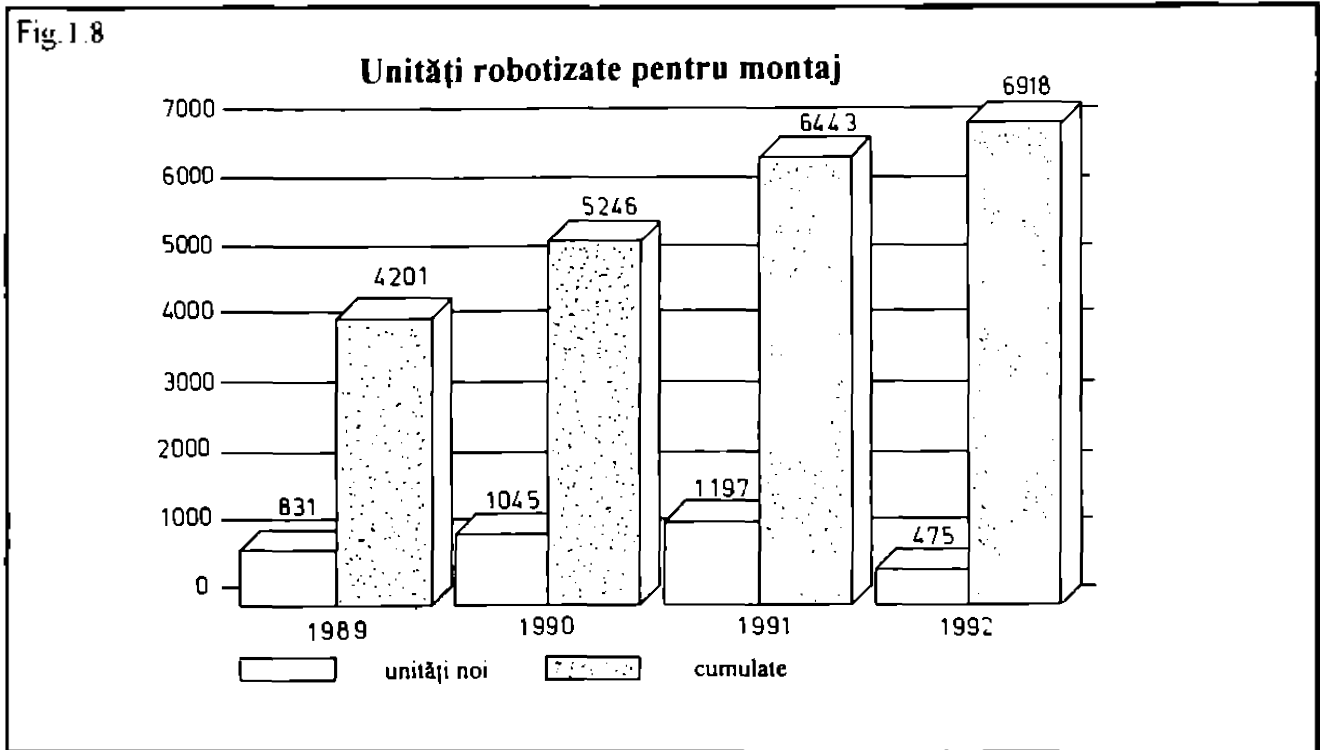


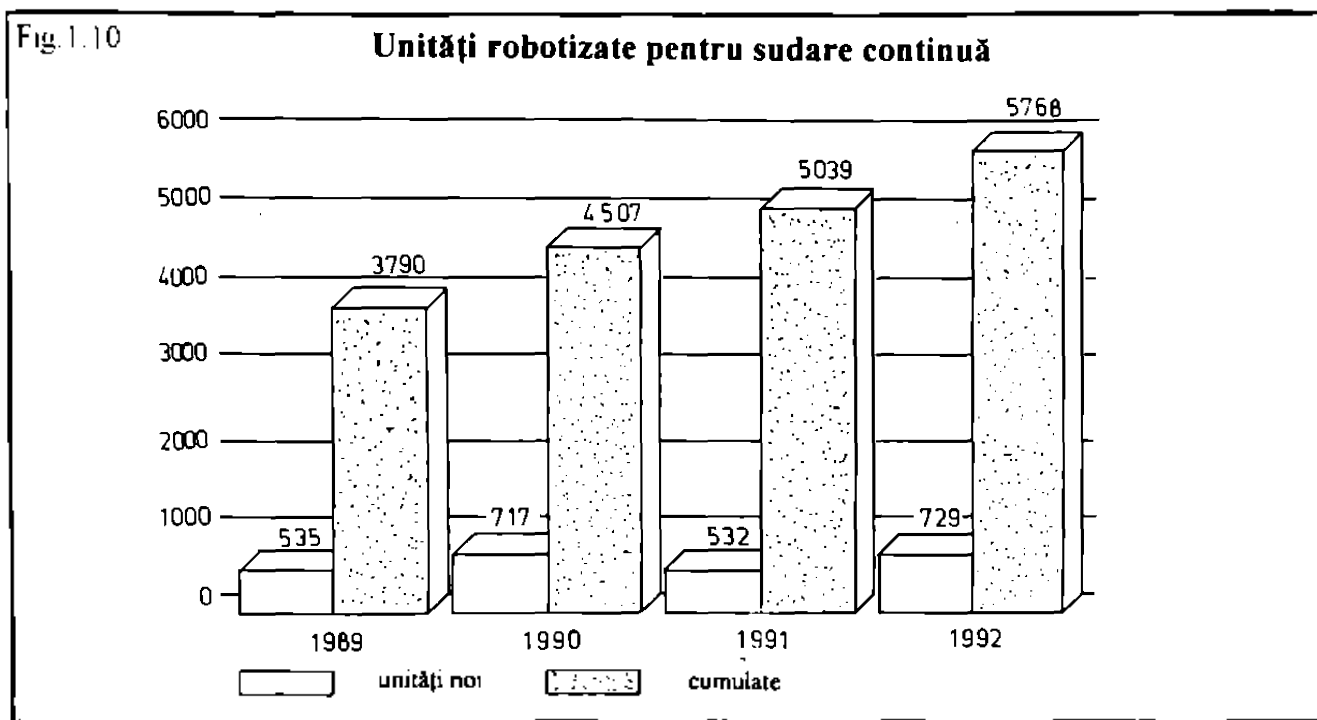
- în Germania după statisticile IPA/VDMA, histograma din fig.1.7. Firma VOLKSWAGEN, spre exemplu, a instalat la uzinele Wolfsburg, cel mai mare atelier de vopsire robotizată din Europa, având patru linii echipate cu 80 de roboți de vopsire tip „FANUC”, pentru autoturismul GOLF, lansat pe piață la sfârșitul anului 1991.



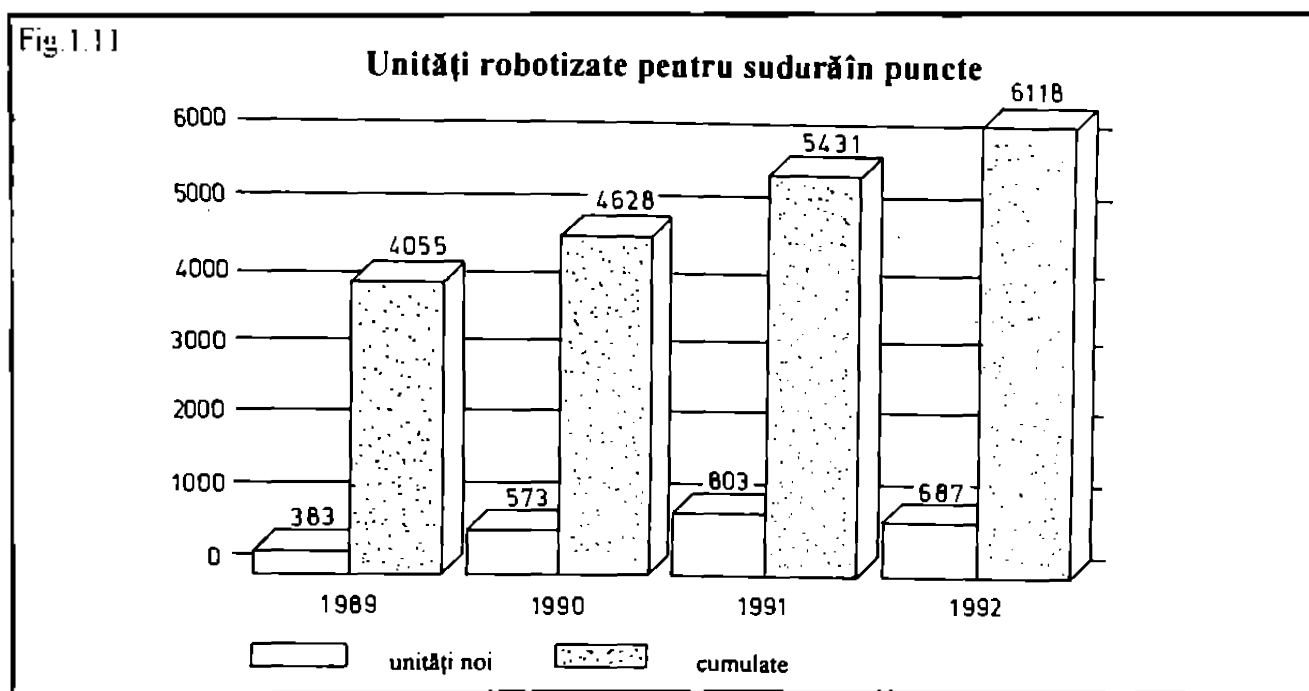
Se remarcă ponderea mare a aplicațiilor robotizate în domeniul montajului, sudurii și manipulărilor diverse ale pieselor.

O prezentare cronologică sintetică privind utilizarea roboților industriali în diverse aplicații, în Germania, este redată în figurile: 1.8, 1.9, 1.10 și 1.11.





Histogramele prezentate au fost întocmite pe baza statisticilor IPA/VDMA și se referă la principalele aplicații robotizate [R10].

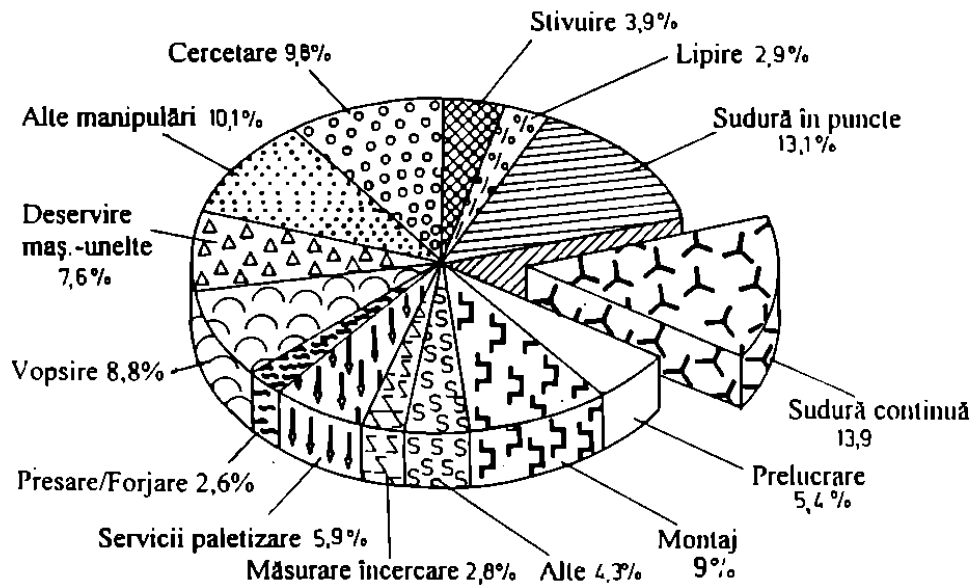


Se remarcă o tendință ascendentă clară, ritmul fabricării și introducerii în diferite domenii ale roboților industriali accelerându-se în permanență.

În fig.1.12 [R10], se prezintă distribuția procentuală, pe aplicații, a roboților instalați în Germania, la finele anului 1992.

Fig. 1.12

Distribuția pe aplicații a roboților 1992

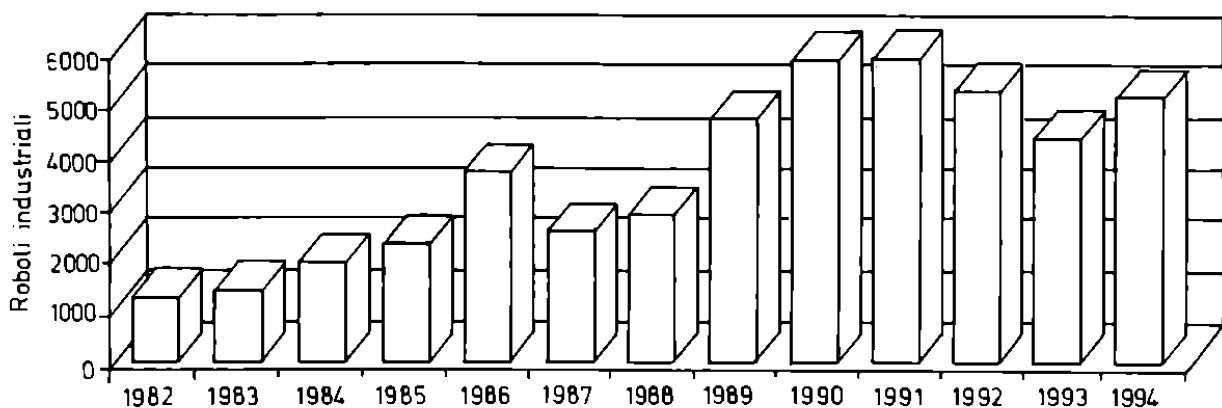


Se remarcă, din nou ponderea aplicațiilor de sudură (continuă și în puncte), montaj și manipulări diverse.

Statistici mai recente [R11] ale IPA/VDMA evidențiază pentru Germania o ușoară recesiune după anii de vârf, 1990-1991, urmată de o tendință de redresare în cursul anului 1994 - fig. 1.13.

Fig. 1.13

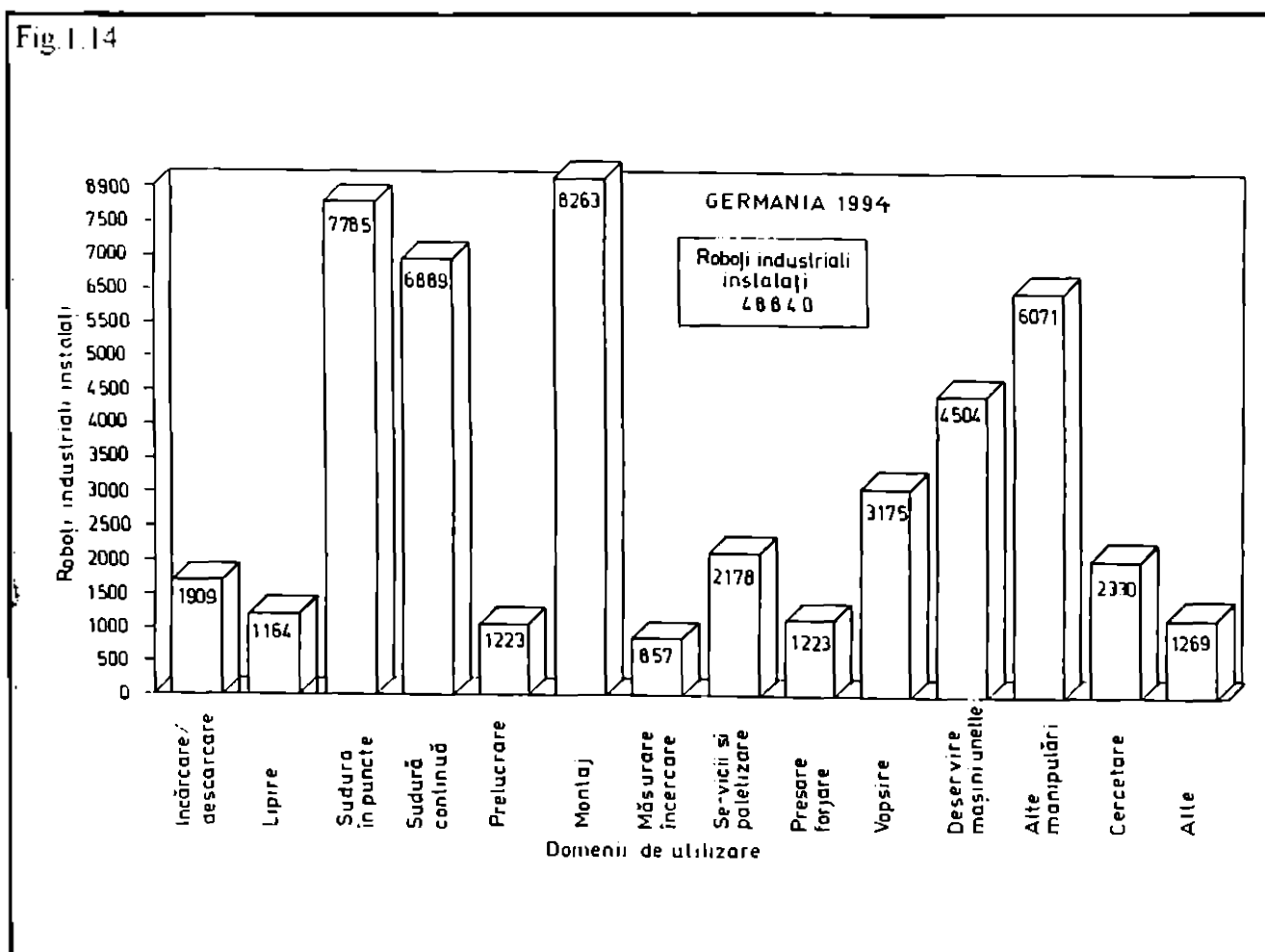
Roboți industriali pe ani



Decalajul în raport cu Japonia se menține însă. Astfel dacă la sfârșitul anului 1994 în Japonia existau, în medie 350 de roboți industriali la 10000 persoane ocupate în industrie, în Germania se regăseau doar 60 de roboți industriali la 10000 de persoane ocupate în industrie.

Interesantă este comparația cu USA. Astfel, dacă în USA la finele anului 1994 existau aproximativ 58000 de roboți industriali în utilizare, în Germania doar, exceptând celelalte țări europene, se aflau în utilizare aproximativ 49000 de roboți industriali [R11].

Histograma din figura 1.14 redă distribuția numerică pe domenii de aplicații, a roboților industriali în Germania, în 1994, iar histograma din figura 1.15 pune în evidență evoluția, în diverse domenii, a numărului de roboți industriali instalați [R11].

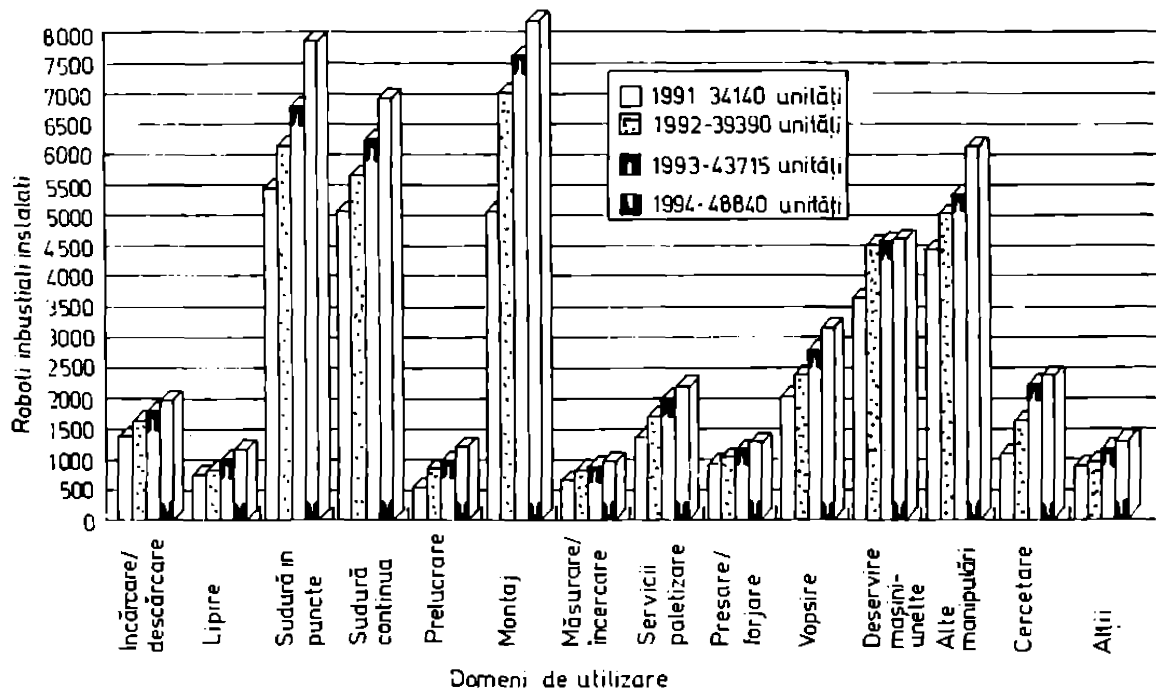


Și într-un studiu al Comisiei Economice a O.N.U. pentru Europa și Federației Internaționale de Robotică [F2], este pusă în evidență perioada de ușoară recesiune în domeniul roboților între anii 1990-1993, urmată de o evidentă tendință de redresare în 1994.

„World Industrial Robots 1995” prevede pentru 1995 că vânzările de roboți se vor ridica la 64.000 de unități, în comparație cu 53.000 unități în 1994, reflectând creșterea continuă a necesității în domeniu în Europa și U.S.A., dar și o redresare a cerințelor în Japonia. Alți doi ani de vânzări în masă sunt așteptați, prevăzându-se o

creștere medie cu 19% pe an până în 1998.

Fig. 1.15



Populația mondială de roboți se estimează a crește cu mai mult de o treime în aceeași perioadă, de la 610.000 la sfârșitul lui 1994, la aproape 820.000 la sfârșitul lui 1998.

Mai mult de jumătate, 57% se estimează a fi în Japonia, cu toate că aceasta reprezintă o scădere față de procentul de 62% în 1994.

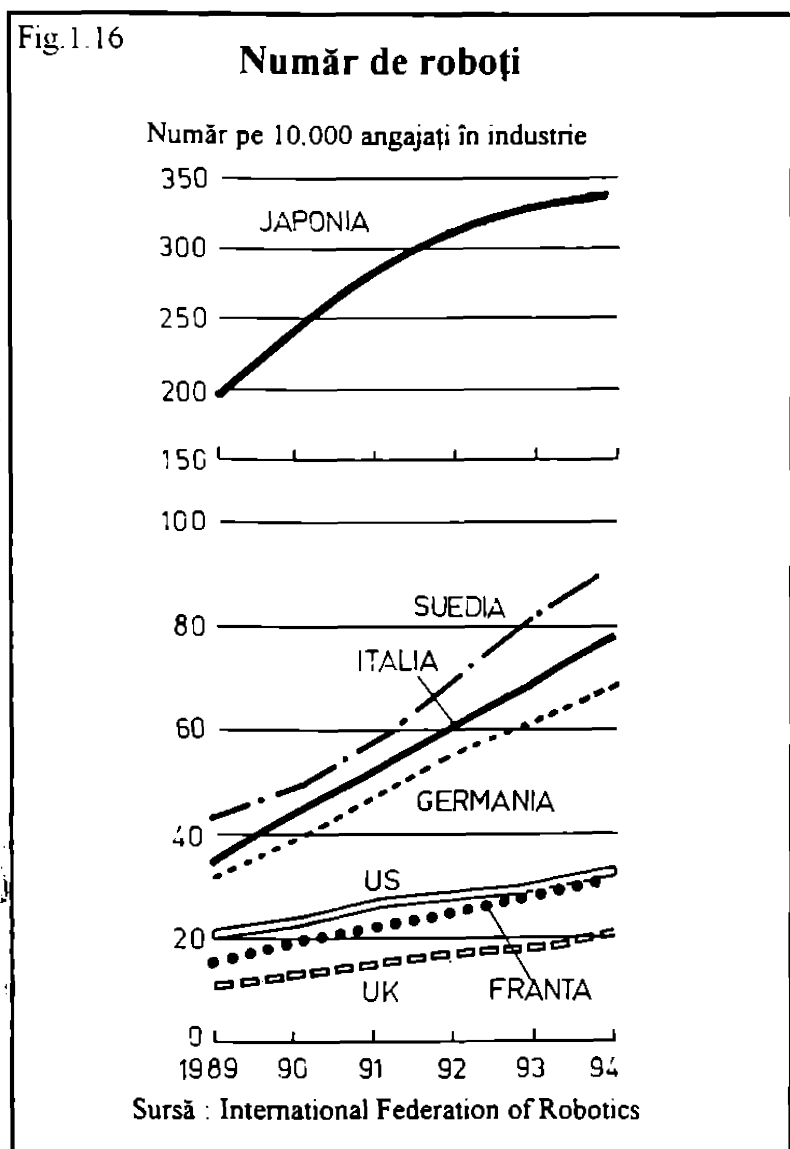
La nivelul anului 1994, populația de roboți a Japoniei era 470.000 de unități, în comparație cu 84.000 de roboți în U.S.A. (10% din stocul mondial), 75.000 în Germania (9%), 35.000 în Italia (4%), 19.000 în Franța și 14.000 în Marea Britanie.

Studiul notează că, în perioada de criză economică a anilor 1990-1993, care a determinat o reducere accentuată a numărului de persoane ocupate în industrie, are loc a creștere relativă a densității roboților, exprimată în număr de roboți la 10.000 de persoane angajate în producția industrială.

Superproducția industrială se așteaptă să vină de la o creștere accentuată a productivității incluzând folosirea intensivă a roboților, mai degrabă decât de la creșterea personalului din industrie.

Japonia cu aproape cu 350 de roboți la 10.000 de angajați în producția industrială conduce ușor în clasamentele curente. Suedia, cu peste 90 de roboți la

10.000 de angajați în producția industrială se află pe locul doi, în timp ce Marea Britanie, cu o densitate de 20 de roboți ocupă locul 7, după Italia, Germania, U.S.A. și Franța, fig.1.16.



Aceste mari diferențe provin din faptul că, majoritatea roboților unei țări este concentrată în producția de automobile. Astfel, industria de automobile a Japoniei folosește circa 815 roboți la 10.000 de muncitori comparativ cu 286 în Suedia, 167 în Franța, 127 în Marea Britanie.

Cu toate acestea se estimează că în Japonia, nu industria de automobile va înregistra principala tendință de creștere în utilizarea roboților, ci industria electronică, unde se estimează că vor lucra peste 50% din numărul de 29.760 roboți cumpărați în 1994.

În cele prezentate am evidențiat doar câteva dintre

realizările din acest domeniu, în diferite țări. Acestea s-au obținut pe baza unor preocupări specifice, de la țară la țară.

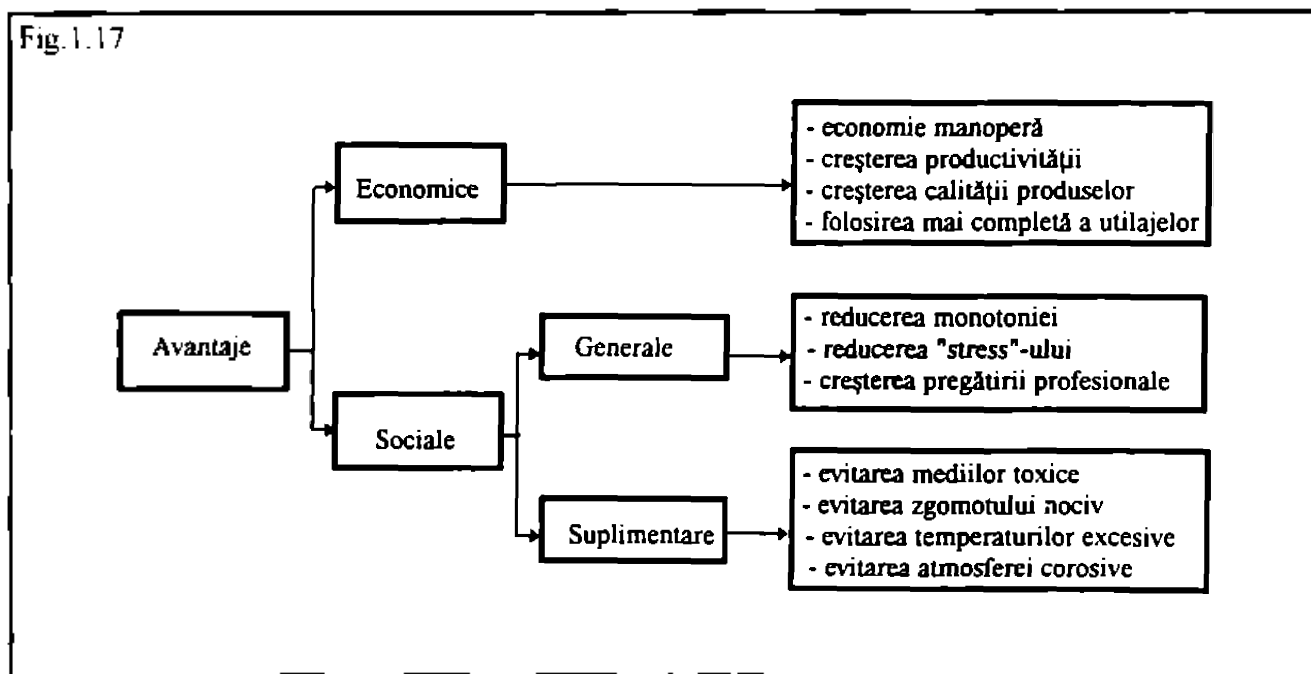
Astfel în unele țări (Japonia, Germania) au fost elaborate programe naționale de robotizare, în cadrul cărora au fost cuprinse o serie de întreprinderi cu preocupări apropiate, cărora li s-au acordat credite necesare.

U.S.A. ca și alte țări occidentale, sunt la rândul lor angajate în cursă "Crysler" are instalați 120 de roboți pentru sudarea în puncte, "General Motors" hotărăște să-și dubleze parcul de roboți ; "Volvo"-Suedia cumpără de pe piața americană 100 de roboți și face o comandă de alte 500 de unități ; "General Electric" lansează un vast program de robotizare ; "Westingshouse" decide investiții

de multe milioane de dolari pentru instalarea de roboți : "Lockhead" pune la punct un proiect de doi ani pentru utilizarea de roboți la asamblarea componentelor de avioane : "Digital Equipment", "International Business Machines", "Texas Instruments" și o serie întreagă de alți producători americani, mai mari sau mai mici, se angajează masiv în producția de roboți. Creșterea producției de masă permite reducerea prețurilor, iar multiplicarea tipurilor de roboți și ridicarea performanțelor acestora, lărgeste gama utilizării lor industriale.

Preocupat să creeze și întreprinderilor mici și mijlocii posibilitatea de a se integra procesului de robotizare, Ministerul Comerțului și Industriei a elaborat în Japonia un program guvernamental, care să permită acestora împrumutarea de roboți industriali pe care, în absența resurselor financiare, nu-i pot cumpăra

În toate țările, considerentele care militează pentru utilizarea roboților industriali sunt cele tehnico-economice și sociale. Desigur că primează avantajele economice, dar nu trebuie neglijate în nici un moment avantajele sociale generale și suplimentare. Figura 1.17 prezintă un tablou de ansamblu al acestor avantaje.



Urmărind datele statistice prezentate, se poate afirma că fenomenul extensiei fabricării și utilizării roboților este cert. Cu suficientă temei, un specialist japonez exclamă: "... explozia pieței roboților este abia la început; piața acestora va avea o dinamică similară celei pe care au avut-o în deceniile trecute piața tranzistoarelor sau a calculatoarelor ...".

Sunt pași care duc la cea de-a doua revoluție industrială, când omul va

transfera mașinii nu numai unele din capacitățile sale fizice, ca în timpul primei revoluții industriale, dar și o serie de atribute ale inteligenței sale.

Și la noi în țară au fost deschise perspective în domeniu, prin lansarea în anii 1980, a unui program național privind realizarea unui sistem de roboți industriali. Au fost angrenate în cercetare institutele de învățământ superior tehnic din București, Iași, Cluj, Brașov, Craiova, Timișoara. Rezultatele acestei cercetări s-au materializat prin implementarea în producție a unor prototipuri de roboți.

Astfel, la Institutul Politehnic București s-a pus în funcțiune, în anul 1983, o celulă de fabricație flexibilă pentru frezat și amborat axe grele, deservită de robotul MERO-3B.

Colectivul de cercetare de la Institutul Politehnic din Cluj-Napoca a realizat roboți industriali REH-01, REH-02 și VIPAS.

La Institutul Politehnic Iași s-a realizat robotul industrial ROBI-01, destinat alimentării preselor de brichetat deșeuri din tablă la I.M.A.I.A. Tecuci.

La Universitatea din Brașov s-a realizat un robot tip pistol, destinat deservirii mașinilor unelte.

În Timișoara, la Institutul Politehnic, Colectivul multidisciplinar de cercetare proiectare roboți, în colaborare cu întreprinderea „Electromotor”- Timișoara, a proiectat și pus în funcțiune, în 1982, o celulă de fabricație flexibilă destinată prelucrării arborilor de motoare electrice, deservită de robotul REMT-1. Acesta este primul robot industrial românesc operațional în mediul industrial, motiv pentru care, colectivul care l-a proiectat și realizat a fost distins cu Premiul „Traian Vuia” al Academiei Române. Acestuia i-a urmat robotul REMT-2, utilizat, între altele, pentru manipulari în sectoarele de tratamente termice, REMT 2-S destinat automatizării operațiilor de sudare ale șasiului de vagoane la întreprinderea MEVA- Drobeta Turnu Severin și robotul REMT-3 destinat manipularii tubului cinescop la întreprinderea de cinescoape București.

Tot din seria REMT au fost executate două exemplare ale robotului REMT-5, destinat industriei electrotehnice, precum și REMT 3-09 și REMT 3-10, amplasați în celulă flexibilă de deservire pentru prelucrări mecanice.

Tot prin colaborarea Institutului Politehnic cu Electromotor, s-a realizat „reciprocatorul” de vopsire a vagoanelor de marfă pentru întreprinderea MEVA Drobeta Turnu-Severin, distins cu Premiul I la faza județeană a concursului național „Cântarea României”.

În colaborare cu I.A.E.M. Timișoara a fost realizat robotul pneumatic RP-1, iar în colaborare cu Electrotimiș s-au proiectat și realizat:

- Microrobotul R-2,5;
- Microroboții cu acționare pneumatică MRP-12,5 și MAP-100;
- Microrobotul cu acționare electrică MAE-100;
- Robotul cu acționare hidraulică RH-1KN;
- Lanțul cinematic de instruire a roboților de vopsire RIV.

Pentru Unio Satu-Mare s-a conceput o familie de roboți, din care s-a realizat RIE-50.

Pentru I.M.U.M. Baia-Mare s-au conceput și realizat manipuloarele sincrone MS-500, MS-200, MS-1000, primul fiind distins cu medalia de aur la TIB '1988'. Deasemenea s-a conceput și realizat robotul ROPOS 50, utilizat în aplicații de sudură.

După 1989, ca urmare a colaborării cu universități și întreprinderi din Europa de vest, în special prin programe TEMPUS a fost asigurat accesul la ultimele noutăți în domeniul roboticii, atât pe plan informațional cât și prin dotarea laboratorului de roboți din cadrul Universității Politehnice din Timișoara cu tehnologie de vârf, ceea ce permite o formare profesională de calitate atât pentru cadrele didactice cât și pentru studenții secției de roboți.

Creșterea populației de roboți în țara noastră, în perioada anilor '80, prin construcția de roboți autohtoni, precum și achiziționarea de roboți din import a condus la creșterea numărului de aplicații robotizate în multe întreprinderi din domeniul industriei constructoare de mașini.

Utilizarea acestor roboți în diferitele tipuri de aplicații industriale a necesitat un studiu de detaliu a ansamblului de performanțe ale acestora în vederea implementării optime a roboților existenți în aplicații specifice.

În acest sens se pune problema elaborării unor metodologii de încercare a roboților precum și a unei aparaturi de determinare a performanțelor acestora, mai ales că, la momentul respectiv, această problemă la nivel mondial se afla în studiu, existând doar câteva norme, specifice unor țări, cu caracter de proiect [S7] și [S8].

Colectivul multidisciplinar de roboți industriali din cadrul Politehnicii timișorene, în cadrul Contractului cu IMMUM Baia Mare [C5], la care a colaborat și autoarea prezentei teze de doctorat, a elaborat un set de dispozitive și

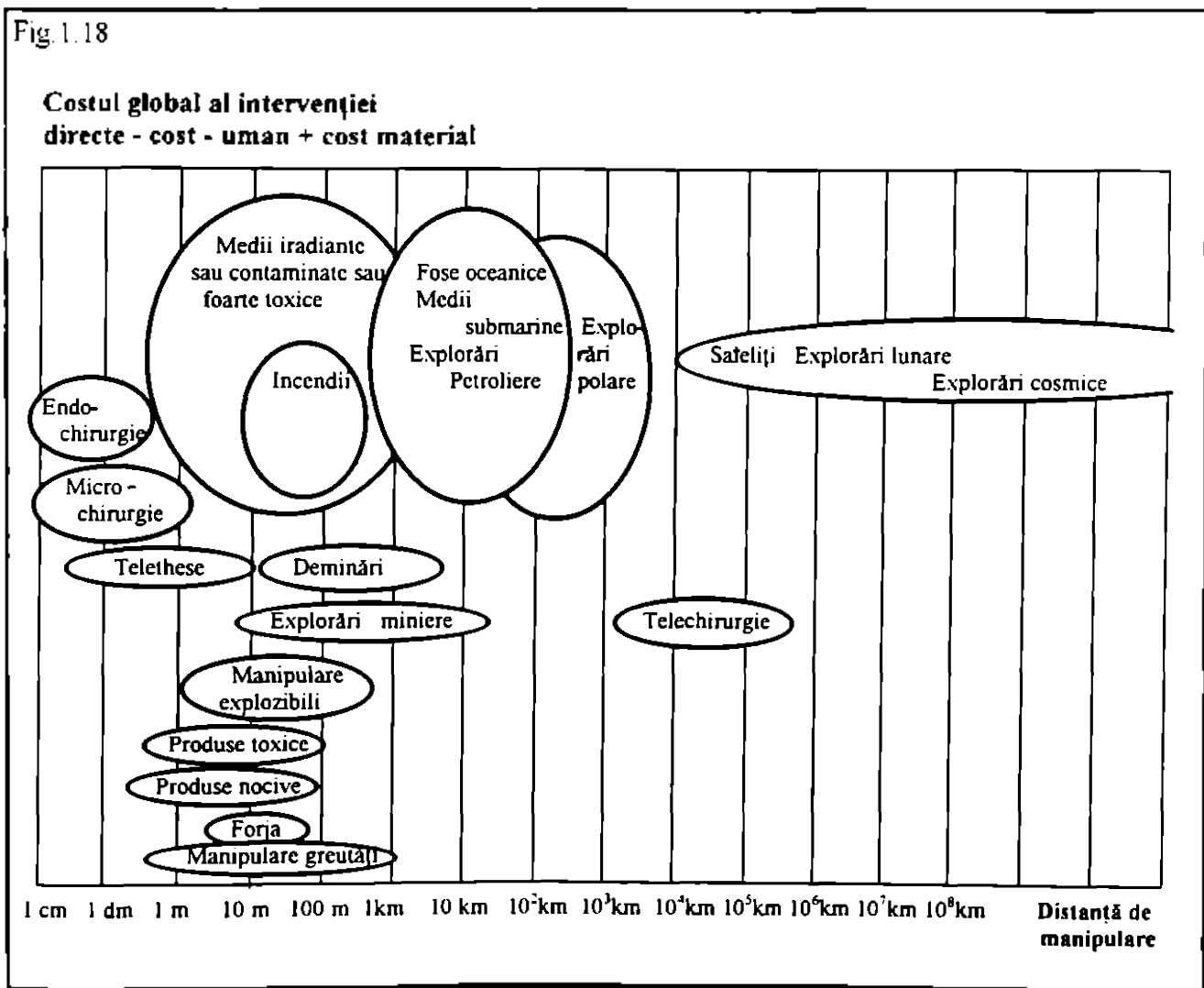
aparate pentru verificarea performanțelor funcționale ale roboților industriali din producția proprie a beneficiarului.

Lucrarea a fost perfecționată, completată și adăugită cu noi metode și aparate în cadrul contractului [C6], susținut de Ministerul Educației și Învățământului

Normele internaționale elaborate actualmente nu au răspuns și nu răspund tuturor cerințelor în domeniu, la diverse institute de cercetare și universități de prestigiu cu preocupări în această direcție, aflându-se în fază de experiment diferite metode-test pentru determinarea performanțelor roboților industriali.

Lucrarea de față își propune să reunească într-un tot unitar ansamblul de metode privind aprecierea performanțelor roboților și să completeze unele lacune existente.

O asemenea acțiune are o amploare deosebită, motiv pentru care prezenta teză de doctorat își propune să rezolve aspectele legate de cercetarea performanțelor de situație ale roboților, având în vedere faptul că aceste



618.174
102 G

caracteristici de situare definesc cvasimajoritatea performanțelor roboților.

Se poate aprecia că se răspunde astfel unei problematici largi în această direcție de cercetare, autoarea propunând în cadrul tezei de doctorat metode moderne și performante pentru testarea performanțelor de situare la roboți și sisteme de fabricație flexibilă robotizate, aplicate concret în capitolul de cercetări experimentale.

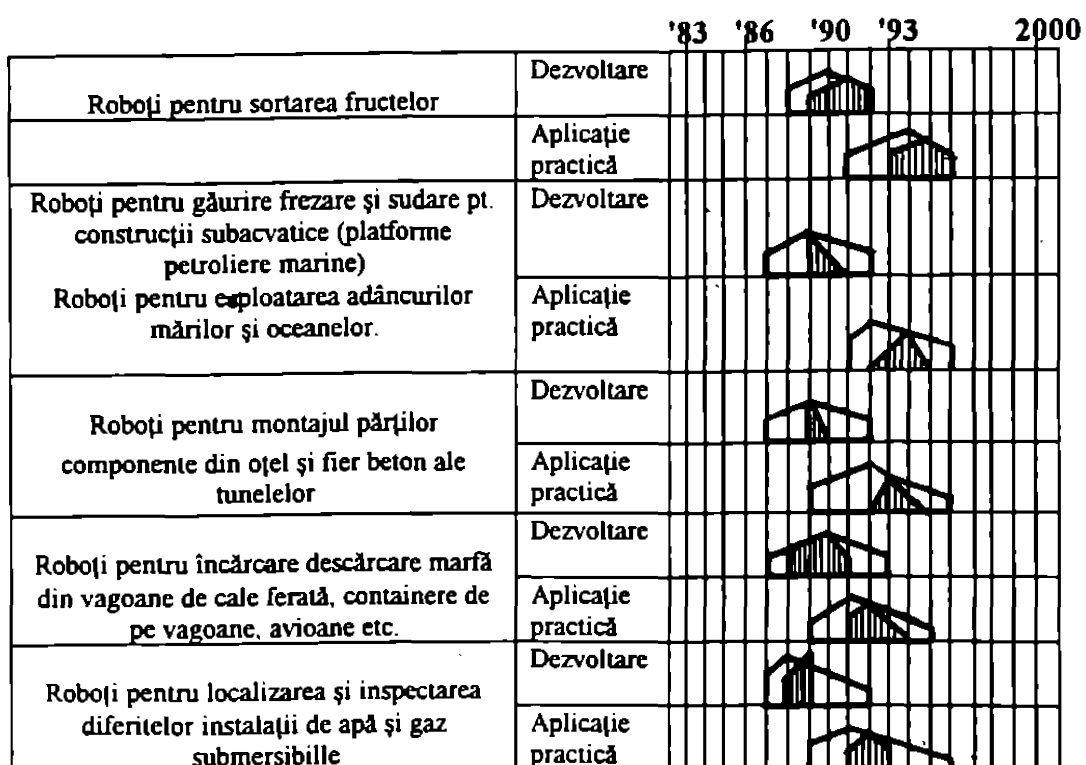
Din cele expuse în acest paragraf se poate remarca faptul că aplicațiile industriale ale roboților au cuprins domenii de bază ale industriei.

În ultimii ani, există tendințe de utilizare a roboților în domenii colaterale, cum sunt prestările de servicii, și anume:

- agricultură
- medicină
- mediu subacvatic
- medii radioactive
- spațiul cosmic, etc.

Figurile 1.18 și 1.19 [G2] prezintă câteva tendințe în acest sens. Se constată practic că există posibilități nelimitate de utilizare a roboților.

Fig.1.19



1.2. Aspecte ale corelației structură mecanică - - performanțe ale roboților industriali.

Este cunoscut faptul că dezvoltarea industriei de roboți s-a făcut de la particular la general. Primii roboți industriali au fost concepuți ca să asigure operații specifice unui anumit domeniu. Industria ultimilor ani are tendința de a crea roboți multifuncționali, care să poată fi utilizați în largi aplicații industriale, deși în paralel, producția roboților superspecializați continuă. De aici marea varietate de modele și variante de roboți industriali.

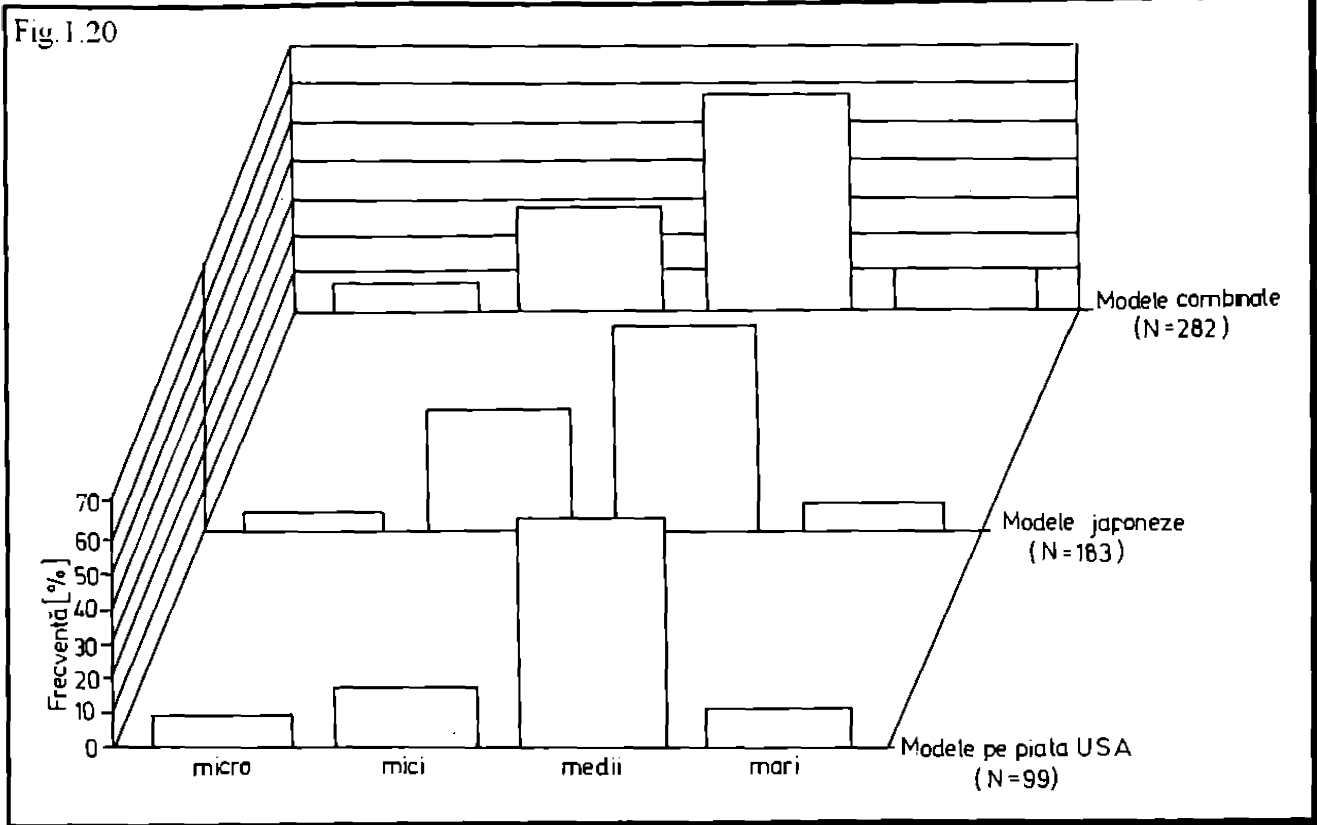
O analiză componistică a roboților industriali presupune stabilirea unor criterii de apreciere, pe baza cărora s-ar putea categorisi structurile mecanice ale roboților.

Această acțiune este deosebit de importantă, deoarece ea poate da o imagine clară asupra unor aspecte ale corelației structură mecanică-performanțe. Astfel de criterii pot fi:

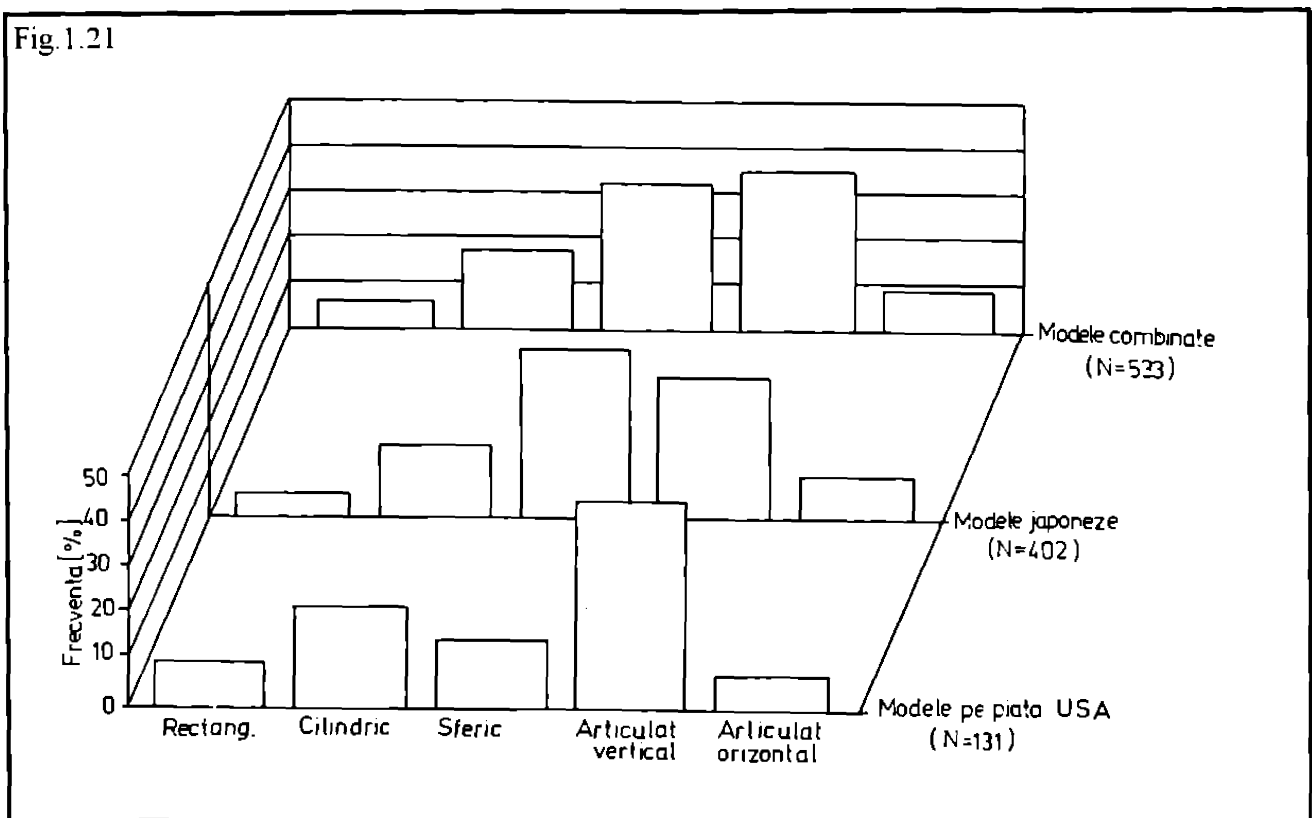
- volumul spațiului de lucru
- forma spațiului de lucru
- numărul gradelor de libertate ale dispozitivului de ghidare
- mărimea sarcinii vehiculate
- tipul acționării
- exactitatea de poziționare și orientare
- viteze liniare și unghiulare de deplasare la nivelul cuplelor cinematice, etc

Se analizează spre exemplificare, trei cazuri: (1)-modele japoneze, (2)-modele vândute pe piața U.S.A., incluzând mulți roboți europeni, dar excluzând modelele japoneze acoperite de prima categorie și (3)-combinația modelelor din primele două categorii. Studiul a urmărit un număr N de roboți, indicat pe fiecare figură [N1].

În figura 1.20 se poate urmări distribuția, în cele trei cazuri analizate, a frecvenței roboților funcție de mărimea spațiului de lucru. Din acest punct de vedere, aceștia sunt clasificați în: microroboți, roboți mici, roboți mijlocii și mari funcție de mărimea dimensiunii maxime în spațiul de lucru, notată cu x . Astfel, microroții au $x < 1$, roboții mici $1 < x < 2$, roboții medii $2 < x < 5$ și roboții mari $x > 5$, x fiind exprimat în metri. Se observă faptul că cea mai mare frecvență o au roboții medii și mici.

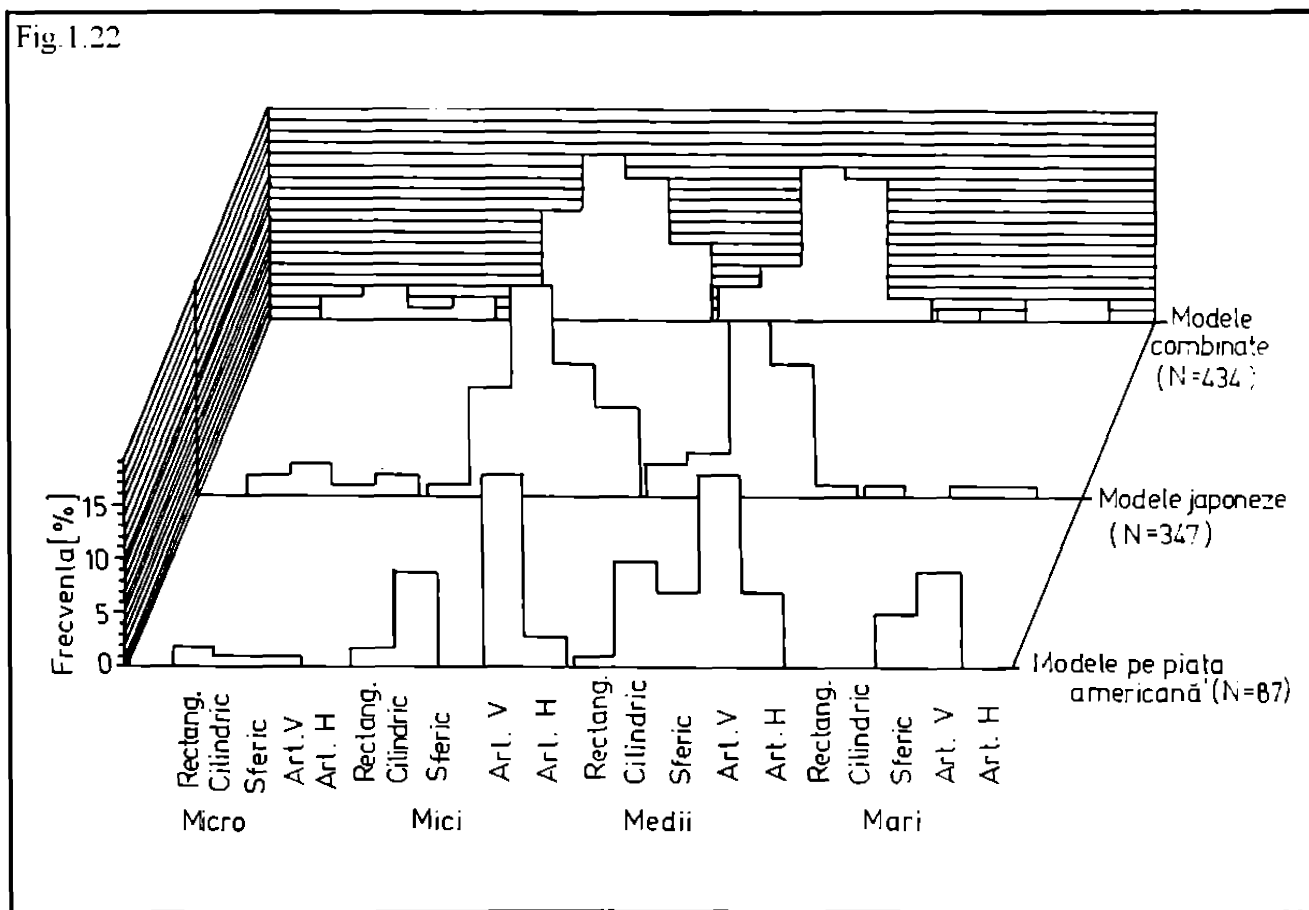


In figura 1.21 se poate urmări frecvența roboților funcție de structura brațului. Între modelele japoneze predomină structurile sferice și articulate verticale (48% și respectiv 40%), pe când pe piața U.S.A., modelele articulate verticale



(peste 50%) sunt predominante

În fig.1.22 se poate urmări o corelare a primelor două caracteristici. Se evidențiază ponderea diferitelor structuri mecanice în diferitele categorii de mărime ale roboților. Pentru roboții utilizați în S.U.A. se remarcă ponderea reprezentativă a structurilor de roboți articulați verticali pentru toate categoriile de mărime, pe când pentru modelele japoneze, la roboții mici predomină structurile sferice și la cei medii structurile articulate verticale



În ceea ce privește mărimea sarcinii manipulate, fig.1.23. se remarcă faptul că, pentru toate situațiile analizate, ponderea mare o au roboții care manipulează sarcini până la 20 kg. Se remarcă de asemenea plaja largă de sarcini vehiculate (de la 0-1000 kg).

În figura 1.24. se observă, pentru modelele japoneze, ponderea maximă a structurilor având în lanțul cinematic 4 și 5 grade de libertate, urmate, la mică distanță, de roboți dotați cu 6 grade de libertate. Modelele întâlnite pe piața americană au preponderent 5 și 6 grade de libertate. Se remarcă tendința spre construirea de roboți cu mobilități multiple și chiar redundanți, roboți dotați cu elemente de inteligență artificială.

Fig. 1.23

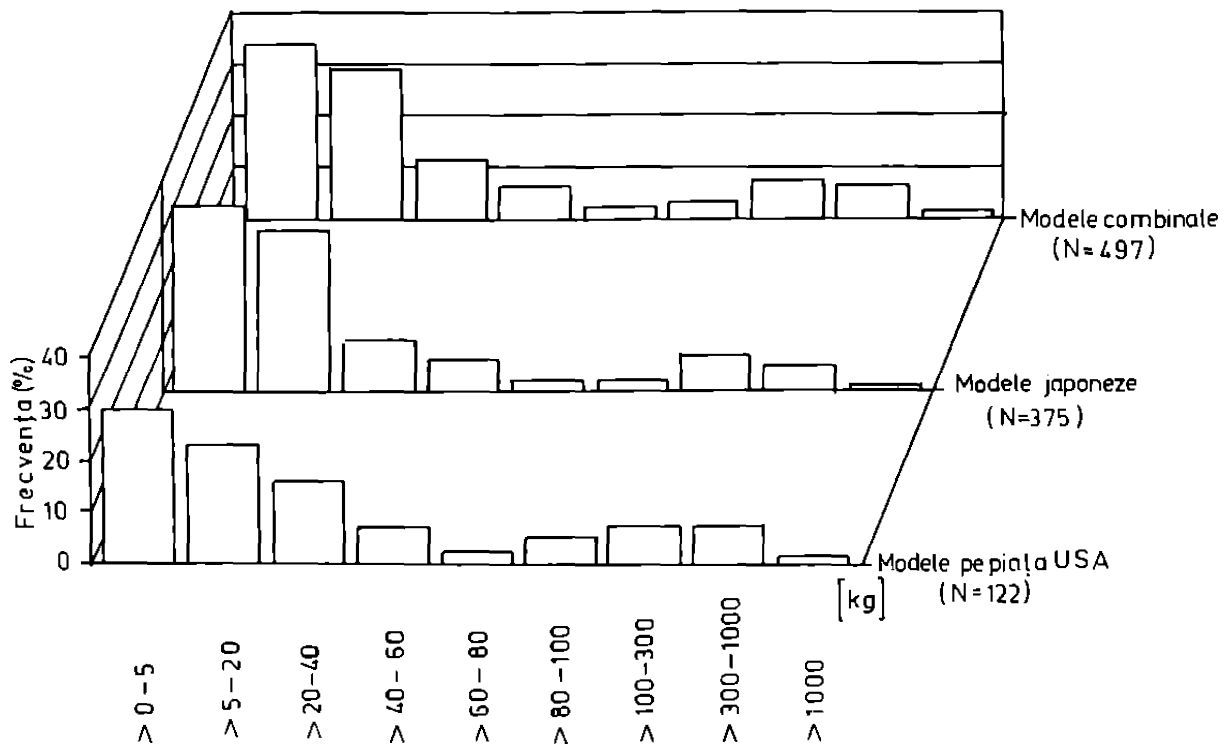
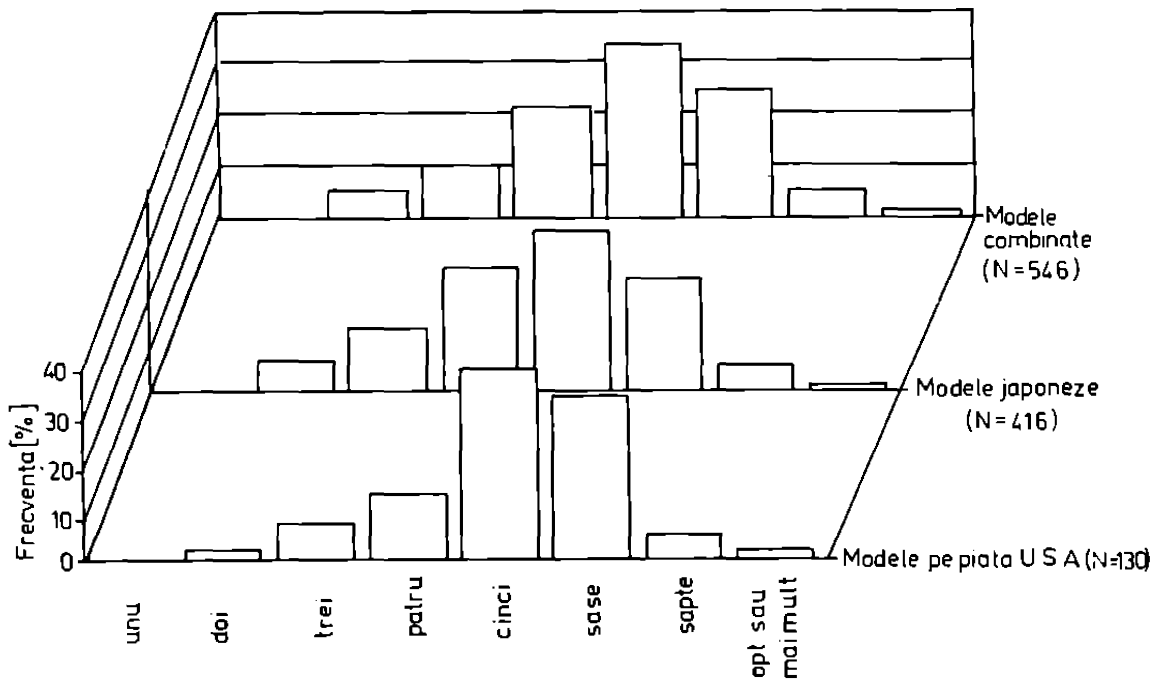
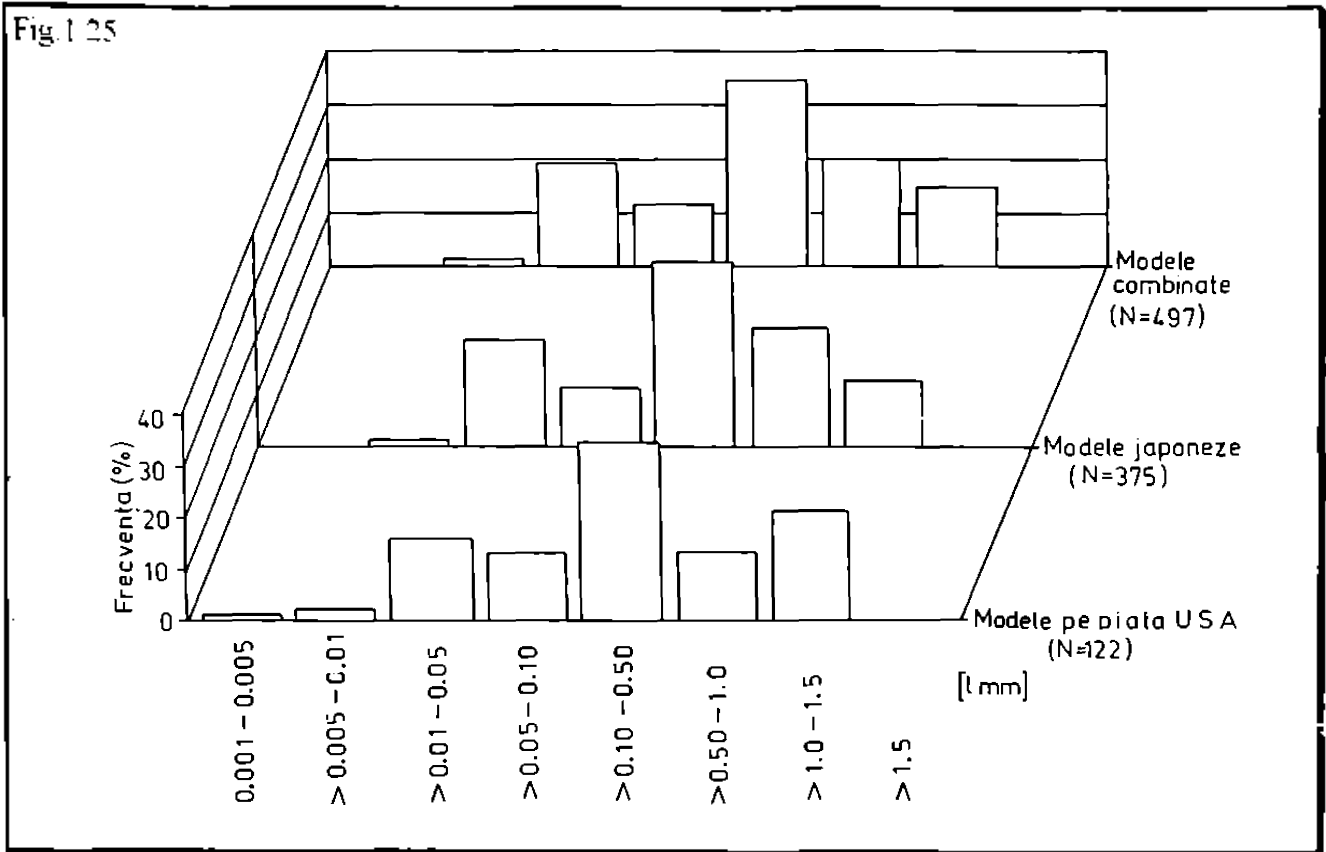


Fig. 1.24

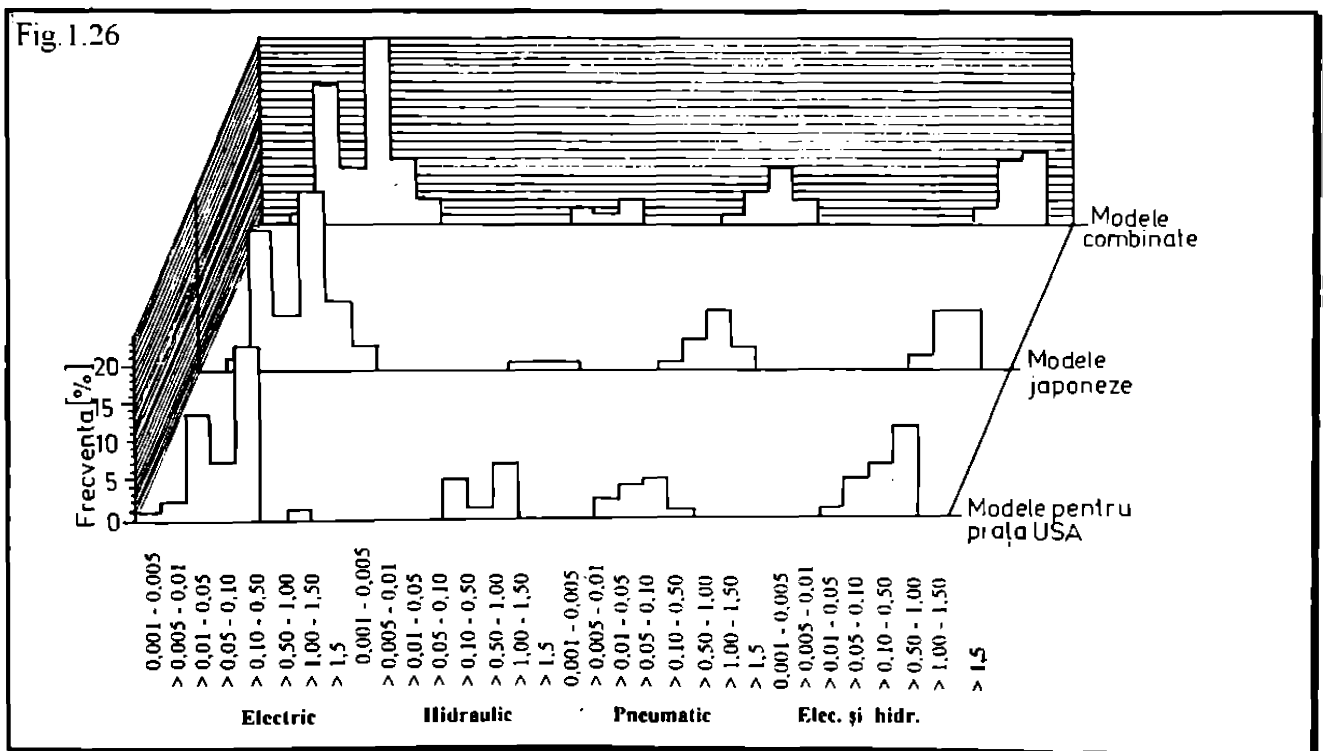


În ceea ce privește caracteristica de repetabilitate de situație a roboților, se poate vedea în figura 1.25 că, atât pentru modelele japoneze cât și pentru cele de pe piața americană, ponderea cea mai mare o au roboții cu repetabilitate între (0,10-

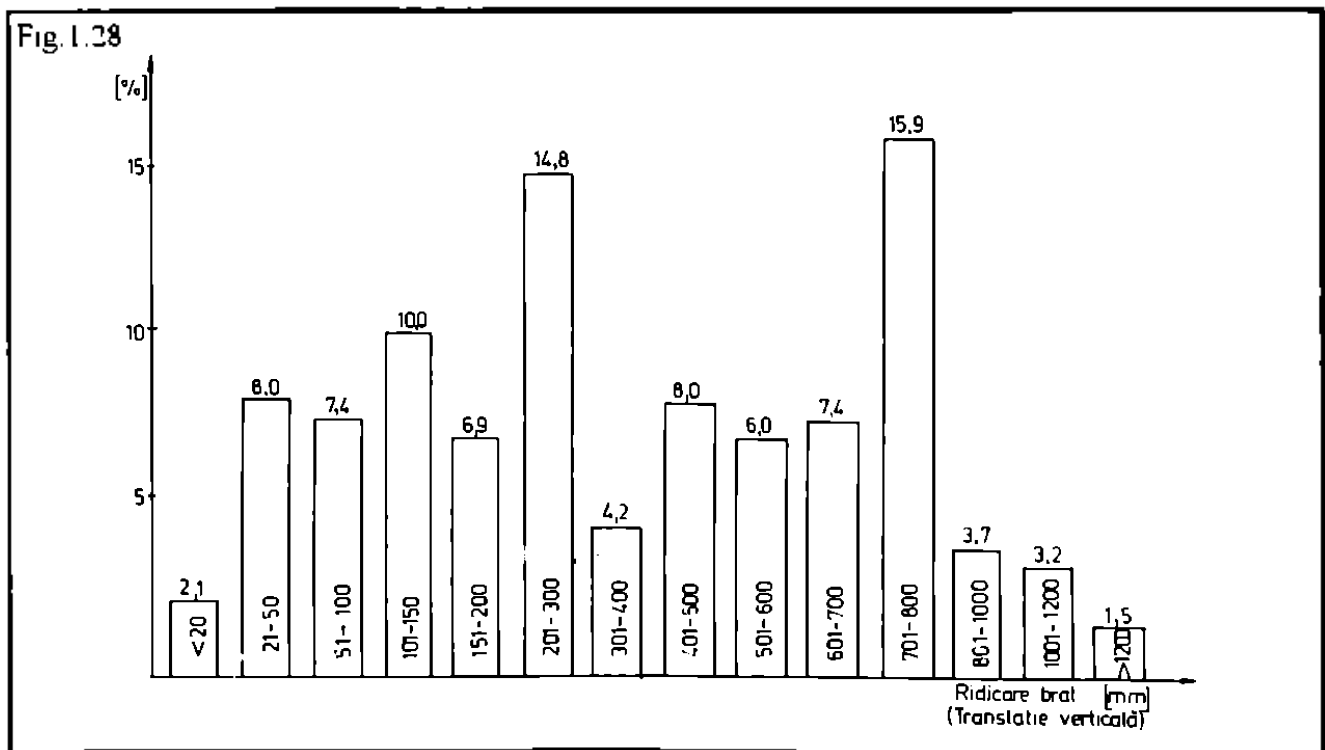
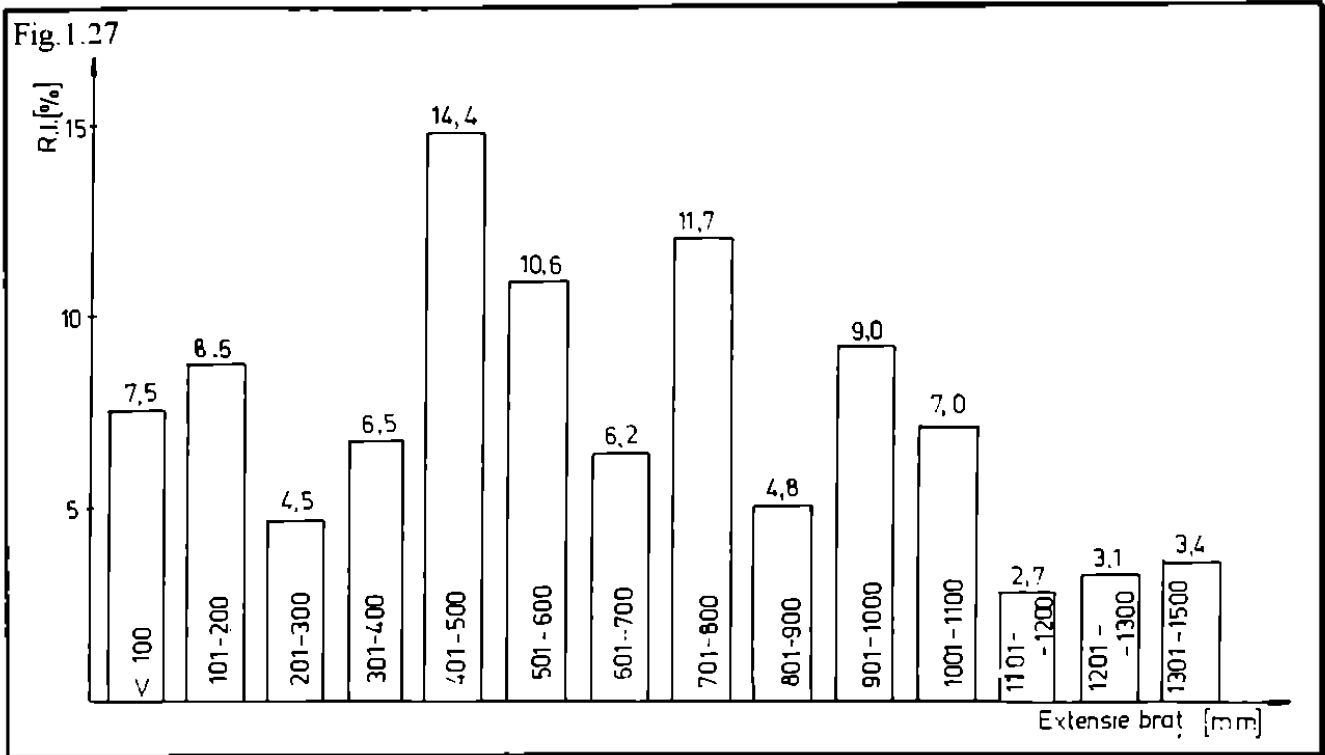
0.50)mm.

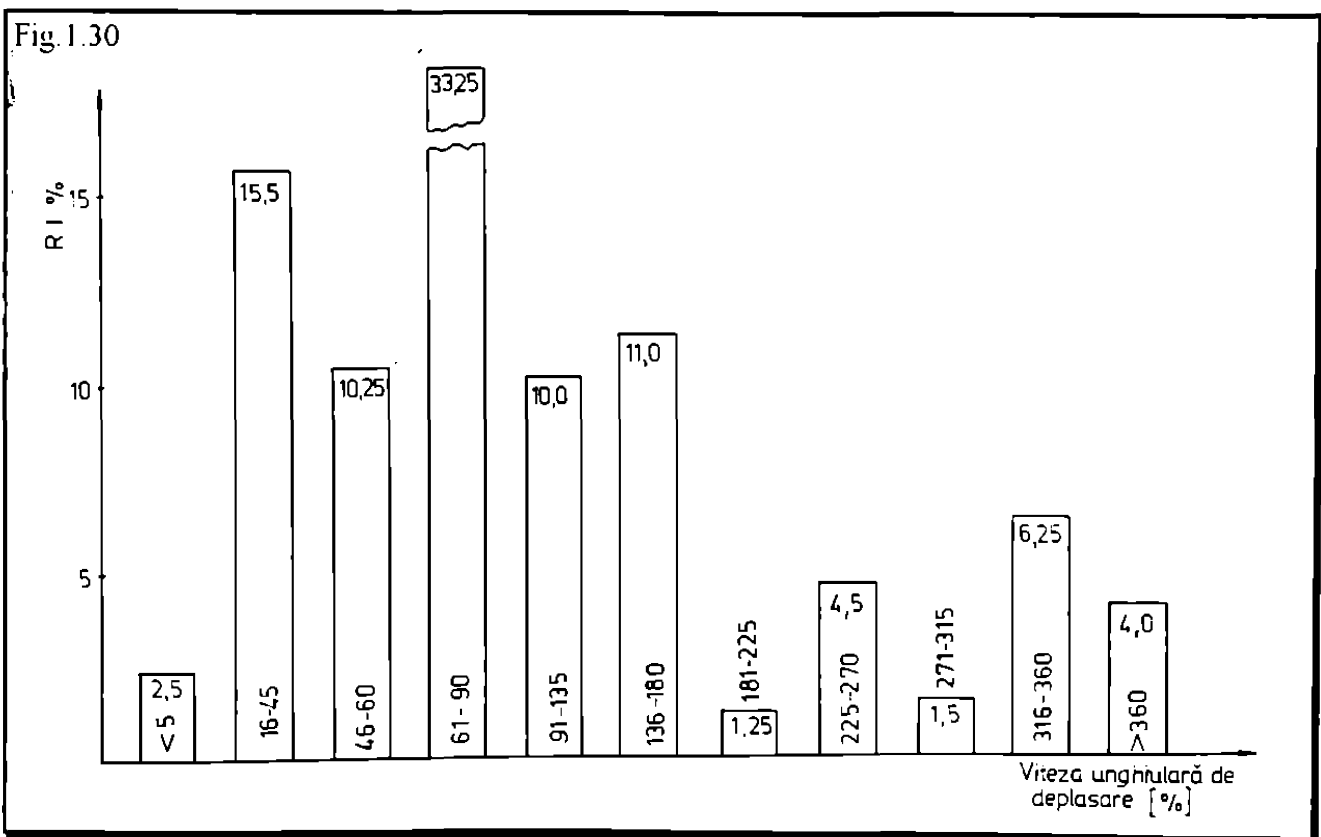
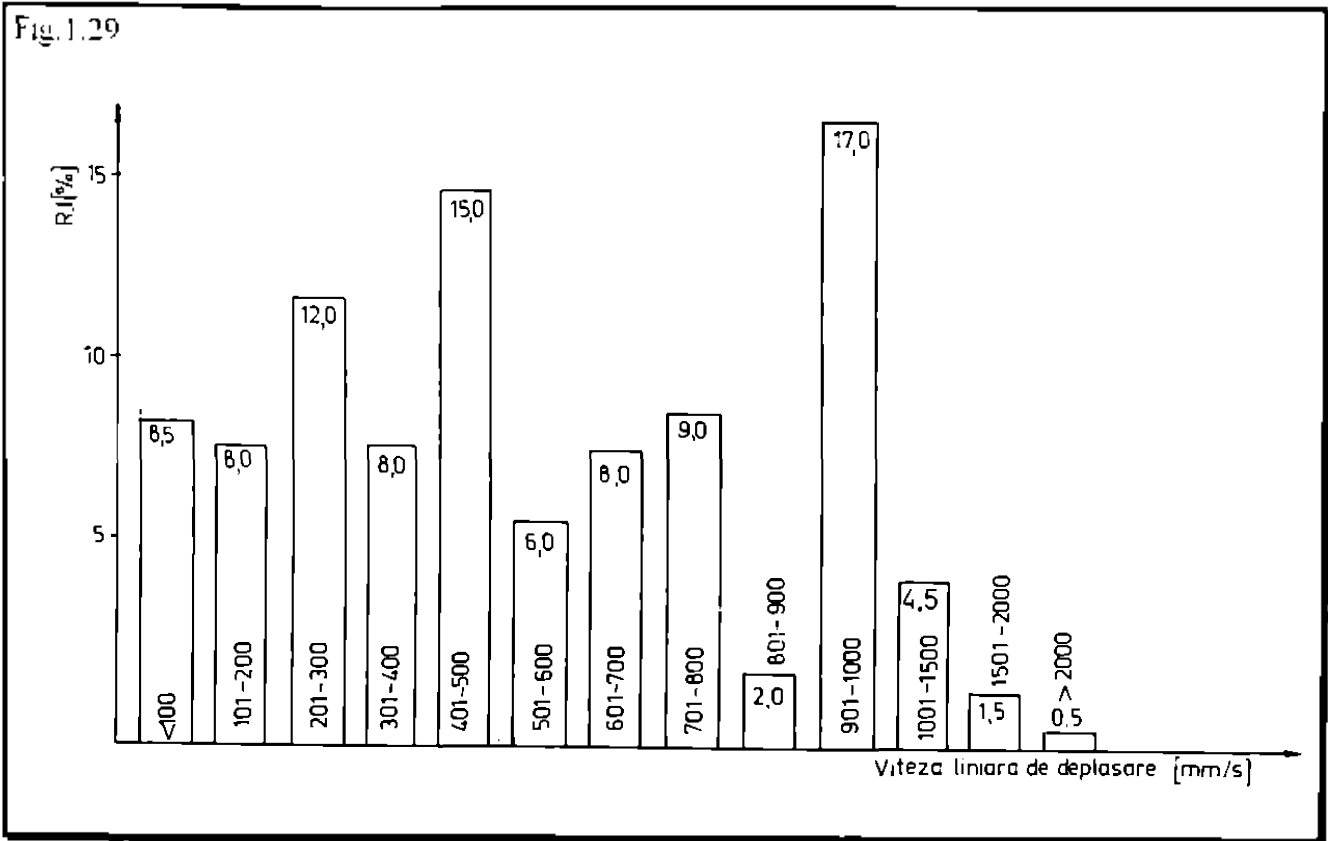


Interesantă este corelarea acestei caracteristici cu tipul acționării, fig 1.26. Se observă că roboții cu acționare electrică sunt cei mai preciși, urmați de cei cu acționare pneumatică. Roboții cu acționare hidraulică sunt mai puțin preciși.



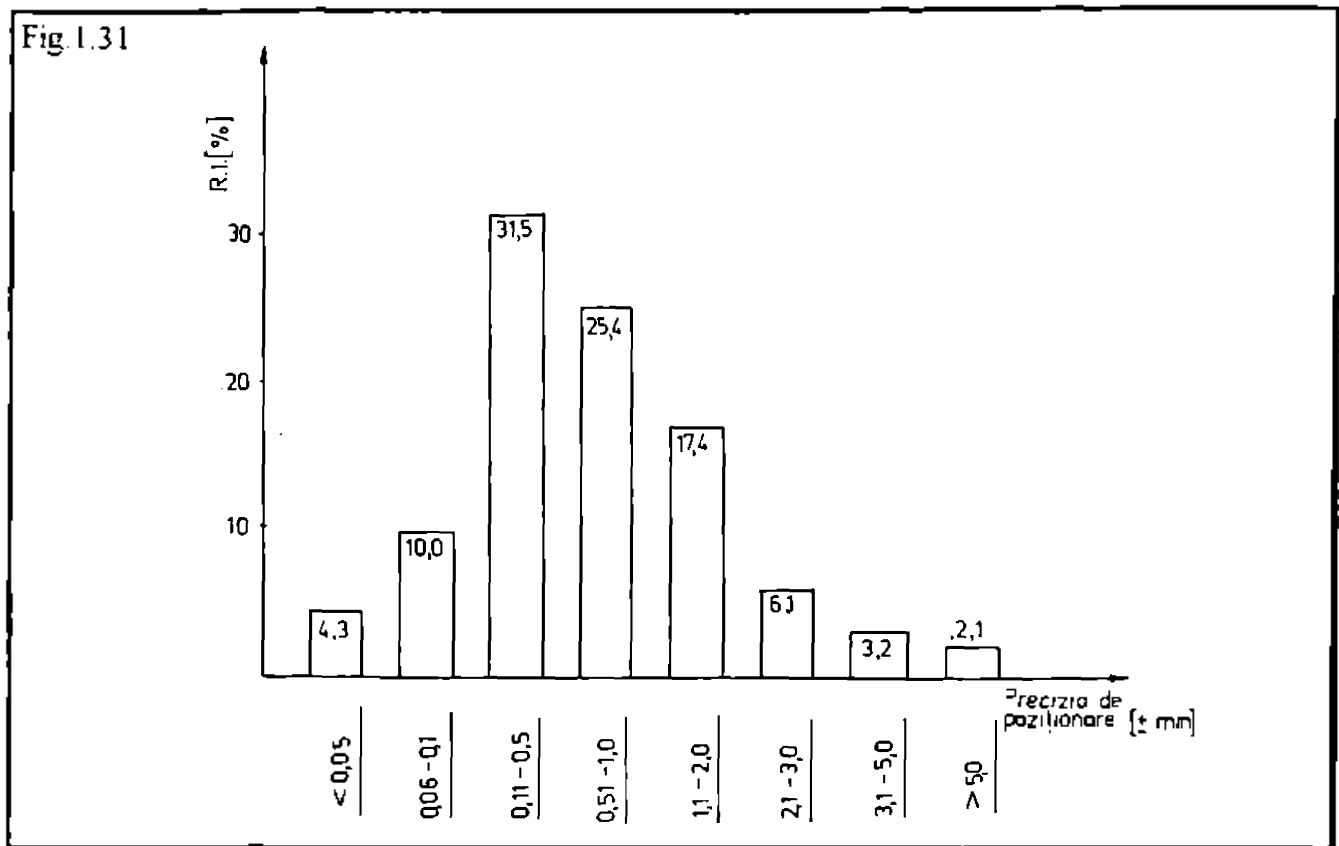
În figurile 1.27-1.31 [V9], se prezintă o imagine asupra caracteristicilor cinematice ale structurii mecanice din componența roboților industriali. Se urmărește astfel amplitudinea extensiei brațului robotului (fig.1.27), precum și limitele maxime ale cursei pe verticală (fig.1.28), vitezele liniare (fig.1.29) și unghiulare (fig.1.30).





În figura 1.31 se urmărește ponderea roboților funcție de exactitatea de poziționare (\pm mm). Se remarcă faptul că aproximativ 71,2% din totalul parcului de

roboți analizați asigură în funcționare o exactitate de poziționare de până la ± 1 mm.



Date mai recente [R5], atestă performanțe mult superioare celor arătate anterior. Spre exemplu, firma EPSON-Germania, are în producția anului 1992 roboți cu repetabilitatea de poziționare de $\pm(10-20)\mu\text{m}$, la o sarcină de $(2-8)$ kg.

Așadar, performanțele roboților industriali se află în strânsă corelație cu arhitectura acestora, respectiv structura mecanică a lanțului cinematic al robotului. Prin termenul "performanță", se înțelege, fie capacitatea robotului de a acoperi un spațiu de lucru impus ca formă și dimensiuni, fie realizarea unui exactități de poziționare a unui punct caracteristic, fie parcurgerea unei traiectorii date, etc.

Se propun în literatura de specialitate de către unii autori, o serie de coeficienți globali de calitate, pe baza cărora se fac aprecieri cu privire la performanțele roboților industriali [K2], [P3], [L2].

CAPITOLUL 2

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIUL ÎNCERCĂRII ROBOȚILOR INDUSTRIALI ȘI A SISTEMELOR DE FABRICAȚIE FLEXIBILĂ ROBOTIZATE

2.1. Clasificarea parametrilor ce caracterizează performanțele roboților industriali

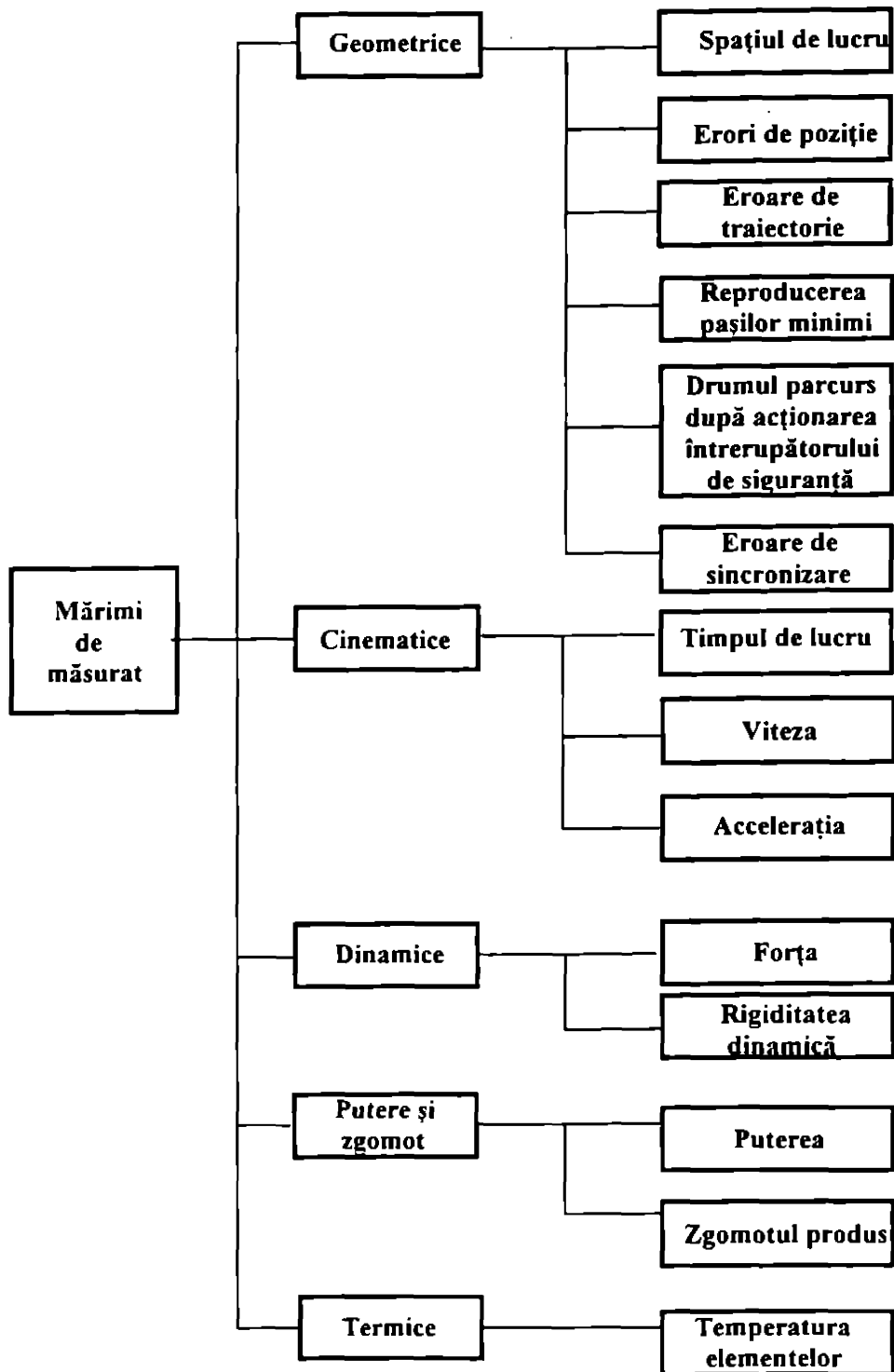
Aplicațiile industriale ale roboților necesită executarea operațiilor cu o exactitate prescrisă. Aceasta înseamnă realizarea și menținerea în timp, întocmai, a tuturor mărimilor ce caracterizează operațiile respective în conformitate cu proiectul robotului și programul său de lucru.

Exactitatea manipuletoarelor și a roboților se apreciază prin intermediul erorilor, care pot fi geometrice, cinematice, dinamice și erori care se referă la corelarea mai multor mărimi.

Exactitatea manipuletoarelor și a roboților industriali se poate aprecia prin metode statistice sau grafice. Pe lângă caracterizarea acestei noțiuni, la un moment dat al unui ciclu de funcționare a robotului industrial, pentru aplicații industriale, prezintă interes menținerea în decursul timpului de funcționare, a caracteristicilor analizate, respectiv după repetarea ciclului de funcționare. Acest aspect, repetabilitatea valorii prescrise a mărimii analizate, se apreciază, la rândul său, prin dimensiunea plajei de dispersie a erorilor mărimii respective.

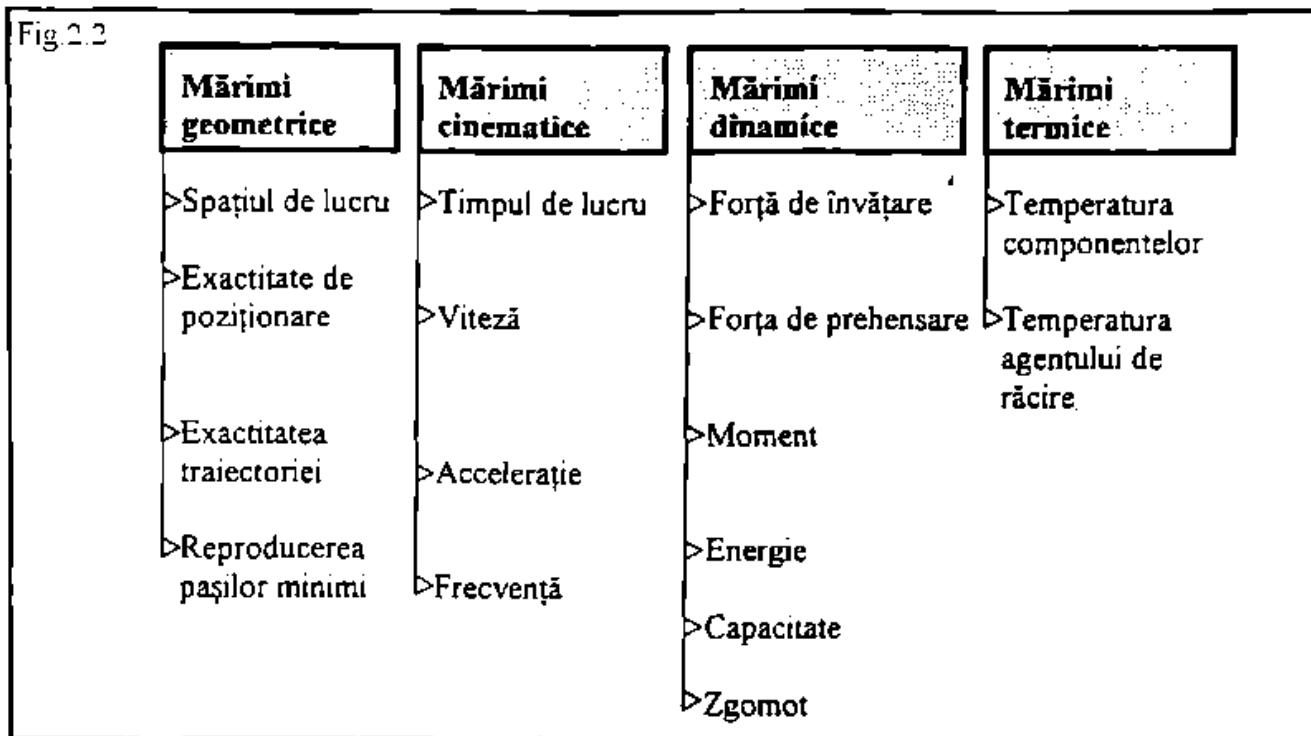
În ceea ce privește o clasificare a parametrilor ce caracterizează performanțele roboților industriali, nu există un consens în literatura de specialitate. Diferențele, se pare că provin din faptul că diferitelor categorii de R.I. li se solicită anumite performanțe, funcție de aplicațiile concrete în care sunt implicați. În linii mari, parametri de bază sunt acceptați de majoritatea autorilor. Acești parametri sunt categorisiți funcție de diferite criterii. În continuare, se prezintă principalele puncte de vedere expuse în literatura de specialitate, legate de problema în discuție.

Fig.2.1



2.1.1. Clasificare după H.J. Warnecke

În lucrarea [W4] se propune o grupare a principalilor parametri de performanță a roboților industriali, după cum se vede în figura 2.1.



Se observă că erorile de poziționare, precum și cele ce caracterizează exactitatea pe traiectorie sunt incluse în categoria mărimilor geometrice. Mărimile de măsurat sunt grupate în cinci categorii, parametri ce caracterizează puterea și zgomotul constituind o categorie aparte.

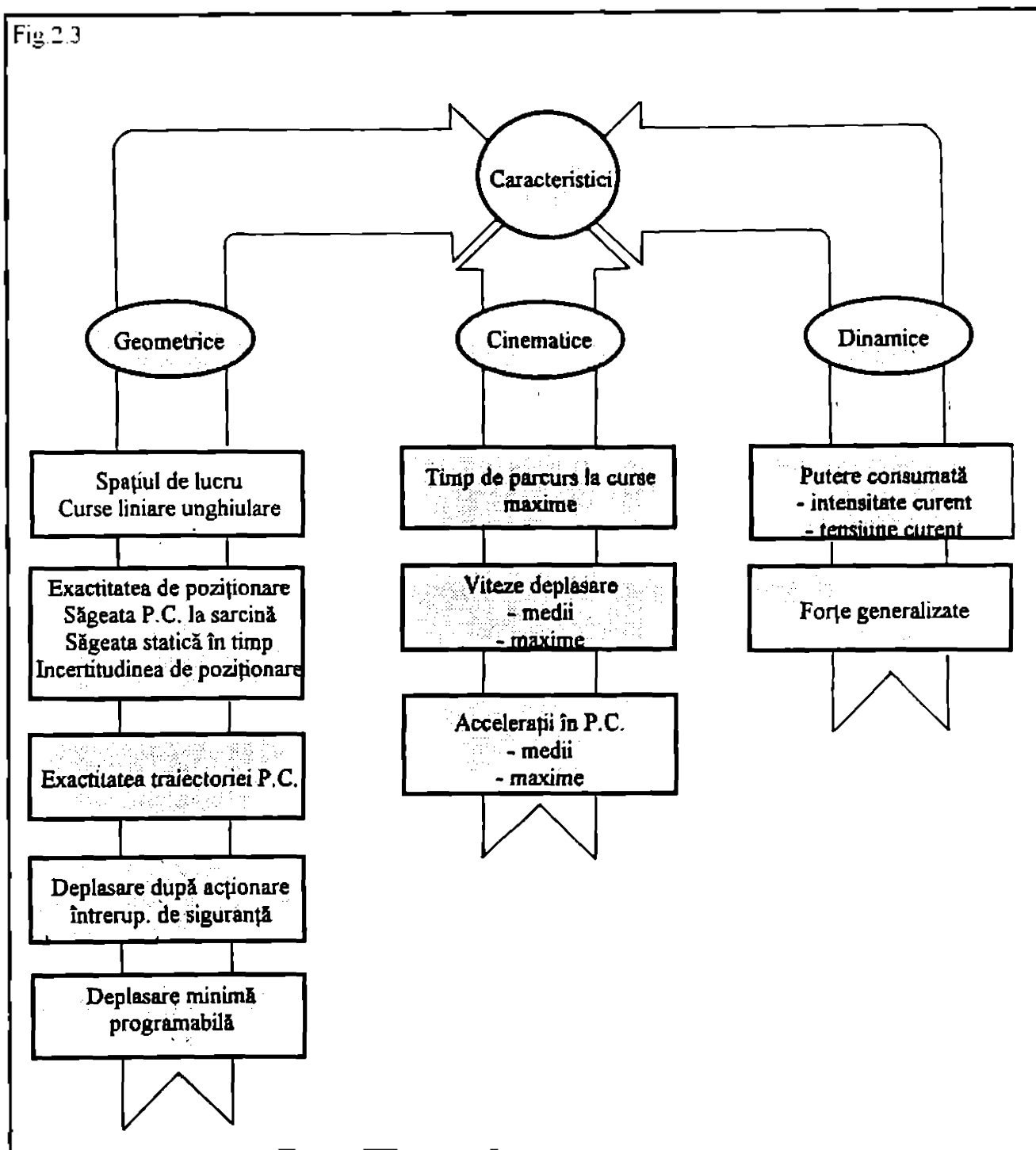
În lucrarea [W2], autorul revine asupra acestei clasificări incluzând în categoria mărimilor dinamice și parametrii de putere (energie) și zgomot, clasificare mai rațională având în vedere faptul că, calculul dinamic se finalizează cu determinarea puterii de acționare a sistemului mecanic mobil respectiv (fig 2.2). De altfel o clasificare asemănătoare se întâlnește și în [V9] - figura 2.3.

2.1.2. Clasificarea conform normei VDI 2861 [S7]

Conform normei germane VDI Richtlinie 2861, sunt denumite ca „mărimi de referință specifice utilizate la roboții industriali”, acele mărimi ce caracterizează principalele performanțe ale roboților industriali. Aceste mărimi se clasifică în patru categorii, conform figurii 2.4. și anume:

- mărimi geometrice
- mărimi de sarcină (încărcare)
- mărimi cinematice
- mărimi de precizie

Fig. 2.3



Se observă că parametrii ce caracterizează precizia roboților industriali formează o categorie aparte, nefiind incluși nici în categoria mărimilor geometrice, nici în cea a mărimilor cinematice.

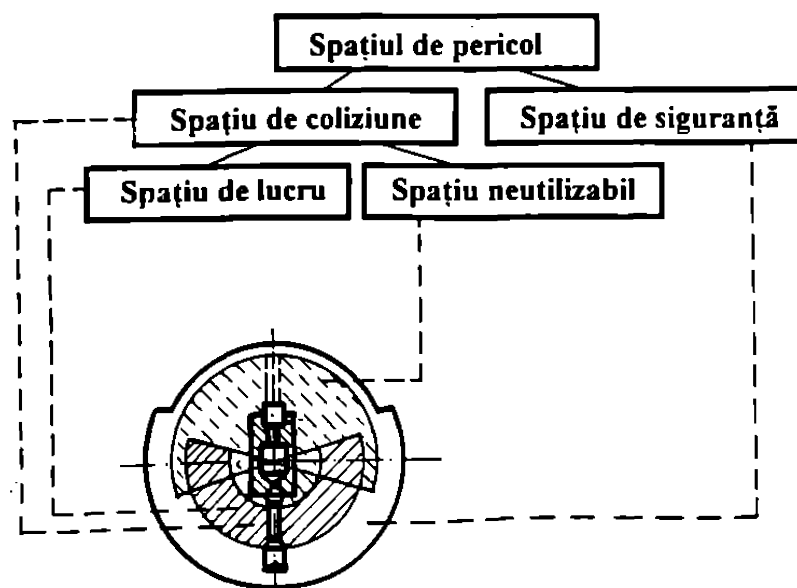
Mărimile de referință geometrice oferă informații asupra structurii robotului și legăturilor sale cu mediu (frontierele spațiului de lucru), asupra subdivizării generale a spațiului de lucru datorită legăturilor cinematice specifice robotului (subdivizarea spațiului de lucru), cât și asupra curselor posibile pe diferite axe ale

Fig. 2.4

VDI - Richtlinie 2861				
Mărimi de referință specifice utilizate la roboți industriali	Mărimi de referință geometrice	Mărimi de referință de sarcină	Mărimi de referință cinematice	Mărimi de referință de precizie
	<ul style="list-style-type: none"> - Limitele (frontierele) spațiului de lucru - Subdivizarea spațiului de lucru - Dimensiunile spațiului de lucru 	<ul style="list-style-type: none"> - Sarcina nominală - Sarcina utilă maximă - Sarcina maximă - Moment nominal - Masă / moment de inerție nominal 	<ul style="list-style-type: none"> - Mărimi de referință de viteză - Mărimi de referință de accelerație - Perioada maximă de amortizare a P.C. - Timp pe cursă - Ciclul temporal de lucru - Amplitudini oscilații ale P.C. 	<ul style="list-style-type: none"> - Exactitatea și repetabilitatea (poziționarea și orientarea PC) - Exactitatea și repetabilitatea pe traiectorie - Mărimi generale de precizie

robotului (dimensiunile spațiului de lucru). În figura 2.5 este prezentată o secțiune transversală prin spațiul de lucru al unui robot, cu evidențierea părților sale componente.

Fig. 2.5

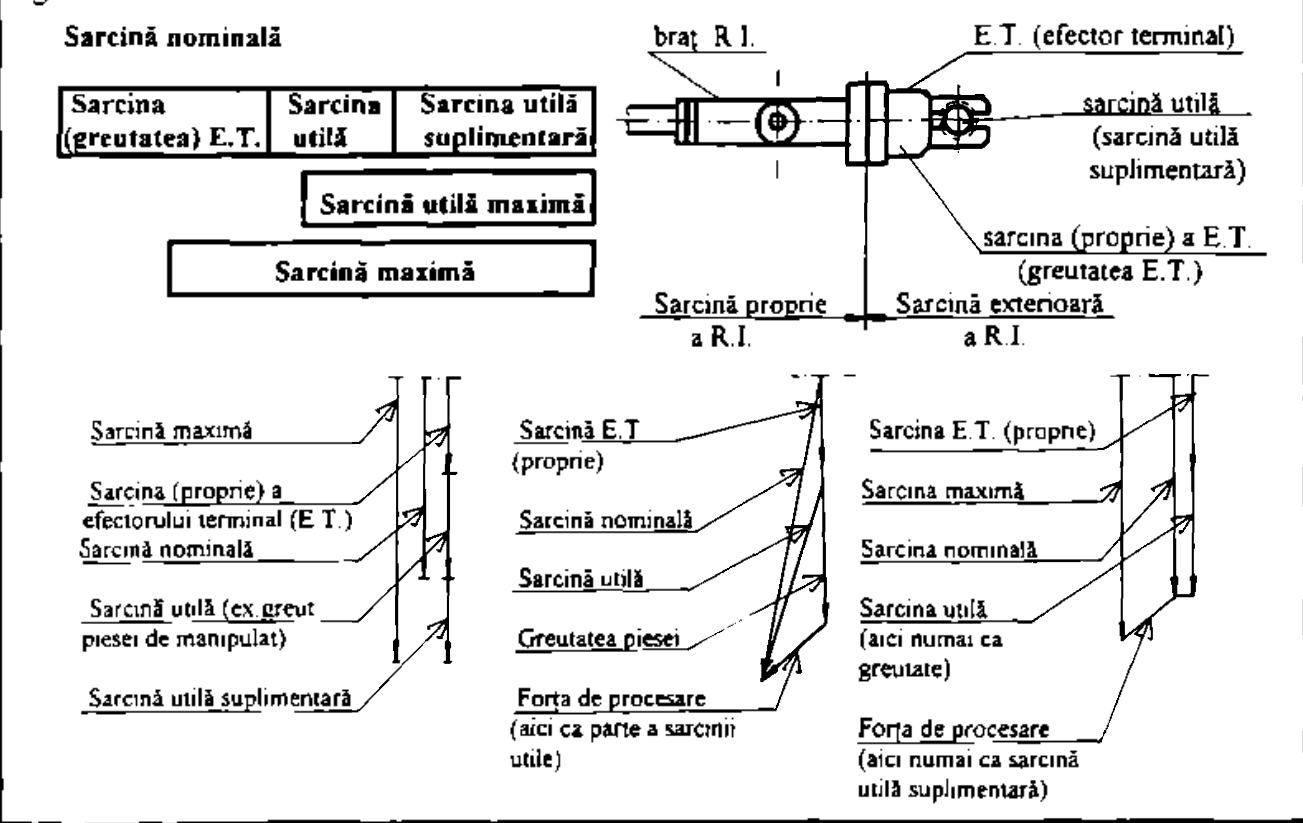


Structura spațiului de pericol al unui robot

Mărimile de referință de sarcină evidențiază încărcarea statică și dinamică a robotului industrial. În figura 2.6 se prezintă încărcarea posibilă a robotului.

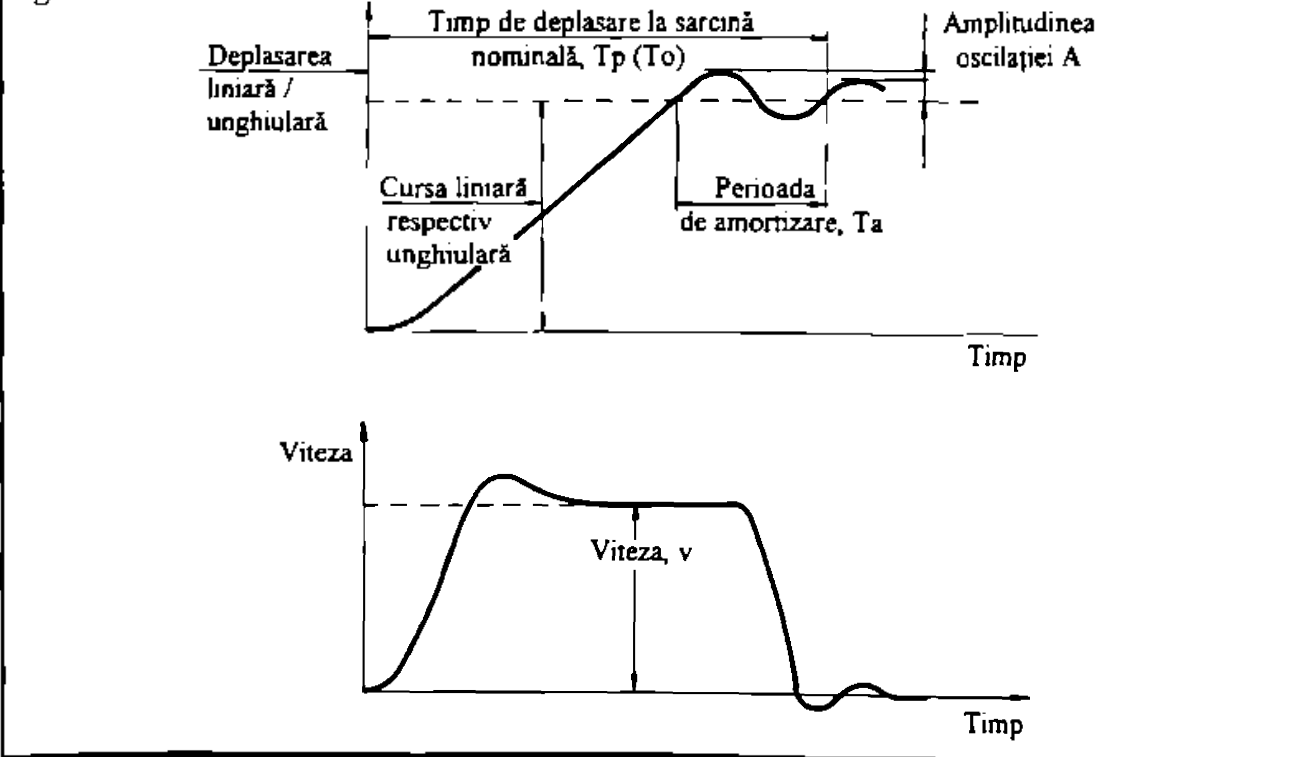
determinată de sarcina nominală și de forța de procesare (de lucru).

Fig.2.6



Mărimile de referință cinematice sunt în general dependente de timp. Importante sunt mărimile ce definesc viteze și accelerații. Figura 2.7 prezintă

Fig.2.7



dependența dintre variația vitezei la o poziție oarecare și deplasarea liniară, respectiv , unghiulară corespunzătoare.

Mărimile de referință de precizie sunt cele mai uzuale în tehnica de măsurare a roboților industriali. Ele se clasifică după cum urmează:

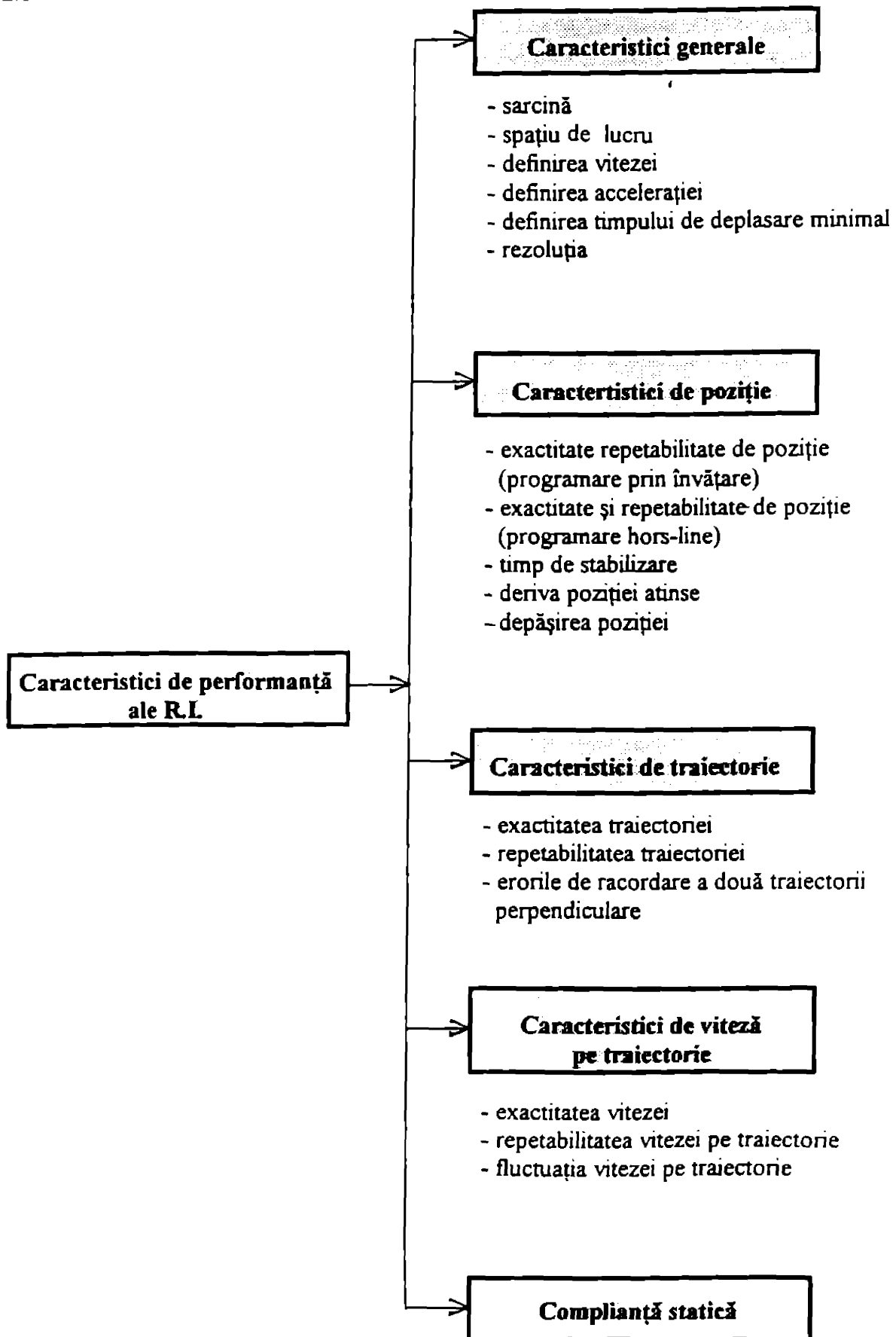
- 1) Exactitatea și repetabilitatea (poziționare și orientare)
 - domeniul de împrăștiere al valorilor atinse (poziționare și orientare) - repetabilitatea poziției și a orientării;
 - media valorilor atinse (poziționare-exactitatea poziției);
 - media valorilor atinse (orientare-exactitatea de orientare).
- 2) Exactitatea și repetabilitatea (pe traiectorie);
 - abaterea medie între traiectoriile atinse (exactitate);
 - domeniul de împrăștiere al traiectoriilor atinse (repetabilitate);
 - abaterea medie de orientare pe traiectorie (exactitate);
 - domeniul de împrăștiere a orientării traiectoriei (repetabilitate);
 - diferența (abaterea) medie a traiectoriei circulare (exactitate);
 - abaterea medie de racordare (traiectorii perpendiculare);
 - abaterea medie de oscilare (depășire) a traiectoriei.
- 3) Mărimi generale de precizie
 - precizie medie de comandă;
 - precizie medie de programare,
 - eroarea medie de temperatură;
 - pasul minim programabil.

Normativul VDI 2861, conform căruia s-a prezentat clasificarea anterioară, se constituie în anteproiect pentru norma ISO 9283 privind testarea performanțelor roboților industriali.

2.1.3. Clasificare conform normei franceze E 61-103 elaborată de AFNOR (L'Association Francaise de Normalisation) [S3]

Respectiva normă propusă de Franța este în concordanță cu anteproiectul de normă ISO/DP 9283. Ea clasifică și definește caracteristicile de performanță ale roboților încercând unificarea limbajului, în acest domeniu în scopul unei prezentări și comparații obiective a performanțelor roboților.

Fig.2.8



Conform acestei norme, caracteristicile de performanță ale roboților se clasifică în următoarele categorii (fig. 2.8):

- caracteristici generale
- caracteristici de poziție
- caracteristici de traiectorie
- caracteristici de viteză pe traiectorie
- compliantă statică

De remarcat faptul că noțiunile de „caracteristici statice” și „dinamice” sunt înlocuite prin „caracteristici de poziție” și „caracteristici de traiectorie”.

2.1.4. Clasificare conform ISO 9283:1990(E): Roboți industriali-criterii de performanță și metode de încercare corespunzătoare[S2]

O primă reglementare internațională în domeniul încercării roboților industriali a fost adusă prin norma ISO 9283, editată în 15.12.1990, care are intenția de a elabora un limbaj unic în acest sens între utilizatorii și producătorii de roboți și sisteme robotizate. Ea definește caracteristicile de performanță cele mai importante, precum și recomandări privind testarea acestor performanțe.

Astfel, standardul internațional ISO 9283 consideră ca fiind semnificative pentru aprecierea „calităților” unui robot industrial, caracteristicile prezentate în fig.2.9.

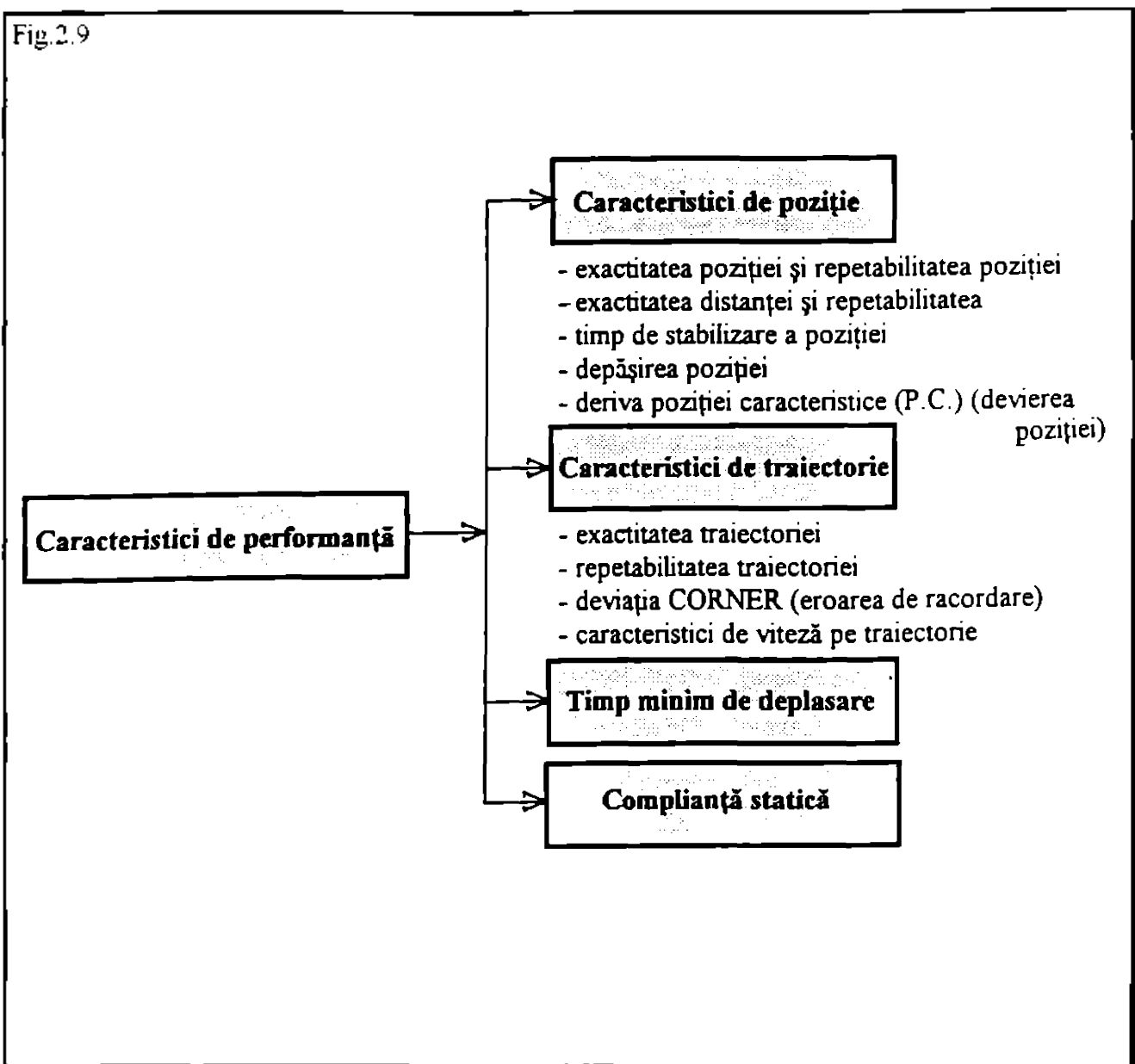
Se observă că ISO 9283:90 reproduce în mare măsură clasificarea propusă prin norma franceză E 61-103 din septembrie 1986 - anteproiect la prezentul standard, dar într-o formă mai sintetică.

Pe baza acestei reglementări ISO se definesc în cele ce urmează principalii parametri ce caracterizează performanțele roboților industriali.

2.2. Definirea principalilor parametri ce caracterizează performanțele roboților industriali

Performanțele și metodele de încercare corespunzătoare se referă la condițiile normale de funcționare și caracteristicile nominale ce trebuie indicate de proiectantul robotului. Prin „condiții normale de funcționare” se înțeleg exigențe

Fig.2.9



relative la energia principală (electrică, hidraulică, pneumatică), la variațiile și perturbațiile de putere, la condițiile de mediu (temperatură, umiditate, câmp electromagnetic și electrostatic, poluare atmosferică, etc.) și limitele maxime de funcționare din punct de vedere al securității exploatării robotului. Variațiile performanțelor pentru condiții diferite de cele normale de funcționare se pot indica la cererea beneficiarului.

2.2.1. Caracteristici de poziție

Caracteristicile de poziție permit determinarea diferențelor între poziția comandată și poziția atinsă, cât și fluctuațiile în jurul unei poziții comandate.

Fig.2.10

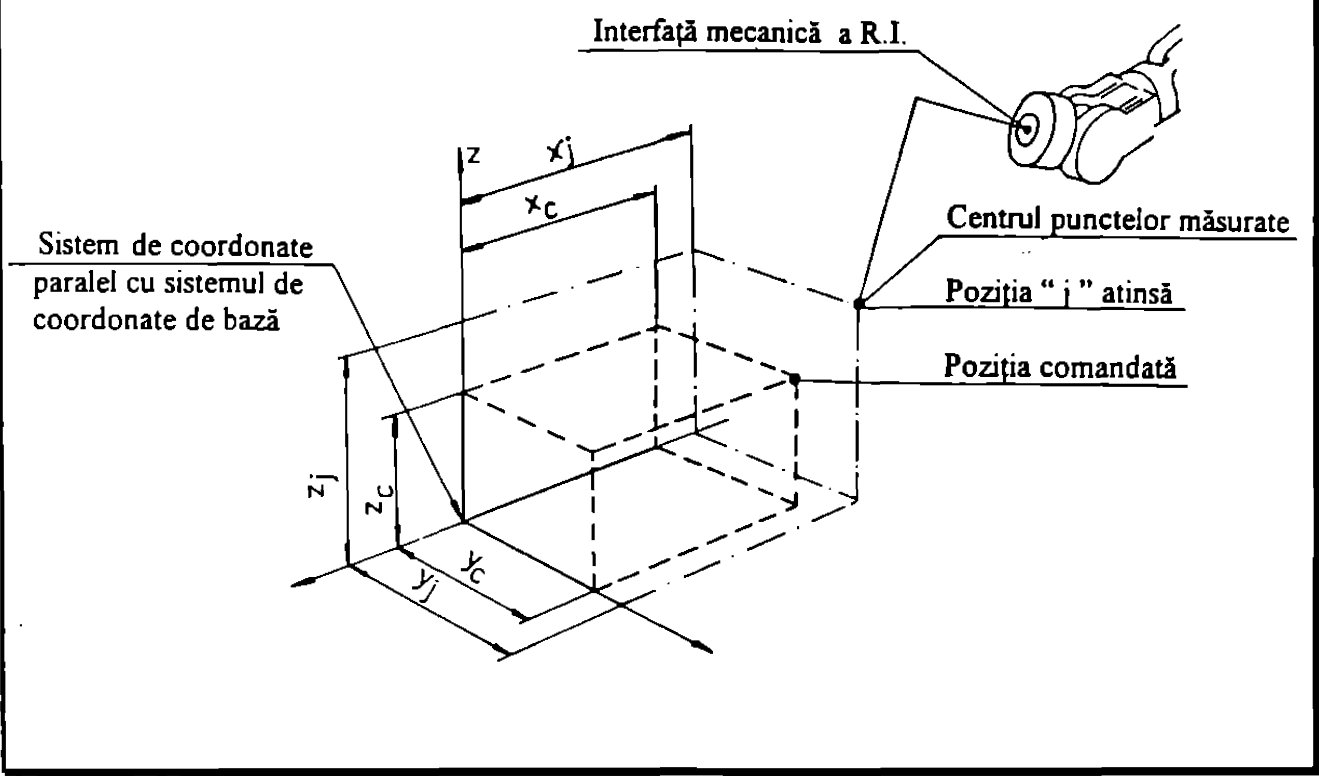
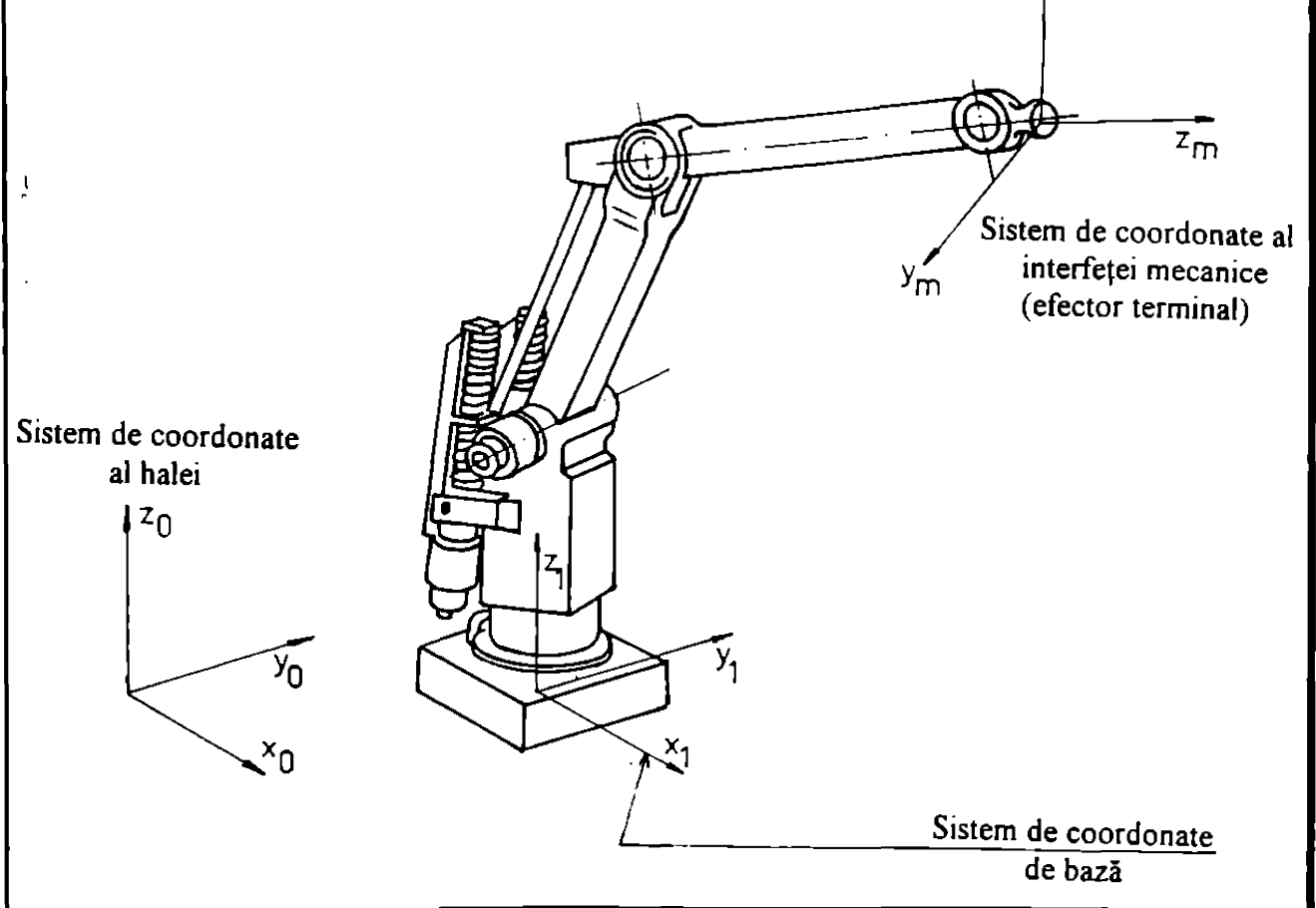


Fig.2.11



„Poziția comandată” este poziția reprodusă prin programare prin învățare, iar „poziția atinsă” este cea realizată de robot ca răspuns la poziția comandată (fig.2.10)

Criteriile de exactitate și repetabilitate vor fi specificate în raport cu un sistem de coordonate ale cărui axe sunt paralele cu axele sistemului de coordonate de bază (sistem de axe legat de baza robotului), (fig.2.11).

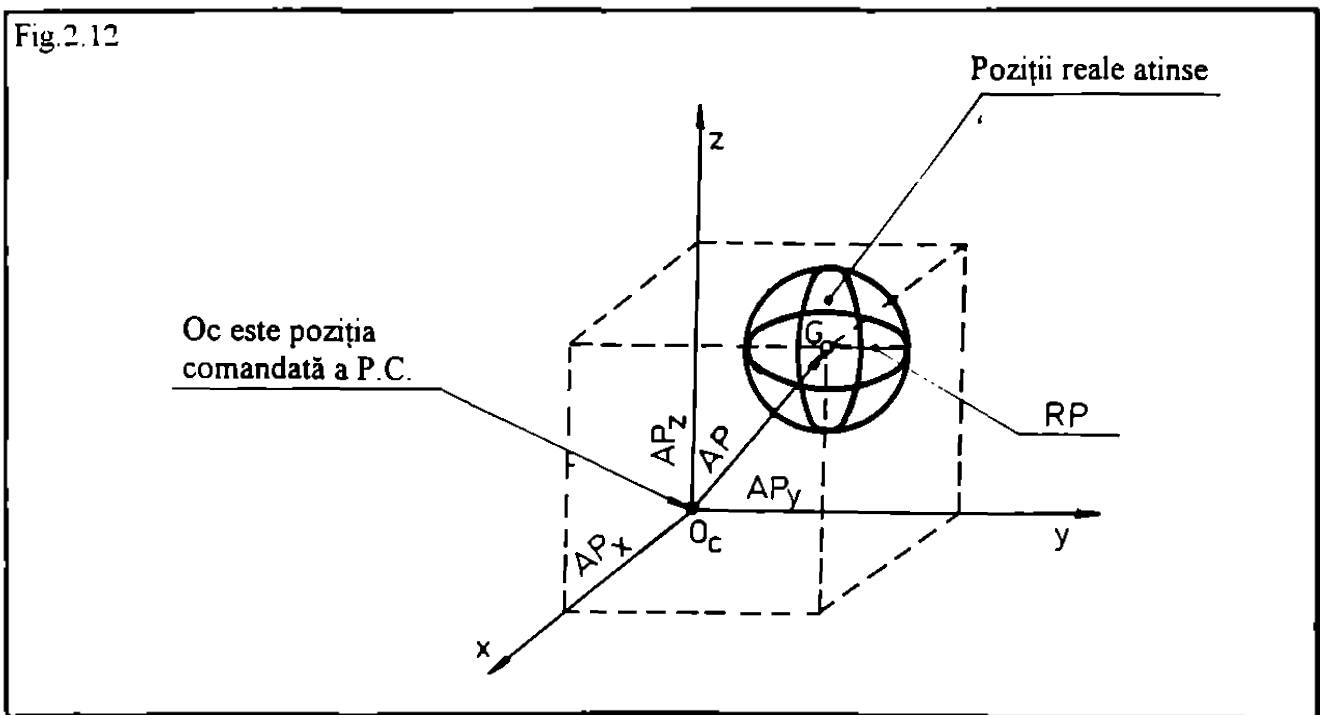
2.2.1.1. Exactitatea și repetabilitatea de situare.

1. Exactitatea de situare unidirecțională (AP)

Exactitatea de situare unidirecțională exprimă abaterea între o poziție comandată și centrul de greutate al pozițiilor atinse, când apropierea de poziția comandată se face urmând aceeași traiectorie.

Cuprinde două aspecte:

a) **Exactitatea de poziționare unidirecțională** - se exprimă prin diferența între poziția comandată a P.C. și centrul de greutate al mulțimii de poziții atinse în realitate, la repetarea de „n” ori a aceleiași traiectorii (fig.2.12)



În figura 2.12, O_c este poziția comandată a punctului caracteristic, iar G este centrul de greutate (punctul mediu) obținut ca medie a coordonatelor punctelor atinse în realitate. O_cxyz reprezintă sistemul de axe atașat poziției comandate (de

exemplu vârful sau centrul cubului - corp de probă), coordonatele lui O_c în sistemul de bază fiind: x_c, y_c, z_c (figura 2.12).

Exactitatea de poziționare unidirecțională se determină prin expresia:

$$AP = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (2.1).$$

având:

$$\begin{aligned} AP_x &= \bar{x} - x_c \\ AP_y &= \bar{y} - y_c \\ AP_z &= \bar{z} - z_c \end{aligned} \quad (2.2).$$

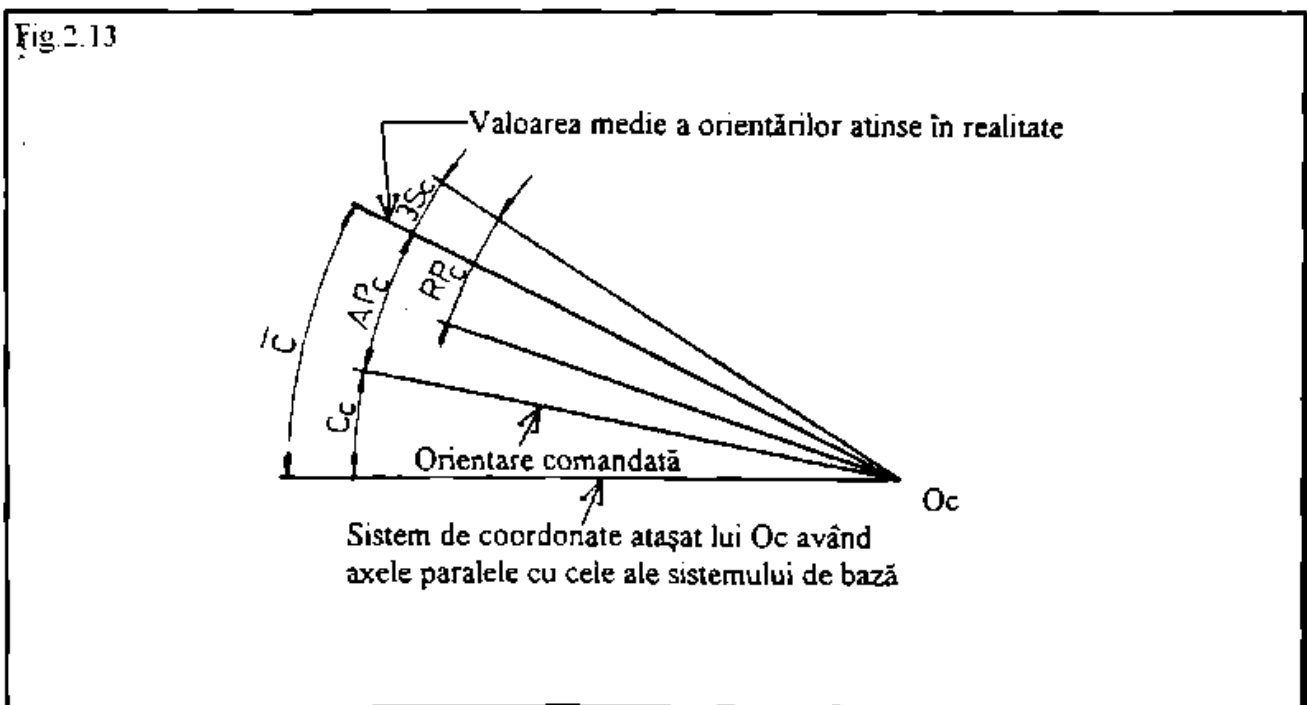
unde:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j \\ \bar{y} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \\ \bar{z} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j \end{aligned} \quad (2.3).$$

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ - sunt coordonatele centrului de greutate G al mulțimii de puncte obținute după repetarea aceleiași poziții de „n” ori;

x_c, y_c, z_c - sunt coordonatele poziției comandate;

x_j, y_j, z_j - sunt coordonatele poziției „j” atinse.



b) Exactitatea de orientare unidirecțională - se exprimă ca diferență între orientarea unghiulară comandată și valoarea medie a orientărilor unghiulare obținute în realitate, la repetarea de „n” ori a aceleiași poziții, parcurgând aceeași traiectorie (figura 2.13)

Acest criteriu se referă la cele trei axe ale sistemului de referință: a, b, c .

Se calculează cu relațiile.

$$\begin{aligned} AP_a &= (\bar{a} - a_c) \\ AP_b &= (\bar{b} - b_c) \\ AP_c &= (\bar{c} - c_c) \end{aligned} \quad (2.4),$$

cu:

$$\begin{aligned} \bar{a} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j \\ \bar{b} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_j \\ \bar{c} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_j \end{aligned} \quad (2.5).$$

Valorile $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$ sunt valorile medii ale orientărilor unghiulare, obținute pentru aceeași orientare comandată de „n” ori;

a_c, b_c, c_c - sunt unghiurile sistemului de axe atașat poziției comandate, în raport cu sistemul ales,

a_j, b_j, c_j - sunt unghiurile sistemului de axe atașat poziției de rang „j” atinsă în realitate, în raport cu sistemul ales.

2.Repetabilitatea de situare unidirecțională

Reflectă mărimea împrăstierii pozițiilor atinse de P.C. în jurul poziției comandate a acestuia, atât în ceea ce privește poziționarea P.C., cât și orientarea sistemului de axe atașat acestuia, la repetarea de „n” ori a comenzii de atingere a poziției comandate, parcurgând aceeași traiectorie. Se exprimă acceptând o distribuție standard pentru pozițiile aleatoare atinse de P.C.

Acest criteriu conține două aspecte:

a) Repetabilitatea de poziționare unidirecțională - se exprimă prin valoarea RP a razei sferei având drept centru punctul mediu G al mulțimii de poziții atinse de P.C., la proba de exactitate de poziționare (fig.2.12). Se determină cu expresia:

$$RP = \bar{l} + 3 \cdot S_l \quad (2.6),$$

unde: \bar{l} - reprezintă media distanțelor l_j , ale punctelor individuale atinse de P.C., față de punctul mediu G al acestora:

S_l - abaterea medie pătratică experimentală a acestor distanțe l_j , ale punctelor individuale atinse de P.C., față de punctul mediu G, al acestora.

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad (2.7),$$

unde:
$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (2.8),$$

cu $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ respectiv x_j, y_j, z_j , definite în paragraful 2.2.1.1.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \quad (2.9)$$

Acest criteriu poate fi calculat chiar dacă distanțele nu sunt normal distribuite.

b) Repetabilitatea de orientare unidirecțională - se exprimă prin întinderea variațiilor unghiulare $\pm 3 \cdot S_a, \pm 3 \cdot S_b, \pm 3 \cdot S_c$ în jurul valorilor $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$.

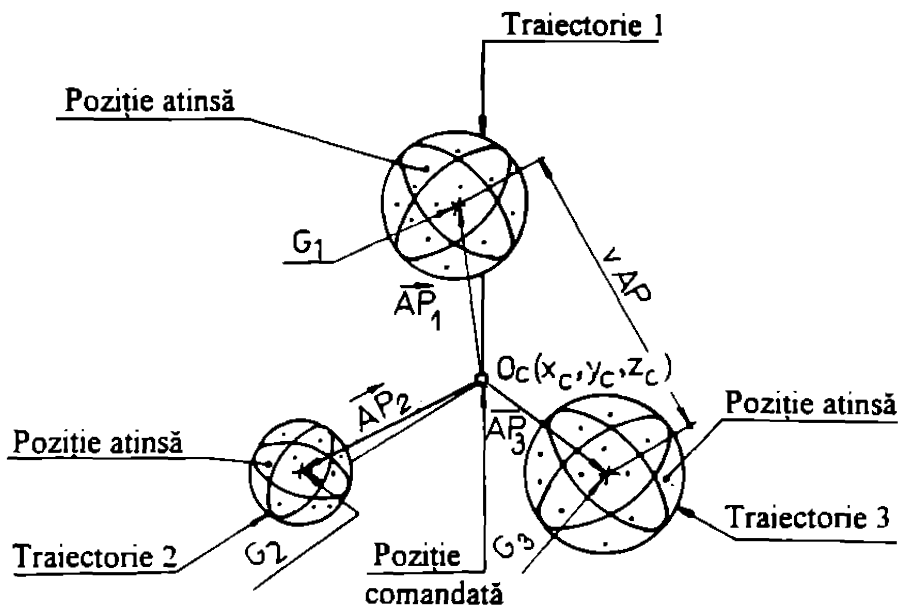
S_a, S_b, S_c sunt abaterile medii pătratice experimentale (abateri standard) ale orientărilor unghiulare atinse, față de valorile medii $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$ (fig.2.13). Se determină cu relațiile:

$$\begin{aligned} RP_a &= \pm 3 \cdot S_a = \pm 3 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_j - \bar{a})^2}{n-1}} \\ RP_b &= \pm 3 \cdot S_b = \pm 3 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_j - \bar{b})^2}{n-1}} \\ RP_c &= \pm 3 \cdot S_c = \pm 3 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_j - \bar{c})^2}{n-1}} \end{aligned} \quad (2.10).$$

3. Variația exactității de situare multidirecțională (vAP)

Exprimă abaterea maximă între diferitele valori medii ale pozițiilor atinse (centrul de greutate ale mulțimiilor de poziții atinse) de P.C., obținute pentru aceeași poziție repetată de „n” ori, dar urmând trei direcții perpendiculare (fig.2.14)

Fig.2.14



Se exprimă prin:

a) **Variația exactității de poziționare multidirecțională vAP** - reprezintă distanța maximă între centrele de greutate ale mulțimilor de poziții atinse de P.C. la aceeași poziție comandată a P.C. după parcurgerea de „n” ori a trei traiectorii diferite (de obicei perpendiculare).

Se determină cu relația:

$$vAP = \max_{h,k=1}^3 \sqrt{(\bar{x}_h - \bar{x}_k)^2 + (\bar{y}_h - \bar{y}_k)^2 + (\bar{z}_h - \bar{z}_k)^2} \quad (2.11),$$

punctele $\bar{x}_{h(k)}, \bar{y}_{h(k)}, \bar{z}_{h(k)}$ fiind valorile medii ale mulțimilor de puncte obținute la extremitatea traiectoriei h sau k ($h, k = 1, 2, 3$) repetată de „n” ori.

Vectorial, vAP se poate exprima astfel:

$$vAP = \max_{h,k=1}^3 |\bar{AP}_h - \bar{AP}_k| \quad (2.12),$$

unde: \bar{AP}_h (\bar{AP}_k) reprezintă vectorul de poziție al centrului de greutate G_h (G_k) al mulțimii punctelor atinse la extremitatea traiectoriei h (k), în raport cu poziția comandată $O_c(x_c, y_c, z_c)$. Se calculează astfel:

$$\bar{AP} = (\bar{x} - x_c) \cdot \bar{u} + (\bar{y} - y_c) \cdot \bar{v} + (\bar{z} - z_c) \cdot \bar{w} \quad (2.13),$$

cu $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ - versorii axelor sistemului de referință atașat poziției comandate O_c .

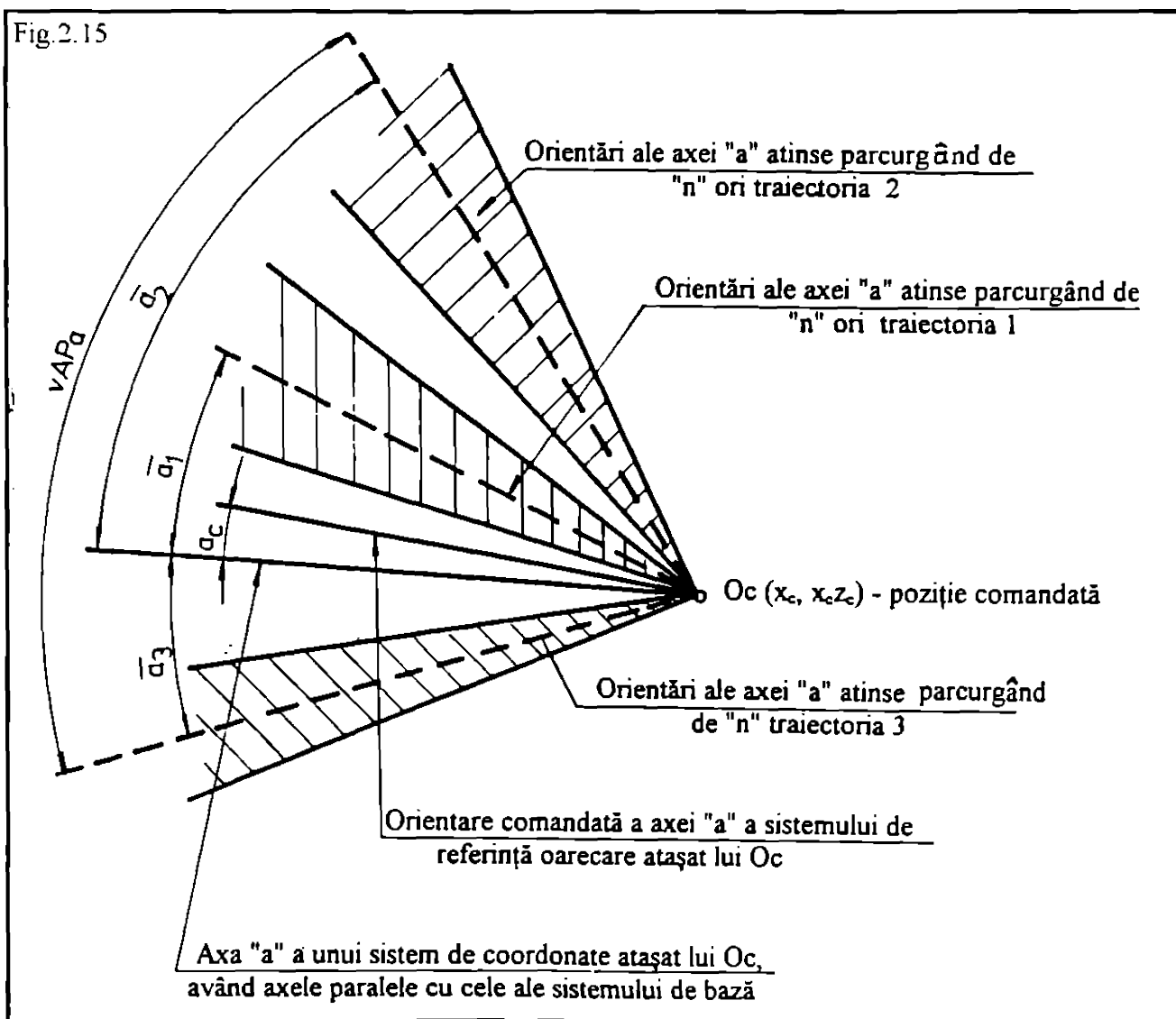
b) **Variația exactității de orientare multidirecțională (vAP_a, vAP_b, vAP_c)**

Se exprimă ca fiind abaterea unghiulară maximă între valorile medii ale orientărilor unghiulare atinse, parcurgând de „n” ori traiectorii diferite (de obicei 3), pentru aceeași orientare comandată (fig.2.15).

Se determină cu relațiile:

$$\begin{aligned} vAP_a &= \max_{b=1}^3 \left[\max_{k=1}^3 (\bar{a}_b - \bar{a}_k) \right] \\ vAP_b &= \max_{b=1}^3 \left[\max_{k=1}^3 (\bar{b}_b - \bar{b}_k) \right] \\ vAP_c &= \max_{b=1}^3 \left[\max_{k=1}^3 (\bar{c}_b - \bar{c}_k) \right] \end{aligned} \quad (2.14),$$

Cele trei traiectorii de apropiere a P.C. al robotului de poziția lui comandată, se acceptă de obicei paralele cu axele sistemului de referință de bază. Dacă acest lucru nu este posibil, atunci fabricantul de roboți trebuie să specifice cele trei traiectorii pentru încercare.



2.2.1.2. Exactitatea și repetabilitatea distanței

Acest parametru se aplică doar la roboții ce pot fi programați analitic.

Caracteristicile de exactitate și repetabilitate a distanței ce fac obiectul acestui paragraf, cuantifică abaterile distanței între punctele medii a două seturi de puncte atinse (distanța medie atinsă între două puncte) și orientării acesteia, în raport cu distanța între două poziții comandate analitic și orientarea acesteia, precum și fluctuația distanței și orientării respective, pentru o serie de mișcări repetate de „n” ori între cele două poziții.

Dacă caracteristicile exactității și repetabilității de poziție unidirecțională, definită în paragraful 2.2.1.1 au fost măsurate utilizând programarea analitică a fiecărei poziții este posibil a se calcula exactitatea și repetabilitatea distanței între fiecare două poziții comandate cu relațiile definite mai jos, dar în acest caz, rezultatele obținute pentru fiecare pereche de poziții succesive trebuie notate.

Dacă exactitatea și repetabilitatea de poziție unidirecțională (definită în paragraful 2.2.1.1), au fost determinate utilizând programarea prin învățare a fiecărei poziții, este suficient a face o testare simplă, în care exactitatea și repetabilitatea distanței se măsoară doar între două poziții, această testare fiind suficientă. În acest caz, exactitatea și repetabilitatea distanței poate fi măsurată comandând pozițiile una după alta, în două moduri:

- a) comandând ambele poziții prin programare analitică;
- b) comandând o poziție prin învățare și programând distanța.

Trebuie specificată metoda utilizată.

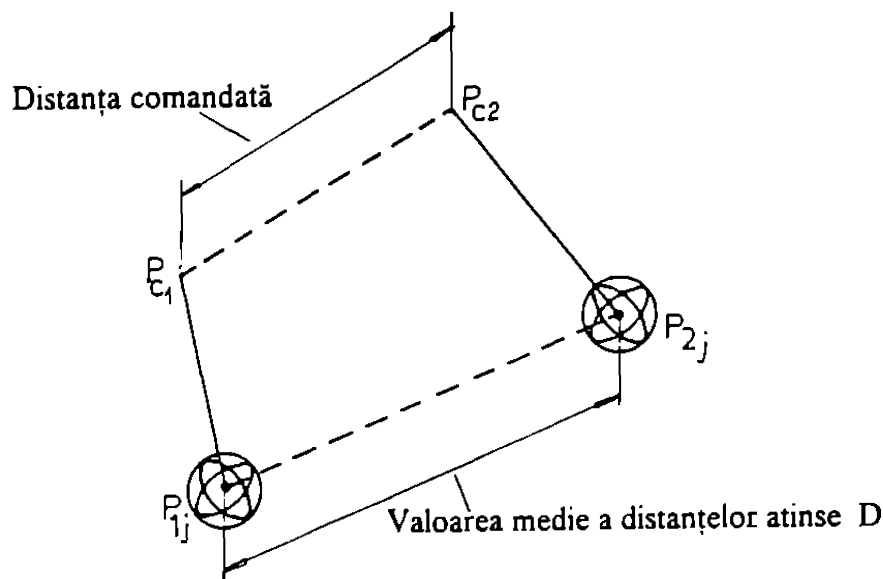
Observație: În ambele cazuri, exactitatea și repetabilitatea distanței trebuie specificate în raport cu un sistem de coordonate ale cărui axe sunt paralele cu axele sistemului de coordonate de bază.

1. Exactitatea distanței (AD) exprimă diferența de poziționare și orientare între distanța comandată și valoarea medie a distanțelor atinse.

a) Exactitatea de poziționare a distanței

Fiind date pozițiile comandate P_{c1} și P_{c2} și pozițiile atinse P_{j1} și P_{j2} , la repetarea de „n” ori a distanței între P_{c1} și P_{c2} , exactitatea de poziționare a distanței se exprimă ca fiind diferența dintre distanța $D_c = |P_{c1} - P_{c2}|$ și valoarea medie a distanțelor $D_j = |P_{j1} - P_{j2}|$ (fig. 2.16).

Fig. 2.16



Așadar: $AD = D_c - \bar{D}$ (2.15),

unde:

$$D_c = |P_{c1} - P_{c2}| = \sqrt{(x_{c1} - x_{c2})^2 + (y_{c1} - y_{c2})^2 + (z_{c1} - z_{c2})^2} \quad (2.16),$$

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_j \quad (2.17),$$

$$D_j = |P_{1j} - P_{2j}| = \sqrt{(x_{1j} - x_{2j})^2 + (y_{1j} - y_{2j})^2 + (z_{1j} - z_{2j})^2} \quad (2.18),$$

cu: x_{c1}, y_{c1} și z_{c1} - coordonatele lui P_{c1} , determinate pe calculatorul robotului;

x_{c2}, y_{c2} și z_{c2} - coordonatele lui P_{c2} , determinate pe calculatorul robotului;

x_{1j}, y_{1j} și z_{1j} - coordonatele lui P_{1j} , măsurate;

x_{2j}, y_{2j} și z_{2j} - coordonatele lui P_{2j} , măsurate;

n - numărul de repetări ale distanței.

Exactitatea de poziționare a distanței poate fi exprimată pentru fiecare axă a sistemului de coordonate de bază, astfel:

$$\begin{aligned} AD_x &= D_{c_x} - \bar{D}_x \\ AD_y &= D_{c_y} - \bar{D}_y \\ AD_z &= D_{c_z} - \bar{D}_z \end{aligned} \quad (2.19),$$

unde:

$$\begin{aligned} D_x &= |x_{e1} - x_{e2}| \\ D_y &= |y_{e1} - y_{e2}| \\ D_z &= |z_{e1} - z_{e2}| \end{aligned} \quad (2.20),$$

și:

$$\begin{aligned} \bar{D}_x &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{xj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |x_{1j} - x_{2j}| \\ \bar{D}_y &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{yj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_{1j} - y_{2j}| \\ \bar{D}_z &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{zj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |z_{1j} - z_{2j}| \end{aligned} \quad (2.21).$$

b) Exactitatea de orientare a distanței - se determină de asemenea ca exactitatea de orientare a distanței fiecărei axe:

$$\begin{aligned} AD_a &= D_{ea} - \bar{D}_a \\ AD_b &= D_{eb} - \bar{D}_b \\ AD_c &= D_{ec} - \bar{D}_c \end{aligned} \quad (2.22),$$

unde:

$$\begin{aligned} D_{ea} &= |a_{e1} - a_{e2}| \\ D_{eb} &= |b_{e1} - b_{e2}| \\ D_{ec} &= |c_{e1} - c_{e2}| \end{aligned} \quad (2.23),$$

și:

$$\begin{aligned} \bar{D}_a &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{aj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |a_{1j} - a_{2j}| \\ \bar{D}_b &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{bj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |b_{1j} - b_{2j}| \\ \bar{D}_c &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n D_{cj} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |c_{1j} - c_{2j}| \end{aligned} \quad (2.24).$$

cu: a_{e1}, b_{e1} și c_{e1} - orientările în P_{e1} , prescrise de calculatorul robotului;

a_{e2}, b_{e2} și c_{e2} - orientările în P_{e2} , prescrise de calculatorul robotului;

a_{1j}, b_{1j} și c_{1j} - orientările în P_{1j} , măsurate;

a_{2j}, b_{2j} și c_{2j} - orientările în P_{2j} , măsurate;

n - numărul de repetări.

2. Repetabilitatea distanței (RD) - se exprimă prin mărimea intervalului de împrăștiere a valorilor reale ale distanțelor efectiv realizate, pentru aceeași distanță

comandată, repetată de „n” ori, în aceeași direcție. Se acceptă o distribuție normală (standard).

Repetabilitatea distanței include:

a) Repetabilitatea de poziționare a distanței

Se exprimă prin relația:

$$RD = \pm 3 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_j - \bar{D})^2}{n-1}} \quad (2.25)$$

Sau, pentru fiecare axă a sistemului de coordonate de bază:

$$\begin{aligned} RD_x &= \pm 3 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{xj} - \bar{D}_x)^2}{n-1}} \\ RD_y &= \pm 3 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{yj} - \bar{D}_y)^2}{n-1}} \\ RD_z &= \pm 3 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{zj} - \bar{D}_z)^2}{n-1}} \end{aligned} \quad (2.26)$$

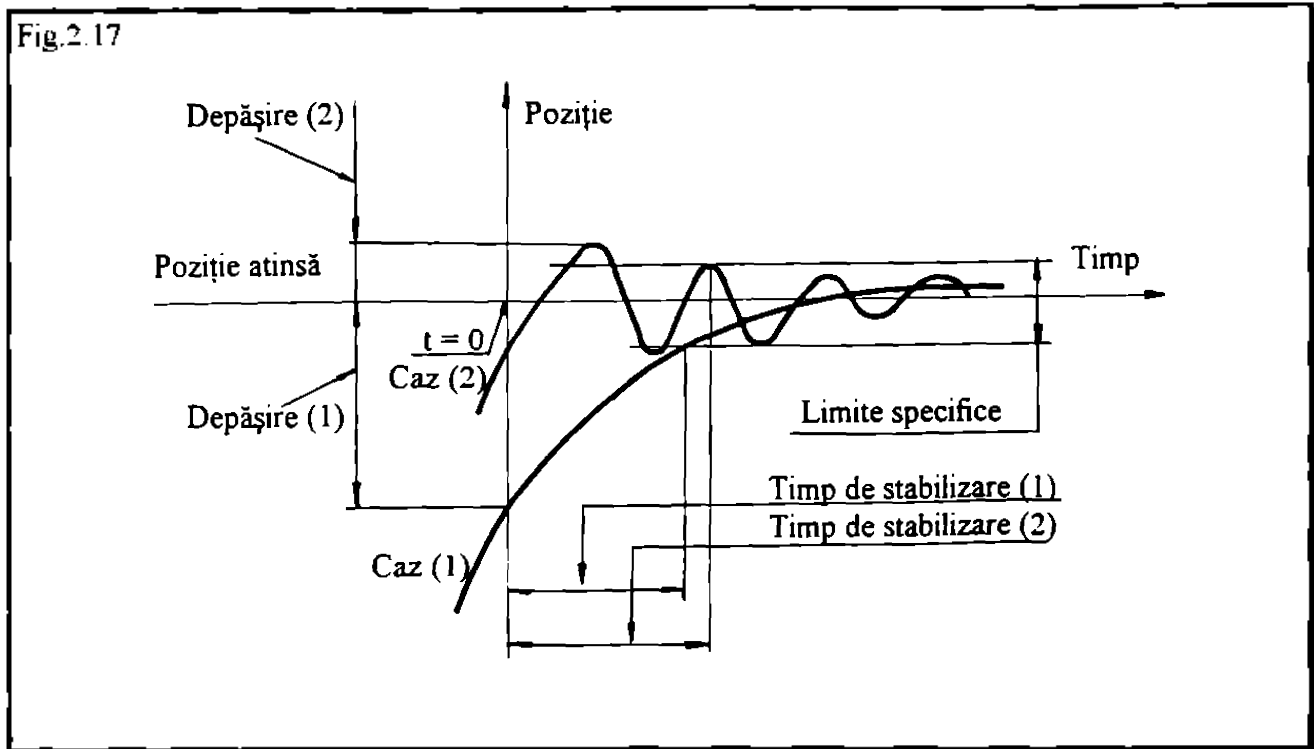
b) Repetabilitatea de orientare a distanței

Se exprimă pentru fiecare axă, cu relații de forma:

$$\begin{aligned} RD_a &= \pm 3 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{aj} - \bar{D}_a)^2}{n-1}} \\ RD_b &= \pm 3 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{bj} - \bar{D}_b)^2}{n-1}} \\ RD_c &= \pm 3 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (D_{cj} - \bar{D}_c)^2}{n-1}} \end{aligned} \quad (2.27)$$

2.2.1.3. Timpul de stabilizare a poziției

Timpul de stabilizare a poziției se definește ca fiind perioada de timp care se scurge între momentul în care robotul dă semnalul de poziție atinsă și momentul în care mișcarea oscilatorie amortizată sau mișcarea amortizată a interfeței mecanice se încadrează între anumite limite specificate de fabricant (fig.2.17).



În figura 2.17 sunt reprezentate două faze de apropiere diferite (cazul 1 pentru un sistem supraamortizat și cazul 2 pentru un sistem subamortizat).

Momentul $t=0$ corespunde semnalului de „poziție atinsă”.

Încercarea se face pentru diferite încărcări și legi de mișcare. Pentru fiecare poziție, poziționarea și orientarea interfeței mecanice se raportează la momentul în care robotul dă semnalul de „poziție atinsă”.

2.2.1.4. Depășirea poziției

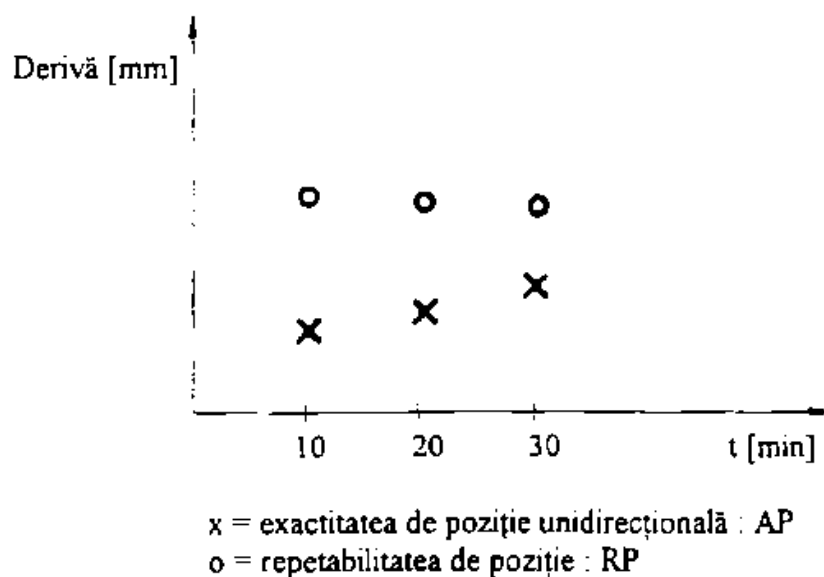
Depășirea poziției se definește ca fiind devierea maximă între traiectoria de apropiere a P.C. și poziția atinsă, după ce robotul a dat semnalul de „poziție atinsă” (fig.2.17).

2.2.1.5. Deriva punctului caracteristic (devierea poziției P.C.)

Deriva punctului caracteristic este variația lentă a poziției P.C. într-un interval de timp specificat.

Această caracteristică se referă atât la exactitatea de poziționare și orientare, cât și la repetabilitatea de poziționare și orientare, și exprimă variația lentă a acestor caracteristici într-un interval de timp dat (fig.2.18).

Fig.2.18



Se disting astfel:

a) **Deriva exactității de situare (poziționare și orientare)** se poate calcula prin diferența exactității de poziție la momentul $t = 0$ și $t = T$, prin relații de forma:

$$dAP = |AP_{t=0} - AP_{t=T}| \quad (2.28),$$

pentru poziționare, și:

$$\begin{aligned} dAP_a &= |AP_{a,t=0} - AP_{a,t=T}| \\ dAP_b &= |AP_{b,t=0} - AP_{b,t=T}| \\ dAP_c &= |AP_{c,t=0} - AP_{c,t=T}| \end{aligned} \quad (2.29),$$

pentru orientare

b) **Deriva repetabilității de situare (poziționare și orientare)** reprezintă variația acestei caracteristici într-un interval de timp $[0, T]$, dar și se exprimă prin:

$$dRP = |RP_{t=0} - RP_{t=T}| \quad (2.30),$$

pentru poziționare, și:

$$\begin{aligned} dRP_a &= |RP_{a,t=0} - RP_{a,t=T}| \\ dRP_b &= |RP_{b,t=0} - RP_{b,t=T}| \\ dRP_c &= |RP_{c,t=0} - RP_{c,t=T}| \end{aligned} \quad (2.31),$$

pentru orientare

2.2.2. Caracteristici de traiectorie

Definițiile exactității și repetabilității traiectoriei sunt independente de forma traiectoriei comandate. În figurile 2.19 și 2.20 se prezintă două tipuri de traiectorii diferite.

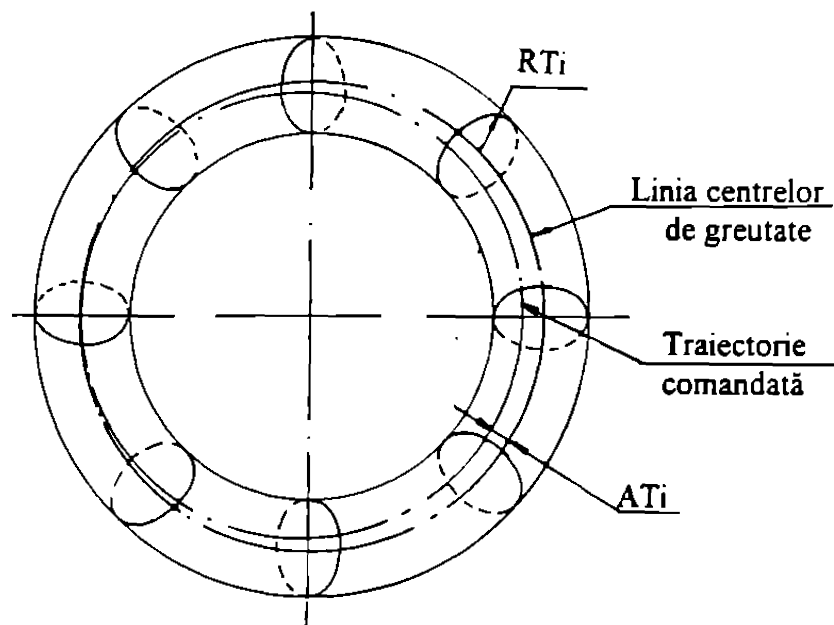
2.2.2.1. Exactitatea de traiectorie (AT)

Exactitatea de traiectorie (AT) caracterizează capacitatea unui robot de-a face ca interfața sa mecanică să urmărească o traiectorie comandată, de „ n ” ori în același sens și „ n ” ori în sens opus.

Se exprimă prin:

a) **Exactitatea de poziționare a traiectoriei (AT)** - reprezintă valoarea maximă a distanței între o traiectorie comandată și linia centrelor de greutate (linia mediană) a mulțimii de traiectorii obținute în realitate (fig 2.19)

Fig.2.19



Dacă traiectoria comandată este definită ca axă Z, exactitatea de poziționare a traiectoriei se calculează astfel:

$$AT = \max_{i=1}^m \sqrt{(x_{c_i} - \bar{x}_i)^2 + (y_{c_i} - \bar{y}_i)^2} \quad (2.32).$$

respectiv:

$$\begin{aligned} AT_x &= \max_{i=1}^m |x_{c_i} - \bar{x}_i| \\ AT_y &= \max_{i=1}^m |y_{c_i} - \bar{y}_i| \end{aligned} \quad (2.33),$$

unde:

$$\begin{aligned} \bar{x}_i &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \\ \bar{y}_i &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \end{aligned} \quad (2.34)$$

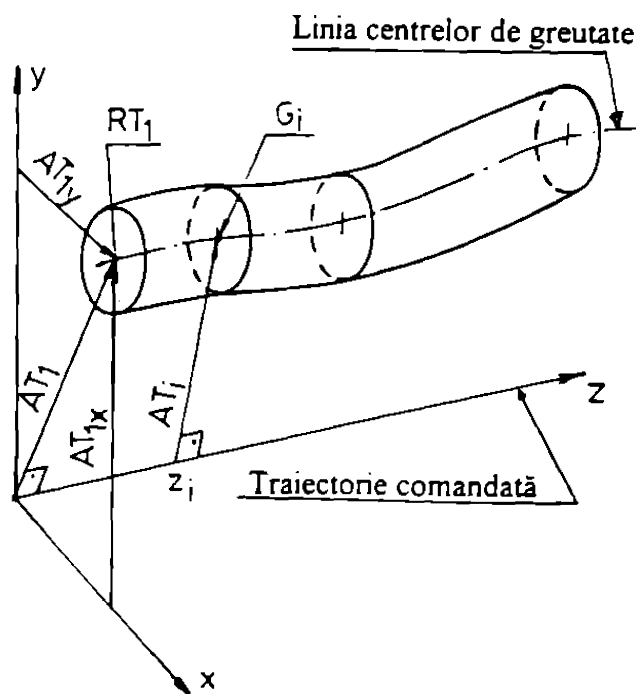
x_{c_i} și y_{c_i} - sunt coordonatele punctului traiectoriei comandate, corespunzătoare abscisei măsurate z_i ;

x_{ij} și y_{ij} - sunt coordonatele punctului traiectoriei atinse, corespunzătoare punctului măsurat z_{ij} , la o repetare de „j” ori.

Traectoria se aproximează prin m puncte de precizie.

b) Exactitatea de orientare a traiectoriei - reprezintă diferența maximă între orientarea unghiulară comandată și media orientărilor unghiulare obținute, sau altfel spus:

Fig. 2.20



Exactitatea de orientare a traiectoriei (cu referire la cele trei axe atașate P.C., AT_a , AT_b , AT_c) este definită ca fiind abaterea maximă de la unghiurile comandate în lungul traiectoriei

Se exprimă prin:

$$\begin{aligned} AT_a &= \max_{i=1}^m |a_{ci} - \bar{a}_i| \\ AT_b &= \max_{i=1}^m |b_{ci} - \bar{b}_i| \\ AT_c &= \max_{i=1}^m |c_{ci} - \bar{c}_i| \end{aligned} \quad (2.35),$$

unde:

$$\begin{aligned} \bar{a}_i &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij} \\ \bar{b}_i &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{ij} \\ \bar{c}_i &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij} \end{aligned} \quad (2.36).$$

a_{ci} , b_{ci} și c_{ci} - fiind unghiurile comandate ale sistemului de axe atașat P.C. în raport cu axele sistemului de bază, corespunzătoare abscisei măsurate z_i ;

a_{ij} , b_{ij} și c_{ij} - fiind unghiurile obținute (reale) pentru poziția z_i , la repetarea acesteia de „j” ori.

În cele de mai sus, s-a definit exactitatea traiectoriei ca o mărime depinzând de distanță, de poziție. Acest aspect se referă la ceea ce se denumește în subcapitolul următor „exactitatea statică a traiectoriei” sau „precizia statică”.

Exactitatea traiectoriei se poate exprima și funcție de timp. În cazul când există fluctuații semnificative ale vitezei în lungul traiectoriei, măsurările făcute în funcție de timp trebuie raportate la aceeași puncte ale traiectoriei comandate în cursul diferitelor cicluri. Este ceea ce în subcapitolul următor se denumește „exactitatea dinamică a traiectoriei” sau „precizia dinamică”.

Încercările pe traiectorie trebuie efectuate în ambele sensuri.

2.2.2.2. Repetabilitatea traiectoriei (RP)

Repetabilitatea traiectoriei (RP) se exprimă prin mărimea domeniului de împrăștiere a traiectoriilor reale, pentru aceeași traiectorie comandată, repetată de

„n” ori.

Pentru o traiectorie dată, repetată de „n” ori în același sens, repetabilitatea traiectoriei se exprimă prin:

a) Repetabilitatea de poziționare a traiectoriei se exprimă prin valoarea maximă a lui RT , reprezentând raza cercului obținut prin secționarea domeniului de împrăștiere a traiectoriilor cu un plan perpendicular pe axa Oz , la cota $z=z_1$. Acest cerc, de rază RT , are centrul situat pe linia centrelor de greutate.

Dacă traiectoria comandată este axa z , repetabilitatea traiectoriei se determină cu relația:

$$RT = \max_{i=1}^m [\bar{l}_i + 3 \cdot S_{l_i}] \quad (2.37),$$

unde

$$\bar{l}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_{ij} \quad (2.38),$$

$$S_{l_i} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_{ij} - \bar{l}_i)^2}{n-1}} \quad (2.39),$$

$$l_{ij} = \sqrt{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2 + (y_{ij} - \bar{y}_i)^2} \quad (2.40),$$

cu $\bar{x}_i, \bar{y}_i, x_{ij}, y_{ij}$ definite la exactitatea de poziționare a traiectoriei.

b) Repetabilitatea de orientare a traiectoriei se exprimă prin valoarea maximă a domeniului de împrăștiere a unghiurilor de orientare reale în jurul valorii medii, pentru diferite poziții z_i .

↓
Așadar:

$$RT_a = \max_{i=1}^m \left[3 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (a_{ij} - \bar{a}_i)^2}{n-1}} \right] \quad (2.41)$$

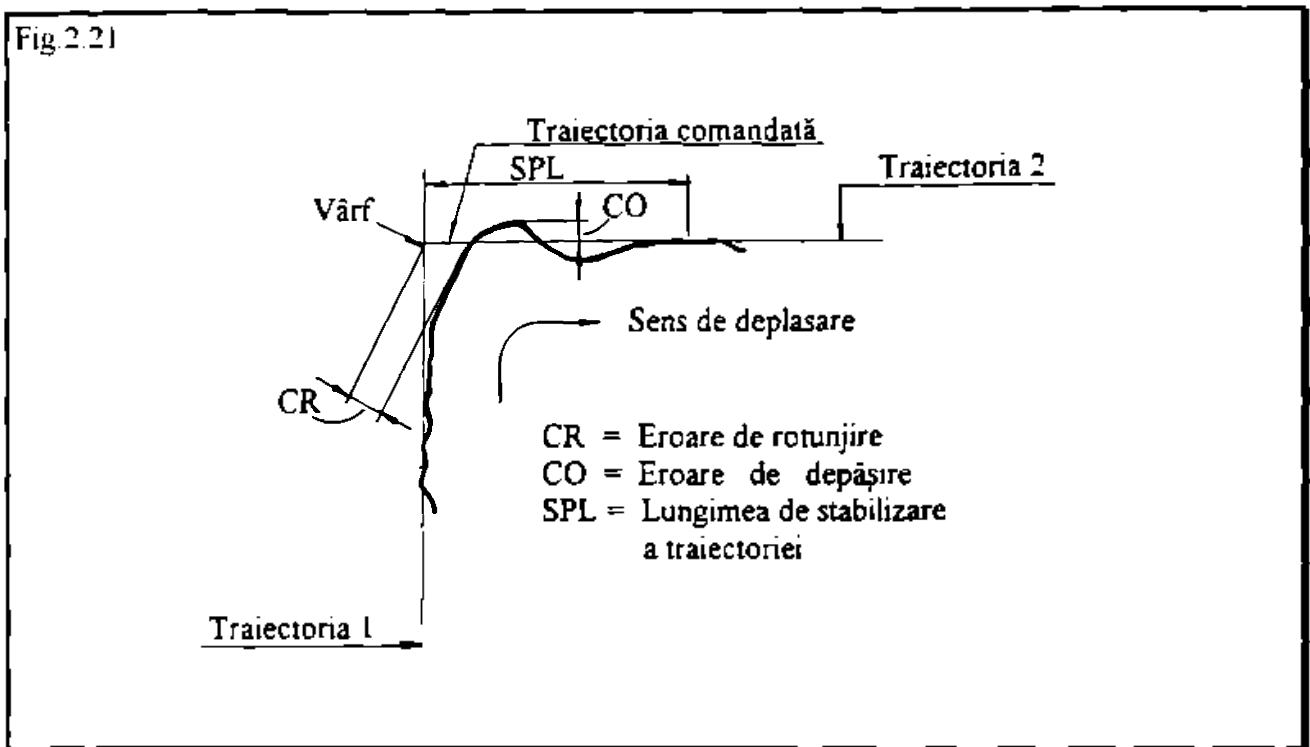
$$RT_b = \max_{i=1}^m \left[3 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (b_{ij} - \bar{b}_i)^2}{n-1}} \right] \quad (2.42)$$

$$RT_c = \max_{i=1}^m \left[3 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (c_{ij} - \bar{c}_i)^2}{n-1}} \right] \quad (2.43),$$

unde $a_y, b_y, c_y, \bar{a}_y, \bar{b}_y, \bar{c}_y$ au fost definite la exactitatea de orientare a traiectoriei.

2.2.2.3. Eroarea de racordare a două traiectorii perpendiculare (deviația Corner)

Erorile de racordare (depășirea CO și rotunjirea CR) reprezintă abaterile dintre traiectoria comandată și traiectoria parcursă, când traiectoria comandată este constituită din două linii perpendiculare (fig.2.21).



a) **Eroarea de rotunjire (CR)** este definită ca fiind distanța minimă între punctul de vârf, de coordonate (x_v, y_v, z_v) în figura 2.21 și traiectoria atinsă (reală). Pentru a „j”-a traiectorie, se exprimă astfel:

$$CR_j = \min_{i=1}^m \sqrt{(x_i - x_v)^2 + (y_i - y_v)^2} \quad (2.44),$$

unde: m este numărul de puncte măsurate în lungul traiectoriei reale (pe porțiunea de racordare);

x_v, y_v, z_v - coordonatele punctului de vârf (de intersecție a celor două traiectorii perpendiculare);

x_i, y_i, z_i - coordonatele punctului măsurat „i” de pe traiectoria reală atinsă.

b) Eroarea de depășire (CO) este definită ca fiind abaterea maximă de la traiectoria comandată, după ce robotul pornește pe cea de-a doua traiectorie, cu viteză programată pe traiectorie

Dacă cea de-a doua traiectorie este definită ca axa z și prima traiectorie comandată este după direcția y , în sensul de deplasare specificat în figura 2.21, eroarea de depășire CO se definește astfel:

$$CO = \max_{i=1}^m \sqrt{(x_i - x_{oi})^2 + (y_i - y_{oi})^2} \quad (2.45)$$

când:

x_{oi}, y_{oi} - sunt coordonatele punctului de pe traiectoria comandată, corespunzătoare poziției z_{oi} ;

x_i, y_i - sunt coordonatele punctului de pe traiectoria reală, atins corespunzătoare poziției z_{oi} .

Relația (2.45) este valabilă doar pentru $(y_i - y_{oi})$ pozitiv. În caz contrar nu există eroare de depășire.

Pentru acest test, traiectoria trebuie să fie comandată prin programare ca o traiectorie continuă.

Atât eroarea de rotunjire, cât și cea de depășire pot fi calculate măsurând abaterea de la punctul de vârf și fiecare traiectorie reală. Poziția vârfului se determină în cursul învățării (programarea prin învățare) sau prin programarea analitică.

Atât eroarea de rotunjire, cât și cea de depășire pot fi calculate ca o medie aritmetică a tuturor erorilor de rotunjire sau de depășire, înregistrate în cursul ciclurilor de măsurători.

c) Lungimea de stabilizare a traiectoriei (SPL) este definită ca distanța între punctul de vârf și punctul din lungul celei de-a doua traiectorii comandate, corespunzător căruia exactitatea și repetabilitatea robotului se încadrează în toleranțele admise. Se calculează cu:

$$SPL = z_v - z_g \quad (2.46)$$

unde: z_v este coordonata „z” a vârfului;

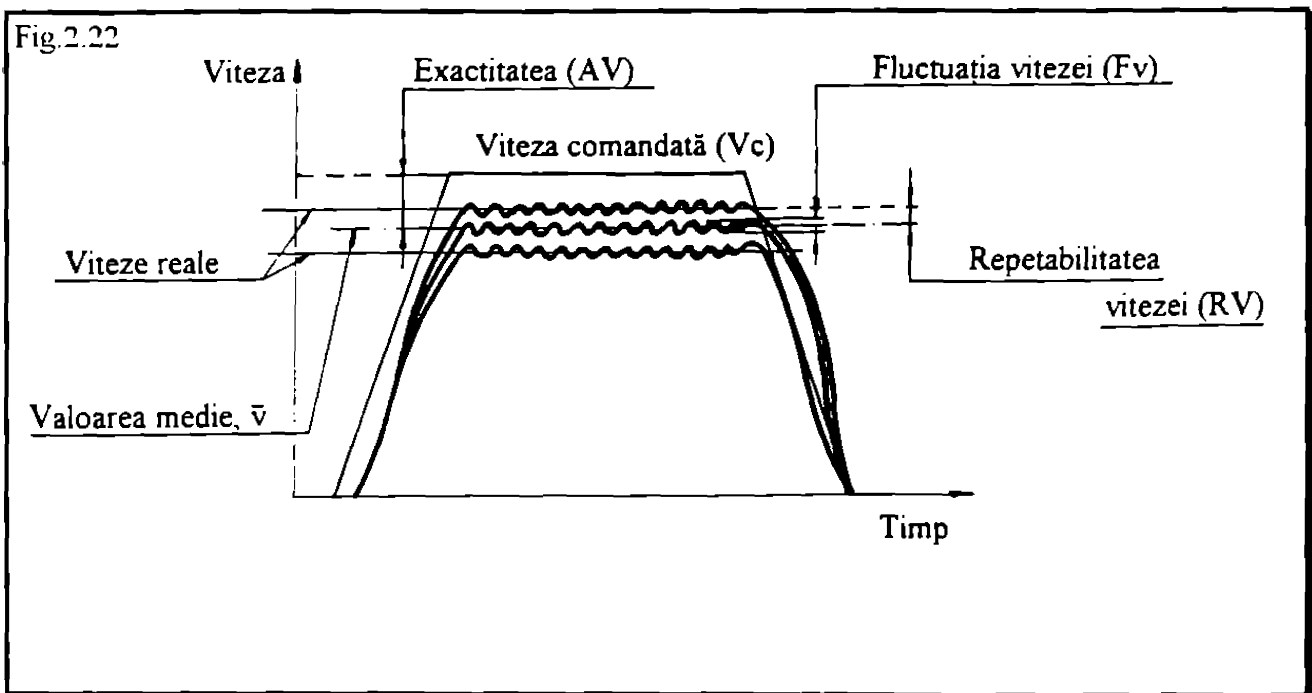
z_g este coordonata „z” a punctului corespunzător căruia caracteristicile de traiectorie ale robotului se încadrează în toleranțele specificate.

2.2.2.4. Caracteristici de viteză pe traiectorie

Se disting trei asemenea caracteristici (fig. 2.22):

- exactitatea vitezei pe traiectorie (AV);
- repetabilitatea vitezei pe traiectorie (RV);
- fluctuația vitezei pe traiectorie (FV).

a) **Exactitatea vitezei pe traiectorie (AV)** - se definește ca fiind diferența dintre viteza comandată și valoarea medie a vitezelor atinse, la repetarea de „n” ori a traiectoriei și se exprimă ca un procent din viteza comandată.



Se calculează cu relația:

$$AV = \frac{v - v_c}{v_c} \cdot 100 \quad \% \quad (2.47),$$

unde:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{v}_j \quad (2.48),$$

$$\bar{v}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_{ji} \quad (2.49),$$

cu: v_c - viteza comandată;

v_{ji} - viteza atinsă pentru a „j”- a măsurătoare și al „j”-lea ciclu;

m - numărul de măsurători în lungul traiectoriei.

În cazul în care există variații semnificative ale vitezei în lungul traiectoriei, măsurătorile făcute în funcție de timp trebuie să fie raportate la același punct al traiectoriei comandate în cursul diferitelor cicluri.

b) Repetabilitatea vitezei pe traiectorie (RV) este definită ca fiind mărimea intervalului de împrăștiere a vitezelor reale atinse, pentru aceeași viteză comandată, la încercări repetate de „n” ori.

Se exprimă în procente din viteza comandată:

$$RV = \pm \left(\frac{3 \cdot S_v}{v_c} \cdot 100 \right) \% \quad (2.50),$$

unde:

$$S_v = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{v}_j - \bar{v})^2}{n-1}} \quad (2.51),$$

cu v_c , \bar{v} și \bar{v}_j definite mai sus.

c) Fluctuația vitezei pe traiectorie (FV) este abaterea maximă a vitezei instantanee în timpul unei încercări cu o viteză comandată constantă.

$$FV = \max_{j=1}^n \left[\bar{\max}_{i=1}^n (v_{ij}) - \bar{\min}_{i=1}^n (v_{ij}) \right] \quad (2.52),$$

unde v_{ij} a fost definit anterior.

2.2.3. Timpul de deplasare minim

Timpul minim de deplasare a efectorului terminal al unui robot este timpul scurs între două stări staționare, pentru parcurgerea unei distanțe sau a unui unghi prescris, în comanda punct cu punct. Timpul de stabilizare a robotului pe poziția atinsă, definită în paragraful 2.2.1 este inclus în timpul de deplasare minimal total.

2.2.4. Complianța statică

Complianța statică este deplasarea pe unitate de sarcină aplicată. Sarcina trebuie aplicată și deplasarea măsurată la interfața mecanică.

Complianța statică se specifică în [mm/N] și se raportează la sistemul de coordonate de bază.

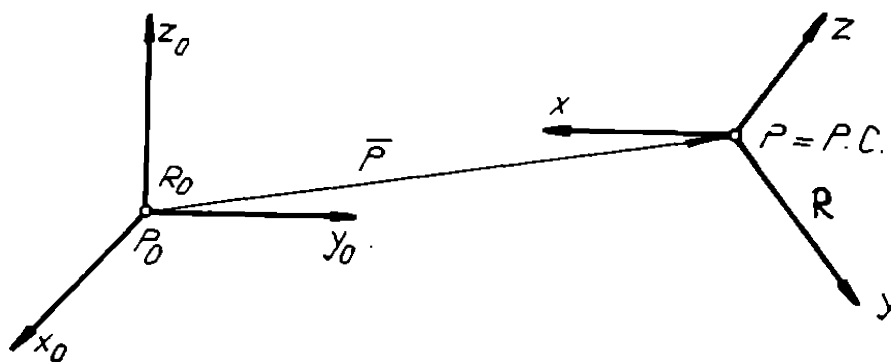
După cum se observă din prezentarea normativului ISO 9283:1990, majoritatea caracteristicilor de performanță ale roboților industriali se referă la aspectul de situare a efectorului terminal (E.T.) al robotului. Prin urmare, un studiu detaliat al caracteristicilor de situare (poziționare și orientare) rezolvă în mare parte problematica determinării performanțelor roboților industriali, motiv pentru care, în continuare, se aduc precizări suplimentare cu privire la acest aspect.

2.3. Situarea efectorului terminal al robotului. Abateri de situare

Intr-o primă aproximare, elementele constituente ale unui robot și cele cu care conlucrează, sunt corpuri solide în mișcare sau nu, unele în raport cu altele. Una dintre principalele sarcini ale roboticii, constă în modificarea stării acestui univers.

În cazul general, starea fiecărui obiect este definită printr-un mare număr de variabile: poziție, orientare, viteze, formă, culoare, stare a suprafeței, masă etc. Evidențierea și calculul acestor variabile de stare sunt indispensabile pentru determinarea evoluției unui robot în mediul său. Printre aceste variabile, câteva intervin în toate problemele de manipulare și asamblare de piese; acestea sunt cele care permit reprezentarea situației instantanee a unui solid (poziționare și orientare) și evoluția acestei stări. Estimarea și măsurarea performanțelor unui robot ce efectuează o anumită sarcină în spațiul său de lucru include, în primul rând, stabilirea unei relații între situarea reală a efectorului terminal, E.T., al robotului și cea dorită.

Fig.2.23



Considerând un reper de referință R_0 (legat de baza robotului sau de univers) situarea E.T. al robotului în raport cu R_0 este determinată prin poziția și orientarea unui reper R cu originea în P.C. (fig.2.23).

Din punct de vedere geometric, un robot ideal este cel pentru care reperul R legat de efectorul său terminal se confundă cu reperul R_d , legat de mediul său, care specifică situarea dorită. Această situație dorită este definită prin programarea robotului, fie prin învățare, fie într-un limbaj specific. Situația reperului R_d în raport cu un reper de referință R_0 poate fi descrisă, în fiecare moment, prin una sau mai multe deplasări în spațiul tridimensional. Reperul R_0 , la rândul său, poate fi fixat de:

- „baza” robotului ;
- un solid fix în mediul exterior al robotului ;
- un solid mobil în mediul exterior al robotului.

În primul caz, referința este „internă”, fiind legată de unul dintre elementele robotului. În al doilea caz, referința este „externă”, legată de exemplu de un dispozitiv cu care conlucrează robotul (ex: cazul unei caroserii de mașină sudată de roboți).

Din punctul de vedere al exactității, interesează abaterile între R și R_d în câteva situații geometrice particulare pe parcursul mișcării R.I. (cazul programării „punct cu punct”), sau de manieră continuă pe întreg parcursul evoluției situației R_d (cazul programării „pe traiectorie”).

În sfârșit, în unele situații este absolut necesar să se țină seama de parametrul „timp”, t , interesând abaterile de situație între $R(t)$ și $R_d(t)$, la un moment dat, t , sau pe parcursul evoluției lui t .

Estimarea și măsurarea acestor abateri, sunt necesare în următoarele situații:

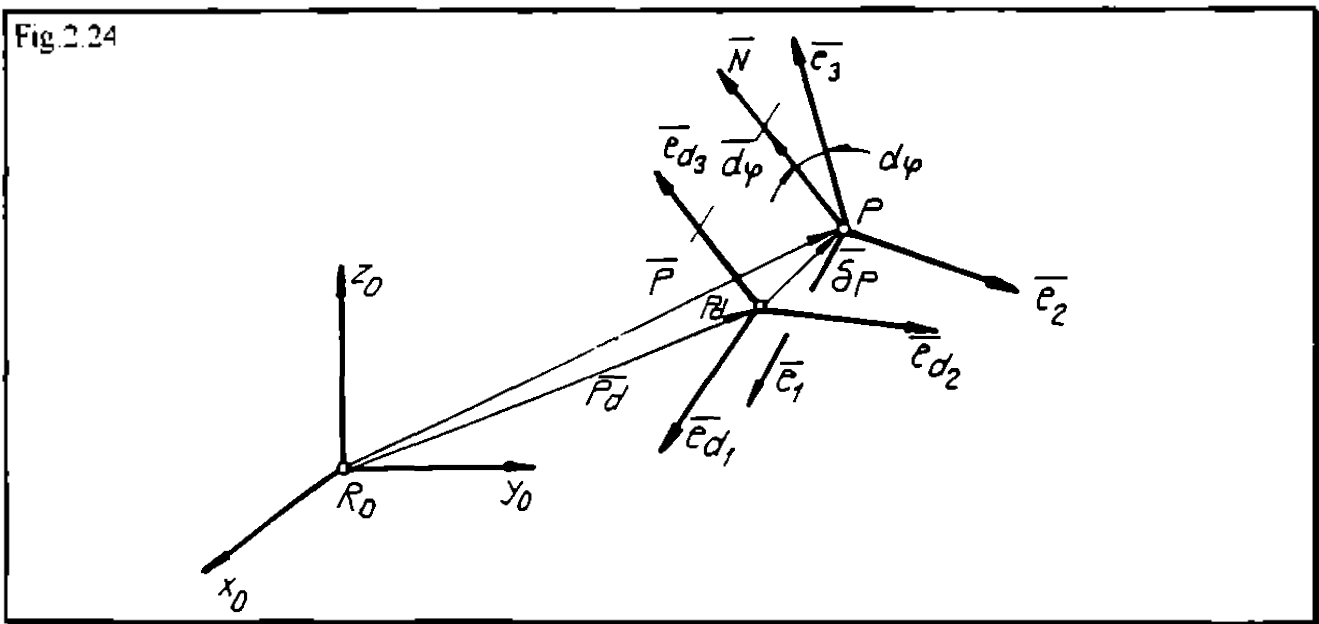
a) - proiectarea unui robot și evaluarea performanțelor sale - proiectantul de roboți poate estima exactitatea unui robot din faza de proiectare precum și influența diferiților parametri constructivi, prin calcule și simulare pe calculator. Imperfecțiunile robotului sunt simulate după principiile geometriei, mecanicii etc: abateri geometrice de construcție, jocuri mecanice, frecări, elasticitatea elementelor, deformații termice, erori de comandă etc.

b) - comanda automată - sistemul de comandă automată al R.I. trebuie să asigure, în ceea ce privește abaterile între R și R_d , reducerea, cât mai mult posibil, a acestora. Aceasta trebuie să aibă loc de manieră adaptivă, date fiind variațiile

imprevizibile ale condițiilor impuse robotului, poziție, orientare și masa obiectului manipulat, spre exemplu.

c) - **programarea robotului** - Limbajele de programare ale roboților nu țin seama de imperfecțiunile inerente fiecărui robot. Rezultă astfel o mișcare reală a E.T. care diferă de mișcarea programată, abaterile necesitând a fi compensate, ceea ce necesită evaluarea abaterilor situații dorite R_d a E.T., în timpul funcționării robotului și eventual și a altor parametri: viteze, sarcini, accelerații etc

Reperul R , legat de E.T. al robotului este specificat prin originea P și trei versori: $\bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3$. Situația dorită, R_d , este specificată prin originea reperului R_d , punctul P_d , și trei versori $\bar{e}_{d1}, \bar{e}_{d2}$ și \bar{e}_{d3} . (fig. 2.24).



Se consideră că abaterea de situație este descrisă prin doi vectori

Primul vector exprimă abaterea de poziție :

$$\overline{\delta P} = \bar{P}_d - \bar{P} \quad (2.53),$$

Al doilea vector exprimă abaterea de orientare :

$$\overline{\delta \varphi} = \bar{N} \cdot d\varphi \quad (2.54),$$

unde φ este un unghi definit astfel încât o rotație de amplitudine $d\varphi$ în jurul versorului \bar{N} al unei direcții să aducă reperul R să aibă axele paralele cu cele ale reperului R_d . Această rotație, $\overline{\delta \varphi}$, se poate exprima în mai multe moduri (unghiurile Euler, Rodrigues-Hamilton, Tait-Bryan, cosinuși directori etc).

În general, vectorii ce descriu abaterea de situație, $\bar{\delta P}$ și $\bar{\delta \varphi}$ sunt exprimați într-un reper R_0 , legat de robot sau legat de hală (mediu, univers).

2.3.1. Exactitatea de situație statică și dinamică

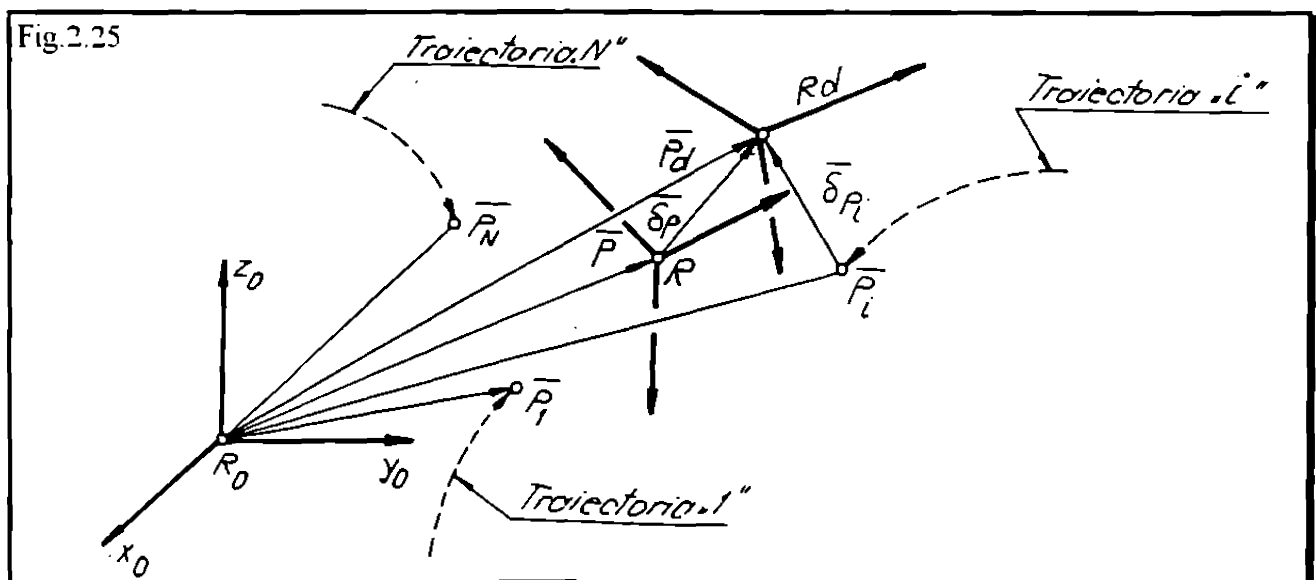
O definiție riguroasă a exactității de poziționare și orientare la nivelul terminalului robotului sau la nivelul interfeței mecanice a acestuia este dificil de realizat. Aceasta, deoarece vectorii $\bar{\delta P}$ și $\bar{\delta \varphi}$ ce descriu abaterile de situație instantanee sunt dependenți nu numai de un număr mare de parametri legați de robot (defecte geometrice, elasticități), de condițiile de lucru (temperatură, sarcină transportată) sau de vitezele instantanee corespondente, ci și de sarcina pe care o are de efectuat robotul (sudare, montaj, manipulare etc), astfel încât modul de exprimare a exactității unui robot trebuie să fie considerat în contextul aplicației particulare în care acesta este implicat.

În aprecierea exactității de situație a unui robot trebuie avute în vedere două aspecte :

- static - exactitatea de situație statică;
- dinamic - exactitatea de situație dinamică.

1. Exactitatea de situație statică

Caracterizează aptitudinea R.I. de a poziționa și orienta triedrul atașat interfeței mecanice în conformitate cu poziția și orientarea programate. Abordarea



punctului programat se face repetând fie aceeași traiectorie, fie traiectorii diferite (fig.2.25).

Exactitatea de situație se exprimă astfel:

$$\begin{aligned}\overline{\delta P} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overline{\delta P_i}, \\ \overline{\delta \varphi} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overline{\delta \varphi_i},\end{aligned}\tag{2.55},$$

$\overline{\delta P}$ exprimând abaterea de poziție și $\overline{\delta \varphi}$ abaterea de orientare.

În relația (2.55), R_d reprezintă situația dorită și R - media situațiilor efectiv realizate.

În cazul în care constructorul de roboți operează cu mai multe situații dorite: $(R_d)_i$ (cu $i=1,2,3,\dots,N'$), atunci exactitatea de poziționare se poate exprima printr-un indice de performanță global, spre exemplu :

$$\overline{\delta P} = \max_{i=1}^{N'} |\overline{\delta P_i}| \tag{2.56},$$

sau printr-o relație de forma (2.55)

$$\overline{\delta P} = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \overline{\delta P_i} \tag{2.57}.$$

Relații de tip (2.56) și (2.57) se pot stabili și pentru exactitatea de orientare:

$$\overline{\delta \varphi} = \max_{i=1}^{N'} |\overline{\delta \varphi_i}| \tag{2.58},$$

sau:

$$\overline{\delta \varphi} = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \overline{\delta \varphi_i} \tag{2.59}.$$

Dacă relațiile de tipul (2.55)-(2.59) se exprimă sub formă scalară, ele se pot utiliza în vederea unei calibrări a roboților, respectiv minimizarea erorilor de tip $\overline{\delta P}$, $\overline{\delta \varphi}$.

2. Exactitatea dinamică

Caracterizează aptitudinea unui robot de a impune punctului său caracteristic P.C., respectiv reperului R , să urmărească o traiectorie programată. Acest parametru este deci funcție de poziția considerată și de viteză. Altfel spus, este vorba de o performanță geometrică, funcțională a torsorului $[\overline{\delta P}, \overline{\delta \varphi}]$ depinzând însă de evoluția

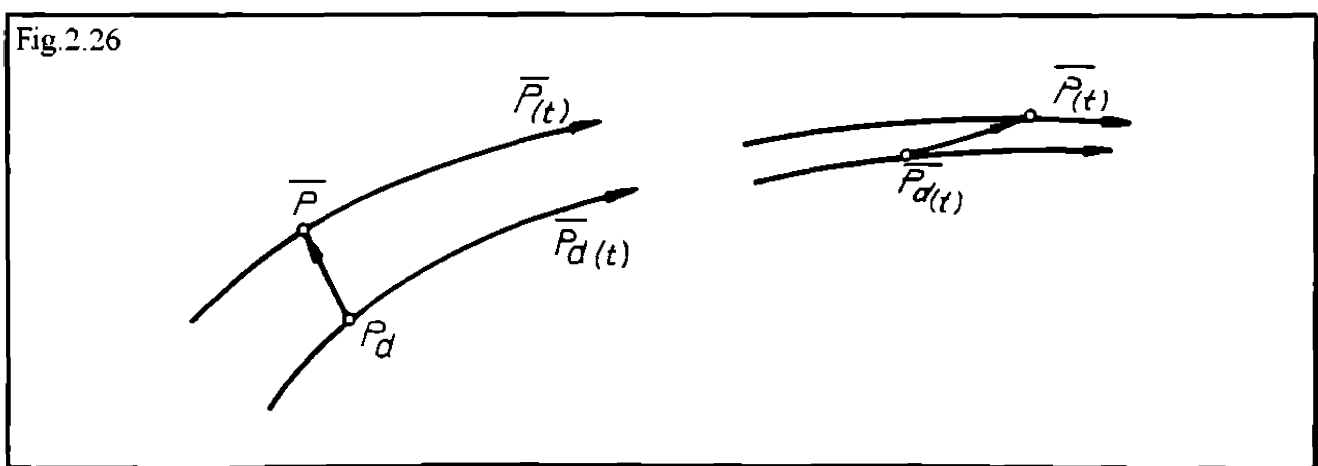
în timp a reperului dorit, deci $R_d(t)$.

Cu aceste precizări, măsurarea indicelui de performanță "dinamic", respectiv se poate efectua cu una dintre metodele generale, utilizate în statică. Măsurătorile se efectuează în lungul unor traiectorii test tipice. Aceste traiectorii sunt locurile geometrice ale lui R_d , iar traiectoriile efectiv urmărite sunt locurile geometrice ale lui R . Traiectoriile test cele mai simple sunt linii continue ale spațiului $[\bar{P}, \bar{\varphi}]$ al situațiilor posibile. Natura acestor linii și legile lor de parcurs, $R_d(t)$, sunt dependente de tipul aplicației în care este inclus robotul. Spre exemplu :

- pentru un robot de sudură prin puncte sau pentru un robot de manipulare, traiectoriile - test sunt linii frânte (constituite în general din segmente de dreaptă sau alte curbe în spațiul $[\bar{P}, \bar{\varphi}]$). Aceste linii sunt închise sau nu și constrângerile privind vitezele $|\dot{\bar{P}}, \dot{\bar{\Omega}}_d|$ sunt impuse la plecare, la sosire și în câteva puncte intermediare (viteze nule, de exemplu). Dependența globală a performanței de exactitate în relație cu viteza impusă pentru executarea unei anumite operații, se poate exprima ca o funcție de timpul de ciclu dorit. Acest parametru, timp, t , măsoară intervalul de timp între situarea inițială și situarea finală a reperului R_d ;

- pentru un robot de vopsire sau de sudare în linie, traiectoria dorită, în regim permanent, este în general o linie geometrică de continuitate ridicată: sinusoidă, elice, spirală etc, putând constitui elemente de traiectorie test.

! Fig.2.26. ilustrează acest concept de „exactitate dinamică”.



Așadar, exactitatea dinamică nu poate fi definită printr-un criteriu pur geometric, ea fiind o funcție de abaterile în lungul traiectoriei, deci de mișcarea pe traiectorie. Existența acestei abateri, eroare dinamică, determină apariția unui „trenaj”

între poziția dorită $P_d(t)$ și cea efectiv realizată $P(t)$ pe traiectorie (fig 2.26.b).

Deci, luând în considerare parametrul timp, indicele de performanță dinamică în lungul unei traiectorii test se determină la plecare (situație inițială $R(0)$), la sosire în poziția finală (situație finală $R(T)$), dar și în lungul traiectoriei impuse $R_d(t)$.

La fel ca și în cazul exactității statice, rezultatele unui test de exactitate dinamică se apreciază statistic, prin valori medii și dispersii. Este tocmai ceea ce impune normativul ISO 9283:90 - "Manipulating industrial robots - Performance criteria and related test methods", în ceea ce privește caracteristicile de poziție și caracteristicile de traiectorie.

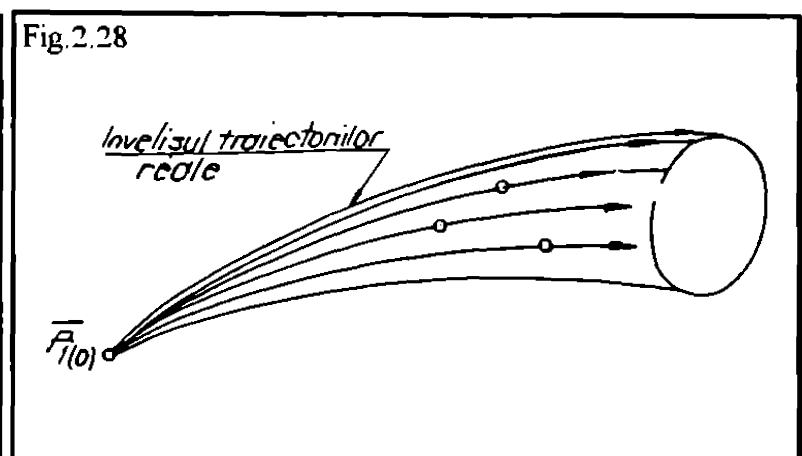
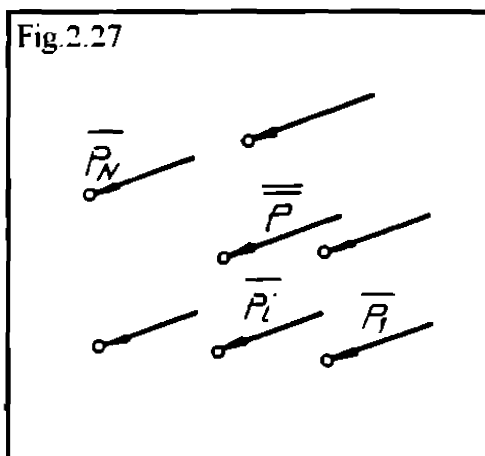
Pentru teste tip bine definite, performanțele dinamice sunt condiționate de parametrii testului: mărimea eșantionului, viteze de translație sau de rotație utilizate pentru încercări.

Exactitatea statică și dinamică sunt factori esențiali ce condiționează, în primul rând, utilizarea programării roboților în limbaje evolute, sintactice și/sau grafice.

De asemenea, pentru toate tipurile de programare, dar mai ales pentru programarea prin învățare, un alt factor de calitate important este repetabilitatea - măsură a fidelității cu care, pe parcursul unor operații repetate, robotul reproduce o poziție sau o mișcare impusă prin învățare sau programare analitică.

2.3.2. Repetabilitatea de situație statică și dinamică

Este caracterizată prin mărimea abaterilor între pozițiile și orientările triedrului efectiv atins, R , pe parcursul mai multor cicluri identice. Acest parametru de performanță se referă atât la una sau mai multe poziții din spațiul de lucru al R.I.



(repetabilitatea de situare statică - fig.2.27), cât și la una sau mai multe traiectorii test (repetabilitatea dinamică - fig.2.28).

În cele expuse anterior s-a subliniat de mai multe ori faptul că performanțele roboților - cu referire în special la exactitate și repetabilitate de situare - sunt funcție de aplicațiile în care sunt implicați aceștia. Diferitele aplicații impun constrângeri asupra geometriei robotului, volumului spațiului de lucru, sarcinii utile, accelerațiilor etc. Pe de altă parte, soluțiile tehnologice utilizate în construcția roboților (materiale alese pentru elementele structurii mecanice, toleranțe de asamblare, tipul motoarelor de acționare, a transmisiilor etc), precum și criteriile economice impun dependența performanțelor roboților de aplicațiile în care sunt utilizați.

Procesele robotizate realizează performanțe deosebite în situația în care se asigură o compatibilitate maximă între procesul propriu-zis și calitățile robotului implementat. O optimizare a acestui proces trebuie să aibă în vedere o analiză a tuturor factorilor implicați în realizarea unui ansamblu proces de lucru - robot, urmărindu-se unele aspecte specifice, cum sunt:

- analiza caracteristicilor de lucru;
- analiza metodelor de lucru;
- desemnarea spațiului de lucru;
- măsurarea performanțelor;
- integrarea ergonomică om - robot.

2.4.Procedee de încercare a roboților industriali

2.4.1 Generalități. Recomandări privind efectuarea încercărilor

Măsurarea abaterilor de situare constituie una dintre componentele evaluării performanțelor roboților industriali.

Un robot poate fi considerat ca fiind „un generator de situare”, un „generator de mișcare”, un „generator de forță”.

Dacă se analizează multitudinea de caracteristici de performanță ce se cer a fi analizate unui robot industrial (tabelul 2.1), se constată că, cvasimajoritatea acestora (exactitatea și repetabilitatea de situare, exactitatea de situare multidirecțională, exactitatea și repetabilitatea distanței, deriva exactității de

poziție, exactitatea și repetabilitatea traiectoriei, eroare de racordare) se reduce, în ultimă instanță, la aspecte de situare (poziționare și orientare). Ca urmare, un studiu aprofundat asupra caracteristicilor de situare ale R.I., rezolvă o multitudine de aspecte legate de caracterizarea performanțelor acestora, motiv pentru care, în continuare se pune accent pe problema de situare (poziționare și orientare).

Așadar în cele ce urmează, se vor lua în considerare doar performanțele geometrice, adică aspectele de "generator de situare" al robotului.

Pentru ca măsurătorile să fie semnificative, este necesar să se efectueze un număr mare de testări implicând situații diverse. Mai mult, cum performanțele depind de caracteristicile efectorului terminal cuplat la brațul robotului (inclusiv sarcina manipulată, dacă este cazul) este de dorit ca testările să se efectueze pentru mai multe condiții de încărcare.

De asemenea, performanțele vizând precizia roboților sunt influențate de alte numeroase condiții de funcționare: temperatura ambiantă, temperatura și natura fluidului la motoarele hidraulice, tensiunea de alimentare etc. Pentru a ține seama de toți acești parametri, se recomandă efectuarea măsurătorilor în regim permanent stabil, determinat cu traductoare și senzori de temperatură, presiune, tensiune etc, de precizie ridicată. Este de dorit ca această stare de regim stabil să fie cât mai apropiată de starea de utilizare în condiții normale a robotului considerat.

Una dintre principalele dificultăți în caracterizarea performanțelor roboților industriali este exprimarea acelor caracteristici dependente de:

- sarcina aplicată interfeței mecanice a robotului;
- de viteza programată pe fiecare axă a robotului;
- de localizarea poziției de încercare în spațiul de lucru al robotului;
- de traiectoria de apropiere de poziția de încercare în cazul măsurării caracteristicilor de situare;
- de localizarea în spațiul de lucru al robotului a traiectoriei de încercare în cazul măsurării caracteristicilor de traiectorie.

Este de asemenea necesar de stabilit un compromis între relevanța informației cercetate și efortul obținerii acesteia, respectiv între numărul de încercări și costul acestora. Spre exemplu, pentru a determina repetabilitatea de situare a unui robot, care este o caracteristică foarte importantă, se poate efectua un număr mare de încercări în diferite poziții ale spațiului de lucru, dar costul obținerii

acestor informații poate fi foarte ridicat.

Așadar, având în vedere aspectul economic un robot nu poate fi încercat în toate configurațiile posibile, ci trebuie găsit un compromis în alegerea acestora

În acest sens, normativul ISO 9283:90, stipulează un ansamblu de încercări reprezentative aplicațiilor cele mai curențe ale roboților industriali. Numărul de încercări propuse ia în considerare aspectul economic privind costul acestor încercări.

Cu privire la mărimea sarcinii aplicate interfeței mecanice, se recomandă ca toate încercările să se realizeze la 100% din condițiile de încărcare nominală (masă, centru de greutate, moment de inerție), respectând eventualele recomandări ale constructorului de roboți.

Pentru caracterizarea roboților a căror performanțe depind de încărcare, încercări complementare facultative se pot efectua și pentru mase reprezentând 50% din cea corespunzătoare sarcinii nominale (tabelul 2.1).

Tabelul 2.1

Sarcina Caracteristică utilizată de încercat	100% din sarcina nominală (x-oblig.)	50% din sarcina nominală (0-facult.)
Exactitate și repet. de situare	x	0
Exact. de situare multidirecțională	x	0
Exact. și repetabilitatea distanței	x	–
Timp de stabilizare a poziției	x	0
Depășirea poziției	x	0
Deriva exactit. de poziție	x	–
Exact. și repetab. traiectoriei	x	0
Eroare de racordare	x	–
Exact și repetab. vitezei pe traiect.	x	0
Fluctuația vitezei pe traiectorie	x	0
Timp de deplasare minimal	x	0
Complianța statică	–	x

Referitor la vitezele de încercare, caracteristicile de situare vor fi testate la viteza maximă ce poate fi atinsă între pozițiile specificate, adică 100% din viteza nominală. Încercări suplimentare pot fi efectuate și la viteze reprezentând 50% sau 20% / 10% din viteza nominală (tabelul 2.2). Pentru caracteristicile de traiectorie

încercările vor fi efectuate la 100%, 50% și 10% din viteza nominală pe traiectorie (tabelul 2.3). Robotul trebuie să atingă viteza nominală la mai puțin de 50% din lungimea traiectoriei.

Tabelul 2.2

Viteză Caract. de încercat	100% din viteza nominală (x-oblig.)	20% sau 10% din viteza nom. (0-facult.)
Exact. și repet. de situare	x	0
Exact. de situare multidirecțională	x	0
Exact. și repetabilit. distanței	x	0
Timp de stabilizare a poziției	x	0
Depășirea poziției	x	0
Deriva exactității de poziționare	x	-
Timp de deplasare minimal	x	0

Tabelul 2.3

viteză pe caract. de încercat	100% din viteza (x-oblig)	50% din viteza (x-oblig)	10% din viteza nominală (x-oblig)
viteză pe traiect. de încercat Exact. și repetab. traiectoriei	x	x	x
Eroare de racordare	x	x	x
Exactitatea și repetabilit. vitezei pe traiectorie	x	x	x
Fluctuația vitezei pe traiectorie	x	x	x

2.4.2. Definirea pozițiilor și traiectoriilor de încercare în spațiul de lucru al robotului industrial

Alegerea pozițiilor de încercare și a traiectoriilor de încercare constituie o dificultate reală întrucât morfologia robotului are o influență importantă asupra performanțelor. Se au în vedere următoarele considerente:

– număr de poziții suficient de reprezentativ pentru volumul de lucru și zona în care se efectuează aplicațiile, dar nu prea ridicat. Se recomandă nu mai mult de

cinci poziții pentru testarea caracteristicilor de poziție:

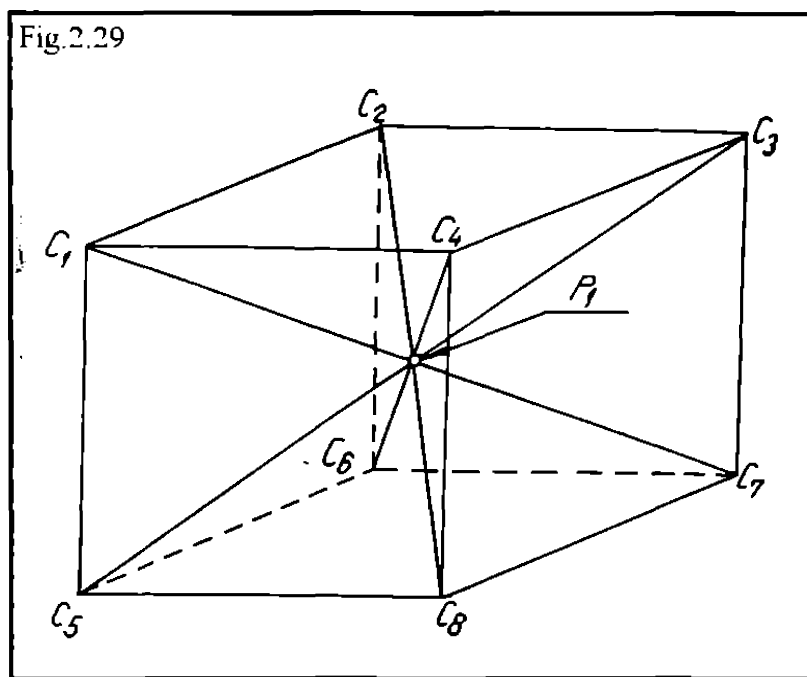
– găsirea unor modalități de definire a pozițiilor de încercare convenabile tuturor structurilor morfologice de roboți.

Se adoptă principiul de a repartiza cele cinci poziții de încercare pe un plan situat în interiorul unui cub înscris în spațiul de lucru, în zona cea mai utilizată a acestuia. Cu ajutorul acestui cub imaginar se pot defini și traiectoriile de încercare

Pentru cazul roboților care au deplasarea în lungul unei axe neglijabilă în raport cu celelalte, cubul fictiv poate fi înlocuit cu un paralelipiped fictiv. Spre exemplu, în cazul unui robot SCARA, cursa în lungul ultimei axe verticale este în general mică, astfel încât se recomandă utilizarea unui paralelipiped.

2.4.2.1. Poziționarea cubului în spațiul de lucru

Cubul trebuie să fie ales în porțiunea de spațiu de lucru cea mai susceptibilă a fi utilizată în aplicația robotizată. Cubul trebuie să aibă cel mai mare volum posibil,



muchiile sale fiind paralele cu axele sistemului de coordonate de bază. Se notează centrul cubului cu P_1 , iar colțurile sale cu C_1, C_2, \dots, C_8 (fig 2.29).

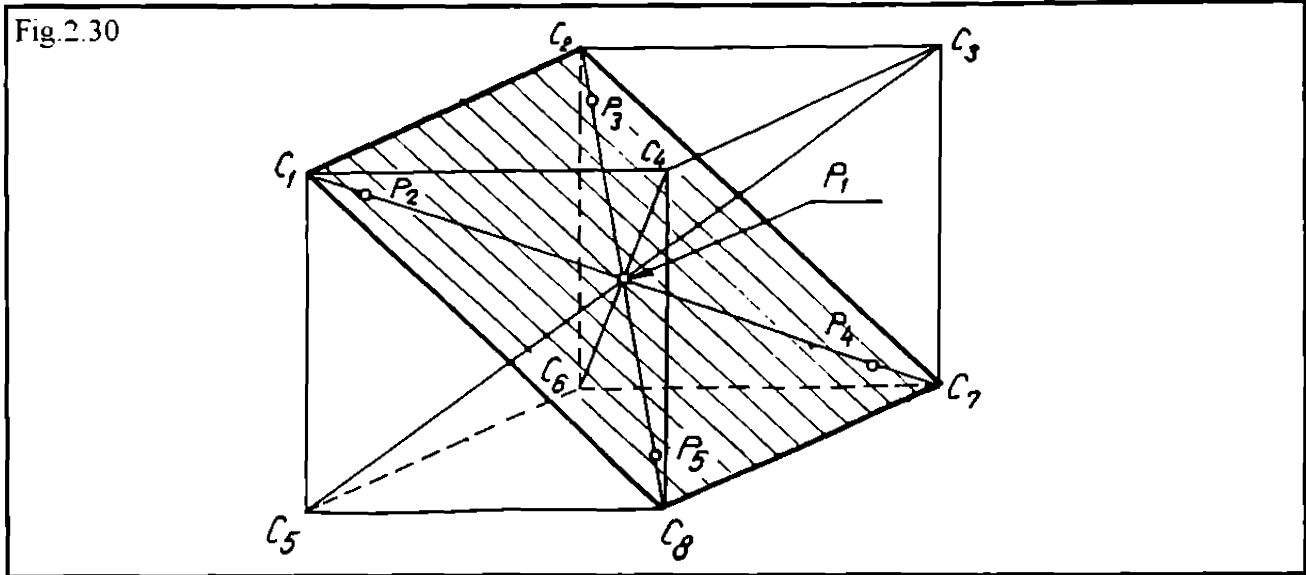
Patru plane pot fi utilizate pentru definirea pozițiilor de încercare:

- varianta 1: $C_1-C_2-C_7-C_8$
- varianta 2: $C_2-C_3-C_8-C_5$
- varianta 3: $C_5-C_4-C_5-C_6$
- varianta 4: $C_4-C_1-C_6-C_7$

2.4.2.2. Definirea pozițiilor de încercare pentru măsurarea caracteristicilor de poziție

Cele 5 poziții de încercare se află poziționate pe diagonalele planului ales. Poziția P_1 este situată la intersecția diagonalelor (centrul cubului). Pozițiile P_2, P_3

sunt situate la o distanță de vârfurile cubului egală cu $(10 \pm 2) \%$ din lungimea diagonalei (fig.2.30). Se recomandă în normativul ISO 9283:90 utilizarea pozițiilor indicate în tabelul 2.4.



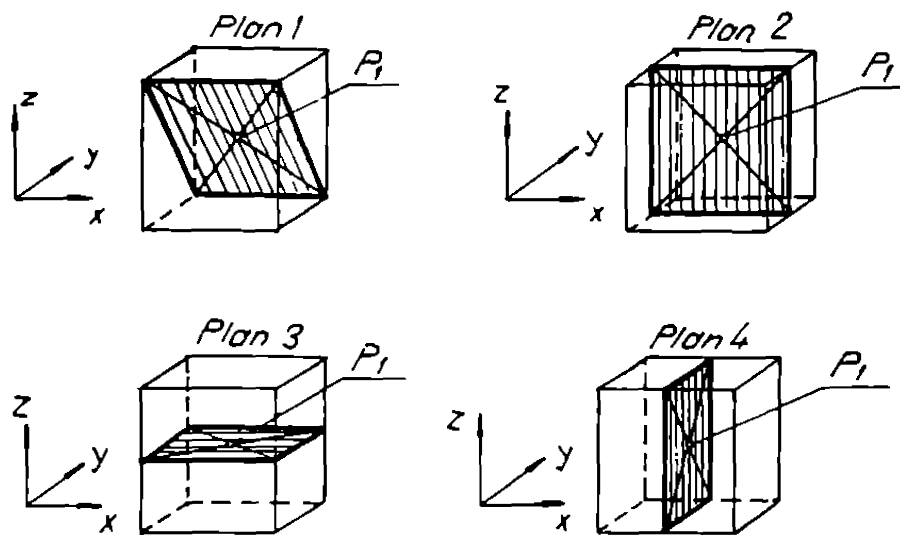
Tabelul 2.4.

Poziții	P1	P2	P3	P4	P5
Caract. de încercat					
Exact și repet. de sit. unidirecțională	x	x	x	x	x
Var. exact de situare multidirecțională	x	x	-	x	-
Exact și repet. distanței	-	x	-	x	-
Timp de stabilizare a poziției	x	x	x	x	x
Depășirea poziției	x	x	x	x	x
Deriva caracteristicilor de poziție	x	-	-	-	-

2.4.2.3. Localizarea traiectoriilor de încercare

Trajectoriile de încercare utilizate pentru măsurarea caracteristicilor de traiectorie vor fi situate într-unul din cele patru plane definite în fig.2.31. Pentru roboți cu 6 axe, se recomandă utilizarea planului 1. În timpul efectuării măsurătorilor pe traiectorie, centrul interfeței mecanice se va situa în centrul planului ales, iar orientarea sa va rămâne constantă în raport cu acest plan.

Fig.2.31



a) Traiectorie liniară

Pentru traiectoriile liniare, se alege una din diagonalele planului, lungimea traiectoriei fiind egală cu 80% din lungimea diagonalei (ex: P_2-P_4 în fig.2.30).

b) Traiectorie circulară

Se testează două traiectorii – cerc diferite: un cerc mare, cel mai mare posibil de înscris în planul ales, având diametrul cel puțin egal cu 80% din lungimea laturii cubului cu centrul în P_1 ; un cerc mic, cu centrul în P_1 și de diametru egal cu 10% din diametrul cercului mare, sau egal cu 20 mm.

c) Traiectorie rectangulară

Trece prin punctele P_1 , P_2 , P_3 și P_4 și este utilizată pentru evaluarea erorilor de racordare (depășiri și rotunjiri), astfel încât traiectoria comandată este alcătuită din două drepte perpendiculare.

2.4.3. Clasificarea metodelor de măsurare a exactității și/ /sau repetabilității de situare la roboți industriali

2.4.3.1. Criterii generale pentru alegerea unei aparaturi de încercare

Măsurarea caracteristicilor roboților ridică o mulțime de probleme specifice:

– metoda de măsurare trebuie să permită obținerea poziționării și orientării interfeței mecanice a robotului, ceea ce înseamnă 3 coordonate (x, y, z) și 3 unghiuri (λ, φ, θ sau a, b, c);

- este preferabil să se utilizeze metode fără contact, pentru a nu introduce eforturi asupra roboților;
- incertitudinea de măsurare trebuie să fie compatibilă cu caracteristicile robotului; se admite ca incertitudinea de măsurare să fie $i \leq \pm \frac{RP}{4}$, RP fiind repetabilitatea de situație;
- instrumentele alese trebuie să permită măsurarea caracteristicilor într-un interval de timp scurt, deci să fie rapide.

2.4.3.2. Clasificarea metodelor de măsurare

În clasificarea metodelor de măsurare trebuie luate în considerare următoarele aspecte:

a) Măsurările pot fi absolute sau relative. În primul caz se determină situația într-un reper unic, de referință R_0 . În al doilea caz se determină situațiile E.T. al R.I., sau abaterile de situație, în mai multe repere, ale căror situații, în raport cu R_0 sunt cunoscute. Se menționează faptul că R_0 reprezintă reperul de referință legat de baza robotului sau de mediu;

b) Măsurările absolute pot fi făcute „prin comparare” sau direct. În primul caz, un generator de situație „etalon” (mașină de măsurat tridimensională sau „robot de măsurare”) este utilizat. Terminalul acestui etalon este deplasat în conformitate cu E.T. al R.I., astfel încât să se permită, printr-un algoritm de calcul adecvat, determinarea situației acestuia din urmă;

c) Măsurările se pot face cu contact sau fără contact între terminalul robotului și mijlocul de măsurare. În primul caz se utilizează captori de tip palpatoare sau microîntrerupătoare. În al doilea caz, se pot utiliza diverse metode: inerțiale – măsurarea poziției și orientării cu accelerometre amplasate pe E.T., unde acustice, fascicul laser, senzori de proximitate etc.

d) Aparatura de măsurare poate fi: complet „îmbarcată” pe terminalul robotului analizat, complet legată de mediu sau repartizată pe ambele subsansamble (emițător-receptor).

În cele ce urmează, se încearcă o clasificare a acestor metode, ținând seama de considerațiile anterioare luând în considerare două criterii:

- 1) - caracteristicile măsurate,
- 2) - principiul de măsurare.

Caracteristicile măsurate pot fi grupate în două categorii:

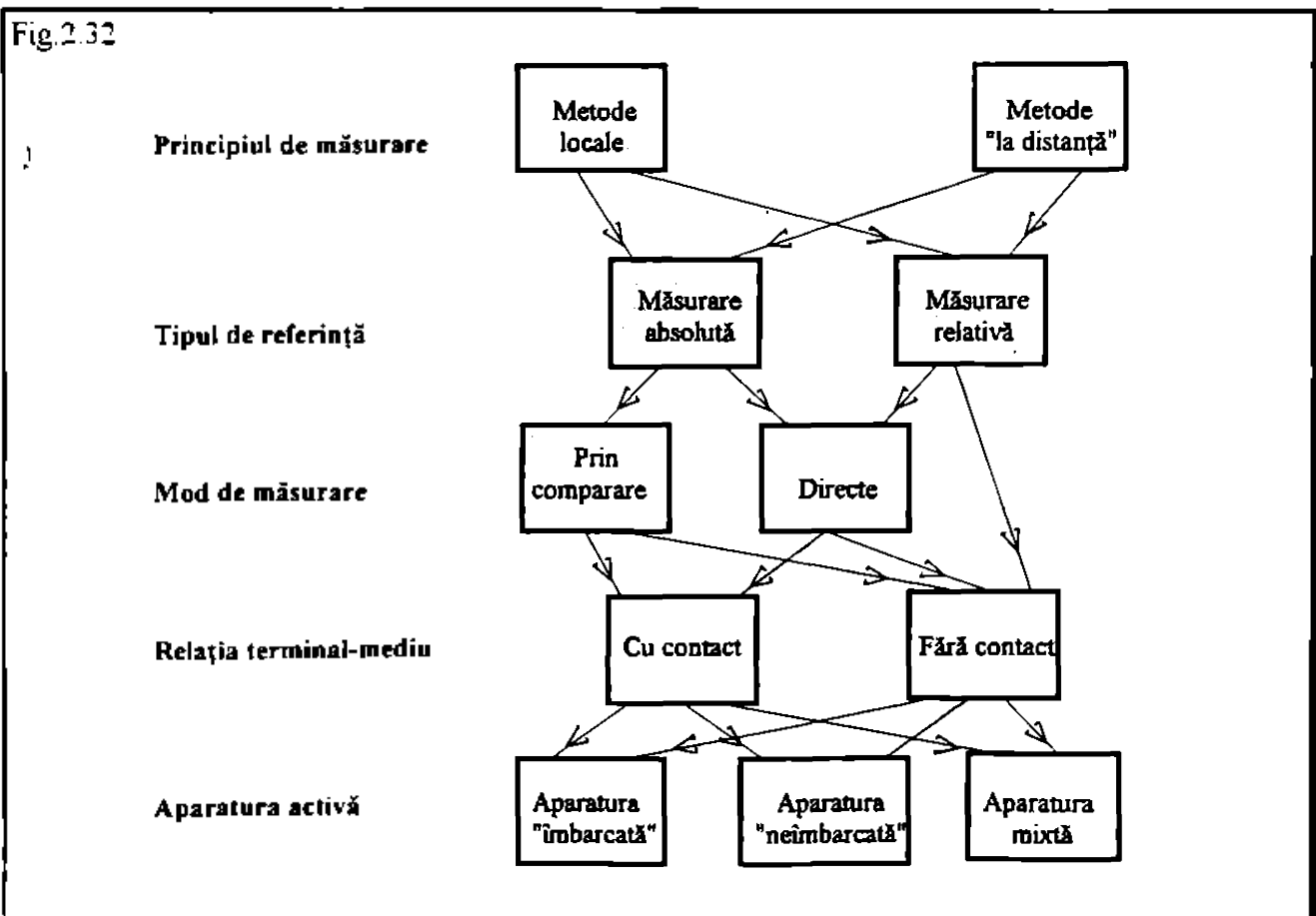
- a) caracteristici de poziție (situație);
- b) caracteristici de traiectorie.

După principiul de măsurare se pot distinge două grupe:

a) - metode locale - se caracterizează prin aceea că determinarea caracteristicilor de situație și/sau de traiectorie se realizează prin măsurarea unor distanțe mici (câțiva mm.) între un corp de probă (sferă calibrată sau cub calibrat) și un terminal de măsurare (cap de măsurare). Cele două componente ale aparaturii de măsurare se amplasează, unul peste interfața mecanică a R.I., celălalt într-o poziție bine determinată în spațiul de lucru al R.I.;

b) - metode „la distanță” - se caracterizează prin aceea că dispozitivul (aparatura) de măsurare se amplasează la distanță de E.T. al R.I. (câțiva metri) și, prin urmare, algoritmi de calcul aferenți acestor metode se bazează pe calcule de triangulație.

În figura 2.32. se prezintă o clasificare sintetică a acestor metode.



2.4.4. Exigențe impuse procedeeilor de măsurare

Indiferent de tipul metodei adoptate, se impune rezolvarea câtorva aspecte:

- materializarea referințelor (de tip R_D , R_d , R);
- utilizarea unor mijloace informatice (calculatoare) performante pentru prelucrarea informațiilor;
- utilizarea unor captori de înaltă calitate: precizie, liniaritate etc.

În fine, metodele de măsurare însăși nu trebuie să introducă erori semnificative: spre exemplu, determinarea unui plan prin coordonatele a trei puncte nu este corectă dacă punctele sunt aliniate.

De asemenea, aparatura utilizată nu trebuie să perturbe funcționarea robotului, exercitând asupra lui forțe necontrolate sau incomodându-i mișcările în spațiul de lucru.

2.4.5. Exemple de metode –test utilizate pentru determinarea performanțelor roboților industriali.

În cele ce urmează se prezintă câteva metode de testare a performanțelor roboților industriali, puse la punct sau aflate în fază de experimentare la diverse întreprinderi sau institute de cercetare cu preocupări în acest sens.

2.4.5.1. Metode–test locale

1. Sistem de măsurare a caracteristicilor de situație dezvoltat de L.N.E (Laboratoire Nationale d'essais) Franța

a) Principiul de măsurare. Instrumentația de măsurare este constituită dintr-un lot de cuburi (calibrate), trei sau cinci, de exemplu, fiecare cub este montat pe un suport cu 6 grade de libertate (3 rotații și 3 translații) permițând poziționarea și orientarea cubului în spațiul de lucru al robotului. Suportul este prevăzut cu un sistem de blocare a cubului în poziția dorită.

Un terminal de măsurare (cap de măsurare) este fixat pe interfața mecanică a R I. Acest terminal este constituit dintr-un triedru echipat cu trei captori (senzori)

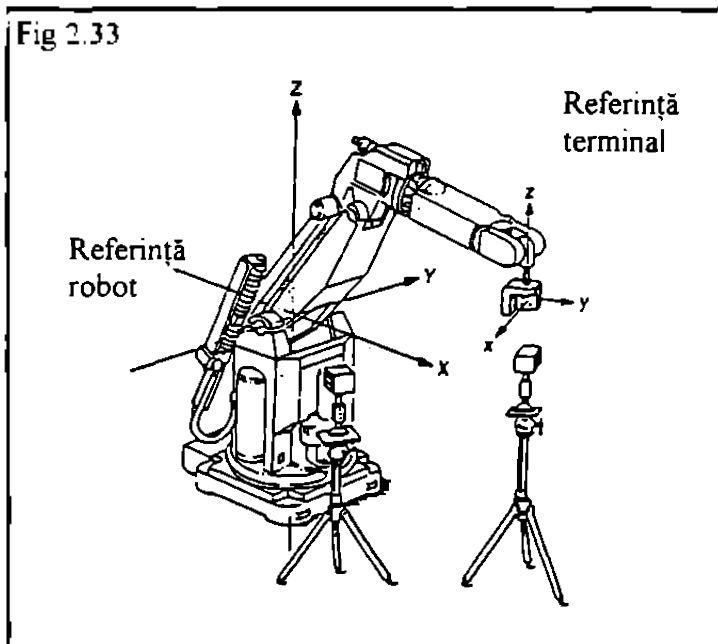
de proximitate pe fiecare dintre cele trei fețe ale sale. Robotul este programat să poziționeze și să orienteze, la capătul fiecărei traiectorii, terminalul de măsurare pe fiecare cub. Două faze distincte sunt necesare pentru efectuarea unei măsurători de situație a unui robot:

- învățarea poziției comandate și măsurarea prin terminal (punere la zero);
- lansarea robotului în poziția comandată și măsurarea prin terminal a abaterilor față de poziția "zero" (identificarea poziției efectiv atinse).

Determinarea distanțelor între terminal și fețele fiecărui cub permite determinarea situației efective a terminalului în raport cu poziția comandată, servind ca referință. Controlul repetabilității, exactității multidirecționale, unidirecționale, timpului de stabilizare a R. I., urmând această metodă, nu necesită cunoașterea poziției și orientării fiecărui cub de manieră absolută (fig. 2.33).

b) Terminalul de măsurare (cap de măsurare)

Este un triedru constituit din 3 plăci, asamblate perpendicular între ele, pentru a forma un "contracub". Se recomandă confecționarea triedrului dintr-un material ușor (Al). Pe una dintre plăci este fixat un dispozitiv de cuplare la robot. Fiecare măsurătoare permite determinarea ecuațiilor a trei plane. Spre exemplu, având coordonatele a trei puncte din fiecare plan, se pot scrie ecuațiile celor 3 plane, prin intersectarea celor trei plane se definesc coordonatele unui punct (punctul caracteristic, P.C. al robotului), rezolvându-se aspectul privitor la poziționare.



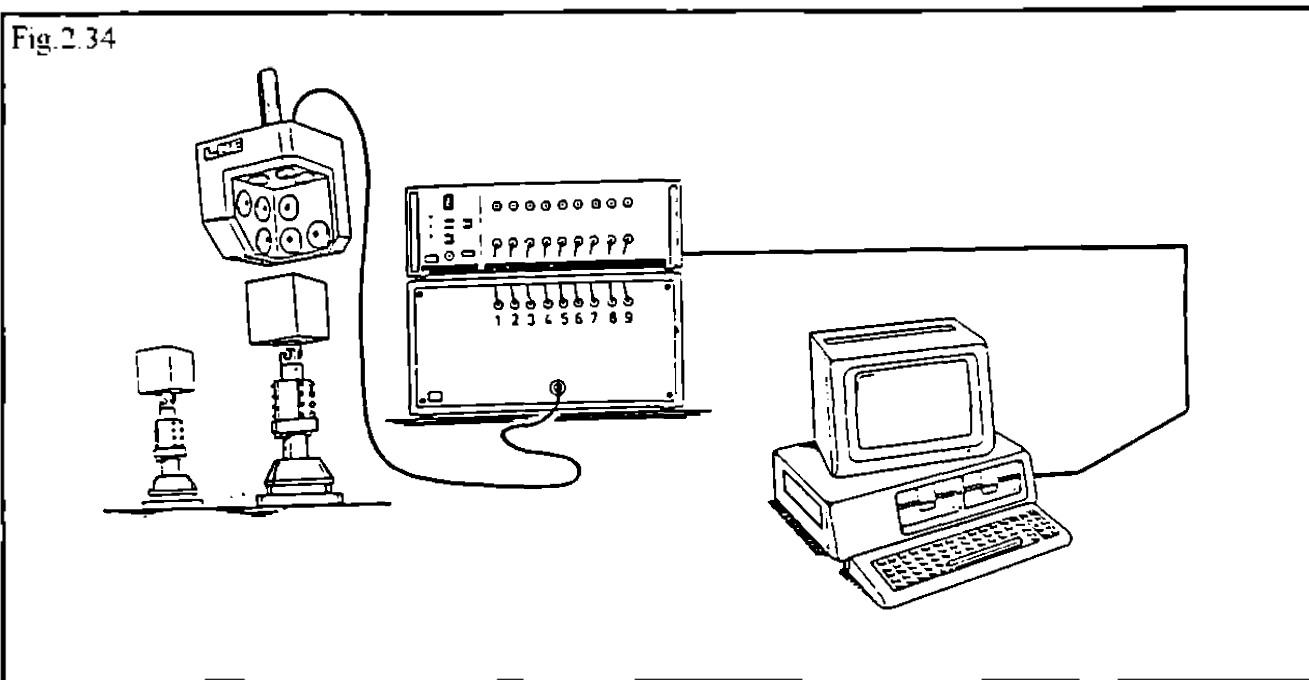
Ecuțiile celor trei plane permit cunoașterea, de asemenea a cosinurilor directori ai celor trei normale, care exprimă orientarea terminalului.

Alegerea numărului de captori (9, după alți autori 6), este determinată de următoarele considerente:

- algoritmul de calcul cel mai simplu,
- soluția utilizând 9 captori

nu necesită introducerea ipotezei de perpendicularitate a fețelor cubului

c) Sistemul de achiziționare de date.

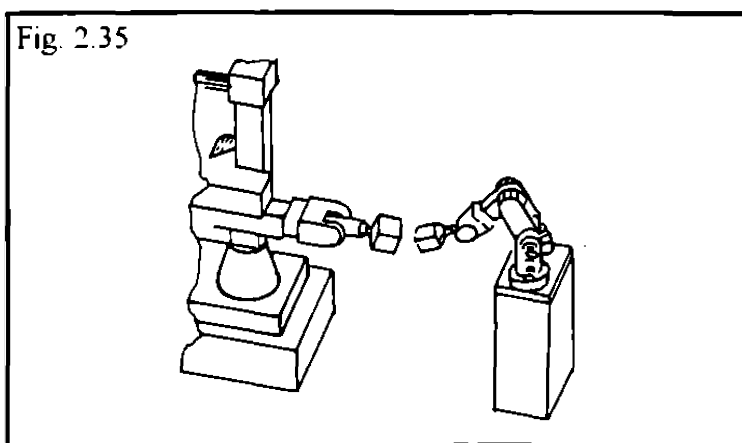


Acesta este o interfață având 14 intrări și 14 ieșiri (14 canale): 9 pentru captori de deplasare și 5 auxiliare pentru măsurarea simultană a altor mărimi (temperatură, forțe etc), precum și un calculator pentru prelucrarea automată a datelor conform algoritmului acceptat (fig 2.34).

2. Sisteme de măsurare utilizând un "robot de măsurare" dezvoltat de I.P.A (Institute für Produktions Technik Automatisierung-Stuttgart)

Se utilizează pentru determinarea caracteristicilor de poziționare și orientare. Robotul este echipat cu un cub calibrat (corp de probă), uzinat cu precizie ridicată

Fig. 2.35



(fig 2.35). „Robotul de măsurare” este o mașină de măsurat în coordonate, dotată cu un cap de măsurare echipat cu senzori fără contact (inductivi). Acest terminal de măsurare este montat printr-o articulație cardanică, cu posibilitate de blocare în poziția dorită,

putând fi orientat de manieră foarte precisă. Metoda utilizată este absolută, prin comparare, fără contact. Avantajele non-contactului sunt evidente:

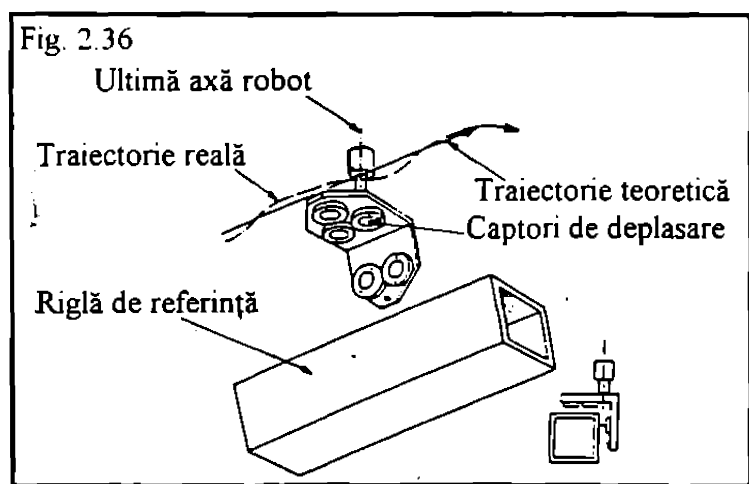
- pentru măsurarea exactității statice, este posibilă explorarea rapidă a unui mare număr de situații, prin deplasarea terminalului robotului și cel al mașinii de măsurat în coordonate;

- pentru măsurarea repetabilității statice în fiecare situație examinată, situarea „robotului de măsurare” neputând fi modificată, se asigură o marjă de siguranță în vederea evitării coliziunii între capul de măsurare și cub.

3. Sistem de măsurare a caracteristicilor de traiectorie, dezvoltat de L.N.E-Franța

Se utilizează pentru măsurarea:

- exactității și repetabilității traiectoriei;
- exactității și repetabilității vitezei pe traiectorie;
- fluctuației vitezei pe traiectorie. (fig.2.36).



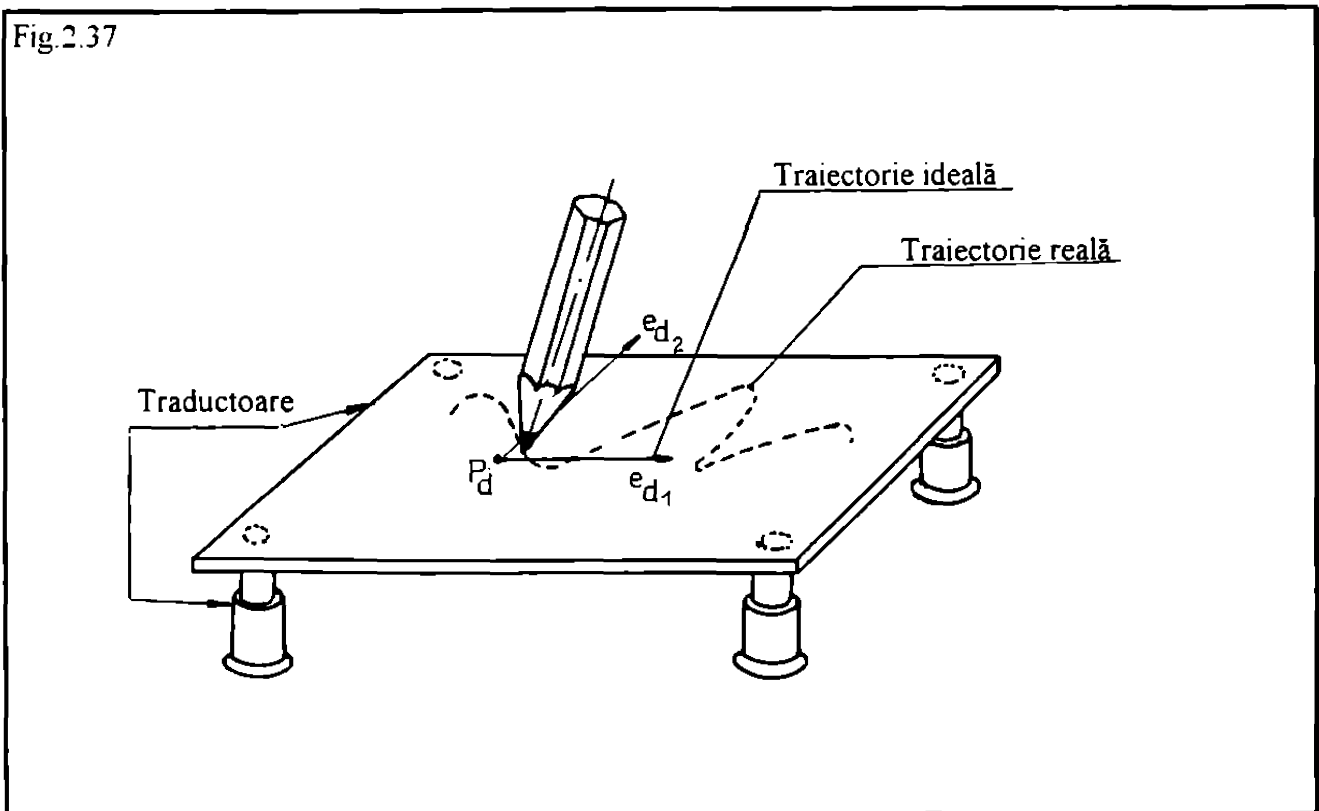
a) **Principiul de măsurare:** robotul este echipat cu un terminal de măsurare sub forma unui diedru echipat cu 5 captori de deplasare, fără contact (3 pe o față a diedrului, 2 pe cealaltă față); se comandă robotul să urmărească o traiectorie ideală (dorită, locul geometric al

reperului R_d), materializată printr-o riglă sau un inel circular. Măsurarea distanțelor între robot și traiectoria materializată permit evaluarea diferitelor caracteristici.

b) **Realizarea instrumentației;** se utilizează de obicei senzori capacitivi, cu rezoluție ridicată (0.5–20 μm). Un senzor optic permite declanșarea citirii la trecerea terminalului de măsurare purtat de robot în dreptul reperelor gravate pe riglă. Echipamentul de achiziționare și prelucrare de date este identic celui folosit la caracteristicile de situație.

4. Metodă de măsurare a caracteristicilor de traiectorie, utilizând o platformă electro-dinamometrică.

Este propusă de L'Unité de Recherche de Biomécanique de l'I.N.S.E.R.M. (Institut National de la Santé et la Recherche Médicale), prin extrapolarea referințelor biologice celor ale roboților.



Sistemul de măsurare constă dintr-o platformă dinamometrică plană, care măsoară în fiecare moment, coordonatele punctului de aplicație a forței exercitate de un robot deplasând pe suprafața sa, extremitatea sferică a unei tije, (fig. 2.37).

Traectoria plană parcursă poate fi oarecare, materializată prin desenarea unei linii. Platforma, a cărei suprafață utilă ocupă un pătrat cu latura de 0.4 m, este alcătuită dintr-o placă rigidă așezată pe patru captori de forță complianți speciali, utilizând curenți Foucault.

Metoda utilizată are inconvenientul limitării vitezei de deplasare a palpatorului (sub 1.2 m/s), în vederea evitării apariției vibrațiilor platformei, datorită frecării. De asemenea asigurarea orizontalității platformei poate constitui un inconvenient.

2.4.5.2. Metode-test "la distanță"

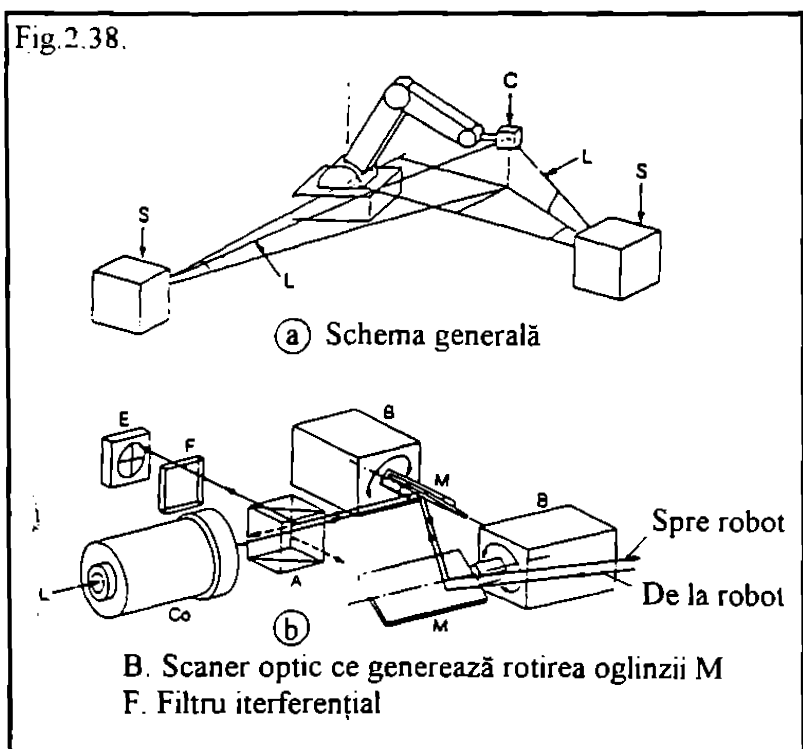
1. Sistem de măsurare cu baleiaj laser

(în dezvoltare la Universitatea Surrey)

Se utilizează pentru determinarea caracteristicilor de situare.

Sistemul de măsurare (fig 2.38) se bazează pe utilizarea unei metode de triangulație optică a fascicolului laser. Sistemul comportă două stații de măsurare S, amplasate în interiorul volumului spațiului de lucru al robotului. Fiecare dintre cele două stații S emite un fascicol laser, care urmărește o țintă C, fixată pe interfața mecanică a robotului; cunoașterea unghiurilor fascicolului laser în cele

Fig.2.38.



două referințe legate de fiecare dintre cele două stații permite calcularea poziției țintei fixate pe robot.

Fiecare dintre cele două stații (fig.2.38.b) comportă un fascicol laser și un colimator. Reflexia fascicolului laser este provocată de două oglinzi rotative, M, având axele perpendiculare.

Fascicolul astfel orientat este emis de stațiile S,

apoi reflectat de ținta C, fixată pe interfața mecanică a robotului. Diferite dispozitive țintă pot fi utilizate, cu condiția ca fascicolul laser să fie reemis în aceeași direcție ca și fascicolul incident (colț de cub, dispozitiv ochi de pisică). Fascicolul retur parcurge același drum optic ca și fascicolul incident. Cu ajutorul unui cub separator, A (prismă), el este apoi trimis spre un dispozitiv de înregistrare, E. Indicațiile acestuia sunt folosite ca semnale de eroare pentru poziționarea oglinzilor astfel încât să permită fascicolului laser să urmărească oglinda mobilă.

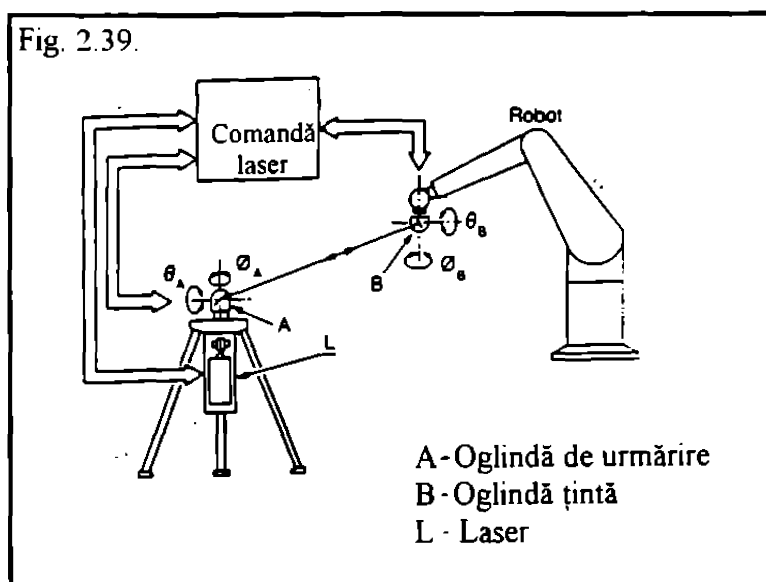
Măsurarea unghiurilor de rotație a celor două oglinzi permit, printr-un algoritm adecvat, determinarea situației țintei C, într-un sistem de referință legat de

una din cele două substații.

2. Sistem de măsurare cu interferometrie laser, dezvoltat de N.B.S (National Bureau of Standards) Marea Britanie

Se utilizează pentru determinarea caracteristicilor de situare

Sistemul de măsurare se bazează pe un dispozitiv de măsurare în coordonate

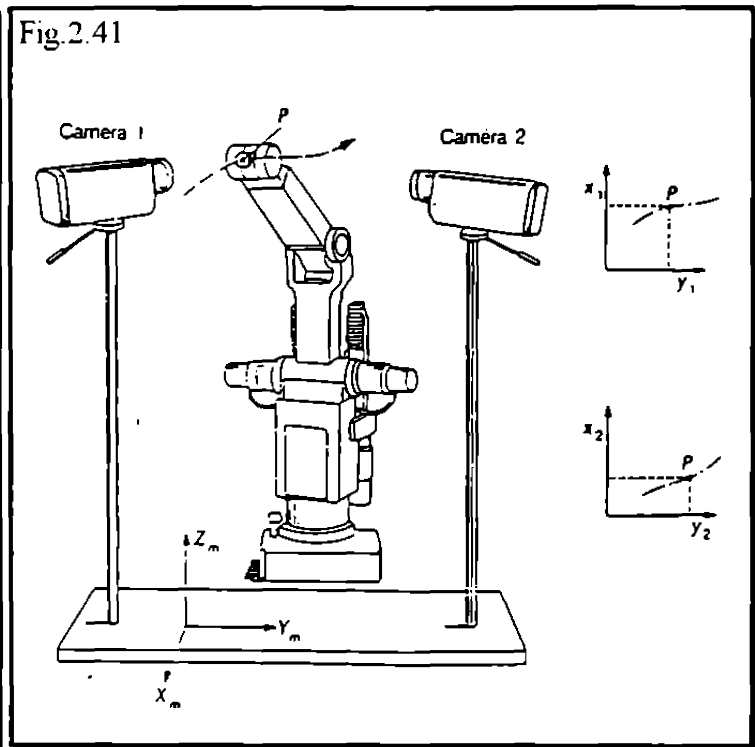
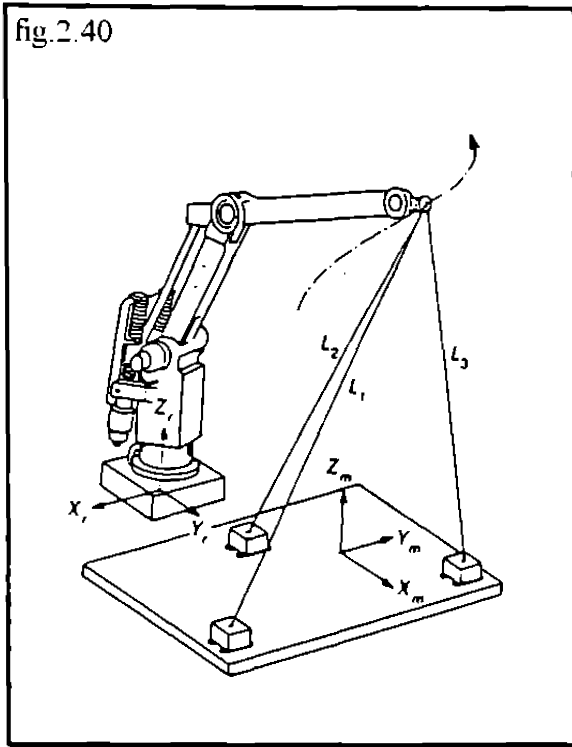


sferice. Cunoașterea direcției fascicolului laser (definit prin două unghiuri θ și φ) și a distanței între dispozitivul de măsurare și terminalul robotului, distanță măsurată prin interferometrie laser, permite determinarea poziției interfeței mecanice a R.I. în spațiul de lucru. Un sistem țintă orientabil, fixat pe robot

permite determinarea poziției interfeței mecanice a acestuia (fig. 2.39).

3. Sistem de măsurare cu traductori cu fir, dezvoltat la societatea "Peugeot-SA"

Sistemul de măsurare (fig. 2.40.) este alcătuit din trei captori (traductori) potențiometrice cu fir. Fiecare din acești captori este alcătuit dintr-un tambur pe care se înfășoară un fir, legat de interfața mecanică a robotului. Un potențiomtru cuplat la un tambur emite un semnal proporțional cu lungimea firului derulat. Firul se poate reînfășura printr-un sistem cu arc. Cele trei semnale ale celor trei potențiometre permit determinarea lungimilor L_1 , L_2 și L_3 până la interfața mecanică, prin intersecția acestora determinându-se poziția interfeței mecanice. Acest sistem permite doar măsurători privind poziționarea interfeței mecanice a R.I., nu și orientarea acestuia.



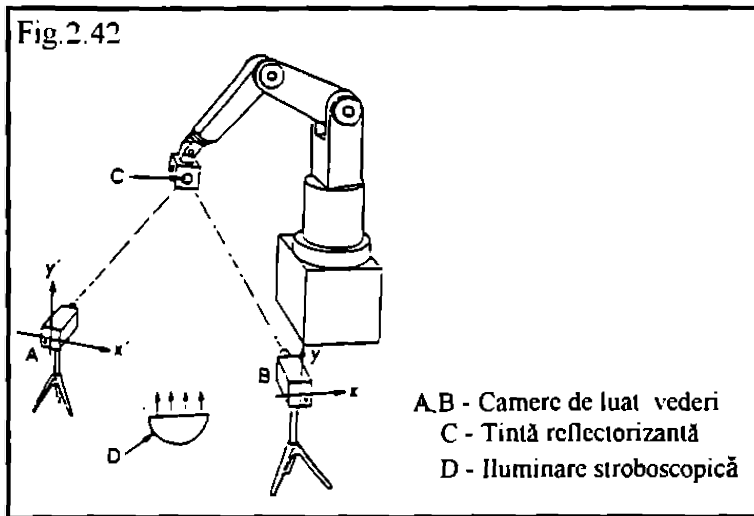
4. Dispozitiv Robot_Check (Societatea Selspine-Suedia)

Acest dispozitiv (fig.2.41.) utilizează lumina emisă de diode electro-luminiscente, funcționând în infraroșu, fixat pe robot. Lumina emisă de o diodă este văzută ca un punct de două camere, echipate cu câte un detector optoelectronic; acesta din urmă, emite două semnale proporționale cu coordonatele x și y ale punctului de impact a fascicolului pe suprafața plană a detectorului. Având cele două cupluri de coordonate x_1, y_1 și x_2, y_2 provenind de la cele două camere, este posibil (ca în tehnica de fotogrametrie clasică) prin calcule trigonometrice, să se determine coordonatele diodei într-un sistem de referință legat de una din cele două camere. Sistemul permite atât determinarea caracteristicilor de situație cât și de traiectorie.

5. Metodă folosind fotogrametria stroboscopică (L.N.E-Franța)

Fotogrametria este o metodă de tip triangulație optică, ce permite determinarea poziției unui punct în spațiul tridimensional. Sistemul de măsurare este utilizat pentru evaluarea caracteristicilor de traiectorie ale roboților industriali (fig.2.42) și se bazează pe iluminarea stroboscopică a unei ținte reflectorizante C , fixată pe un cub purtat de robot. Punctul luminos este vizat cu două camere de luat

vederi. Este astfel posibilă determinarea pozițiilor unei succesiuni de puncte în spațiu (imagini succesive ale țintei mobile). Analiza acestor puncte permite calcularea traiectoriei mobilului.



Măsurătorile fiind efectuate prin puncte discrete, precizia depinde de calitatea imaginii acestor puncte, motiv pentru care este necesară ținta reflectorizantă.

În cele prezentate mai sus, au fost trecute în revistă, succint câteva din preocupările în domeniu în diferite țări.

Capitolele următoare prezintă preocupările autorului desigur, sub coordonarea conducătorului tezei în cea ce privește elaborarea unor metodologii și conceperea unor dispozitive pentru determinarea caracteristicilor de situație ale roboților industriali.

CAPITOLUL 3

CONTRIBUȚII LA ELABORAREA UNOR METODE ȘI ALGORITMI DE CALCUL A EXACTITĂȚII ȘI REPETABILITĂȚII DE SITUARE A ROBOȚILOR INDUSTRIALI

3.1. Considerații generale

Evaluarea caracteristicilor funcționale ale roboților industriali, constituie unul dintre aspectele dezvoltării acestora. Performanțele reale ale acestor mașini sunt încă insuficient cunoscute, întrucât definirea criteriilor de performanță constituie preocupări relativ recente. Analizând aplicațiile în care sunt implicați roboții industriali se constată că acestea se pot în general clasifica în două categorii.

În prima categorie robotul este utilizat pentru a poziționa un obiect sau o sculă în spațiul său de lucru; aceasta corespunde unor aplicații numeroase: sudură prin puncte, asamblare, manipulare, paletizare, montare de componente electronice, etc.

În a doua categorie robotul este utilizat pentru deplasarea programată și continuă a unui obiect sau sculă. În această categorie intră aplicațiile de sudură continuă, debavurare de piese, vopsire, etc.

Aceste două categorii de utilizare a roboților industriali determină două familii de caracteristici considerate fundamentale pentru aprecierea performanțelor roboților: caracteristici de poziționare și caracteristici de urmărirea traiectoriei.

Caracteristicile de poziționare sunt exprimate, în general, prin exactitatea și repetabilitatea de situare (poziționare și orientare).

Modalitățile de determinare a acestora diferă funcție de tipul metodei utilizate.

3.2. Metode locale de determinare a exactității și repetabilității de situare la roboții industriali

Sunt cele denumite în mod curent „metode clasice” și ele presupun determinarea abaterilor de situare (poziționare și orientare) prin măsurarea unor distanțe mici (câțiva mm), cu sau fără contact, între:

- un corp de probă (fixat de obicei în efectorul terminal al robotului, dar nu neapărat necesar), care poate fi o sferă calibrată (pentru caracteristici de poziționare) sau un cub calibrat (pentru caracteristici de poziționare și orientare);

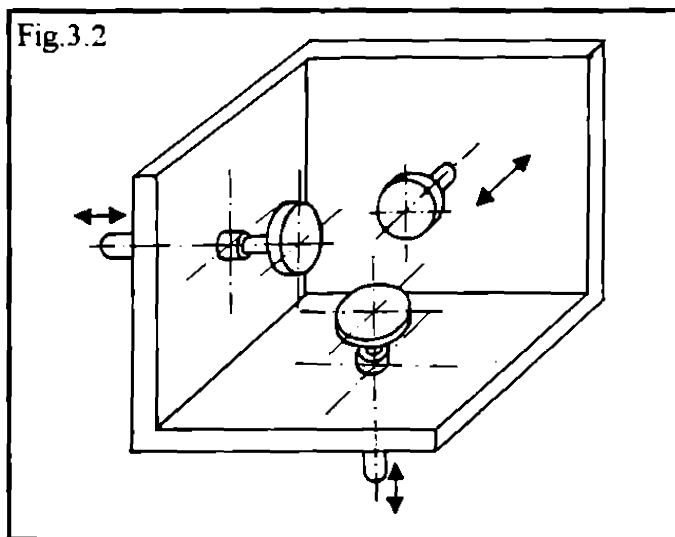
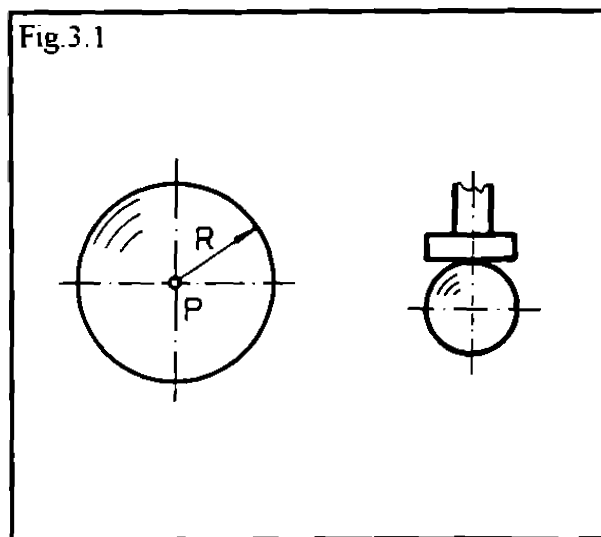
- un cap de măsurare (terminal de măsurare), amplasat în puncte determinate din spațiul de lucru al robotului.

Metodele de măsurare diferă funcție de algoritmul de calcul utilizat.

3.2.1. Metodă și algoritm de calcul pentru determinarea exactității și repetabilității de poziționare, utilizând corp de probă sferă calibrată

Această metodă permite doar determinarea exactității și repetabilității de poziționare, nu și de orientare.

Corpul de probă (sferă calibrată) prins în efectorul terminal al robotului conlucrează cu un cap de măsurare amplasat într-un punct determinat al spațiului de lucru al robotului (fig.3.1). Capul de măsurare este echipat cu trei instrumente de măsurare a distanțelor (comparatoare, traductoare de poziție) având axele concurente și perpendiculare două câte două (fig.3.2)



Centrul sferei calibrate materializează punctul caracteristic, P.C., al robotului.

Pentru determinarea exactității de poziționare, se procedează astfel (fig.3.3):

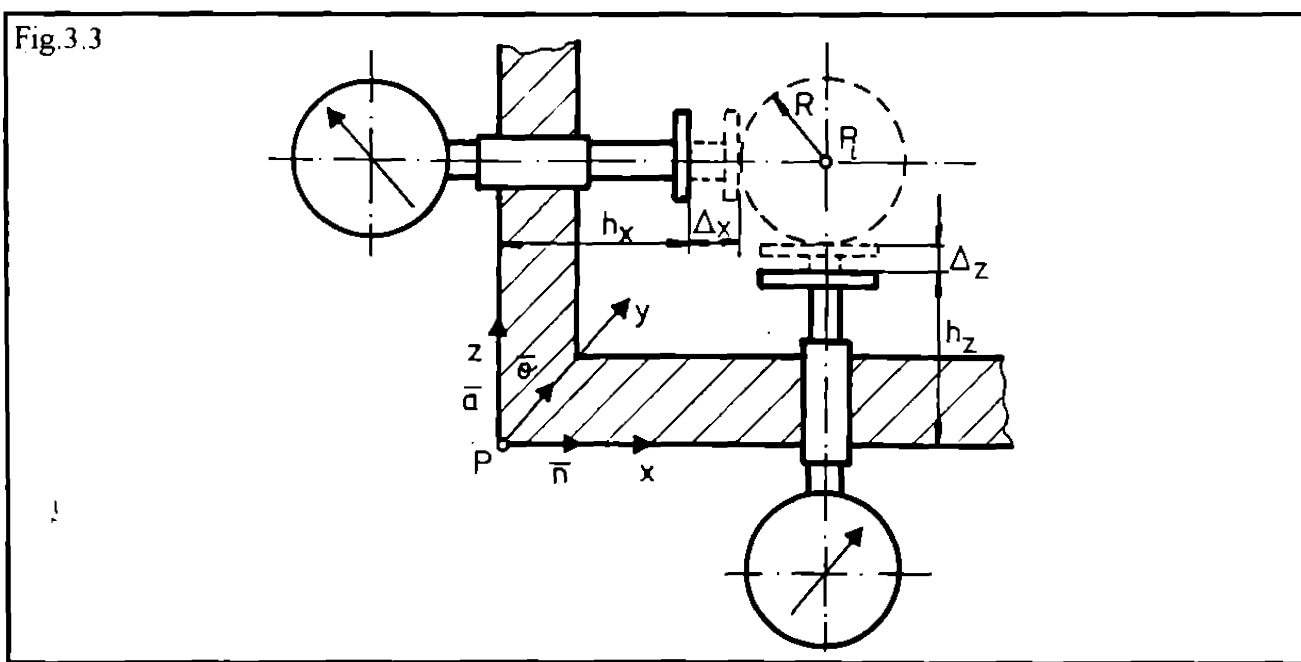
- se consideră sistemul de referință Pxyz, legat de capul de măsurare. În poziția lor de zero, suprafețele de contact plane ale palpatoarelor se găsesc la

distanțele h_x , h_y și h_z de planele de referință ale sistemului Pxyz.

Se aduce capul de măsurare în poziția cu care suprafețele plane de contact să fie în poziția lor de zero, tangente la corpul de probă sferic cu centrul în poziția programată, P_{00} . Coordonatele punctului P_{00} în raport cu sistemul de referință solidar cu capul de măsurare, vor fi:

$$\begin{cases} x_{P_{00}} = h_x + R \\ y_{P_{00}} = h_y + R \\ z_{P_{00}} = h_z + R \end{cases} \quad (3.1),$$

R fiind raza corpului de probă sferic. Se stabilește, în modul arătat mai sus, poziția de zero a ansamblului corp de probă-cap de măsurare.



Se comandă robotul să revină în poziția programată, P_{00} , a P.C. În realitate din cauza multiplilor erori sistematice și aleatoare, robotul nu va poziționa corpul de probă sferic cu centrul în P_{00} , ci în vecinătatea acestuia într-o poziție efectivă P_e . Indicațiile palpatoarelor instrumentelor de măsură ce ating corpul de probă sferic în poziția efectivă vor fi: $\pm \Delta x$, $\pm \Delta y$, $\pm \Delta z$. Cu acestea, coordonatele poziției efective ale P.C. vor fi:

$$\begin{cases} x_{P_e} = h_x + R \pm \Delta x = x_{P_{00}} \pm \Delta x \\ y_{P_e} = h_y + R \pm \Delta y = y_{P_{00}} \pm \Delta y \\ z_{P_e} = h_z + R \pm \Delta z = z_{P_{00}} \pm \Delta z \end{cases} \quad (3.2).$$

În consecință, vectorul erorii de poziție a P.C., în raport cu sistemul Pxyz, legat de capul de măsurare (CM), va fi:

$${}^{CM}\Delta\bar{p} = {}^{CM}(\Delta p_x \ \Delta p_y \ \Delta p_z)^T = (\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ 1)^T \quad (3.3)$$

În raport cu sistemul de referință de bază, R, legat de elementul fix al robotului, vectorul erorii de poziție va fi:

$${}^R\Delta\bar{p} = {}^R T_{CM} \cdot {}^{CM}\Delta\bar{p} = {}^R T_{CM} \cdot (\Delta x \ \Delta y \ \Delta z \ 1)^T \quad (3.4)$$

în care ${}^R T_{CM}$, reprezintă matricea de trecere de la sistemul Pxyz, legat de capul de măsurare (CM), la sistemul de referință R, legat de baza robotului.

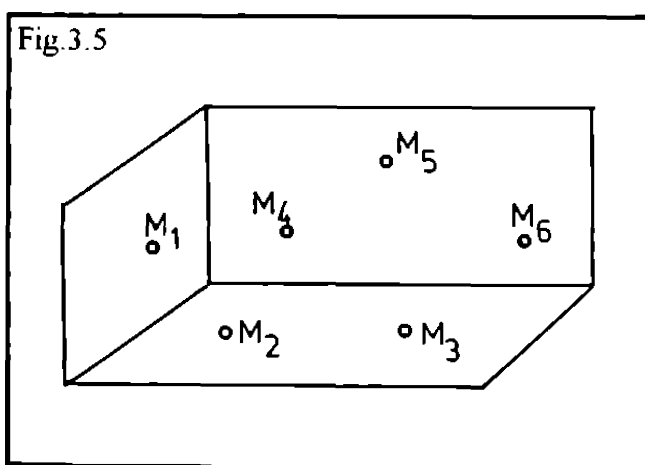
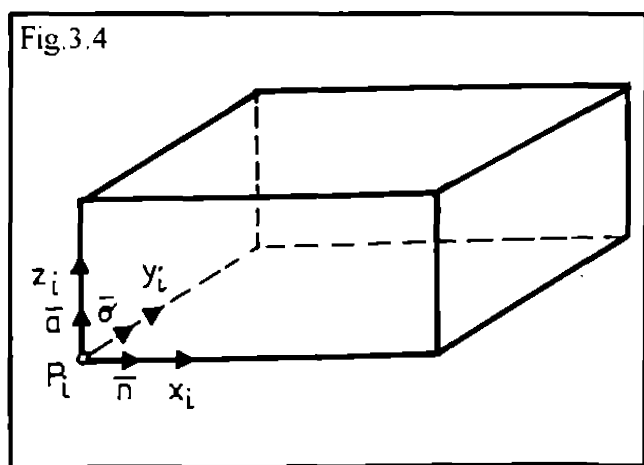
În vederea determinării repetabilității de poziționare, după punerea "la zero" a sistemului cap de măsurare - corp de probă, în poziția comandată, P_{in} , se comandă repetarea de „n” ori a operației de poziționare a corpului de probă în poziția P_{in} , măsurându-se de fiecare dată abaterile de poziționare.

Atât în cazul exactității cât și a repetabilității de poziționare, rezultatele obținute se prelucrează statistic, în conformitate cu prevederile ISO 9283:90, estimându-se valoarea acestora.

3.2.2. Metodă și algoritm de calcul pentru determinarea exactității și repetabilității de situare la roboți industriali, utilizând distribuția $3 \times 2 \times 1$

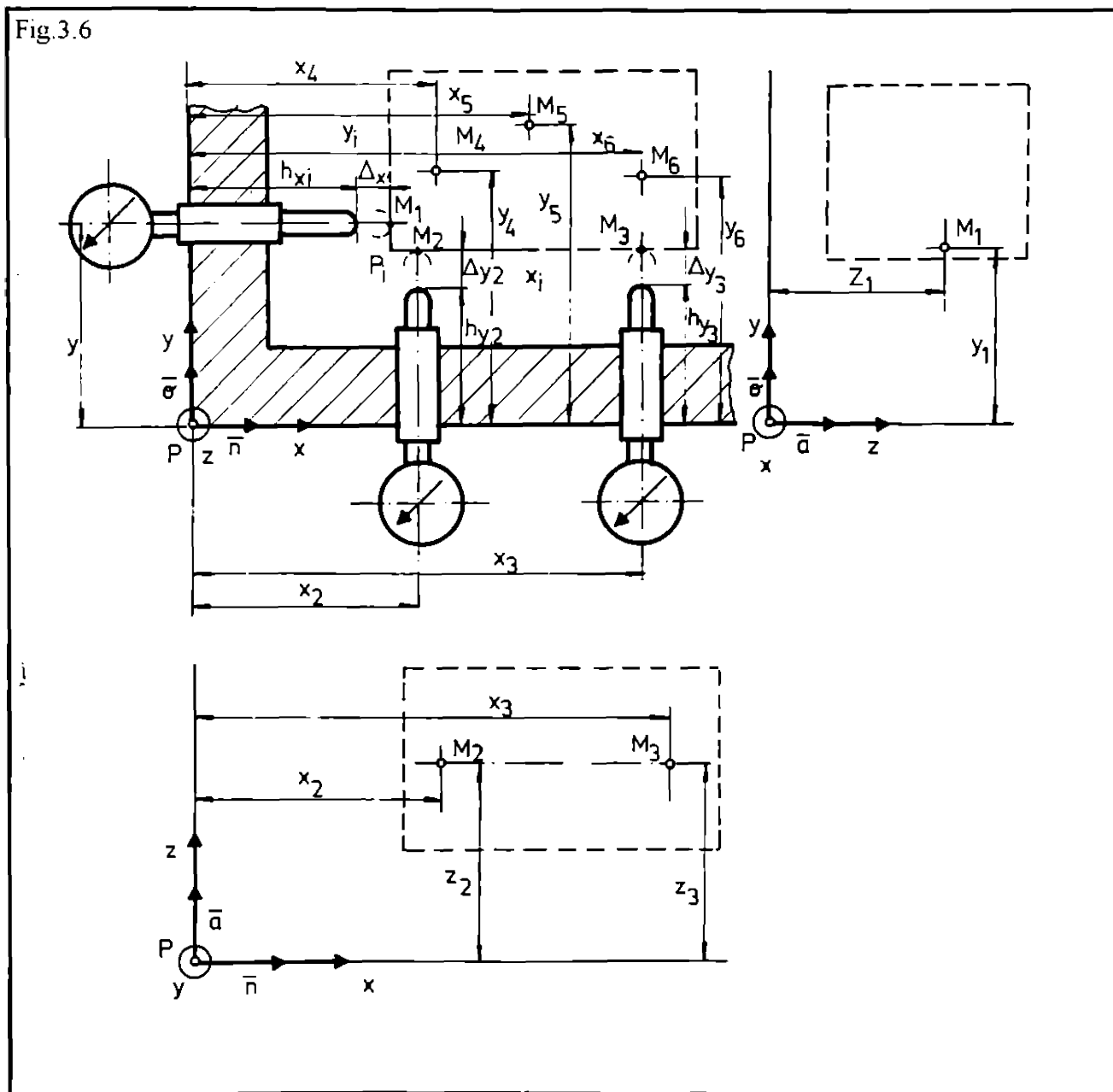
În acest scop se utilizează un corp de probă paralelipipedic (cub sau nu) calibrat (fig. 3.4).

Trei muchii perpendiculare două câte două, materializează axele sistemului de referință legat de corpul de probă, punctul lor de intersecție fiind $P_i \equiv P.C.$ Corpul



de probă prismatic conlucrează cu un cap de măsurare având șase instrumente de măsură, amplasate în configurația din fig.3.5. Capul de măsurare este prezentat în fig.3.6.

Determinarea erorii de situare, utilizând distribuția $3 \times 2 \times 1$, se face după metodologia descrisă în continuare. Se consideră sistemul de referință Pxyz legat de capul de măsurare.



În poziția lor "de zero", punctele de intersecție ale extremităților palpatoarelor, respectiv axelor, vor fi la distanțele h_x , h_y și h_z de planele de referință ale sistemului Pxyz. În ipoteza că, în poziția "de zero", toate extremitățile palpatoarelor se găsesc pe suprafața corpului de probă, coordonatele acestora, în

raport cu sistemul Pxyz, vor fi:

$$\begin{cases} x_{M_{10}} = h_x \\ y_{M_{10}} = y_1 \\ z_{M_{10}} = z_1 \end{cases} \quad \begin{cases} x_{M_{20}} = x_2 \\ y_{M_{20}} = h_{y_2} \\ z_{M_{20}} = z_2 \end{cases} \quad \begin{cases} x_{M_{30}} = x_3 \\ y_{M_{30}} = h_{y_3} \\ z_{M_{30}} = z_3 \end{cases} \quad \begin{cases} x_{M_{40}} = x_4 \\ y_{M_{40}} = y_4 \\ z_{M_{40}} = h_{z_4} \end{cases} \quad \begin{cases} x_{M_{50}} = x_5 \\ y_{M_{50}} = y_5 \\ z_{M_{50}} = h_{z_5} \end{cases} \quad \begin{cases} x_{M_{60}} = x_6 \\ y_{M_{60}} = y_6 \\ z_{M_{60}} = h_{z_6} \end{cases} \quad (3.5).$$

Este posibil ca:

$$\begin{aligned} h_{y_2} &= h_{y_3} = h_y \\ h_{z_4} &= h_{z_5} = h_{z_6} = h_z \end{aligned} \quad (3.6).$$

dar nu absolut necesar.

Pentru simplificarea relațiilor, să considerăm în continuare că sunt îndeplinite condițiile (3.6). În această situație, coordonatele punctului caracteristic $P_{10} \equiv P.C.$, atașat corpului de probă prismatic, în poziția „de zero”, în sistemul Pxyz, vor fi:

$$\begin{cases} x_{P_{10}} = h_x \\ y_{P_{10}} = h_y \\ z_{P_{10}} = h_z \end{cases} \quad (3.7).$$

După inițializarea sistemului corp de probă - cap de măsură, se comandă poziționarea robotului în poziția programată P_{10} . În realitate, robotul va deplasa corpul de probă cu P.C. în vecinătatea lui P_{10} , adică într-o poziție efectivă, $P_1(x_1, y_1, z_1)$ în sistemul Pxyz. Deplasările palpatoarelor instrumentelor de măsură, pentru a atinge corpul de probă, vor fi: $\pm \Delta x$, $\pm \Delta y$ și $\pm \Delta z$, față de poziția „de zero”.

Coordonatele punctelor de palpate M_i , $i=1,2,3,\dots,6$, de pe corpul de probă, vor fi:

$$\begin{cases} x_{M_1} = h_x \pm \Delta x_1 \\ y_{M_1} = y_1 \\ z_{M_1} = z_1 \end{cases} \quad \begin{cases} x_{M_2} = x_2 \\ y_{M_2} = h_y \pm \Delta y_2 \\ z_{M_2} = z_2 \end{cases} \quad \begin{cases} x_{M_3} = x_3 \\ y_{M_3} = h_y \pm \Delta y_3 \\ z_{M_3} = z_3 \end{cases} \\ \begin{cases} x_{M_4} = x_4 \\ y_{M_4} = y_4 \\ z_{M_4} = h_z \pm \Delta z_4 \end{cases} \quad \begin{cases} x_{M_5} = x_5 \\ y_{M_5} = y_5 \\ z_{M_5} = h_z \pm \Delta z_5 \end{cases} \quad \begin{cases} x_{M_6} = x_6 \\ y_{M_6} = y_6 \\ z_{M_6} = h_z \pm \Delta z_6 \end{cases} \quad (3.8).$$

Cu ajutorul coordonatelor punctelor de palpate, date de relația (3.8), se pot scrie ecuațiile planelor ce materializează cele trei fețe adiacente ale corpului de probă, în poziția lui efectivă. Astfel, planul $P_1x_1y_1$, determinat de cele trei puncte de palpate M_4, M_5, M_6 , va avea ecuația:

$$A_{456} \cdot x + B_{456} \cdot y + C_{456} \cdot z + 1 = 0 \quad (3.9),$$

unde coeficienții ecuației vor fi:

$$A_{456} = \frac{- \begin{vmatrix} 1 & y_{M_4} & z_{M_4} \\ 1 & y_{M_5} & z_{M_5} \\ 1 & y_{M_6} & z_{M_6} \end{vmatrix}}{D_{456}} \quad B_{456} = \frac{- \begin{vmatrix} x_{M_4} & 1 & z_{M_4} \\ x_{M_5} & 1 & z_{M_5} \\ x_{M_6} & 1 & z_{M_6} \end{vmatrix}}{D_{456}} \quad C_{456} = \frac{- \begin{vmatrix} x_{M_4} & y_{M_4} & 1 \\ x_{M_5} & y_{M_5} & 1 \\ x_{M_6} & y_{M_6} & 1 \end{vmatrix}}{D_{456}}$$

$$D_{456} = \begin{vmatrix} x_{M_4} & y_{M_4} & z_{M_4} \\ x_{M_5} & y_{M_5} & z_{M_5} \\ x_{M_6} & y_{M_6} & z_{M_6} \end{vmatrix} \quad (3.10).$$

Ecuația planului P_1x,z , care trece prin punctele M_2 și M_3 , este:

$$A_{23} \cdot x + B_{23} \cdot y + C_{23} \cdot z + 1 = 0 \quad (3.11),$$

Acest plan este perpendicular pe planul P_1x,y , deci:

$$A_{23} \cdot A_{456} + B_{23} \cdot B_{456} + C_{23} \cdot C_{456} = 0 \quad (3.12).$$

De unde, coeficienții ecuației (3.11), vor fi:

$$A_{23} = \frac{- \begin{vmatrix} 1 & y_{M_2} & z_{M_2} \\ 1 & y_{M_3} & z_{M_3} \\ 0 & B_{456} & C_{456} \end{vmatrix}}{D_{23}} \quad B_{23} = \frac{- \begin{vmatrix} x_{M_2} & 1 & z_{M_2} \\ x_{M_3} & 1 & z_{M_3} \\ A_{456} & 0 & C_{456} \end{vmatrix}}{D_{23}} \quad C_{23} = \frac{- \begin{vmatrix} x_{M_2} & y_{M_2} & 1 \\ x_{M_3} & y_{M_3} & 1 \\ A_{456} & B_{456} & 0 \end{vmatrix}}{D_{23}}$$

$$D_{23} = \begin{vmatrix} x_{M_2} & y_{M_2} & z_{M_2} \\ x_{M_3} & y_{M_3} & z_{M_3} \\ A_{456} & B_{456} & C_{456} \end{vmatrix} \quad (3.13).$$

Ecuația planului P_1y,z , care trece prin punctul M_1 , va fi:

$$A_1 \cdot x + B_1 \cdot y + C_1 \cdot z + 1 = 0 \quad (3.14),$$

Acest plan, este perpendicular atât pe planul P_1x,y , (determinat de punctele M_4, M_5, M_6), cât și pe planul P_1x,z , (determinat de punctele M_2 și M_3), deci:

$$A_1 \cdot A_{456} + B_1 \cdot B_{456} + C_1 \cdot C_{456} = 0 \quad (3.15).$$

$$A_1 \cdot A_{23} + B_1 \cdot B_{23} + C_1 \cdot C_{23} = 0 \quad (3.16).$$

Cu acestea:

$$A_1 = \frac{- \begin{vmatrix} 1 & y_{M_1} & z_{M_1} \\ 0 & B_{456} & C_{456} \\ 0 & B_{23} & C_{23} \end{vmatrix}}{D_1} \quad B_1 = \frac{- \begin{vmatrix} x_{M_1} & 1 & z_{M_1} \\ A_{456} & 0 & C_{456} \\ A_{23} & 0 & C_{23} \end{vmatrix}}{D_1} \quad C_1 = \frac{- \begin{vmatrix} x_{M_1} & y_{M_1} & 1 \\ A_{456} & B_{456} & 0 \\ A_{23} & B_{23} & 0 \end{vmatrix}}{D_1}$$

$$D_1 = \begin{vmatrix} x_{M_1} & y_{M_1} & z_{M_1} \\ A_{456} & B_{456} & C_{456} \\ A_{23} & B_{23} & C_{23} \end{vmatrix} \quad (3.17).$$

Punctul P_1 , care reprezintă poziția efectivă a punctului caracteristic P.C., al R.I., se află la intersecția celor trei plane, definite de relațiile (3.9), (3.12), (3.14):

$$\begin{aligned} A_{456} \cdot x_1 + B_{456} \cdot y_1 + C_{456} \cdot z_1 + 1 &= 0 \\ A_{23} \cdot x_1 + B_{23} \cdot y_1 + C_{23} \cdot z_1 + 1 &= 0 \\ A_1 \cdot x_1 + B_1 \cdot y_1 + C_1 \cdot z_1 + 1 &= 0 \end{aligned} \quad (3.18).$$

Soluționând sistemul (3.18), se obțin coordonatele punctului P_1 în sistemul de referință solidar cu capul de măsurare:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{\begin{vmatrix} 1 & B_{456} & C_{456} \\ 1 & B_{23} & C_{23} \\ 1 & B_1 & C_1 \end{vmatrix}}{D_1} & y_1 &= \frac{\begin{vmatrix} A_{456} & 1 & C_{456} \\ A_{23} & 1 & C_{23} \\ A_1 & 1 & C_1 \end{vmatrix}}{D_1} & z_1 &= \frac{\begin{vmatrix} A_{456} & B_{456} & 1 \\ A_{23} & B_{23} & 1 \\ A_1 & B_1 & 1 \end{vmatrix}}{D_1} \\ D_1 &= \begin{vmatrix} A_{456} & B_{456} & C_{456} \\ A_{23} & B_{23} & C_{23} \\ A_1 & B_1 & C_1 \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (3.19).$$

Astfel, eroarea de poziție a punctului caracteristic va fi:

$$\Delta \bar{p} = \bar{p}_1 - \bar{p}_{10} \quad (3.20).$$

în care: \bar{p}_1 - vectorul de poziție al P.C. în poziția efectivă, P_1 , iar \bar{p}_{10} - vectorul de poziție al P.C. în poziția inițială, comandată, P_{10} . Deci (ținând seama de (3.7)):

$$\Delta \bar{p} = (x_1 - h_x, y_1 - h_y, z_1 - h_z, 1)^T \quad (3.21).$$

Așadar, relația (3.21) exprimă eroarea de poziționare a P.C. pentru poziția efectivă „i” a acestuia.

Dacă încercarea se repetă de „n” ori ($i=1,2,3,\dots,n$), parcurgând aceeași traiectorie, conform ISO 9283:90, se poate exprima exactitatea de poziționare unidirecțională:

$$AP = \sqrt{(\bar{x} - x_{10})^2 + (\bar{y} - y_{10})^2 + (\bar{z} - z_{10})^2} \quad (3.22).$$

în care:

$$\begin{aligned} AP_x &= \bar{x} - x_{i0} \\ AP_y &= \bar{y} - y_{i0} \\ AP_z &= \bar{z} - z_{i0} \end{aligned} \quad (3.23).$$

cu:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ \bar{y} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \\ \bar{z} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \end{aligned} \quad (3.24).$$

unde: x_i, y_i, z_i reprezintă coordonatele punctului P_i efectiv atins, $i=1,2,3,\dots,n$;

x_{i0}, y_{i0}, z_{i0} reprezintă coordonatele punctului comandat P_{i0} .

În ceea ce privește orientarea corpului de probă se ia în considerare faptul că versorul \bar{n}_i este versorul normal pe planul $P_i y, z_i$, iar, în raport cu sistemul de referință $Pxyz$, solidar cu capul de măsurare, el va avea expresia:

$$\bar{n}_i = (n_x \ n_y \ n_z \ 1)^T \quad (3.25).$$

în care:

$$\begin{aligned} n_x &= \frac{A_1}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}} \\ n_y &= \frac{B_1}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}} \\ n_z &= \frac{C_1}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}} \end{aligned} \quad (3.26).$$

Analog, \bar{o}_i este versorul normal pe planul $P_i x, z_i$, în raport cu sistemul $Pxyz$, el va avea expresia:

$$\bar{o}_i = (o_x \ o_y \ o_z \ 1)^T \quad (3.27).$$

cu:

$$\begin{aligned} o_x &= \frac{A_{21}}{\sqrt{A_{23}^2 + B_{23}^2 + C_{23}^2}} \\ o_y &= \frac{B_{23}}{\sqrt{A_{23}^2 + B_{23}^2 + C_{23}^2}} \\ o_z &= \frac{C_{21}}{\sqrt{A_{23}^2 + B_{23}^2 + C_{23}^2}} \end{aligned} \quad (3.28).$$

Versorul \bar{a}_i , normal pe planul $P_i x_i y_i$, în raport cu $Pxyz$, va avea expresia:

$$\bar{a}_i = (a_{ix} \ a_{iy} \ a_{iz} \ 1)^T \quad (3.29).$$

unde:

$$\begin{aligned} a_{ix} &= \frac{A_{456}}{\sqrt{A_{456}^2 + B_{456}^2 + C_{456}^2}} \\ a_{iy} &= \frac{B_{456}}{\sqrt{A_{456}^2 + B_{456}^2 + C_{456}^2}} \\ a_{iz} &= \frac{C_{456}}{\sqrt{A_{456}^2 + B_{456}^2 + C_{456}^2}} \end{aligned} \quad (3.30).$$

Repetând comanda de aducere a robotului cu P.C. în P_{i0} , de „n” ori ($i=1,2,3,\dots,n$), se poate exprima exactitatea de orientare a corpului de probă, astfel:

- pentru axa „n”:

$$AP_{n_i} = \bar{n}_x - n_{x_0} \quad AP_{n_j} = \bar{n}_y - n_{y_0} \quad AP_{n_k} = \bar{n}_z - n_{z_0} \quad (3.31).$$

cu:

$$\begin{aligned} \bar{n}_x &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_{ix} \\ \bar{n}_y &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_{iy} \\ \bar{n}_z &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n n_{iz} \end{aligned} \quad (3.32).$$

unde: \bar{n}_x , \bar{n}_y , \bar{n}_z sunt valorile medii ale orientărilor unghiulare ale axei „n”, obținute pentru aceeași poziție comandată, repetată de $i=1,2,\dots,n$ ori;

n_{x_0} , n_{y_0} , n_{z_0} - sunt valorile orientărilor comandate ale axei „n”;

n_{ix} , n_{iy} , n_{iz} - orientările axei „n” pentru poziția de rang „i”, atinsă efectiv.

- pentru axa „o”:

$$AP_{o_i} = \bar{o}_x - o_{x_0} \quad AP_{o_j} = \bar{o}_y - o_{y_0} \quad AP_{o_k} = \bar{o}_z - o_{z_0} \quad (3.33).$$

cu :

$$\begin{aligned}\bar{o}_x &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n o_{ix} \\ \bar{o}_y &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n o_{iy} \\ \bar{o}_z &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n o_{iz}\end{aligned}\quad (3.34)$$

iar pentru axa "a":

$$AP_{a_x} = \bar{a}_x - a_{x_0}, \quad AP_{a_y} = \bar{a}_y - a_{y_0}, \quad AP_{a_z} = \bar{a}_z - a_{z_0} \quad (3.35)$$

cu

$$\begin{aligned}\bar{a}_x &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{ix} \\ \bar{a}_y &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{iy} \\ \bar{a}_z &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{iz}\end{aligned}\quad (3.36)$$

Matricial, exactitatea de situare (poziționare și orientare) a corpului de probă, în raport cu sistemul Pxyz, legat de capul de măsurare, se poate exprima astfel:

$${}^{CM} \underline{AP}_{CP} = \begin{bmatrix} AP_{ax} & AP_{ay} & AP_{az} & AP_x \\ AP_{bx} & AP_{by} & AP_{bz} & AP_y \\ AP_{cx} & AP_{cy} & AP_{cz} & AP_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Matricea exactității de situare (poziționare și orientare) a corpului de probă, CP, în raport cu un sistem de referință legat de robot, R, se poate scrie printr-o transformare ${}^R \underline{T}_{CM}$, astfel:

$${}^R \underline{AP}_{CP} = {}^R \underline{T}_{CM} \cdot {}^{CM} \underline{AP}_{CP} \quad (3.38)$$

în care, ${}^R \underline{T}_{CM}$ reprezintă matricea de transformare de la sistemul de referință legat de capul de măsurare la sistemul de referință legat de baza robotului.

3.2.3. Metodă și algoritm de calcul pentru determinarea exactității și repetabilității de situare la roboți industriali, utilizând distribuția 3×3×3

Metoda utilizează un corp de probă - cub calibrat, care conlucrează cu un cap de măsurare având nouă instrumente de măsură (traductoare), amplasate câte trei pe fiecare față a capului de măsurare (fig.3.7).

În același mod, ca în distribuția 3-2-1, în distribuția 3-3-3 se pot scrie coordonatele punctelor de palpate, P_i ($i=1,2,\dots,9$) (fig.3.8), în raport cu un sistem de axe OXYZ, legat de capul de măsurare, prin relațiile de forma:

$$\begin{cases} X_1 = h_x \pm \Delta X_1 \\ Y_1 = Y_1 \\ Z_1 = Z_1 \end{cases} \\ \begin{cases} X_2 = h_x \pm \Delta X_2 \\ Y_2 = Y_2 \\ Z_2 = Z_2 \end{cases} \quad (3.39), \\ \begin{cases} X_3 = h_x \pm \Delta X_3 \\ Y_3 = Y_3 \\ Z_3 = Z_3 \end{cases}$$

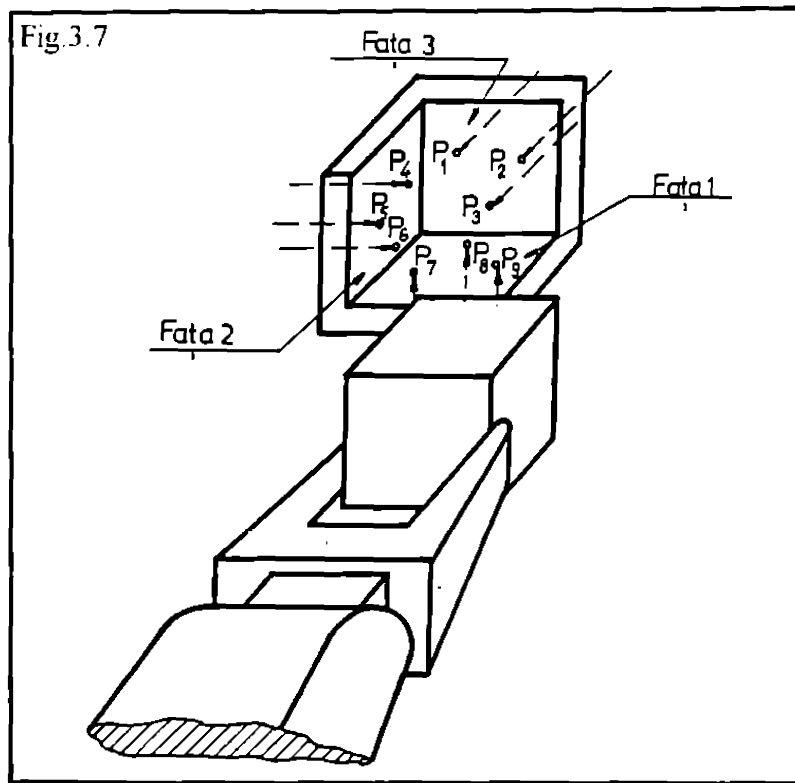
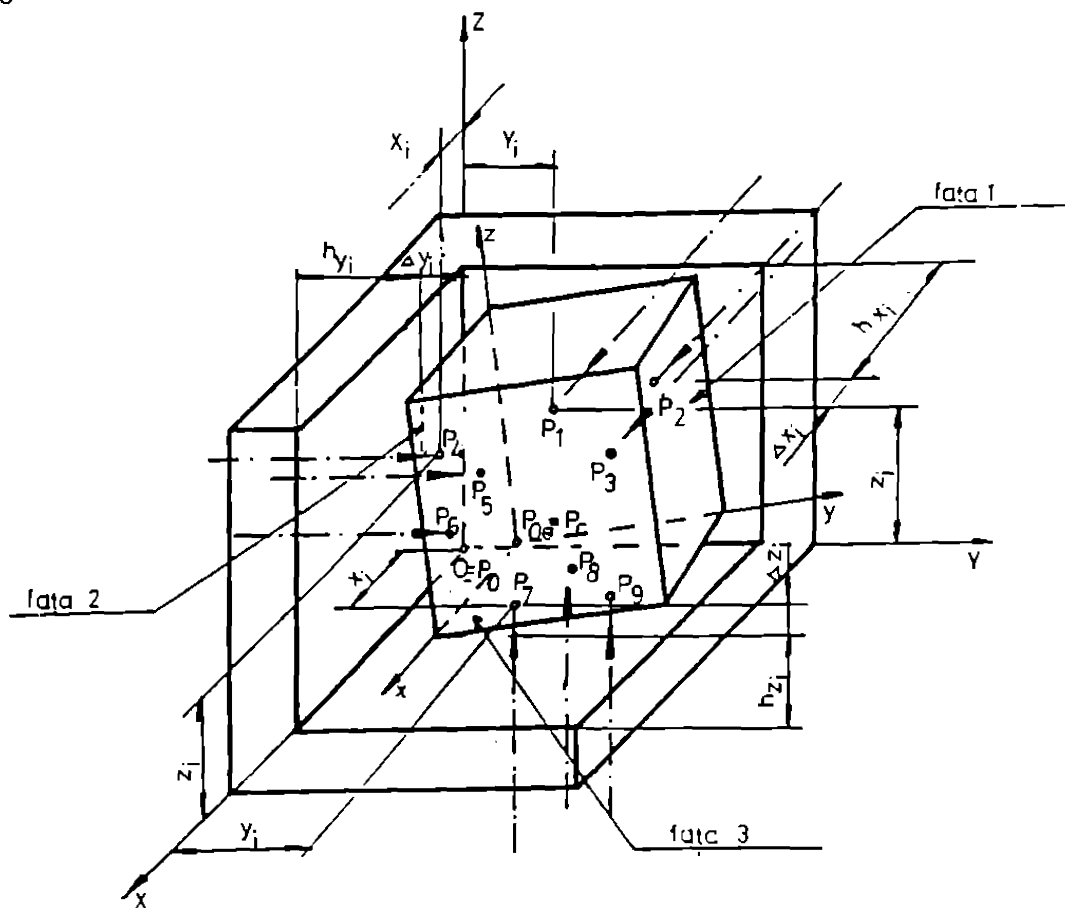


Fig.3.8



pentru fața 1 a cubului în poziția efectiv atinsă (plan determinat de punctele de palpate P_1 , P_2 și P_3);

$$\begin{cases} X_4 = X_4 \\ Y_4 = h_4 \pm \Delta Y_4 \\ Z_4 = Z_4 \end{cases} \quad \begin{cases} X_5 = X_5 \\ Y_5 = h_5 \pm \Delta Y_5 \\ Z_5 = Z_5 \end{cases} \quad \begin{cases} X_6 = X_6 \\ Y_6 = h_6 \pm \Delta Y_6 \\ Z_6 = Z_6 \end{cases} \quad (3.40).$$

pentru fața 2 a cubului în poziția efectiv atinsă (plan determinat de punctele de palpate P_4 , P_5 și P_6);

$$\begin{cases} X_7 = X_7 \\ Y_7 = Y_7 \\ Z_7 = h_7 \pm \Delta Z_7 \end{cases} \quad \begin{cases} X_8 = X_8 \\ Y_8 = Y_8 \\ Z_8 = h_8 \pm \Delta Z_8 \end{cases} \quad \begin{cases} X_9 = X_9 \\ Y_9 = Y_9 \\ Z_9 = h_9 \pm \Delta Z_9 \end{cases} \quad (3.41).$$

pentru fața 3 a cubului în poziția efectiv atinsă (plan determinat de punctele de palpate P_7 , P_8 și P_9).

Cunoscând coordonatele punctelor P_i ($i=1,2,\dots,9$) în sistemul XOYZ legat de capul de măsurare, se poate determina situarea corpului de probă (cub calibrat) în acest sistem de referință.

1. Exactitatea de poziționare

Se consideră drept punct caracteristic (P.C.) al corpului de probă, vârful P_0 al cubului (fig.3.8).

În poziția inițială, axele sistemului de referință P_0xyz , legat de cub, sunt paralele cu axele sistemului de referință OXYZ ale capului de măsurare. În această poziție are loc inițializarea traductoarelor. Ca atare, coordonatele vârfului cubului ($P_0 \equiv P.C.$), în această poziție inițială, vor fi:

$$\begin{cases} X_0 = h_x \\ Y_0 = h_y \\ Z_0 = h_z \end{cases} \quad (3.42).$$

Se comandă poziționarea robotului în P.C. stabilit mai sus. În realitate, robotul va deplasa corpul de probă cu P.C. într-o poziție efectivă $P_{ue} \neq P_0$.

Să determinăm coordonatele acestui punct efectiv atins, P_{ue} .

Având determinate coordonatele celor nouă puncte P_i , se pot defini ecuațiile planelor celor trei fețe ale cubului în poziția lor efectivă.

Astfel, ecuația planului feței 1, definit de punctele P_1 , P_2 și P_3 , în raport cu sistemul OXYZ, va fi:

$$A_{123} \cdot X + B_{123} \cdot Y + C_{123} \cdot Z + 1 = 0 \quad (3.43)$$

în care:

$$A_{123} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & Y_1 & Z_1 \\ 1 & Y_2 & Z_2 \\ 1 & Y_3 & Z_3 \end{vmatrix}}{D_{123}} \quad B_{123} = \frac{\begin{vmatrix} X_1 & 1 & Z_1 \\ X_2 & 1 & Z_2 \\ X_3 & 1 & Z_3 \end{vmatrix}}{D_{123}} \quad C_{123} = \frac{\begin{vmatrix} X_1 & Y_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & 1 \\ X_3 & Y_3 & 1 \end{vmatrix}}{D_{123}}$$

$$D_{123} = \begin{vmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ X_3 & Y_3 & Z_3 \end{vmatrix} \quad (3.44).$$

Ecuația planului feței 2, definit de punctele P_4 , P_5 și P_6 , în raport cu sistemul OXYZ, va fi:

$$A_{456} \cdot X + B_{456} \cdot Y + C_{456} \cdot Z + 1 = 0 \quad (3.45)$$

în care:

$$A_{456} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & Y_4 & Z_4 \\ 1 & Y_5 & Z_5 \\ 1 & Y_6 & Z_6 \end{vmatrix}}{D_{456}} \quad B_{456} = \frac{\begin{vmatrix} X_4 & 1 & Z_4 \\ X_5 & 1 & Z_5 \\ X_6 & 1 & Z_6 \end{vmatrix}}{D_{456}} \quad C_{456} = \frac{\begin{vmatrix} X_4 & Y_4 & 1 \\ X_5 & Y_5 & 1 \\ X_6 & Y_6 & 1 \end{vmatrix}}{D_{456}}$$

$$D_{456} = \begin{vmatrix} X_4 & Y_4 & Z_4 \\ X_5 & Y_5 & Z_5 \\ X_6 & Y_6 & Z_6 \end{vmatrix} \quad (3.46).$$

Ecuația planului feței 3, definit de punctele P_7 , P_8 și P_9 , în raport cu sistemul OXYZ, va fi:

$$A_{789} \cdot X + B_{789} \cdot Y + C_{789} \cdot Z + 1 = 0 \quad (3.47)$$

în care:

$$A_{789} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & Y_7 & Z_7 \\ 1 & Y_8 & Z_8 \\ 1 & Y_9 & Z_9 \end{vmatrix}}{D_{789}} \quad B_{789} = \frac{\begin{vmatrix} X_7 & 1 & Z_7 \\ X_8 & 1 & Z_8 \\ X_9 & 1 & Z_9 \end{vmatrix}}{D_{789}} \quad C_{789} = \frac{\begin{vmatrix} X_7 & Y_7 & 1 \\ X_8 & Y_8 & 1 \\ X_9 & Y_9 & 1 \end{vmatrix}}{D_{789}}$$

$$D_{789} = \begin{vmatrix} X_7 & Y_7 & Z_7 \\ X_8 & Y_8 & Z_8 \\ X_9 & Y_9 & Z_9 \end{vmatrix} \quad (3.48).$$

Punctul P_{oc} se găsește la intersecția celor trei plane, deci coordonatele lui, $X_{P_{oc}}$, $Y_{P_{oc}}$, $Z_{P_{oc}}$ trebuie să satisfacă simultan ecuațiile: (3.43), (3.45), (3.47). Așadar:

$$\begin{cases} A_{123} \cdot X + B_{123} \cdot Y + C_{123} \cdot Z + 1 = 0 \\ A_{456} \cdot X + B_{456} \cdot Y + C_{456} \cdot Z + 1 = 0 \\ A_{789} \cdot X + B_{789} \cdot Y + C_{789} \cdot Z + 1 = 0 \end{cases} \quad (3.49).$$

Soluționând sistemul (3.49), se obțin coordonatele punctului P_{oc} - poziția efectiv atinsă de P.C.:

$$X_{P_{oc}} = \frac{\begin{vmatrix} 1 & B_{123} & C_{123} \\ -1 & B_{456} & C_{456} \\ 1 & B_{789} & C_{789} \end{vmatrix}}{D_{oc}}, \quad Y_{P_{oc}} = \frac{\begin{vmatrix} A_{123} & 1 & C_{123} \\ A_{456} & 1 & C_{456} \\ A_{789} & 1 & C_{789} \end{vmatrix}}{D_{oc}}, \quad Z_{P_{oc}} = \frac{\begin{vmatrix} A_{123} & B_{123} & 1 \\ A_{456} & B_{456} & 1 \\ A_{789} & B_{789} & 1 \end{vmatrix}}{D_{oc}}$$

$$D_{oc} = \begin{vmatrix} A_{123} & B_{123} & C_{123} \\ A_{456} & B_{456} & C_{456} \\ A_{789} & B_{789} & C_{789} \end{vmatrix} \quad (3.50).$$

Deci, matricea de poziționare, va fi:

$${}^{CM} \underline{T}_{CP} = \begin{bmatrix} X_{P_{oc}} & Y_{P_{oc}} & Z_{P_{oc}} & 1 \end{bmatrix}^T \quad (3.51).$$

Eroarea de poziționare a P.C., fig 3.9, va fi:

$$\overline{\Delta p} = \overline{p_{oc}} - \overline{p_o} \quad (3.52),$$

în care:

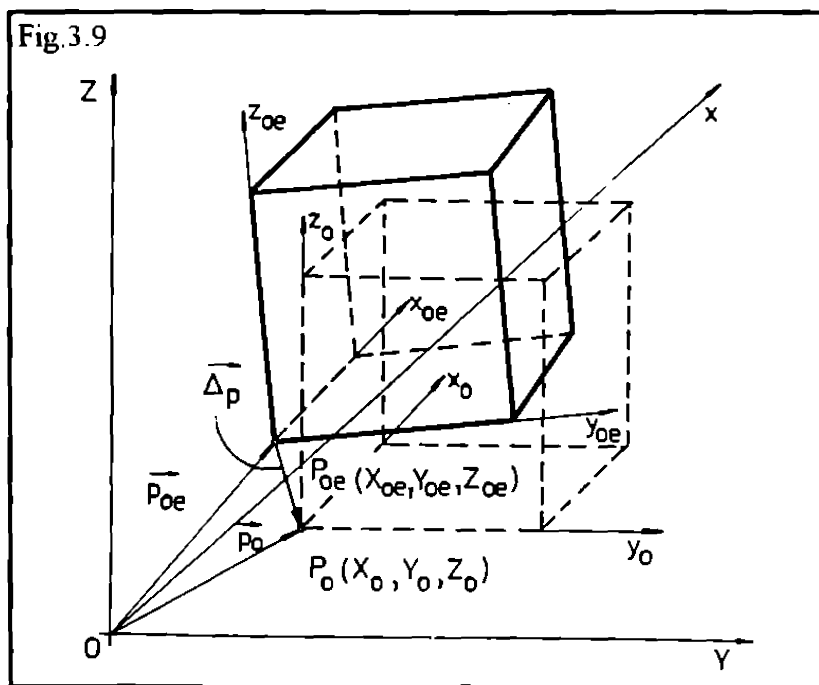
- $\overline{p_{oc}}$ este vectorul de poziție al P.C., în poziția efectivă, P_{oc} , în sistemul OXYZ, legat de capul de măsurare;

- $\overline{p_o}$ este vectorul de poziție al P.C., în poziția inițială, P_o , în sistemul OXYZ.

Matricea erorii de poziționare, va fi:

$$\overline{\Delta p} = \begin{bmatrix} \Delta p_x & \Delta p_y & \Delta p_z \end{bmatrix}^T \quad (3.53)$$

în care:



$$\begin{aligned}\Delta p_x &= X_{P_{i_w}} - X_0 \\ \Delta p_y &= Y_{P_{i_w}} - Y_0 \\ \Delta p_z &= Z_{P_{i_w}} - Z_0\end{aligned}\quad (3.54).$$

Repetând de „n” ori comanda de revenire a E.T. al robotului, purtând cubul de probă, în aceeași poziție P_0 a P.C., urmărind aceeași traiectorie, se obțin „n” poziții efective, P_{i_w} ($i=1,2,\dots,n$). Conform ISO 9283:90, se poate determina exactitatea de poziționare cu expresia:

$$AP = \sqrt{(\bar{X}_{P_w} - X_{P_0})^2 + (\bar{Y}_{P_w} - Y_{P_0})^2 + (\bar{Z}_{P_w} - Z_{P_0})^2} \quad (3.55)$$

$$\begin{aligned}\text{cu:} \quad AP_x &= \bar{X}_{P_w} - X_{P_0} \\ AP_y &= \bar{Y}_{P_w} - Y_{P_0} \\ AP_z &= \bar{Z}_{P_w} - Z_{P_0}\end{aligned}\quad (3.56)$$

unde,

$$\begin{aligned}\bar{X}_{P_w} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{P_{i_w}} \\ \bar{Y}_{P_w} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{P_{i_w}} \\ \bar{Z}_{P_w} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_{P_{i_w}}\end{aligned}\quad (3.57).$$

Deci, exactitatea de poziționare a cubului de probă în raport cu capul de măsurare se poate exprima printr-o matrice de forma:

$${}^{CM} \underline{AP}_{CP} = \begin{bmatrix} AP_x & AP_y & AP_z & 1 \end{bmatrix}^T \quad (3.58).$$

2. Exactitatea de orientare

Cunoscând coordonatele celor nouă puncte P_i , se pot defini vectorii, de exemplu $\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_3$ ce poziționează punctele P_1, P_2, P_3 , ce definesc planul efectiv al feței 1 a cubului, în raport cu sistemul de axe OXYZ (fig.3 10), astfel:

$$\bar{p}_1 = \begin{bmatrix} X_{P_1} \\ Y_{P_1} \\ Z_{P_1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad \bar{p}_2 = \begin{bmatrix} X_{P_2} \\ Y_{P_2} \\ Z_{P_2} \\ 1 \end{bmatrix} \quad \bar{p}_3 = \begin{bmatrix} X_{P_3} \\ Y_{P_3} \\ Z_{P_3} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.59).$$

Orientarea feței 1 se poate determina calculând versorul normalei \bar{n}_1 la

această față.

Vectorii $\overline{p_2 p_1}$ și $\overline{p_2 p_3}$, conținuți în planul feței 1, se pot determina astfel:

$$\begin{aligned} \overline{p_2 p_1} &= \overline{p_1} - \overline{p_2} \\ \overline{p_2 p_3} &= \overline{p_3} - \overline{p_2} \end{aligned} \quad (3.60).$$

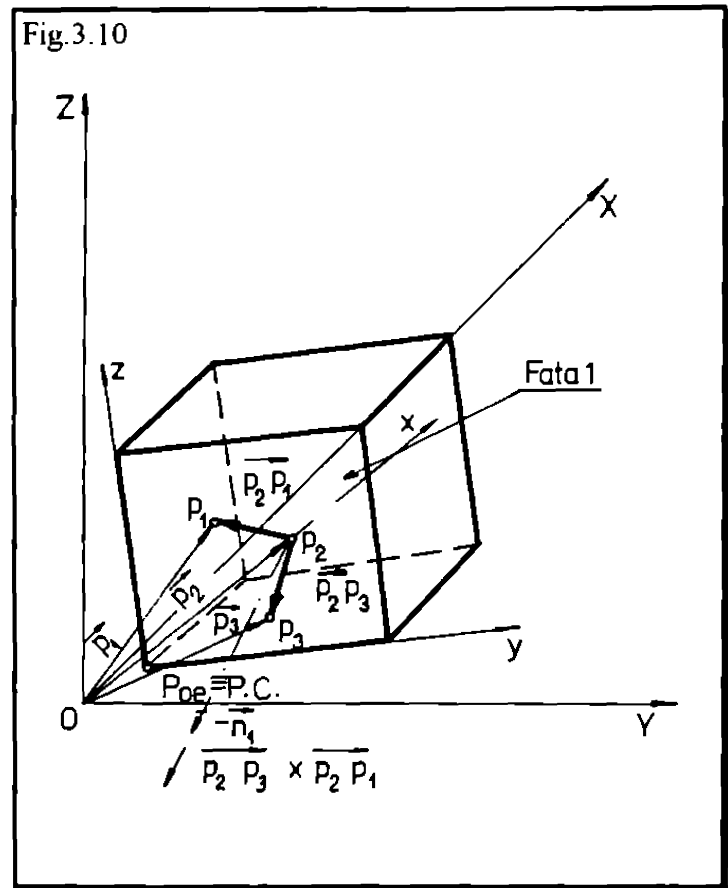
respectiv,

$$\overline{p_2 p_1} = (X_{P_1} - X_{P_2}) \cdot \bar{i} + (Y_{P_1} - Y_{P_2}) \cdot \bar{j} + (Z_{P_1} - Z_{P_2}) \cdot \bar{k} \quad (3.61),$$

$$\overline{p_2 p_3} = (X_{P_3} - X_{P_2}) \cdot \bar{i} + (Y_{P_3} - Y_{P_2}) \cdot \bar{j} + (Z_{P_3} - Z_{P_2}) \cdot \bar{k}$$

unde \bar{i} , \bar{j} , \bar{k} sunt versorii axelor OXYZ.

Vectorul normalei la planul feței 1, se obține efectuând produsul vectorial:



$$\overline{N}_1 = \overline{p_2 p_3} \times \overline{p_2 p_1} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ X_{P_3} - X_{P_2} & Y_{P_3} - Y_{P_2} & Z_{P_3} - Z_{P_2} \\ X_{P_1} - X_{P_2} & Y_{P_1} - Y_{P_2} & Z_{P_1} - Z_{P_2} \end{vmatrix} \quad (3.62).$$

$$\begin{aligned} \overline{N}_1 = \overline{p_2 p_3} \times \overline{p_2 p_1} &= [(Y_{P_3} - Y_{P_2})(Z_{P_1} - Z_{P_2}) - (Z_{P_3} - Z_{P_2})(Y_{P_1} - Y_{P_2})] \cdot \bar{i} + \\ &+ [(X_{P_3} - X_{P_2})(Z_{P_1} - Z_{P_2}) - (X_{P_1} - X_{P_2})(Z_{P_1} - Z_{P_2})] \cdot \bar{j} + \\ &+ [(X_{P_3} - X_{P_2})(Y_{P_1} - Y_{P_2}) - (X_{P_1} - X_{P_2})(Y_{P_3} - Y_{P_2})] \cdot \bar{k} \end{aligned} \quad (3.63).$$

respectiv:

Pentru simplificarea modalităților de exprimare a produsului vectorial

$\overline{p_2 p_3} \times \overline{p_2 p_1}$, se vor adopta următoarele notații:

$$\begin{aligned} C_1 &= (Y_{P_3} - Y_{P_2})(Z_{P_1} - Z_{P_2}) - (Z_{P_3} - Z_{P_2})(Y_{P_1} - Y_{P_2}) \\ C_2 &= (X_{P_3} - X_{P_2})(Z_{P_1} - Z_{P_2}) - (X_{P_1} - X_{P_2})(Z_{P_1} - Z_{P_2}) \\ C_3 &= (X_{P_3} - X_{P_2})(Y_{P_1} - Y_{P_2}) - (X_{P_1} - X_{P_2})(Y_{P_3} - Y_{P_2}) \end{aligned} \quad (3.64).$$

Se poate scrie:

$$\overline{p_2 p_3} \times \overline{p_2 p_1} = C_1 \bar{i} + C_2 \bar{j} + C_3 \bar{k} \quad (3.65).$$

Versorul \overline{n}_1 al normalei la fața 1 a cubului, se scrie:

$$\overline{n}_1 = \frac{C_1 \bar{i} + C_2 \bar{j} + C_3 \bar{k}}{D_1} \quad (3.66).$$

unde:

$$D_1 = \sqrt{C_1^2 + C_2^2 + C_3^2} \quad (3.67)$$

Analog, pentru fața 2 a cubului, definită de punctele P_4, P_5, P_6 , se poate scrie:

$$\begin{aligned} \overline{P_5 P_4} &= \overline{P_4} - \overline{P_5} \\ \overline{P_5 P_6} &= \overline{P_6} - \overline{P_5} \end{aligned} \quad (3.68)$$

respectiv:

$$\begin{aligned} \overline{P_5 P_4} &= (X_{P_4} - X_{P_5}) \cdot \bar{i} + (Y_{P_4} - Y_{P_5}) \cdot \bar{j} + (Z_{P_4} - Z_{P_5}) \cdot \bar{k} \\ \overline{P_5 P_6} &= (X_{P_6} - X_{P_5}) \cdot \bar{i} + (Y_{P_6} - Y_{P_5}) \cdot \bar{j} + (Z_{P_6} - Z_{P_5}) \cdot \bar{k} \end{aligned} \quad (3.69)$$

Produsul vectorial al celor doi vectori, care reprezintă vectorul normalei la planul feței 2, va fi:

$$\overline{N_2} = \overline{P_5 P_6} \times \overline{P_5 P_4} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ X_{P_6} - X_{P_5} & Y_{P_6} - Y_{P_5} & Z_{P_6} - Z_{P_5} \\ X_{P_4} - X_{P_5} & Y_{P_4} - Y_{P_5} & Z_{P_4} - Z_{P_5} \end{vmatrix} \quad (3.70)$$

Notând:

$$\begin{aligned} C_4 &= (Y_{P_6} - Y_{P_5})(Z_{P_4} - Z_{P_5}) - (Z_{P_6} - Z_{P_5})(Y_{P_4} - Y_{P_5}) \\ C_5 &= (X_{P_6} - X_{P_5})(Z_{P_4} - Z_{P_5}) - (X_{P_4} - X_{P_5})(Z_{P_6} - Z_{P_5}) \\ C_6 &= (X_{P_6} - X_{P_5})(Y_{P_4} - Y_{P_5}) - (X_{P_4} - X_{P_5})(Y_{P_6} - Y_{P_5}) \end{aligned} \quad (3.71)$$

Se poate scrie:

$$\overline{P_5 P_6} \times \overline{P_5 P_4} = C_4 \bar{i} + C_5 \bar{j} + C_6 \bar{k} \quad (3.72)$$

Versorul $\overline{n_2}$ al normalei la fața 2 a cubului, va fi:

$$\overline{n_2} = \frac{C_4 \bar{i} + C_5 \bar{j} + C_6 \bar{k}}{D_2} \quad (3.73)$$

unde:

$$D_2 = \sqrt{C_4^2 + C_5^2 + C_6^2} \quad (3.74)$$

Pentru fața 3 a cubului, definită de punctele P_7, P_8, P_9 , se poate scrie:

$$\begin{aligned} \overline{P_8 P_7} &= \overline{P_7} - \overline{P_8} \\ \overline{P_8 P_9} &= \overline{P_9} - \overline{P_8} \end{aligned} \quad (3.75)$$

respectiv:

$$\begin{aligned} \overline{P_8 P_7} &= (X_{P_7} - X_{P_8}) \cdot \bar{i} + (Y_{P_7} - Y_{P_8}) \cdot \bar{j} + (Z_{P_7} - Z_{P_8}) \cdot \bar{k} \\ \overline{P_8 P_9} &= (X_{P_9} - X_{P_8}) \cdot \bar{i} + (Y_{P_9} - Y_{P_8}) \cdot \bar{j} + (Z_{P_9} - Z_{P_8}) \cdot \bar{k} \end{aligned} \quad (3.76)$$

Vectorul normalei la planul feței 3 a cubului va fi produsul vectorial:

$$\overline{N}_3 = \overline{p_8 p_6} \times \overline{p_8 p_7} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ X_{P_6} - X_{P_8} & Y_{P_6} - Y_{P_8} & Z_{P_6} - Z_{P_8} \\ X_{P_7} - X_{P_8} & Y_{P_7} - Y_{P_8} & Z_{P_7} - Z_{P_8} \end{vmatrix} \quad (3.77).$$

Notând:

$$\begin{aligned} C_7 &= (Y_{P_6} - Y_{P_8})(Z_{P_7} - Z_{P_8}) - (Z_{P_6} - Z_{P_8})(Y_{P_7} - Y_{P_8}) \\ C_8 &= (X_{P_6} - X_{P_8})(Z_{P_7} - Z_{P_8}) - (X_{P_7} - X_{P_8})(Z_{P_6} - Z_{P_8}) \\ C_9 &= (X_{P_6} - X_{P_8})(Y_{P_7} - Y_{P_8}) - (X_{P_7} - X_{P_8})(Y_{P_6} - Y_{P_8}) \end{aligned} \quad (3.78).$$

Se poate scrie:

$$\overline{p_8 p_6} \times \overline{p_8 p_7} = C_7 \bar{i} + C_8 \bar{j} + C_9 \bar{k} \quad (3.79).$$

Versorul \overline{n}_3 al normalei la fața 3 a cubului se scrie:

$$\overline{n}_3 = \frac{C_7 \bar{i} + C_8 \bar{j} + C_9 \bar{k}}{D_3} \quad (3.80),$$

în care:

$$D_3 = \sqrt{C_7^2 + C_8^2 + C_9^2} \quad (3.81).$$

Având determinați \overline{n}_1 , \overline{n}_2 și \overline{n}_3 - versorii normali independenți la cele trei fețe ale cubului, ei vor determina orientarea acestuia în raport cu sistemul de referință OXYZ, legat de capul de măsurare.

Așadar:

$$\begin{aligned} \overline{n}_1 &= \frac{C_1}{D_1} \bar{i} + \frac{C_2}{D_1} \bar{j} + \frac{C_3}{D_1} \bar{k} \\ \overline{n}_2 &= \frac{C_4}{D_2} \bar{i} + \frac{C_5}{D_2} \bar{j} + \frac{C_6}{D_2} \bar{k} \\ \overline{n}_3 &= \frac{C_7}{D_3} \bar{i} + \frac{C_8}{D_3} \bar{j} + \frac{C_9}{D_3} \bar{k} \end{aligned} \quad (3.82).$$

Matricea de orientare va fi deci:

$${}^{cm} T_{\vec{0}_{cr}} = \begin{vmatrix} \frac{C_1}{D_1} & \frac{C_2}{D_1} & \frac{C_3}{D_1} \\ \frac{C_4}{D_2} & \frac{C_5}{D_2} & \frac{C_6}{D_2} \\ \frac{C_7}{D_3} & \frac{C_8}{D_3} & \frac{C_9}{D_3} \end{vmatrix} \quad (3.83).$$

Așadar, exactitatea de orientare a corpului de probă (cub) în raport cu referința OXYZ, legată de capul de măsurare se exprimă astfel:

- pentru axa „n₁”:

$$\begin{aligned} AP_{n_1} &= \frac{\overline{C_1}}{D_1} - \frac{C_1}{D_1} \\ AP_{n_1} &= \frac{\overline{C_2}}{D_1} - \frac{C_2}{D_1} \\ AP_{n_1} &= \frac{\overline{C_3}}{D_1} - \frac{C_3}{D_1} \end{aligned} \quad (3.84).$$

cu:

$$\begin{aligned} \frac{\overline{C_1}}{D_1} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_1}{D_1} \right)_i \\ \frac{\overline{C_2}}{D_1} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_2}{D_1} \right)_i \\ \frac{\overline{C_3}}{D_1} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_3}{D_1} \right)_i \end{aligned} \quad (3.85).$$

unde: - $\frac{\overline{C_1}}{D_1}$, $\frac{\overline{C_2}}{D_1}$, $\frac{\overline{C_3}}{D_1}$ - sunt valorile medii ale orientărilor unghiulare ale axei „n₁”,

obținute pentru aceeași poziție comandată, repetată de $i=1,2,\dots,n$ ori;

- $\frac{C_1}{D_1}$, $\frac{C_2}{D_1}$, $\frac{C_3}{D_1}$ - sunt valorile orientărilor comandate ale axei „n”;

- $\left(\frac{C_1}{D_1} \right)_i$, $\left(\frac{C_2}{D_1} \right)_i$, $\left(\frac{C_3}{D_1} \right)_i$ - sunt orientările axei „n₁” pentru poziția de rangul

„i”, atinsă efectiv;

- pentru axa „n₂”:

$$\begin{aligned} AP_{n_2} &= \frac{\overline{C_4}}{D_2} - \frac{C_4}{D_2} \\ AP_{n_2} &= \frac{\overline{C_5}}{D_2} - \frac{C_5}{D_2} \\ AP_{n_2} &= \frac{\overline{C_6}}{D_2} - \frac{C_6}{D_2} \end{aligned} \quad (3.86).$$

cu:

$$\begin{aligned} \frac{\overline{C_4}}{D_2} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_4}{D_2} \right)_i \\ \frac{\overline{C_5}}{D_2} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_5}{D_2} \right)_i \\ \frac{\overline{C_6}}{D_2} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_6}{D_2} \right)_i \end{aligned} \quad (3.87).$$

iar pentru axa „n₃”:

$$\begin{aligned} AP_{n_1} &= \frac{\overline{C_2}}{D_3} - \frac{C_7}{D_3} \\ AP_{n_2} &= \frac{\overline{C_8}}{D_3} - \frac{C_8}{D_3} \\ AP_{n_3} &= \frac{\overline{C_9}}{D_3} - \frac{C_9}{D_3} \end{aligned} \quad (3.88),$$

cu:

$$\begin{aligned} \frac{\overline{C_2}}{D_3} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_2}{D_3} \right), \\ \frac{\overline{C_8}}{D_3} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_8}{D_3} \right), \\ \frac{\overline{C_9}}{D_3} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_9}{D_3} \right), \end{aligned} \quad (3.89).$$

Situarea (poziționarea + orientarea) corpului de probă în raport cu reperul OXYZ, se exprimă printr-o matrice de forma:

$${}^{CM} \underline{T}_{S_{CP}} = \begin{pmatrix} \frac{C_1}{D_1} & \frac{C_2}{D_1} & \frac{C_3}{D_1} & X_{r_w} \\ \frac{C_4}{D_2} & \frac{C_5}{D_2} & \frac{C_6}{D_2} & X_{r_w} \\ \frac{C_7}{D_3} & \frac{C_8}{D_3} & \frac{C_9}{D_3} & X_{r_w} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.90).$$

iar exactitatea de situare (poziționare + orientare), printr-o matrice de forma:

$${}^{CM} \underline{AP}_{CP} = \begin{pmatrix} AP_{n_1} & AP_{n_2} & AP_{n_3} & AP_x \\ AP_{n_1} & AP_{n_2} & AP_{n_3} & AP_y \\ AP_{n_1} & AP_{n_2} & AP_{n_3} & AP_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.91).$$

Matricea exactității de situare (poziționare și orientare) a corpului de probă, CP, în raport cu un sistem de referință legat de robot, R, se poate scrie printr-o transformare ${}^R \underline{T}_{CM}$, astfel:

$${}^R \underline{AP}_{CP} = {}^R \underline{T}_{CM} \cdot {}^{CM} \underline{AP}_{CP} \quad (3.92).$$

3.3 Metode "la distanță" pentru determinarea exactității și repetabilității de situare la roboții industriali

Se caracterizează prin aceea că aparatura de măsurare se amplasează la distanță de E.T. al R.I. (câțiva metri) și deci, algoritmi de calcul utilizați se bazează în general pe calcule de triangulație.

3.3.1. Metodă și algoritm de calcul utilizând doi teodoliți pentru determinarea exactității și repetabilității de situare la roboți industriali (metoda prin intersecții)

În paragraful 3.2, s-a arătat că metodele locale presupun existența unui sistem de măsurare format dintr-un corp de probă (fixat în E.T. al R.I.) și cap (terminal) de măsurare (situat în spațiul de lucru al R.I.). Amplasarea capului de măsurare este o problemă, având în vedere aplicația concretă în care este implicat robotul industrial. În plus, existența capului de măsurare constituie ea însăși o sursă de erori.

Metoda propusă, elimină acest cap de măsurare clasic, pentru măsurători utilizându-se doar corpul de probă - cub calibrat - prins în E.T. al R.I. și măsurându-se cu ajutorul a doi teodoliți - distanțele unor puncte de pe muchiile acestuia în raport cu un sistem de referință.

1. Considerații geometrice

Dacă se urmărește fig. 3.11, se poate constata că, amplasând în punctele T_1 și T_2 ale planului xOy , două dispozitive optice de măsurare, cu ajutorul lor pot fi înregistrate lungimile segmentelor $\overline{T_1N_H}$ și $\overline{T_2N_H}$, sau direct unghiurile α_H și respectiv β_H , prin vizarea simultană a punctului N_H din plan.

Punctele T_1 și T_2 pot fi reperate cu precizie în planul xOy , tot prin sisteme optice și, prin urmare, distanța s dintre ele. În acest caz, se pot scrie relațiile:

$$\frac{s}{\sin \gamma} = \frac{s_2}{\sin \alpha_H} = \frac{s_1}{\sin \beta_H} \quad (3.93),$$

$$\gamma = 180^\circ - (\alpha_H + \beta_H) \quad (3.94).$$

și:

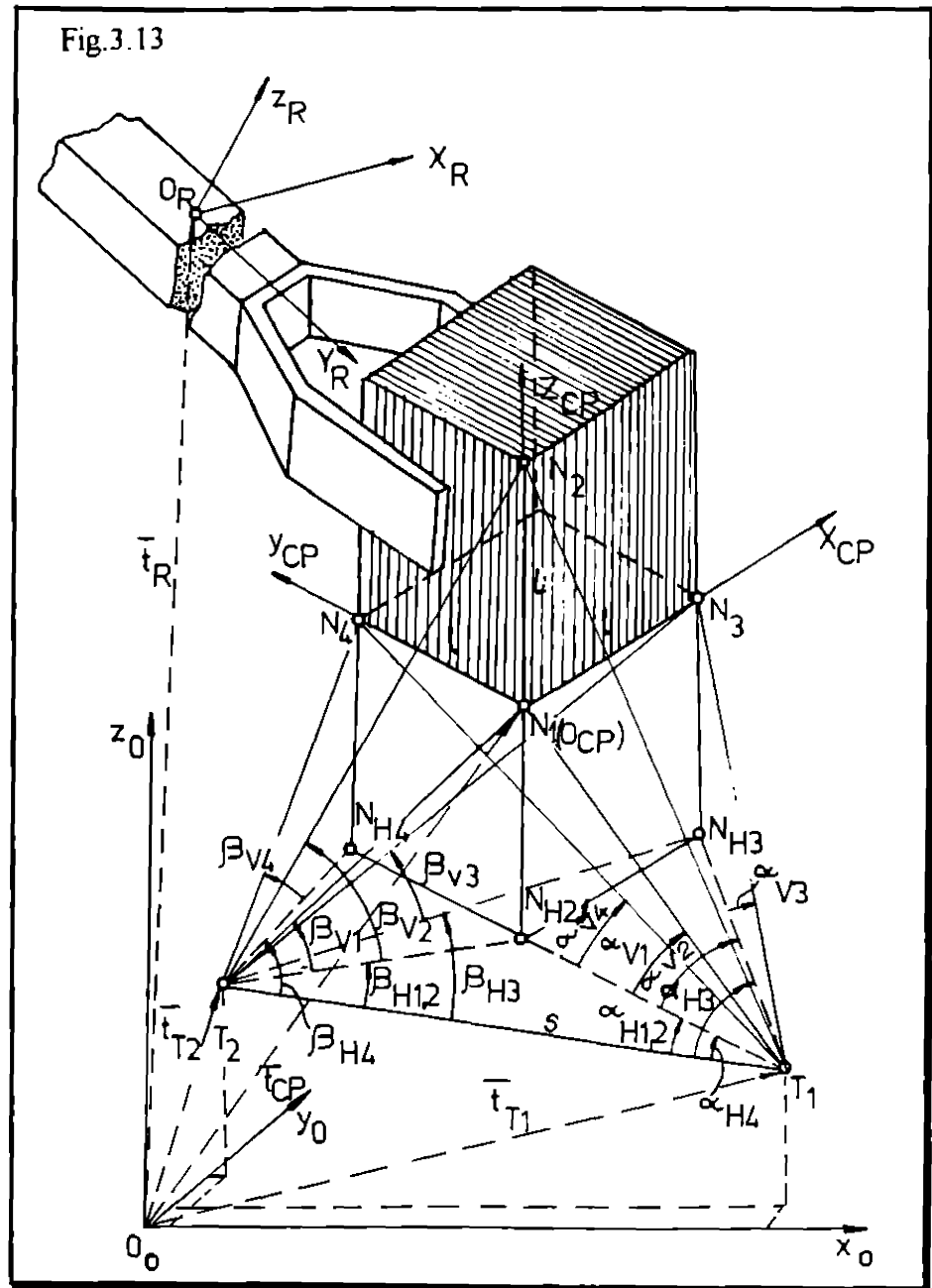
$$\varepsilon = (\mu + \alpha_H) - 360^\circ \quad (3.97).$$

Prin urmare:

$$\begin{aligned} x_N &= x_{T_1} + s_1 \cdot \sin \varepsilon \\ y_N &= y_{T_1} + s_1 \cdot \cos \varepsilon \end{aligned} \quad (3.98).$$

Repetând raționamentul pentru cazul unui punct N situat în spațiul $O_0 x_0 y_0 z_0$ (fig.3.12), se pot obține lungimile segmentelor $\overline{T_1 N}$, $\overline{T_2 N}$, $\overline{T_1 N_H}$, $\overline{T_2 N_H}$ și respectiv unghiurile α_H , β_H , α_V , β_V .

În aceste condiții, se pot determina coordonatele punctului N , cu următoarele relații:



$$\begin{aligned} x_N &= x_{T_1} + s \cdot \frac{\sin \beta_H}{\sin \gamma} \sin \varepsilon \\ y_N &= y_{T_1} + s \cdot \frac{\sin \beta_H}{\sin \gamma} \cos \varepsilon \\ z_N &= z_{T_1} + s \cdot \frac{\sin \beta_H}{\sin \gamma} \operatorname{tg} \alpha_V \\ z_{T_1} &= z_{T_2}, \quad z_N = z_{T_1} + s_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_V \end{aligned} \quad (3.99).$$

În consecință, se poate spune că, așa cum s-au determinat coordonatele unui punct în spațiu (prin vizare cu doi teodoliti) se pot determina coordonatele a 4 puncte în

spațiu. Dacă aceste puncte sunt chiar 4 colțuri ale unui corp de probă (fig.3.13), de formă cubică, atunci se poate obține poziția, respectiv orientarea acestuia în spațiul de lucru, în raport cu un sistem de axe legat de unul dintre teodoliți (T_1 de ex.).

Metoda prezentată se poate utiliza și în cazul metodelor „locale” pentru determinarea situării capului de măsurare în spațiul de lucru al robotului. Dacă se admite, în locul cubului de probă, capul de măsurare tridimensional (3D), amplasat în spațiul de lucru al robotului și se admit 4 puncte pe acesta : un punct fiind vârful triedrului și altele trei la distanțe egale față de vîrf, pe cele trei muchii concurente în vîrf și perpendiculare între ele, cele prezentate mai sus servesc și pentru determinarea situării capului de măsură în raport cu sistemul de axe legat de teodolitul T_1 (legat de hală) în cazul metodelor locale (subcapitolul 3.2).

Pentru a determina situarea capului de măsură în raport cu elementul fix al robotului, este necesar să se materializeze sistemul de referință legat de baza robotului, a cărui situare, apoi, în raport cu referința legată de teodolitul T_1 , se poate determina tot prin vizarea a patru puncte (originea sistemului și câte un punct de pe fiecare axă).

Ceea ce este dificil de realizat este materializarea originii sistemului de axe atașat bazei robotului, precum și a axei Z .

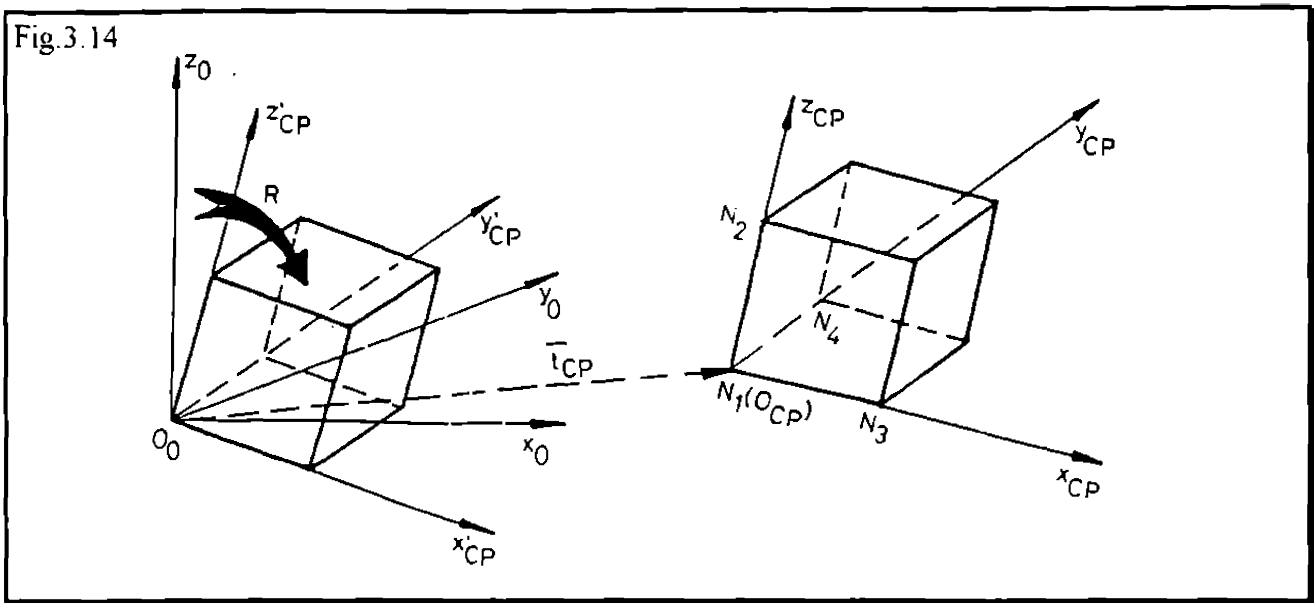
Această operațiune nu este însă necesară în majoritatea situațiilor practice, concrete, având în vedere faptul că situarea componentelor unei celule de fabricație flexibilă robotizată și implicit a robotului implicat în aplicație, se exprimă în raport cu un sistem de referință exterior acesteia, legat de hală [K3], acestei cerințe răspunzându-i excelent principiul de măsurare a caracteristicilor de situare prin metode „la distanță”.

În cazul calibrării unui robot apare însă necesitatea materializării sistemului de referință legat de baza robotului. Pentru structuri concrete de roboți, acceptând o marjă de eroare, se poate realiza această operațiune.

Revenind la problematica abordată, s-au stabilit deci coordonatele a patru puncte (patru vîrfuri) ale cubului calibrat - corp de probă - prin vizarea lor simultană cu doi teodoliți (metoda „intersecției înainte”). În cele ce urmează, pe baza acestor coordonate, se determină exactitatea și repetabilitatea de situare.

2. Matrici de transformare

Punctele N_1 (O_{CP}), N_2 , N_3 și N_4 pun în evidență sistemul de referință legat de corpul de probă $O_{CP}x_{CP}y_{CP}z_{CP}$. Situația acestui sistem de referință în raport cu sistemul de referință $O_0x_0y_0z_0$ pune în evidență situația corpului de probă în raport cu sistemul amintit. Referința $O_0x_0y_0z_0$ este un sistem de referință fix, legat de unul dintre teodoliți (de hală), amplasați în exteriorul spațiului de lucru al robotului.



Sistemul de referință legat de corpul de probă, $O_{CP}x_{CP}y_{CP}z_{CP}$ se poate considera că, inițial a corespuns cu sistemul de referință $O_0x_0y_0z_0$, căruia i s-a aplicat o transformare geometrică (TR), compusă dintr-o rotație R și o translație, T (fig.3.14).

Deci,

$$O_0x_0y_0z_0 \xrightarrow{T} O_0x'_{CP}y'_{CP}z'_{CP} \xrightarrow{R} O_{CP}x_{CP}y_{CP}z_{CP} \quad (3.100)$$

Transformarea de rotație este definită de matricea de rotație [R], care este o matrice ortogonală cu termenii compuși din cosinuzii directori ai axelor sistemului de referință $O_{CP}x_{CP}y_{CP}z_{CP}$.

Transformarea de translație este definită de vectorul de poziție $\overline{t_{CP}}$.

Așadar, matricea de transformare între $O_{CP}x_{CP}y_{CP}z_{CP}$ și $O_0x_0y_0z_0$, are forma:

$${}^0TR_{CP} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & x_{CP} \\ n_y & o_y & a_y & y_{CP} \\ n_z & o_z & a_z & z_{CP} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.101)$$

unde:

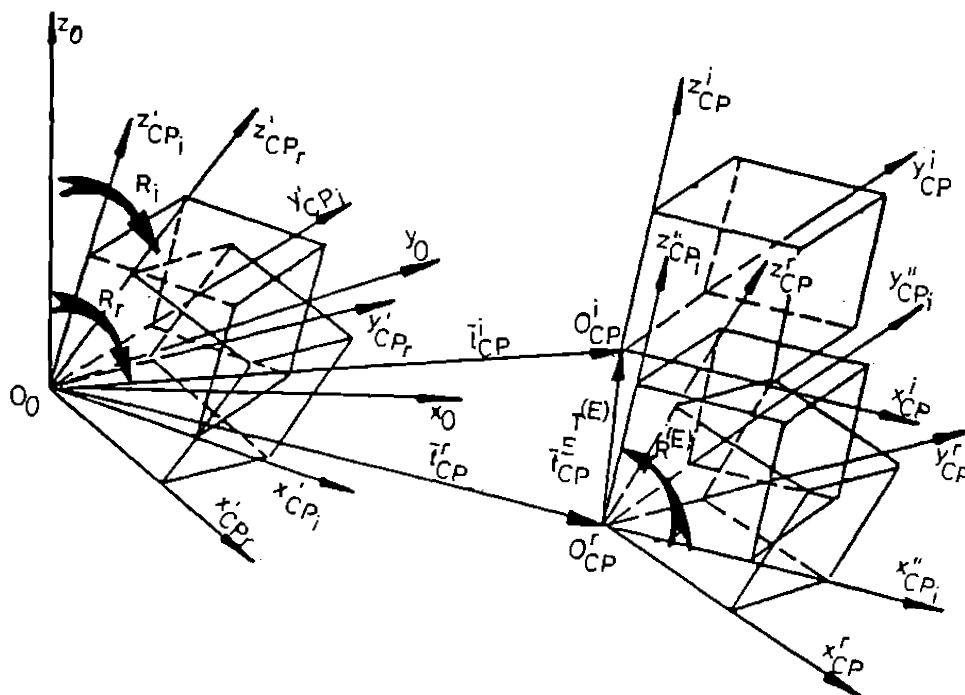
$$\begin{aligned}
 n_x &= \frac{x_{N_1} - x_{CP}}{l} & n_y &= \frac{y_{N_1} - y_{CP}}{l} & n_z &= \frac{z_{N_1} - z_{CP}}{l} \\
 o_x &= \frac{x_{N_2} - x_{CP}}{l} & o_y &= \frac{y_{N_2} - y_{CP}}{l} & o_z &= \frac{z_{N_2} - z_{CP}}{l} \\
 a_x &= \frac{x_{N_3} - x_{CP}}{l} & a_y &= \frac{y_{N_3} - y_{CP}}{l} & a_z &= \frac{z_{N_3} - z_{CP}}{l}
 \end{aligned} \quad (3.102),$$

l - fiind latura cubului, iar $O_{CP} \equiv N_1$ ($x_{CP} = x_{N_1}, y_{CP} = y_{N_1}, z_{CP} = z_{N_1}$).

3. Matricea erorilor

În procesul în care se propune să se atingă punctul țintă O'_{CP} (ideal, comandat, dorit), datorită erorilor lanțului cinematic al robotului, acest lucru nu se poate realiza. Din acest motiv, în locul țintei ideale (O'_{CP}) robotul atinge o țintă reală (O^r_{CP}) (fig.3.15 și fig. 3.16). Transformările necesare pentru a aduce poziția reală în cea ideală și a o raporta la $O_0x_0y_0z_0$, sunt exprimate prin:

Fig.3.15

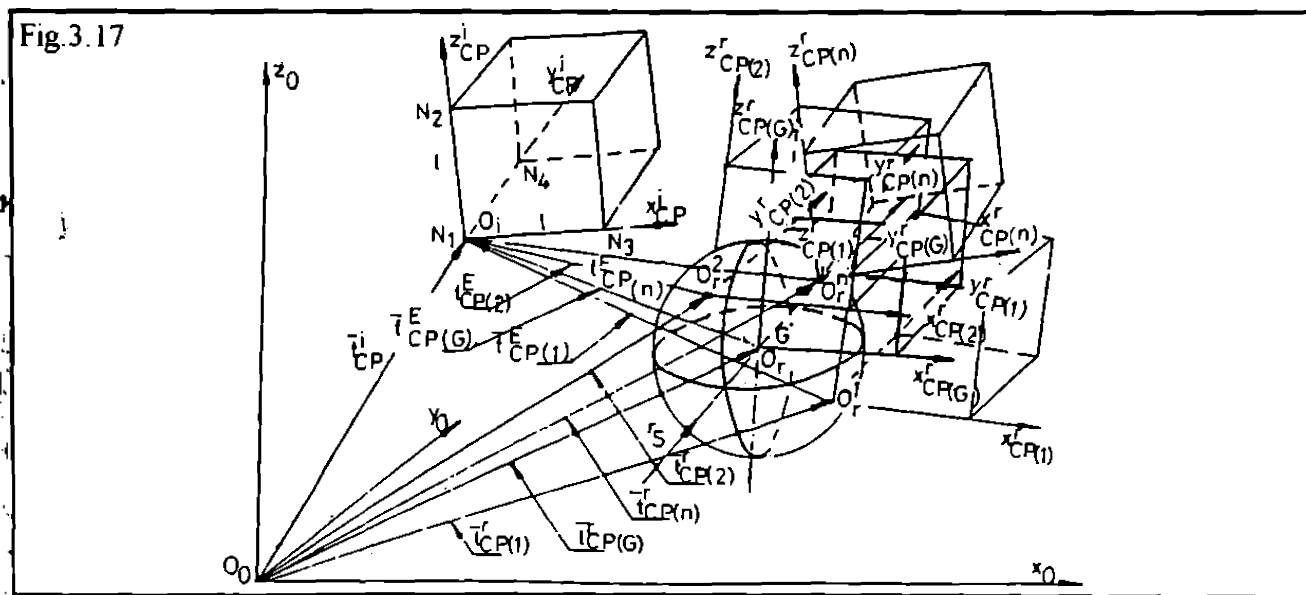


Termenii acestei matrici sunt de forma:

$$\begin{aligned} n_q^E &= \frac{(q'_{N_3} - q'_{N_2}) - (q'_{CP} - q'_{CP})}{l} \\ o_q^E &= \frac{(q'_{N_3} - q'_{N_2}) - (q'_{CP} - q'_{CP})}{l} \\ a_q^E &= \frac{(q'_{N_3} - q'_{N_2}) - (q'_{CP} - q'_{CP})}{l} \\ q_{CP}^E &= q'_{CP} - q_{CP}, \text{ cu } q = x, y, z \end{aligned} \quad (3.105).$$

4. Exactitatea și repetabilitatea de poziționare

a) **Exactitatea de poziționare (AP)** - se exprimă ca fiind distanța dintre poziția ideală (comandată) a P.C. și centrul de greutate al mulțimii de poziții atinse în realitate, la un număr „n” de deplasări ale robotului. În fig.3.17 O_i reprezintă poziția ideală a P.C., iar O_r^G - este punctul centru de greutate al tuturor punctelor atinse în realitate.



Practic, punctul O_r^G reprezintă centrul de greutate al învelișului sferic, ce cuprinde totalitatea punctelor atinse în realitate de P.C.

Coordonatelor punctului O_r^G vor fi:

$$q_r^G = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i^r \quad q = x, y, z \quad (3.106).$$

Deci, exactitatea de poziționare se exprimă prin mărimea vectorului $\overline{O_0^G O_r^G}$.

(fig.3.17).

$$AP = \overline{O_r^G O_r} = \sqrt{(x_r^G - x_r)^2 + (y_r^G - y_r)^2 + (z_r^G - z_r)^2} \quad (3.107),$$

respectiv, pe axe:

$$AP_q = \overline{(O_r^G O_r)_q} = q_r^G - q_r \quad q = x, y, z \quad (3.108),$$

cu: x_r^G, y_r^G, z_r^G coordonatele punctului O_r^G și

x_r, y_r, z_r coordonatele punctului O_r (ideal, comandat).

Tinând seama de aceste relații și urmărind fig.3.17, se poate scrie matricea exactității de poziționare:

$$AP = (x_{CP}^E \ y_{CP}^E \ z_{CP}^E \ 1)^T \quad (3.109),$$

cu următoarea structură a termenilor:

$$q_{CP}^E = q_{CP}^I - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_{CP(j)}^I \quad q = x, y, z \quad (3.110),$$

b) Repetabilitatea de poziționare (RP) este egală ca mărime cu raza sferei al cărei centru este centrul de greutate al mulțimii punctelor atinse și care cuprinde deci, ca un înveliș sferic, toate aceste puncte (fig.3.17).

Expresia lui RP va fi:

$$RP = \bar{L} + 3S_L \quad (3.111),$$

cu:

$$\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_j \quad (3.112),$$

și:

$$L_j = \sqrt{(x_r^I - x_r^G)^2 + (y_r^I - y_r^G)^2 + (z_r^I - z_r^G)^2} \quad (3.113),$$

$$S_L = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (L_j - \bar{L})^2} \quad (3.114),$$

Relația (3.111) se poate deci scrie:

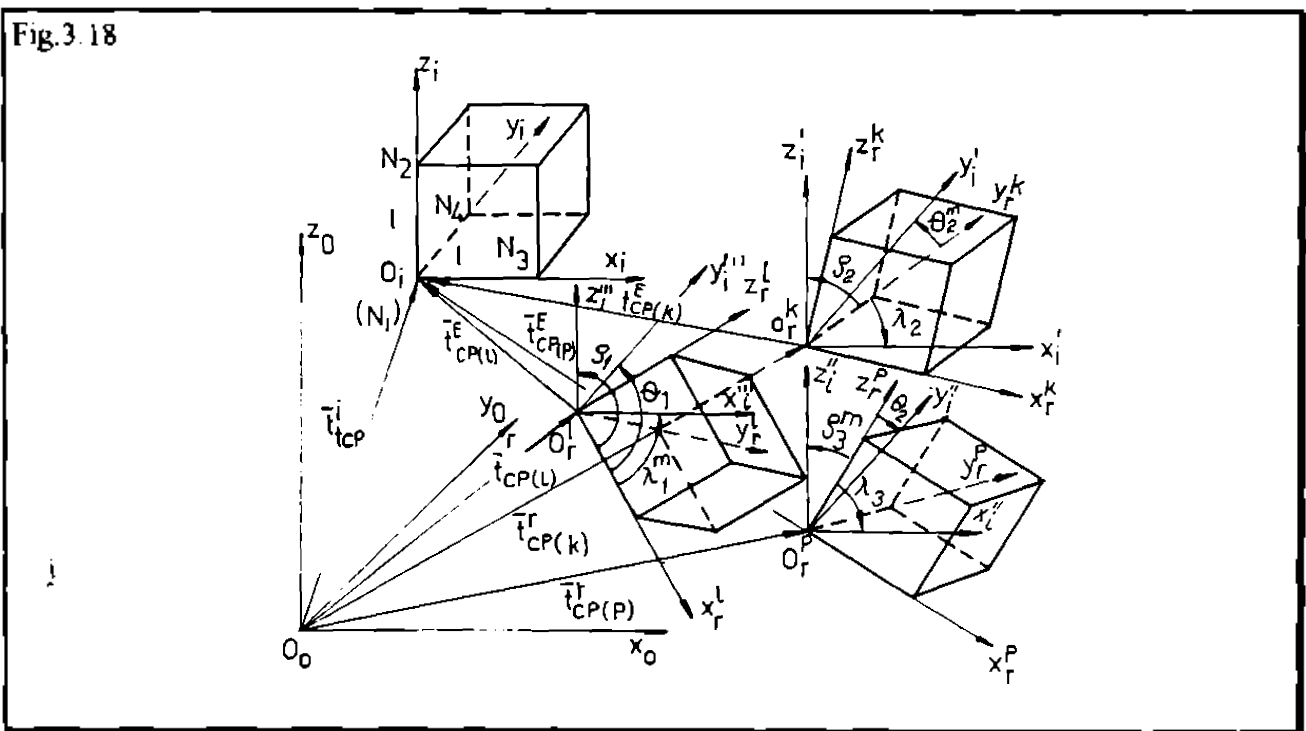
$$RP = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_j + 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (L_j - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_j)^2} \quad (3.115),$$

5. Exactitatea și repetabilitatea de orientare

Se exprimă prin diferența între valorile medii ale unghiurilor formate de direcțiile axelor sistemului de referință atașat pozițiilor reale realizate de corpul de probă și direcțiile axelor sistemului de referință atașat poziției comandate (ideale),

în raport cu un sistem de referință de bază, $O_0x_0y_0z_0$.

Desigur că, în timpul măsurătorilor, valorile maxime, minime și medii ale unghiurilor direcțiilor axelor sistemelor de referință raportate la poziția ideală, se ating pentru diferite poziții ale P.C. (fig.3.18). Practic, se poate spune că exactitatea de orientare este o mărime teoretică ce definește un grup de măsurători. Unghiurile λ_j , θ_j , ρ_j nu vor atinge valorile medii λ_j^m , θ_j^m , ρ_j^m în același moment, deci în același punct al spațiului delimitat de sfera de rază $r_j(RP)$. Ca atare va apare un pachet de valori unghiulare ce vor defini cele trei poziții ale corpului de probă în raport cu poziția ideală.



Acestea sunt: $\lambda_1^m, \theta_1, \rho_1$

$\lambda_2, \theta_2^m, \rho_2$

$\lambda_3, \theta_3, \rho_3^m$

Valorile unghiurilor respective se obțin cu relațiile:

$$\lambda_1^m = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_j, \quad \theta_2^m = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \theta_j, \quad \rho_3^m = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \rho_j, \quad (3.116).$$

Se consideră trei drepte concurente în punctul O_r^G paralele cu direcțiile axelor sistemelor de referință, corespunzător valorilor medii ale unghiurilor din relația (3.116).

Prin urmare, exactitatea de orientare se va exprima prin ansamblul de unghiuri având următoarele valori:

$$\begin{aligned}
 (AP_a)_s &= a_s = \lambda_s - \hat{\lambda}_s \\
 (AP_b)_s &= b_s = \theta_s - \hat{\theta}_s \quad s = 1,2,3 \\
 (AP_c)_s &= c_s = \rho_s - \hat{\rho}_s
 \end{aligned}
 \tag{3.117}$$

Valorile λ_s ($s=1$), θ_s ($s=2$), ρ_s ($s=3$) sunt valorile medii ale acestor unghiuri exprimate cu relația (3.116), adică: $\lambda_s = \lambda_s^m$, $\theta_s = \theta_s^m$, $\rho_s = \rho_s^m$.

Repetabilitatea de orientare este reprezentată, conform ISO 9283.90 de abaterea standard într-o distribuție normală.

Ea este dată de relațiile:

$$\begin{aligned}
 (RP_a)_s &= \pm 3(s_a)_s = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\lambda_j - \lambda_s)^2}{n-1}} \\
 (RP_b)_s &= \pm 3(s_b)_s = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\theta_j - \theta_s)^2}{n-1}} \\
 (RP_c)_s &= \pm 3(s_c)_s = \pm 3 \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\rho_j - \rho_s)^2}{n-1}}
 \end{aligned}
 \tag{3.118}$$

cu $s=1,2,3$.

6. Expresia matricii exactității de situare

Este de forma:

$${}^E TR = \begin{bmatrix} n_x^E & o_x^E & a_x^E & x_{CP}^E \\ n_y^E & o_y^E & a_y^E & y_{CP}^E \\ n_z^E & o_z^E & a_z^E & z_{CP}^E \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \tag{3.119}$$

Tinând cont de cele prezentate anterior, termenii matricii (3.119) se exprimă astfel:

$$\begin{aligned}
 n_x^E &= \frac{1}{l} \left[(x'_{N_s} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x'_{N_{s(j)}}) - (x'_{CP} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x'_{CP(j)}) \right] \\
 n_y^E &= \frac{1}{l} \left[(y'_{N_s} - y'_{N_{s(j)}}) - (y'_{CP} - y'_{CP(j)}) \right] \\
 n_z^E &= \frac{1}{l} \left[(z'_{N_s} - z'_{N_{s(j)}}) - (z'_{CP} - z'_{CP(j)}) \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.120}$$

$$\begin{aligned}
o_x^E &= \frac{1}{l} \left[(x_{N_4}^l - x_{N_{4(2)}}^r) - (x_{CP}^l - x_{CP(2)}^r) \right] \\
o_y^E &= \frac{1}{l} \left[\left(y_{N_4}^l - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{N_{4(j)}}^r \right) - \left(y_{CP}^l - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{CP(j)}^r \right) \right] \\
o_z^E &= \frac{1}{l} \left[(z_{N_4}^l - z_{N_{4(2)}}^r) - (z_{CP}^l - z_{CP(2)}^r) \right] \\
a_x^E &= \frac{1}{l} \left[(x_{N_2}^l - x_{N_{2(3)}}^r) - (x_{CP}^l - x_{CP(3)}^r) \right] \\
a_y^E &= \frac{1}{l} \left[(y_{N_2}^l - y_{N_{2(3)}}^r) - (y_{CP}^l - y_{CP(3)}^r) \right] \\
a_z^E &= \frac{1}{l} \left[\left(z_{N_2}^l - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{N_{2(j)}}^r \right) - \left(z_{CP}^l - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{CP(j)}^r \right) \right]
\end{aligned} \tag{3.120}$$

Termenii (3.120) ai matricei exactității de orientare, împreună cu termenii dați de relațiile (3.109) și (3.110) aferenți matricei exactității de poziționare, introduși în (3.119), conduc la expresia finală a matricei exactității de situare.

7. Repetabilitatea de situare

Relația (3.113) poate fi scrisă, în contextul celor tratate, astfel:

$$L_j = \sqrt{(x_{CP}^l - \sum_{j=1}^n x_{CP}^j)^2 + (y_{CP}^l - \sum_{j=1}^n y_{CP}^j)^2 + (z_{CP}^l - \sum_{j=1}^n z_{CP}^j)^2} \tag{3.121},$$

unde $x_{CP}^j, y_{CP}^j, z_{CP}^j$ reprezintă coordonatele originii sistemului de referință legat de corpul de probă, pentru cele "j" măsurători.

Cu relația (3.121), înglobată în relațiile (3.111), (3.112), (3.114) și (3.115), precum și cu relațiile (3.118), se poate aprecia repetabilitatea de situare a corpului de probă în raport cu $O_o x_o y_o z_o$.

Relațiile deduse în prezentul algoritm completează lacune ale normativului ISO 9283:90, descriind totodată un limbaj matematic unitar pentru determinarea exactității și repetabilității de situare, putând fi utilizate în procesul de prelucrare a datelor experimentale.

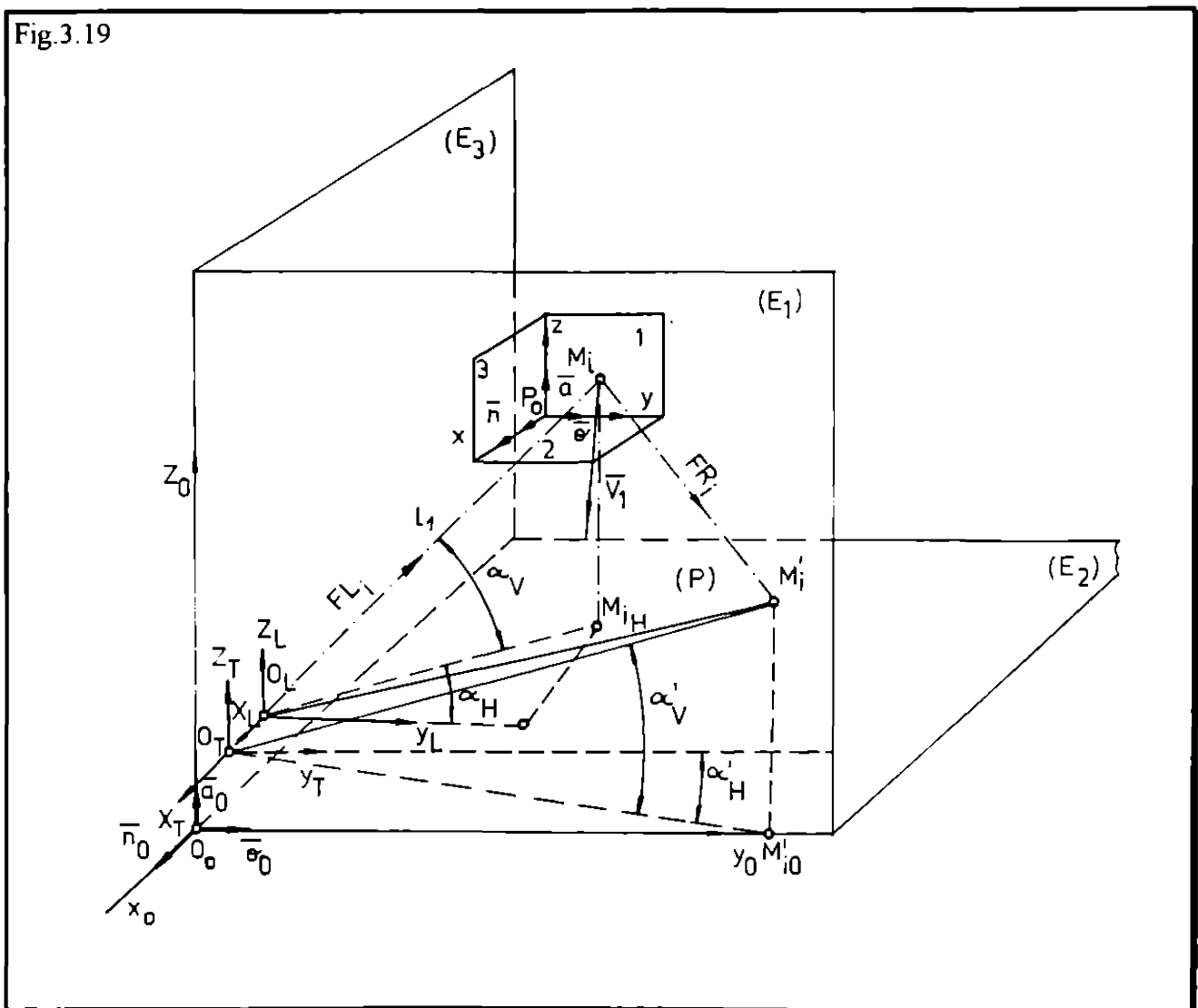
3.3.2 Metodă și algoritm de calcul pentru determinarea exactității de de situare a roboților industriali, utilizând un telemetru laser

Face parte din categoria metodelor de măsurare "la distanță", fără contact, fără cap de măsurare, eliminând astfel dezavantajele impuse de prezența acestuia.

1. Principiul metodei

Corpul de probă (cub calibrat), are montate pe trei fețe ale sale adiacente, câte trei oglinzi plane. Un telemetru laser TL, trimite succesiv câte un fascicol laser FL_i pe fiecare oglindă i (i=1,2,3), reflectat în punctul de incidență M_i. Fascicolul reflectat FR_i va forma pe ecranul E_i fix, spotul luminos M'_i. Teodolitul T_i reperează punctul M'_i, măsurând unghiurile α'_k și α'_v . La rândul său, telemetrul laser măsoară distanța l_i , dintre originea sa optică O_L și punctul M_i (fig. 3.19).

Fig.3.19



Cu ajutorul datelor măsurate, se calculează coordonatele punctelor M_i și M'_i față de un sistem de referință fix. Punctele O_L, M_i, M'_i definesc un plan, în care se găsește bisectoarea unghiului O_LM_iM'_i, normală pe suprafața oglinzii plane "i". Normala are versorul \bar{v}_i . Ecuația planului "i" se obține cunoscând faptul că el trece

prin M_i și este perpendicular pe versorul \bar{v}_i . Intersecția celor trei plane "i" ($i=1,2,3$) este originea sistemului de coordonate legat de corpul de probă, iar versorii \bar{v}_i sunt versorii axelor sistemului de coordonate respectiv.

Intr-o altă variantă, se iluminează pe rând, cu fascicol laser, șase puncte aflate pe cele trei oglinzi plane, fixate pe suprafețele corpului de probă, de exemplu în distribuția $3 \times 2 \times 1$. Cunoscând distanța l_i a punctului M_i față de punctul O_L și unghiurile α_H și α_V , ale direcției de vizare a punctului M_i , se pot calcula coordonatele acestui punct.

Cunoscând coordonatele celor șase puncte de pe suprafața corpului de probă, se poate determina matricea de situare a acestuia.

2. Algoritm de calcul

Fie originea O_0 a sistemului de coordonate fix, iar axele O_0x_0 , O_0y_0 și O_0z_0 intersecțiile planelor ecranelor (E_1), (E_2) și (E_3) - fig.3.19. Centrele optice O_L și O_T ale temetrului laser, respectiv teodolitului, au coordonatele în raport cu sistemul de referință $O_0x_0y_0z_0$, x_L , y_L , z_L respectiv x_T , y_T , z_T .

Coordonatele punctului M_i vor fi, în raport cu sistemul de referință cu originea în punctul O_L :

$$\begin{aligned} O_{Lx_{M_i}} &= l_i \cdot \cos \alpha_V \cdot \sin \alpha_H \\ O_{Ly_{M_i}} &= l_i \cdot \cos \alpha_V \cdot \cos \alpha_H \\ O_{Lz_{M_i}} &= l_i \cdot \sin \alpha_V \end{aligned} \quad (3.122).$$

Pentru calculul coordonatelor punctului M'_i în raport cu sistemul de referință cu originea O_T , se determină pentru început, distanța între punctele O_T și M'_{i0} .

$$l_{O_T M'_{i0}} = x_T \cdot \frac{1}{\sin \alpha'_H} \quad (3.123).$$

Așadar :

$$O_{T_{y_{M'_{i0}}}} = l_{O_T M'_{i0}} \cdot \cos \alpha'_H = x_T \cdot \operatorname{ctg} \alpha'_H \quad (3.124),$$

$$O_{T_{z_{M'_{i0}}}} = l_{O_T M'_{i0}} \cdot \operatorname{tg} \alpha'_V = x_T \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha'_V}{\sin \alpha'_H} \quad (3.125).$$

În consecință coordonatele punctului M'_{i0} vor fi, în sistemul de referință cu originea în O_T :

$$\begin{aligned}
 O_{T_1 M_1} &= -x_T \\
 O_{T_2 M_2} &= x_T \cdot \operatorname{ctg} \alpha'_H \\
 O_{T_3 M_3} &= x_T \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha'_i}{\sin \alpha'_H}
 \end{aligned} \tag{3.126}$$

În sistemul de referință cu originea O_0 , aceste coordonate vor fi :

$$\begin{aligned}
 O_{0x_{M_1}} &= l_i \cdot \cos \alpha_v \cdot \sin \alpha_H - x_L \\
 O_{0y_{M_1}} &= l_i \cdot \cos \alpha_v \cdot \cos \alpha_H - y_L \\
 O_{0z_{M_1}} &= l_i \cdot \sin \alpha_v - z_L
 \end{aligned} \tag{3.127}$$

respectiv :

$$\begin{aligned}
 O_{0x_{M_2}} &= 0 \\
 O_{0y_{M_2}} &= x_T \cdot \operatorname{ctg} \alpha'_i - y_T \\
 O_{0z_{M_2}} &= x_T \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha'_v}{\sin \alpha'_H} - z_T
 \end{aligned} \tag{3.128}$$

Planul (P), care conține punctele O_L , M_1 , M'_1 , are ecuația (în raport cu sistemul de referință $O_0x_0y_0z_0$):

$$A_p \cdot x + B_p \cdot y + C_p \cdot z + D_p = 0 \tag{3.129}$$

unde:

$$\begin{aligned}
 A_p &= - \begin{vmatrix} 1 & y_L & z_L \\ 1 & y_{M_1} & z_{M_1} \\ 1 & y_{M'_1} & z_{M'_1} \end{vmatrix} & B_p &= - \begin{vmatrix} x_L & 1 & z_L \\ x_{M_1} & 1 & z_{M_1} \\ x_{M'_1} & 1 & z_{M'_1} \end{vmatrix} \\
 C_p &= - \begin{vmatrix} x_L & y_L & 1 \\ x_{M_1} & y_{M_1} & 1 \\ x_{M'_1} & y_{M'_1} & 1 \end{vmatrix} & D_p &= \begin{vmatrix} x_L & y_L & z_L \\ x_{M_1} & y_{M_1} & z_{M_1} \\ x_{M'_1} & y_{M'_1} & z_{M'_1} \end{vmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.130}$$

Dreapta $\overline{O_L M_1}$, are ecuația :

$$\frac{x - x_{M_1}}{x_L - x_{M_1}} = \frac{y - y_{M_1}}{y_L - y_{M_1}} = \frac{z - z_{M_1}}{z_L - z_{M_1}} \tag{3.131}$$

iar dreapta $\overline{M_1 M'_1}$ are ecuația :

$$\frac{x - x_{M_1}}{x_{M'_1} - x_{M_1}} = \frac{y - y_{M_1}}{y_{M'_1} - y_{M_1}} = \frac{z - z_{M_1}}{z_{M'_1} - z_{M_1}} \tag{3.132}$$

ambele în raport cu $O_0x_0y_0z_0$.

Planul (P_B) - loc geometric al dreptelor care fac unghiuri egale cu $\overline{O_L M_1}$ și $\overline{M_1 M'_1}$, are ecuația :

$$A_B \cdot x + B_B \cdot y + C_B \cdot z + D_B = 0 \quad (3.133),$$

în raport cu $O_0x_0y_0z_0$, cu :

$$\begin{aligned} A_B &= x_L - x_{M_i} & B_B &= y_L - y_{M_i} & C_B &= z_L - z_{M_i} \\ D_B &= (x_L - x_{M_i}) \cdot x_{M_i} + (y_L - y_{M_i}) \cdot y_{M_i} + (z_L - z_{M_i}) \cdot z_{M_i} \end{aligned} \quad (3.134),$$

Bisectoarea M_i , a triunghiului $\Delta O_i M_i M_i$, se găsește la intersecția planelor (P) și (P_B) , având ecuația :

$$\frac{x - x_{M_i}}{v_{ix}} = \frac{y - y_{M_i}}{v_{iy}} = \frac{z - z_{M_i}}{v_{iz}} \quad (3.135),$$

unde:

$$\underline{v}_i = |v_{ix} \ v_{iy} \ v_{iz}|^T \quad (3.136),$$

este versorul bisectoarei unghiului M_i , în același timp și normala la suprafața (i) a corpului de probă în poziția considerată.

Ecuația bisectoarei din vârful M_i , sub formă canonică, se poate scrie:

$$\frac{x - x_{M_i}}{\begin{vmatrix} B_P & C_P \\ B_B & C_B \end{vmatrix}} = \frac{y - y_{M_i}}{\begin{vmatrix} C_P & A_P \\ C_B & A_B \end{vmatrix}} = \frac{z - z_{M_i}}{\begin{vmatrix} A_P & B_P \\ A_B & B_B \end{vmatrix}} \quad (3.137),$$

Comparând relațiile (3.137) și (3.135), componentele versorului \underline{v}_i , vor fi:

$$v_{ix} = \begin{vmatrix} B_P & C_P \\ B_B & C_B \end{vmatrix} \quad v_{iy} = \begin{vmatrix} C_P & A_P \\ C_B & A_B \end{vmatrix} \quad v_{iz} = \begin{vmatrix} A_P & B_P \\ A_B & B_B \end{vmatrix} \quad (3.138),$$

3. Matricea de situare

Așadar, bisectoarea unghiului M_i , care este în același timp normala la suprafața "i" a corpului de probă (cub calibrat), are versorul \underline{v}_i definit prin relația (3.136), respectiv (3.138).

Deci:

$$\begin{aligned} \underline{v}_1 &= |v_{1x} \ v_{1y} \ v_{1z}|^T \\ \underline{v}_2 &= |v_{2x} \ v_{2y} \ v_{2z}|^T \\ \underline{v}_3 &= |v_{3x} \ v_{3y} \ v_{3z}|^T \end{aligned} \quad (3.139),$$

reprezintă versorii normalelor la cele 3 fețe ale cubului, în punctele $M_1(x_{M1}y_{M1}z_{M1})$, $M_2(x_{M2}y_{M2}z_{M2})$, $M_3(x_{M3}y_{M3}z_{M3})$, determinate conform algoritmului de calcul prezentat în paragraful anterior. Cei trei versori definesc orientarea corpului de

probă.

Ecuția planului P_i , față "i" a cubului care admite normala de versor \bar{v}_i și trece prin punctul $M_i(x_i; y_i; z_i)$, va fi:

$$v_{ix} \cdot (x - x_{M_i}) + v_{iy} \cdot (y - y_{M_i}) + v_{iz} \cdot (z - z_{M_i}) = 0 \quad (3.140),$$

$$\text{respectiv} \quad v_{ix} \cdot x + v_{iy} \cdot y + v_{iz} \cdot z - (v_{ix} \cdot x_{M_i} + v_{iy} \cdot y_{M_i} + v_{iz} \cdot z_{M_i}) = 0 \quad (3.141),$$

Pentru cele trei fețe ale cubului, materializate prin trei plane P_i ($i=1,2,3$), se pot scrie trei ecuații (3.141):

$$\begin{aligned} v_{1x} \cdot x + v_{1y} \cdot y + v_{1z} \cdot z - (v_{1x} \cdot x_{M_1} + v_{1y} \cdot y_{M_1} + v_{1z} \cdot z_{M_1}) &= 0 \\ v_{2x} \cdot x + v_{2y} \cdot y + v_{2z} \cdot z - (v_{2x} \cdot x_{M_2} + v_{2y} \cdot y_{M_2} + v_{2z} \cdot z_{M_2}) &= 0 \\ v_{3x} \cdot x + v_{3y} \cdot y + v_{3z} \cdot z - (v_{3x} \cdot x_{M_3} + v_{3y} \cdot y_{M_3} + v_{3z} \cdot z_{M_3}) &= 0 \end{aligned} \quad (3.142),$$

Punctul P_0 (vârful cubului) având coordonatele $x_{P_0}y_{P_0}z_{P_0}$ în raport cu $O_0x_0y_0z_0$, se află la intersecția celor trei plane P_i ($i=1,2,3$), definite de relația (3.142). Așadar :

$$\begin{aligned} v_{1x} \cdot x_{P_0} + v_{1y} \cdot y_{P_0} + v_{1z} \cdot z_{P_0} - (v_{1x} \cdot x_{M_1} + v_{1y} \cdot y_{M_1} + v_{1z} \cdot z_{M_1}) &= 0 \\ v_{2x} \cdot x_{P_0} + v_{2y} \cdot y_{P_0} + v_{2z} \cdot z_{P_0} - (v_{2x} \cdot x_{M_2} + v_{2y} \cdot y_{M_2} + v_{2z} \cdot z_{M_2}) &= 0 \\ v_{3x} \cdot x_{P_0} + v_{3y} \cdot y_{P_0} + v_{3z} \cdot z_{P_0} - (v_{3x} \cdot x_{M_3} + v_{3y} \cdot y_{M_3} + v_{3z} \cdot z_{M_3}) &= 0 \end{aligned} \quad (3.143),$$

Soluționând sistemul (3.143) se obțin coordonatele punctului P_0 , în raport cu sistemul $O_0x_0y_0z_0$:

$$\begin{aligned} x_{P_0} &= \frac{\begin{vmatrix} -(v_{1x} \cdot x_{M_1} + v_{1y} \cdot y_{M_1} + v_{1z} \cdot z_{M_1}) & v_{1y} & v_{1z} \\ -(v_{2x} \cdot x_{M_2} + v_{2y} \cdot y_{M_2} + v_{2z} \cdot z_{M_2}) & v_{2y} & v_{2z} \\ -(v_{3x} \cdot x_{M_3} + v_{3y} \cdot y_{M_3} + v_{3z} \cdot z_{M_3}) & v_{3y} & v_{3z} \end{vmatrix}}{D_i} \\ y_{P_0} &= \frac{\begin{vmatrix} v_{1x} & -(v_{1x} \cdot x_{M_1} + v_{1y} \cdot y_{M_1} + v_{1z} \cdot z_{M_1}) & v_{1z} \\ v_{2x} & -(v_{2x} \cdot x_{M_2} + v_{2y} \cdot y_{M_2} + v_{2z} \cdot z_{M_2}) & v_{2z} \\ v_{3x} & -(v_{3x} \cdot x_{M_3} + v_{3y} \cdot y_{M_3} + v_{3z} \cdot z_{M_3}) & v_{3z} \end{vmatrix}}{D_i} \\ z_{P_0} &= \frac{\begin{vmatrix} v_{1x} & v_{1y} & -(v_{1x} \cdot x_{M_1} + v_{1y} \cdot y_{M_1} + v_{1z} \cdot z_{M_1}) \\ v_{2x} & v_{2y} & -(v_{2x} \cdot x_{M_2} + v_{2y} \cdot y_{M_2} + v_{2z} \cdot z_{M_2}) \\ v_{3x} & v_{3y} & -(v_{3x} \cdot x_{M_3} + v_{3y} \cdot y_{M_3} + v_{3z} \cdot z_{M_3}) \end{vmatrix}}{D_i} \end{aligned} \quad (3.144),$$

$$D_i = \begin{vmatrix} v_{1x} & v_{1y} & v_{1z} \\ v_{2x} & v_{2y} & v_{2z} \\ v_{3x} & v_{3y} & v_{3z} \end{vmatrix} \quad (3.145).$$

Tinând seama de relațiile (3.136), (3.138), (3.139), (3.144) și (3.145) se poate scrie matricea de situare a corpului de probă în sistemul de referință $O_0x_0y_0z_0$:

$${}^{O_0}I_{CP} = \begin{vmatrix} v_{1x} & v_{1y} & v_{1z} & x_{P_0} \\ v_{2x} & v_{2y} & v_{2z} & y_{P_0} \\ v_{3x} & v_{3y} & v_{3z} & z_{P_0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.146).$$

3.4. Concluzii

Așadar, în capitolul 3, se propun câteva metodologii de determinare a caracteristicilor de situare la roboți și componentele sistemelor de fabricație flexibilă robotizată, atât pentru cazul metodelor „locale” cât și pentru metodele „la distanță”, precum și algoritmi de calcul corespunzători celor două categorii de metode.

Totodată se propune, în completare la normativele existente actualmente pe plan mondial, exprimarea matricială a exactității și repetabilității de situare, în concordanță cu limbajul matematic unitar utilizat în robotică.

CAPITOLUL 4

APLICAREA PROBLEMEI DE SITUARE LA CALIBRAREA ROBOȚILOR

4.1. Exprimarea problemei de calibrare

Un înalt nivel al exactității roboților poate fi citat ca cerință esențială în multe aplicații robotizate avansate. Fără modificări ale structurii mecanice, capacitatea de situare a roboților poate fi îmbunătățită cu succes prin diverse procedee de calibrare. Luând în considerare doar aspectul de situare statică, exactitatea de situare a unui robot este afectată de:

a) factori geometrici, cum sunt variațiile în lungimile elementelor și orientării articulațiilor;

b) factori negeometrici, cum sunt: elasticități ale elementelor și jocuri în cuple, complianțe, excentricități ale angrenajelor și bătăi ale acestora, modificări termice ale lungimilor elementelor;

c) incertitudine în localizarea sistemului de coordonate de bază, față de sistemul de coordonate ale universului (legat de hală).

Se apreciază în literatura de specialitate, [R2], contribuția diferitelor surse la aceste erori, concluzionându-se că erorile datorate factorilor geometrici reprezintă aproximativ (90+95)% din erorile de situare la roboți și manipolatoare.

Variațiile geometriei robotului nu sunt generate doar de toleranțele de fabricare și asamblare, ci și de deplasările relative între baza robotului și universul de lucru, precum și între componentele robotului, cauzate de vibrații inevitabile sau coliziuni în mediul său de lucru.

În modul de programare prin învățare a roboților, actualmente utilizat în general, caracteristica semnificativă este repetabilitatea robotului, caracteristică neesențial influențată de cauzele anterior arătate. Acest mod de programare este lent și costisitor. Din acest motiv se tinde spre înlocuirea acestei metode de

programare prin programarea analitică, „off-line”, ceea ce înseamnă că robotul va fi comandat prin indicarea coordonatelor $(x, y, z, \lambda, \rho, \theta)$ ale poziției atinse, într-o referință aleasă de operator, de obicei referința halei (atelierului, universului).

În această situație o altă caracteristică devine importantă: exactitatea de situație (poziționare și orientare) absolută, definită de ISO 9283:90. Această caracteristică este mai dificil de determinat decât repetabilitatea, dată fiind dificultatea în definirea sistemului de referință.

Programarea off-line a procesului robotizat în sistemul CAD face posibilă proiectarea generală și a planului de amplasament a unei celule robotizate, precum și simularea sarcinilor robotului. În vederea realizării simulării este importantă introducerea unui program corect în sistemul de comandă al robotului pentru a îndeplini mișcările dorite.

Problema majoră este diferența dintre geometria nominală a robotului, determinată prin proiectare, în concordanță cu funcțiile robotului și geometria reală a aceluiași robot, afectat de toleranțele de prelucrare, erorile de montare în timpul asamblării robotului etc. Modelele geometrice nominale sunt în general simple, bazate pe câteva prezumții, cum ar fi paralelismul sau ortogonalitatea axelor cuplelor.

Diferențe între modelul geometric nominal și real apar de asemenea și din cauza unor erori negeometrice (elasticitatea articulațiilor, erori ale rapoartelor de transmitere, etc.).

Calibrarea unui robot constă în identificarea cu mare precizie a relațiilor geometrice dintre citirile traductoarelor din cuplele robotului și situarea efectorului terminal, E.T., al acestuia, exprimată prin coordonatele tridimensionale ale punctului caracteristic al efectorului terminal și orientarea sistemului de axe atașat acestuia, determinată printr-una dintre metodele „locale” sau la „la distanță” enunțate în capitolul 2 și capitolul 3 și apoi corectarea programului robotului funcție de diferențele identificate.

Așadar calibrarea geometrică a unui robot implică patru etape: modelarea funcțiilor robotului, măsurarea situației efectorului terminal și a poziției relative a elementelor cuplelor cinematice ale robotului, identificarea diferențelor dintre geometria nominală și reală a robotului și efectuarea corecțiilor necesare.

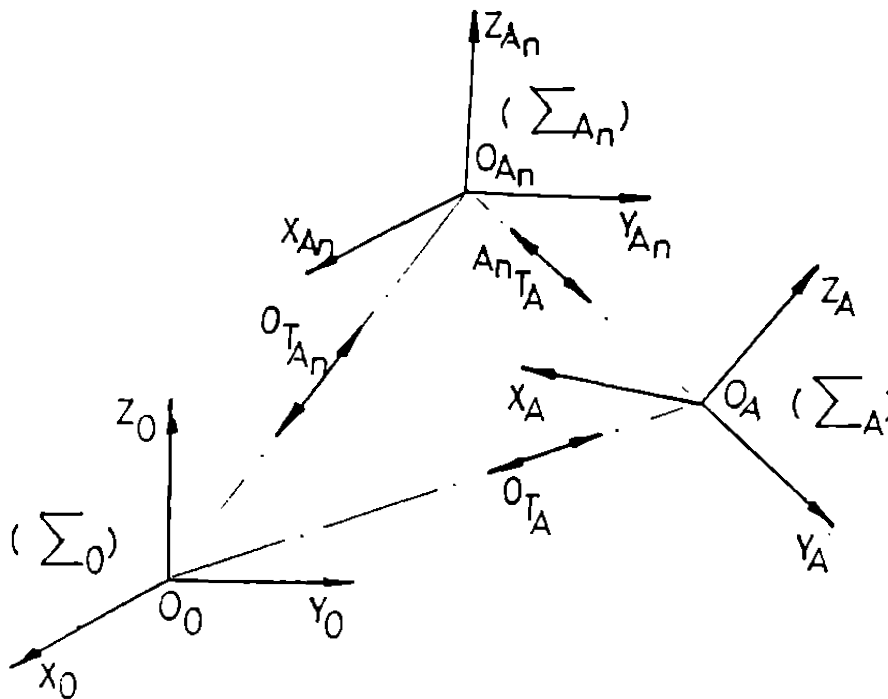
În general diferența dintre geometria nominală și reală a robotului se poate exprima prin transformări de coordonate în raport cu un sistem de referință de bază,

ales în mod convenabil, $\Sigma_o(x_o, y_o, z_o)$.

Astfel, poziția și orientarea reală a unui obiect A, poate fi reprezentată, în raport cu un sistem de referință $\Sigma_o(x_o, y_o, z_o)$, printr-o relație de forma (fig.4.1):

$${}^oT_A = {}^oT_{A_n} \cdot {}^{A_n}T_A \quad (4.1).$$

Fig.4.1



În relația (4.1):

oT_A - transformarea de coordonate de la sistemul de bază, Σ_o , la sistemul definind situarea reală, Σ_A ;

${}^oT_{A_n}$ - transformarea de coordonate de la sistemul de bază, Σ_o , la sistemul definind situarea nominală, Σ_{A_n} ;

${}^{A_n}T_A$ - transformarea de coordonate de la sistemul definind situarea nominală, Σ_{A_n} , la sistemul definind situarea reală, Σ_A .

$${}^oT_A = \begin{bmatrix} {}^oR_A & {}^oP_A \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^oT_{A_n} = \begin{bmatrix} {}^oR_{A_n} & {}^oP_{A_n} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^{A_n}T_A = \begin{bmatrix} {}^{A_n}R_A & {}^{A_n}P_A \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2).$$

în care:

oR_A : matricea de rotație reală (3×3);

0p_A : vectorul de poziție reală (3×1);

0R_A : matricea de rotație nominală (3×3);

0p_A : vectorul de poziție nominală (3×1);

${}^A R_A$: matricea erorilor de rotație (3×3);

${}^A p_A$: vectorul erorii de poziție (3×1).

Din (4.1), rezultă că:

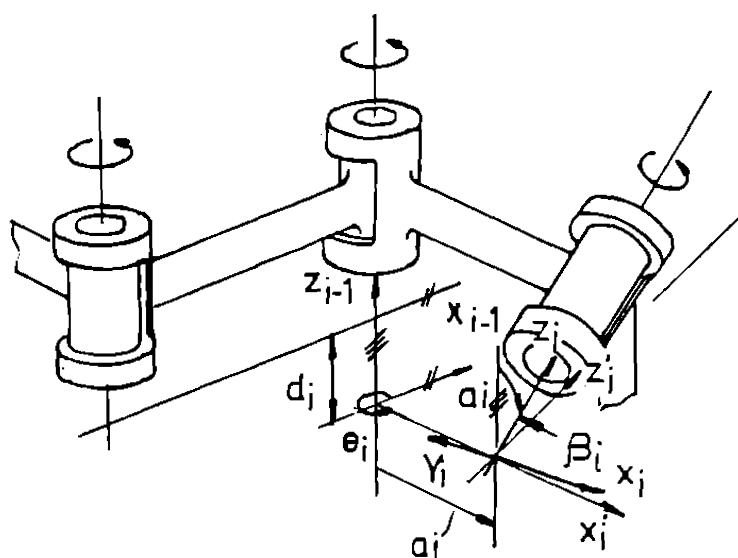
$${}^0R_A = {}^0R_{A_n} \cdot {}^A R_A \quad (4.3),$$

$${}^0p_A = {}^0p_{A_n} - {}^0R_{A_n} \cdot {}^A p_A \quad (4.4).$$

4.2. Parametri geometrici de erori

Există în literatura de specialitate diferite modelări ale erorii de situare a unui robot. Majoritatea autorilor utilizează în modelarea erorilor geometrice ale parametrilor de poziționare relativă între elementele robotului, parametri de tip Hartenberg-Denavit (θ , d , a , și α). Se cunoaște însă faptul că, erorile geometrice mici ale acestor patru parametri pot conduce la variații semnificative ale parametrilor de situare. Spre exemplu, dacă axele a două cuple de rotație succesive sunt paralele, normala comună ce definește distanța a , dintre cele două axe poate fi localizată arbitrar. Dacă cele două axe au o foarte mică abatere de la paralelism,

Fig.4.2



această distanță poate varia foarte mult ca mărime și poziție, funcție de localizarea ei. Din acest motiv se impune și un parametru extern și anume unghiul β_i , ce definește o rotație a sistemului (i) într-un nou sistem (i'), în jurul axei y_i . Acest unghi β_i , este determinat de neparalelismul axelor cuplelor de rotație succesive (fig.4.2).

În absența acestui unghi β_i , numit unghi twist, neparalelismul axelor trebuie compensat printr-o modificare artificială a lungimilor a_i și respectiv d_i , chiar dacă acești parametri au fost inițial corecți.

Acest unghi de rotație β_i este folosit doar pentru axele paralele ale cuplelor de rotație succesive. Pentru modelul geometric nominal, desigur, $\beta_i = 0$.

4.3. Erori negeometrice

Așa cum s-a arătat în paragraful anterior, parametri geometrici pot fi afectați de erori în valorile lor nominale (erori de execuție și montaj). Și alte surse de erori sunt însă prezente în structura robotului. Printre acestea, sursele de erori cu efecte semnificative asupra exactității robotului sunt: flexibilitatea cuplei (jocul în cuple), flexibilitatea elementelor de legătură, erori ale rapoartelor de transmitere, bătăi radiale și frontale ale roților dințate și efectul temperaturii. Conform datelor prezentate în literatură, flexibilitatea în cuple și a elementelor de legătură este responsabilă pentru (8÷10)% din eroarea de poziție și orientare a efectorului terminal al robotului. Flexibilitatea elementelor de legătură este uzual mai mică decât jocurile în cuple. Erorile rapoartelor de transmitere sunt în general mici în raport cu cele studiate anterior.

Bătăile sunt, se pare, una din cele mai dificil de identificat surse de eroare. Contribuția lor la eroarea globală de situație este, din fericire, foarte mică (0,5÷1)%.

Efectul temperaturii determină dilatări ale structurii mecanice a robotului. Cunoscându-se materialele folosite pentru elementele de legătură ale robotului și coeficienții lor termici de dilatare, se pot determina erorile datorate variațiilor termice. Se estimează în literatură că, aceste erori reprezintă doar 0,1% din eroarea totală.

Din cele expuse mai sus, rezultă faptul că efectul erorilor negeometrice în valoarea erorii totale este destul de mic (sub 10%), și între acestea, ponderea cea

mai mare o reprezintă erorile negeometrice datorate flexibilității în cuple (jocuri). Ca atare, în cele ce urmează, în estimarea erorilor efectorului terminal al robotului se iau în considerare doar efectele provocate de abaterile dimensionale ale elementelor, toleranțe de asamblare (erori geometrice) și jocurile în cuple (erori negeometrice).

4.4. Modelarea diferențială a erorilor

Modelul geometric permite determinarea vectorului de situație a efectorului terminal al robotului, ca o funcție de parametri geometrici Hartenberg-Denavit, sub forma generală următoare:

$$x = f(\theta, \alpha, a, d, \beta) \quad (4.5).$$

unde: $\theta, \alpha, a, d, \beta$ sunt vectori R^n , pentru cele n cuple ale robotului. Această relație între parametri geometrici este în general neliniară.

În ordinea identificării lor, modelul geometric se liniază în jurul unei estimări inițiale $\hat{\theta}, \hat{\alpha}, \hat{a}, \hat{d}, \hat{\beta}$ (parametri nominali) a parametrilor reali $\theta, \alpha, a, d, \beta$.

Intrucât două axe ale unor cuple de rotație succesive sunt presupuse inițial (în modelul geometric nominal) a fi paralele, se alege $\hat{\beta} = 0$, pentru fiecare element i al robotului.

Un model diferențial al erorilor se obține astfel:

$$\Delta x = J_\theta \cdot \Delta\theta + J_\alpha \cdot \Delta\alpha + J_a \cdot \Delta a + J_d \cdot \Delta d + J_\beta \cdot \Delta\beta \quad (4.6).$$

în care: $\Delta\theta$ este vectorul de eroare a unghiului θ , (măsurat în cuplele de rotație cu traductoare incrementale de obicei). $\Delta\alpha, \Delta a, \Delta d, \Delta\beta$ sunt vectorii de eroare ai unghiului de torsiune α , lungimilor a , d , și unghiului β (în cazul cuplelor de translație, d , este măsurat cu traductoare), și:

$$J_\theta = \frac{\partial x}{\partial \theta}; \quad J_\alpha = \frac{\partial x}{\partial \alpha}; \quad J_a = \frac{\partial x}{\partial a}; \quad J_d = \frac{\partial x}{\partial d}; \quad J_\beta = \frac{\partial x}{\partial \beta} \quad (4.7).$$

Fiecare dintre aceste matrici iacobiene este o matrice de sensibilitate a poziției și orientării efectorului terminal ținând seama de variația parametrilor geometrici tip Hartenberg-Denavit (coeficienți de ponderare). Aceste matrici sunt calculate utilizând valorile nominale ale parametrilor geometrici, $\hat{\theta}, \hat{\alpha}, \hat{a}, \hat{d}, \hat{\beta}$.

În general, vectorul J_{θ} se poate scrie sub forma:

$$\{J_{\theta}\} = \left\{ \begin{bmatrix} {}^0R_{i-1} \\ {}^0R_{i-1} \end{bmatrix} \left(\begin{Bmatrix} z_{i-1} \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} {}^{i-1}P_N \end{Bmatrix} \right) \right\} \quad (4.8),$$

unde „[]”, „{ }” și „x” înseamnă matrice, vector și produs vectorial; ${}^0R_{i-1}$ este matricea de rotație a sistemului de axe de coordonate $(i-1)$ în raport cu sistemul de coordonate de bază (0) ; ${}^{i-1}P_N$ este vectorul de poziție al efectorului terminal în raport cu sistemul $(i-1)$ și $\{z_{i-1}\} = \{0 \ 0 \ 1\}^T$. O expresie similară se poate utiliza pentru fiecare matrice jacobiană.

Modelul diferențial al erorilor, dat de relația (4.6), poate fi utilizat în următoarele situații:

a) - pentru o analiză „apriori”; cunoscând proprietățile statistice ale parametrilor geometrici (determinați funcție de toleranțele de prelucrare și montaj), se pot determina erorile de tip $\Delta\theta, \Delta\alpha, \Delta a, \Delta d, \Delta\beta$, precum și matricile $J_{\theta}, J_{\alpha}, J_a, J_d, J_{\beta}$ utilizând valorile nominale ale parametrilor $\theta, \alpha, a, d, \beta$. Se determină astfel parametri statistici ai erorii de situație Δx a efectorului terminal, dată de relația (4.6), care caracterizează distribuția erorilor de situație ale efectorului terminal în întreg spațiul de lucru al robotului. Se poate stabili astfel zona din spațiul de lucru cu cele mai mici erori.

b) - pentru calibrarea unui robot cu o amplasare prestabilită în cadrul aplicației robotizate.

În această situație, se determină prin măsurare cu un sistem oarecare (metode „locale” sau „la distanță”) eroarea de situație a efectorului terminal, exprimată generic prin Δx în relația (4.6), se măsoară cu ajutorul unui TIRO deplasările de tip $\Delta\theta_i$ sau Δd_i în articulații și utilizând ca date de intrare în relația de tip (4.6), Δx , $\Delta\theta_i$ (sau Δd_i) precum și valorile nominale $\hat{\theta}, \hat{\alpha}, \hat{a}, \hat{d}, \hat{\beta}$ ale parametrilor geometrici Hartenberg-Denavit, se calculează erorile $\Delta\theta, \Delta\alpha, \Delta a, \Delta d, \Delta\beta$, cu ajutorul cărora se determină parametri geometrici Hartenberg-Denavit reali, corecțai, $\theta^*, \alpha^*, a^*, d^*, \beta^*$ prin relații de forma:

$$\theta^* = \hat{\theta} + \Delta\theta, \quad \alpha^* = \hat{\alpha} + \Delta\alpha, \quad a^* = \hat{a} + \Delta a, \quad d^* = \hat{d} + \Delta d, \quad \beta^* = \hat{\beta} + \Delta\beta \quad (4.9).$$

Calculul se face iterativ până la minimizarea erorilor în limitele dorite,

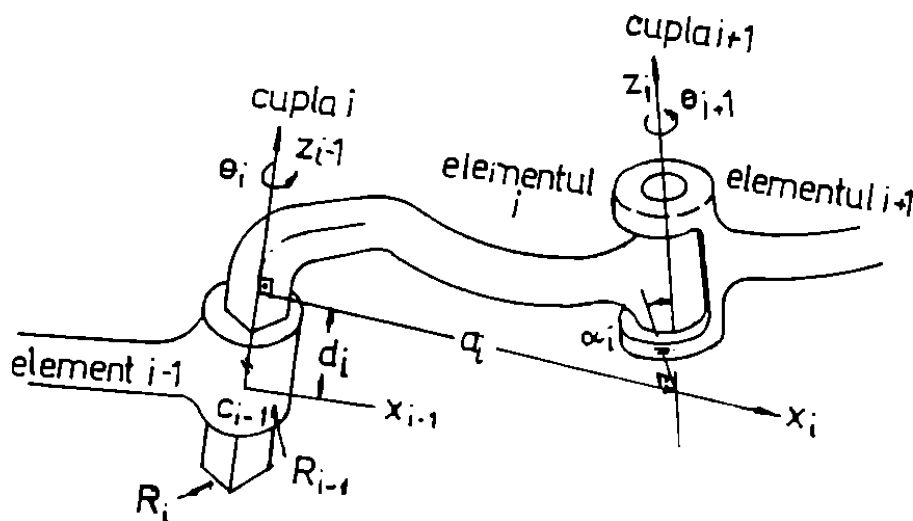
introducând în relația (4.6) noile valori estimate ale parametrilor geometrice de tip Hartenberg-Denavit, θ^* , α^* , a^* , d^* , β^*

Se face observația că, parametrul geometric suplimentar β , poate fi utilizat sau nu în modelul geometric.

În cele ce urmează se analizează influența erorilor geometrice de tip Hartenberg-Denavit, precum și influența erorilor negeometrice generate de jocurile din cuplele robotului, asupra erorilor de situație ale efectorului său terminal.

Se cunoaște faptul că, pentru a descrie forma și poziția relativă între cuplele adiacente ale unui robot, în metoda matricială, se atribuie câte un sistem de coordonate (xyz) , fiecărui element i (fig 4.3).

Fig.4.3



În acest mod, definirea poziției relative a elementului i în raport cu elementul $i-1$ se face printr-o matrice de transformări omogene, ${}^{i-1}A_i^N$, definită astfel:

$${}^{i-1}A_i^N = \text{Transl}(0,0,d_i) \cdot \text{Rot}(z,\theta_i) \cdot \text{Transl}(a_i,0,0) \cdot \text{Rot}(x,\alpha_i) \quad (4.10),$$

în care d_i , θ_i , a_i , α_i sunt parametri geometrice de tip Hartenberg-Denavit nominali. Indicele superior N indică faptul că este vorba de o matrice de transformare nominală.

Între parametri nominali enumerați, d_i și θ_i sunt variabili la cuplele de translație, respectiv de rotație.

În general, poziția și orientarea nominală a sistemului de referință atașat

elementului „ n ” al robotului, $(x|z)_n$, în raport cu sistemul de referință de bază, $(x|z)_0$, se poate scrie ca un produs de matrici de forma (4.10)

$${}^0T_n^N = \prod_{i=1}^n A_i^N \quad (4.11)$$

Se subliniază faptul că elementul „ n ” al robotului este efectorul terminal

Relațiile (4.10) și (4.11) descriu o situație ideală (transformări nominale).

În realitate, datorită erorilor generate de jocuri în cuple și erorilor dimensionale ale elementelor, poziția și orientarea reală a fiecărui element diferă față de cea nominală.

4.4.1. Modelarea erorilor de situare a efectorului terminal generate de erorile geometrice ale parametrilor de tip Hartenberg-Denavit (HD)

Așadar, în absența erorilor geometrice, matricea de transformare între sistemele $\{n\}$ și $\{0\}$ este dată de relația (4.11) în care A_i^N reprezintă matricea nominală tip HD de transformare omogenă între reperele $\{i-1\}$ și $\{i\}$, având forma (pentru cuplele de rotație succesive, de exemplu):

$$A_i^N = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i \cdot s\theta_i & s\alpha_i \cdot s\theta_i & a_i \cdot c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i \cdot c\theta_i & -s\alpha_i \cdot c\theta_i & a_i \cdot s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

în care $s\theta_i$ și $c\theta_i$, respectiv $s\alpha_i$ și $c\alpha_i$, reprezintă: $\sin\theta_i$, $\cos\theta_i$, respectiv $\sin\alpha_i$, $\cos\alpha_i$.

Dacă se ia în considerare parametrul suplimentar β_i , matricea A_i^N va fi de forma:

$$A_i^N = \begin{bmatrix} c\theta_i \cdot c\beta_i - s\theta_i \cdot s\alpha_i \cdot s\beta_i & -s\theta_i \cdot c\alpha_i & c\theta_i \cdot s\beta_i + s\theta_i \cdot s\alpha_i \cdot c\beta_i & a_i \cdot c\theta_i \\ s\theta_i \cdot c\beta_i + c\theta_i \cdot s\alpha_i \cdot s\beta_i & c\theta_i \cdot c\alpha_i & s\theta_i \cdot s\beta_i - c\theta_i \cdot s\alpha_i \cdot c\beta_i & a_i \cdot s\theta_i \\ -c\alpha_i \cdot s\beta_i & s\alpha_i & c\alpha_i \cdot c\beta_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.13),$$

Datorită erorilor geometrice de tip HD, notate simbolic cu: $\Delta\alpha_i$, $\Delta\alpha_i$, Δd_i , $\Delta\theta_i$ (și eventual $\Delta\beta_i$), matricea (4.12), respectiv (4.13) înregistrează o variație elementară dA_i , denumită matricea diferențială de transformare între reperele $\{i-1\}$ și $\{i\}$, de forma:

$$dA_i = \delta A_i \cdot A_i^N \quad (4.14).$$

unde δA_i este un operator diferențial ale cărui elemente sunt funcții de erorile geometrice $\Delta\alpha_i, \Delta\alpha, \Delta d_i, \Delta\theta_i$ (și eventual $\Delta\beta_i$).

Operatorul diferențial δA_i este definit prin matricea:

$$\delta A_i = \begin{bmatrix} R_i^e & P_i^e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -e_{iz}^e & e_{iy}^e & \delta_{ix}^e \\ e_{iz}^e & 0 & -e_{ix}^e & \delta_{iy}^e \\ -e_{iy}^e & e_{ix}^e & 0 & \delta_{iz}^e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15),$$

în care:

$$\begin{aligned} P_i^e &= [\delta_{ix}^e \quad \delta_{iy}^e \quad \delta_{iz}^e]^T \\ e_i^e &= [e_{ix}^e \quad e_{iy}^e \quad e_{iz}^e]^T \end{aligned} \quad (4.16),$$

cu:

$$\begin{aligned} e_{ix}^e &= c\theta_i \cdot \Delta\alpha_i \\ e_{iy}^e &= s\theta_i \cdot \Delta\alpha_i \\ e_{iz}^e &= \Delta\theta_i \\ \delta_{ix}^e &= c\theta_i \cdot \Delta\alpha_i - d_i \cdot s\theta_i \cdot \Delta\alpha_i \\ \delta_{iy}^e &= s\theta_i \cdot \Delta\alpha_i + d_i \cdot c\theta_i \cdot \Delta\alpha_i \\ \delta_{iz}^e &= \Delta d_i \end{aligned} \quad (4.17),$$

pentru cazul în care nu se ia în considerare β_i (relația (4.12)), și:

$$\begin{aligned} e_{ix}^e &= c\theta_i \cdot \Delta\alpha_i - s\theta_i \cdot c\alpha_i \cdot \Delta\beta_i \\ e_{iy}^e &= s\theta_i \cdot \Delta\alpha_i + c\theta_i \cdot c\alpha_i \cdot \Delta\beta_i \\ e_{iz}^e &= \Delta\theta_i + s\alpha_i \cdot \Delta\beta_i \\ \delta_{ix}^e &= c\theta_i \cdot \Delta\alpha_i - d_i \cdot s\theta_i \cdot \Delta\alpha_i + (a_i \cdot s\theta_i \cdot s\alpha_i - d_i \cdot c\theta_i \cdot c\alpha_i) \cdot \Delta\beta_i \\ \delta_{iy}^e &= s\theta_i \cdot \Delta\alpha_i + d_i \cdot c\theta_i \cdot \Delta\alpha_i - (a_i \cdot c\theta_i \cdot s\alpha_i + d_i \cdot s\theta_i \cdot c\alpha_i) \cdot \Delta\beta_i \\ \delta_{iz}^e &= \Delta d_i + a_i \cdot c\alpha_i \cdot \Delta\beta_i \end{aligned} \quad (4.18),$$

pentru cazul în care se consideră și β_i (relația (4.13)).

Matricea diferențială a erorilor de situație a efectorului terminal, se exprimă prin relația:

$$\delta T = \text{Transl}(dx, dy, dz) \cdot \text{Rot}(x, d\lambda) \cdot \text{Rot}(y, dp) \cdot \text{Rot}(z, d\theta) \quad (4.19),$$

unde: dx, dy, dz - reprezintă componentele vectorului erorii de poziționare a efectorului terminal al robotului;

$d\lambda, dp, d\theta$ - reprezintă componentele vectorului erorii de orientare a efectorului terminal al robotului.

Modelul diferențial de ordinul întâi (liniar) al erorilor se caracterizează prin ecuația matricială:

$$\delta \Gamma^i = \begin{bmatrix} 0 & -\delta\theta & \delta\rho & dx \\ \delta\theta & 0 & -\delta\lambda & dy \\ -\delta\rho & \delta\lambda & 0 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \delta A_i \quad (4.20)$$

În relația (4.20), membrul stâng al ecuației este cunoscut prin măsurarea erorilor de poziție și orientare ale efectorului terminal, E.T., al robotului cu un sistem de măsurare a situației efectorului terminal, iar în membrul drept al ecuației, se cunosc valorile θ , și d , afișate de TIRO din articulații. Cu aceste date de intrare, prin identificarea termenilor corespondenți ai matricilor în ecuația (4.20) se determină erorile parametrilor geometrici, $\Delta\alpha$, $\Delta\alpha$, Δd , $\Delta\theta$ (și eventual $\Delta\beta$).

Cu aceste valori se corectează modelul geometric al robotului, obținându-se o diminuare a erorilor de situație a efectorului terminal. Se obține matricea de transformare corectă:

$$A_i^C = A_i^N + dA_i \quad (4.21)$$

În general se efectuează câteva iterații, până la obținerea preciziei dorite.

4.4.2. Modelarea erorilor de situație a efectorului terminal considerând și erorile negeometrice generate de jocurile în cuple

Eroarea de situație a efectorului terminal al robotului este determinată, pe lângă variația parametrilor geometrici și de imperfecțiunile de ghidare și mișcare în timpul mișcării relative între elementele cuplelor robotului. Aceste erori au o pondere mai mică decât erorile geometrice, în eroarea de situație a efectorului terminal, în jur de (5÷10)%. Ele pot fi descrise în general de trei componente de translație, Δx , Δy , Δz , a unui punct de referință O_i , și trei componente de rotație, $\Delta\Gamma$, $\Delta\Psi$, $\Delta\Phi$, ale elementului i (fig.4.4 și fig.4.5), pentru cupla de translație, respectiv de rotație.

Matricea de erori A_i^E , care reprezintă efectul total, rezultând din aceste șase componente de erori generate de jocurile în cuple, va fi:

$$A_i^E = \text{Transl}(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \cdot \text{Rot}(x, \Delta\Phi) \cdot \text{Rot}(y, \Delta\Psi) \cdot \text{Rot}(z, \Delta\Gamma) \quad (4.22),$$

respectiv

$$A_i^E = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta\Phi_i & \Delta\Psi_i & \Delta x_i \\ \Delta\Phi_i & 1 & -\Delta\Gamma_i & \Delta y_i \\ -\Delta\Psi_i & \Delta\Gamma_i & 1 & \Delta z_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Fig.4.4

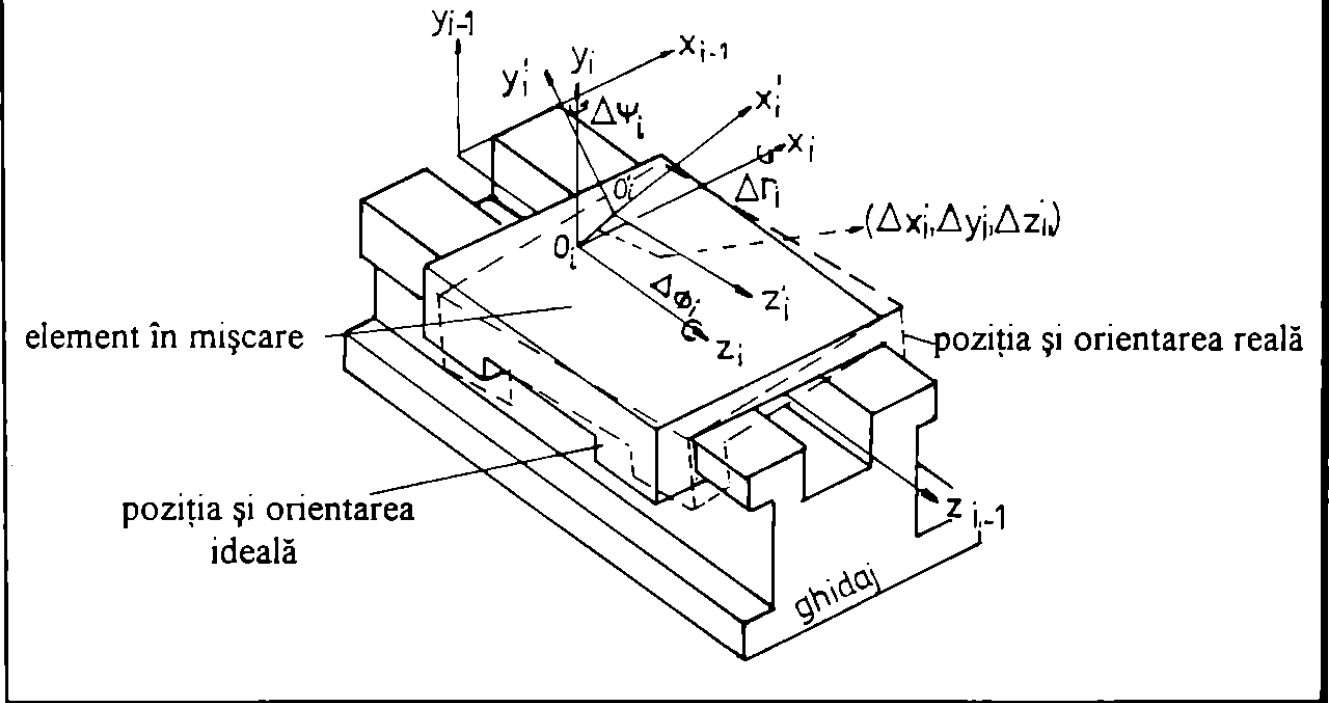
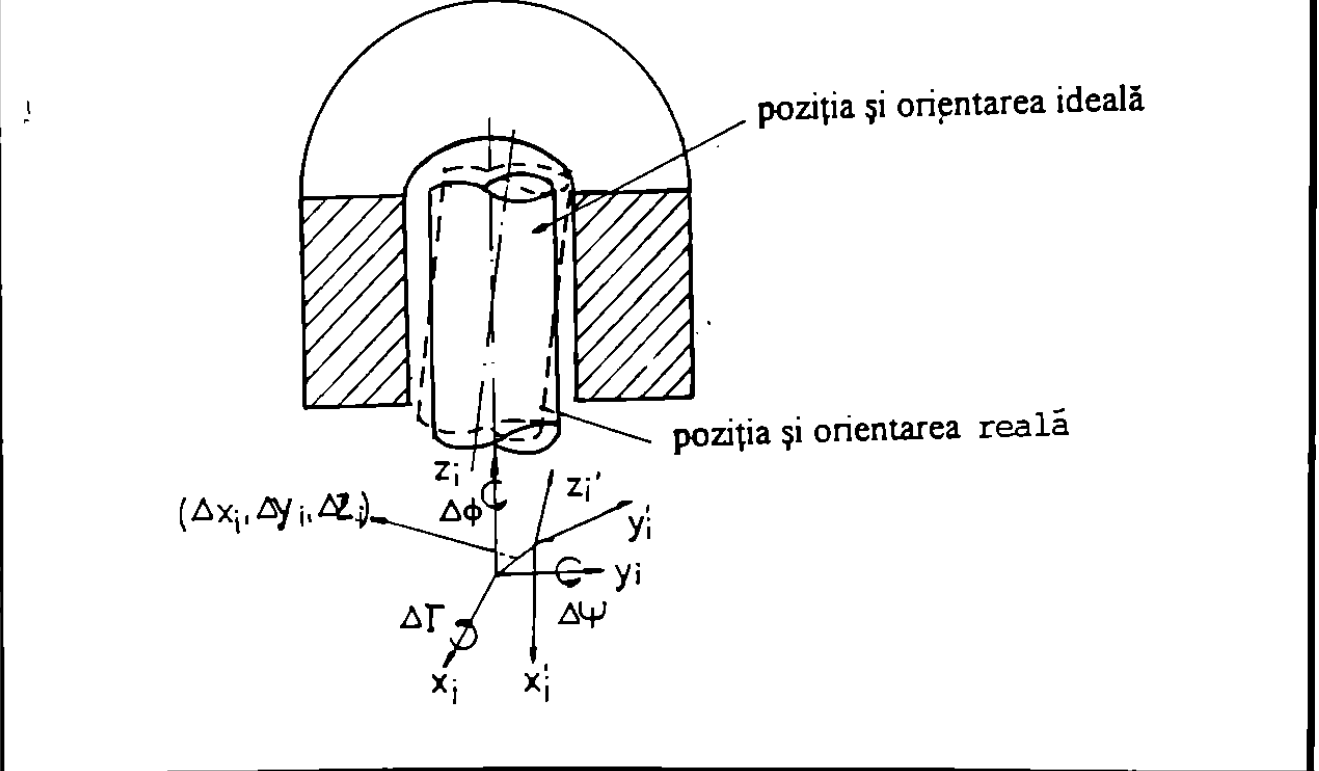


Fig.4.5



Pentru o cuplă ideală, matricea A_i^E devine matricea unitate.

Astfel, poziția și orientarea reală, corectă a sistemului de referință (xyz) , în raport cu sistemul $(xyz)_{i-1}$ (fig.4.3), în prezența erorilor, atât geometrice cât și datorate jocurilor din cuple, este descrisă de matricea reală, corectă, A_i^C , care reprezintă efectele celor două categorii de erori:

$$A_i^C = A_i^E \cdot \text{Transl}(0,0,d_i + \Delta d_i) \cdot \text{Rot}(z, \theta_i + \Delta \theta_i) \cdot \text{Transl}(a_i + \Delta a_i, 0, 0) \cdot \text{Rot}(x, \alpha_i + \Delta \alpha_i) \quad (4.24),$$

Pe de altă parte, matricea de transformare reală, corectă, A_i^C , între elemente adiacente ale robotului, poate fi exprimată ca sumă între matricea de transformare nominală, A_i^N , care nu include efectele erorilor și matricea de transformare diferențială dA_i , datorată prezenței erorilor:

$$A_i^C = A_i^N + dA_i \quad (4.25).$$

Matricea diferențială de transformare este o funcție de zece erori componente ale elementului i , putând fi scrisă astfel:

$$\begin{aligned} dA_i = & \frac{\partial A_i}{\partial d_i} \Delta d_i + \frac{\partial A_i}{\partial \theta_i} \Delta \theta_i + \frac{\partial A_i}{\partial a_i} \Delta a_i + \frac{\partial A_i}{\partial \alpha_i} \Delta \alpha_i, \\ & + \frac{\partial A_i}{\partial \Delta x_i} \Delta x_i + \frac{\partial A_i}{\partial \Delta y_i} \Delta y_i + \frac{\partial A_i}{\partial \Delta z_i} \Delta z_i, + \\ & + \frac{\partial A_i}{\partial \Gamma_i} \Delta \Gamma_i + \frac{\partial A_i}{\partial \Delta \Psi_i} \Delta \Psi_i + \frac{\partial A_i}{\partial \Delta \Phi_i} \Delta \Phi_i, \end{aligned} \quad (4.26).$$

Derivatele parțiale sunt evaluate pentru parametri geometrici nominali.

Definind:

$$\delta A_i = dA_i \cdot (A_i^N)^{-1} \quad (4.27),$$

matricea diferențială de transformare datorată componentelor de erori geometrice și determinate de jocurile din cuple, între reperatele $\{i-1\}$ și $\{i\}$, ecuația (4.25) se poate scrie astfel:

$$A_i^C = (I + \delta A_i) \cdot A_i^N \quad (4.28),$$

în care I este matricea unitate.

Matricea diferențială δA_i , este de forma:

$$\delta A_i = \begin{bmatrix} R_i^e & P_i^e \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -e_{iz}^e & e_{iy}^e & \delta_{iz}^e \\ e_{iz}^e & 0 & -e_{ix}^e & \delta_{iy}^e \\ -e_{iy}^e & e_{ix}^e & 0 & \delta_{iz}^e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.29).$$

În rel (4.29):

$$P_i^c = \begin{bmatrix} \delta_{\alpha}^c & \delta_{\psi}^c & \delta_{z}^c \end{bmatrix}^T = m_{i,1} \cdot \Delta\alpha_i + m_{i,2} \cdot \Delta\psi_i + m_{i,3} \cdot \Delta z_i + m_{i,4} \cdot \Delta d_i + m_{i,5} \cdot \Delta a_i, \quad (4.30).$$

și

$$e_{i,0} = \begin{bmatrix} e_{\alpha}^c & e_{\psi}^c & e_{z}^c \end{bmatrix}^T = m_{i,2} \cdot \Delta\Gamma_i + m_{i,3} \cdot \Delta\Psi_i + m_{i,4} \cdot \Delta\Phi_i + m_{i,5} \cdot \Delta\theta_i + m_{i,6} \cdot \Delta\alpha_i, \quad (4.31).$$

în care:

$$\begin{aligned} m_{i,1} &= [-d_i \cdot s\theta_i \quad d_i \cdot c\theta_i \quad 0]^T \\ m_{i,2} &= [1 \quad 0 \quad 0]^T \\ m_{i,3} &= [0 \quad 1 \quad 0]^T \\ m_{i,4} &= [0 \quad 0 \quad 1]^T \\ m_{i,5} &= [c\theta_i \quad s\theta_i \quad 0]^T \end{aligned} \quad (4.32)$$

cu $s\theta_i$ și $c\theta_i$ reprezentând $\sin\theta_i$, $\cos\theta_i$.

Se observă așadar din relațiile (4.30), (4.31) și (4.32) că elementele matricii δA_i dată de relația (4.29) exprimă atât influența parametrilor geometrici tip Hartenberg-Denavit, cât și a celor negeometrici (jocurile în cuple).

Având stabilită matricea δA_i în relația (4.29), în continuare se procedează analog cazului prezentat în paragraful 4.4.1, respectiv se determină erorile parametrilor geometrici și negeometrici prin identificarea termenilor corespondenți în relația (4.20), efectuându-se câteva iterații, până la obținerea preciziei dorite

Având în vedere faptul că măsurătorile poziției efectorului terminal, respectiv deplasărilor în cuple, se efectuează pentru mai multe puncte din spațiul de lucru al robotului, sistemul de ecuații obținut este, uneori supradeterminat, ceea ce conduce la obținerea unor soluții aproximative, prin utilizarea metodei celor mai mici pătrate.

4.5. Concluzii

În cele prezentate în capitolul de față s-a avut în vedere ameliorarea performanțelor de situare a efectorului terminal al unui robot industrial, prin calibrarea geometrică (îmbunătățirea modelului geometric). Desigur, un studiu mai complex al acestui aspect privitor la funcționarea unui robot presupune și o calibrare a modelului cinematic, dinamic, al sistemelor de acționare și control.

aspecte care însă nu fac obiectul lucrării de față.

Punerea la punct a unei tehnici de măsurare a performanțelor unui robot, cu precădere a celor de situație, constituie însă o bază de date importantă pentru cercetătorii în domeniu, permițându-le aprofundarea cunoștințelor cu privire la modelarea comportamentului roboților.

CAPITOLUL 5

APLICAREA PROBLEMEI DE SITUAȚIE ÎN CAZUL SISTEMELOR DE FABRICAȚIE FLEXIBILĂ ROBOTIZATE

5.1. Considerații generale

Problema realizării unor sisteme de fabricație flexibilă reprezintă aspectul cel mai actual, dar totodată și cel mai dificil al tendinței ce marchează evoluția tehnologică de ultimă oră, în toate ramurile industriale, cu procese discontinue de producție, trecerea la tehnologii flexibile, cu înalt nivel de automatizare.

Roboții industriali și manipuloarele reprezintă elemente constitutive de bază ale sistemelor flexibile de fabricație datorită, în principal, propriei lor flexibilități, a calității lor de a efectua o mare varietate de mișcări de lucru. Se știe că la baza concepției roboților industriali stă posibilitatea de a compune orice mișcare de lucru, oricât de complicată, dintr-o succesiune de trei tipuri de funcțiuni elementare: „rotație”, „translație” și „prehensare”. Modelul cel mai general de robot industrial sau manipulator poate fi imaginat ca o combinație spațială de „module de rotație”, „module de translație” și un „efector terminal”, cu funcție de prehensare sau de sculă de lucru.

Includerea robotului în sistem poate presupune, pe lângă efectuarea sarcinilor specifice de manipulare sau procesare și preluarea altor funcțiuni, spre exemplu funcțiunea de transfer, nemaifiind necesar sistemul de transfer. De asemenea, echipamentul de comandă tipizat al robotului va putea îndeplini și funcțiunile de comandă ale sistemului, nemaifiind nevoie să se recurgă la echipament specific.

Așadar, aspectul de „utilaj tehnologic multifuncțional” al robotului pledează pentru extinderea tehnologiilor robotizate în toate domeniile tehnice și nu numai.

5.2. Problema de situare (poziționare și orientare) în cazul componentelor unui sistem flexibil robotizat

Procesele robotizate realizează performanțe bune în situația în care se asigură o compatibilitate maximă între procesul propriu-zis și calitățile robotului utilizat. O optimizare a acestui proces trebuie să aibă în vedere o analiză a factorilor implicați în realizarea ansamblului proces de lucru-robot, printre care, în mod special, analiza caracteristicilor de situare (poziționare și orientare) ale componentelor sistemului robotizat, în scopul determinării erorilor de situare relativă ale componentelor și minimizării acestor erori prin calibrarea componentelor sistemului, desigur, în limitele posibilităților sistemului de comandă al celulei flexibile.

Spre exemplu, accesibilitatea robotului este legată de capacitatea acestuia de a lucra în interiorul unor spații delimitate sau într-o ambianță cu un relief foarte variat. În aceste situații, este de multe ori necesar nu numai să se programeze poziția și orientarea efectorului terminal al robotului, ci și să se efectueze verificarea detaliată, în diverse puncte ale traiectoriei, a acestor caracteristici, în vederea evitării coliziunilor dintre părțile mobile ale robotului și obiectele din mediul ambiant.

De asemenea, în sistemele flexibile de montaj, în cazul procesului de cuplare piesă-contrapiasă, atât etapa de așezare cât și etapa de inserție a componentelor presupun obținerea unui nivel admisibil al forțelor de interacțiune, în vederea evitării deteriorării elementelor din lanțurile de acționare ale robotului și a grișajului pieselor asamblate, cu respectarea condițiilor geometrice impuse.

Calitativ, forțele de interacțiune nedorite apar ca efect al erorilor de poziție și, mai puțin, de viteză, în raport cu valorile de referință. Valorile forțelor de interacțiune cresc la mărirea erorilor de poziție, conform unei dependențe, în general neliniare, funcție de caracteristicile de rigiditate ale elementelor și soluțiile constructive de acționare mecanică. Situația este similară în cazul erorilor inerente de formă ale reperelor asamblate, înscrise în câmpurile de toleranțe prescrise.

Caracteristica de deformație elastică a structurii de manipulare, sub efectul forțelor de interacțiune care intervin la apariția erorilor de poziționare, în raport cu poziția teoretică, ideală, de referință, este denumită în mod curent „compliance”.

Apare astfel ca necesară punerea în concordanță a compliancei structurii

mecanice cu precizia robotului industrial, astfel încât forțele de interacțiune în procesele de cuplare să rămână într-un domeniu admisibil.

Dar, în procesul de lucru, robotul conlucrează cu subansamble mobile ale elementelor componente ale celulei de fabricație flexibilă robotizate, care, la rândul lor introduc erori de situare (poziționare și orientare).

Rezultă așadar necesitatea de a determina aceste erori de situare ale componentelor celulei și, desigur, ale robotului implicat în proces, în scopul minimizării acestora prin calibrarea componentelor și a robotului, în vederea asigurării concordanței amintite mai sus.

De asemenea, în cazul unei celule flexibile de prelucrări mecanice, erorile de situare (poziționare și orientare) ale robotului ce deserveste celula, precum și a subansamblelor mobile ale componentelor acesteia, se reflectă, în ultimă instanță, asupra preciziei de prelucrare a piesei. Apare astfel necesitatea determinării caracteristicilor de situare ale componentelor celulei în scopul creșterii preciziei de prelucrare, prin introducerea corecțiilor necesare în programarea componentelor celulei.

5.2.1. Determinarea erorilor de situare (poziționare și orientare) în cazul unei celule de fabricație flexibilă robotizată.

Având în vedere considerentele expuse mai sus, în capitolul de față se încearcă punerea la punct a unei metodologii generale de stabilire a matricilor de erori de situare pentru componentele unei celule de fabricație flexibilă robotizată.

Se consideră, în acest scop, o celulă de prelucrări mecanice, deservită de un robot (fig.5.1), având următoarea configurație: robotul R , deservind mașina - unealtă M , paleta P_1 , pe care se află depozitate piesele ce urmează a fi prelucrate (semifabricatele), paleta P_2 , pe care se depozitează piesele finite. Robotul R preia semifabricatul de pe paleta P_1 , îl depune în dispozitivul de lucru D , aflat pe masa, m , a mașinii M ; are loc apoi prelucrarea semifabricatului, după care robotul R preia piesa din dispozitivul D și o transportă pe paleta de piese finite, P_2 .

Așadar, în timpul unui ciclu, robotul R deserveste trei posturi de lucru: paleta P_1 , mașina - unealtă M și paleta P_2 . Ca urmare, efectorul său terminal se situează în trei poziții diferite, punctul caracteristic al său (P.C.) ocupând trei poziții diferite, P.C., ($i=1,2,3$).

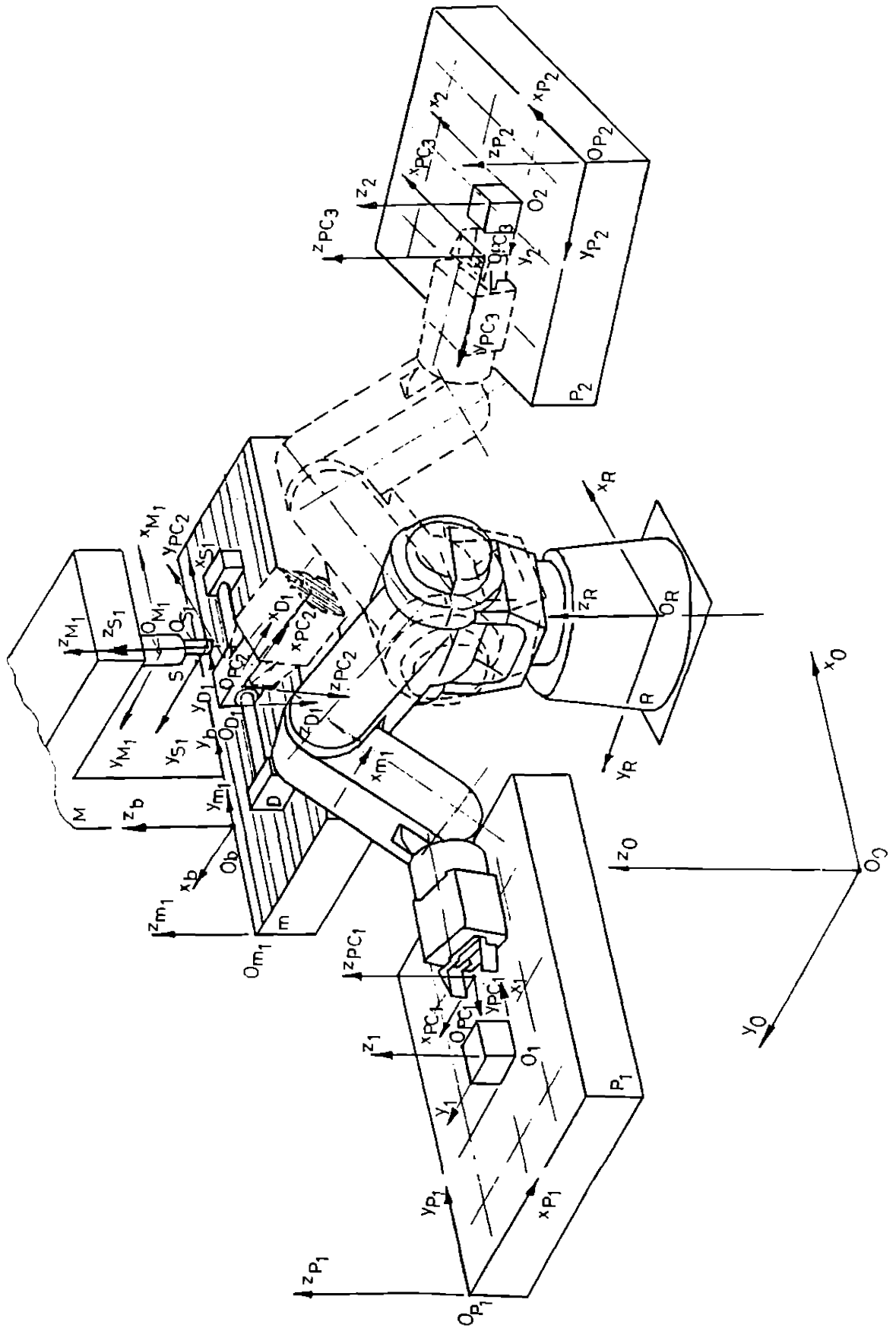


Fig. 5.1

Pe parcursul unui ciclu de lucru, componentele mobile ale celulei (în situația de față robotul R), precum și subansamblele mobile ale unor componente (în cazul dat cele ale mașinii unelte M), își realizează deplasările cu anumite erori, cauzate de o multitudine de factori, erori care pot fi atât de natură sistematică, cât și de natură aleatorie, erori care influențează, în ultimă instanță, precizia de prelucrare a piesei. Cunoașterea mărimii acestor erori este absolut necesară în scopul minimizării lor prin introducerea corecțiilor necesare în modelul geometric al robotului și al mașinii-unelte, la programarea acestora, și realizarea, în acest mod, a compatibilității cu câmpul de toleranțe admis pentru piesa ce urmează a fi prelucrată.

Pentru exprimarea matematică a problemei, se admite un sistem de referință fix, atașat halei, $O_0x_0y_0z_0$, precum și câte un sistem de referință atașat fiecărei componente a celulei și anume (fig.5.2):

- O_R, x_R, y_R, z_R - atașat robotului R ;
- $O_{P_1}, x_{P_1}, y_{P_1}, z_{P_1}$ - atașat paletei P_1 ;
- O_m, x_m, y_m, z_m - atașat masei m , a mașinii-unealtă;
- O_D, x_D, y_D, z_D - atașat dispozitivului de lucru D ;
- O_M, x_M, y_M, z_M - atașat capului de lucru al mașinii-unealtă;
- O_b, x_b, y_b, z_b - atașat batiului mașinii-unealtă;
- O_S, x_S, y_S, z_S - atașat sculei;
- ! - $O_{P_2}, x_{P_2}, y_{P_2}, z_{P_2}$ - atașat paletei P_2 .

Se menționează faptul că s-a admis această modalitate de exprimare, având în vedere recomandările privind proiectarea „layout”-ului unei celule de fabricație flexibilă robotizate, în cadrul căreia, determinarea situațiilor relative ale elementelor componente ale celulei se face în raport cu un sistem de referință fix, legat de hală [K3].

Această modalitate de exprimare a situației, și implicit a erorilor de situare, se află în concordanță și cu metodologia de determinare a exactității și repetabilității de situare la roboți industriali, atât în contextul metodelor „locale”, cât și a celor „la distanță”.

Fig.5.2 evidențiază alegerea sistemelor de referință, precum și ansamblul de transformări raportate la $O_0x_0y_0z_0$.

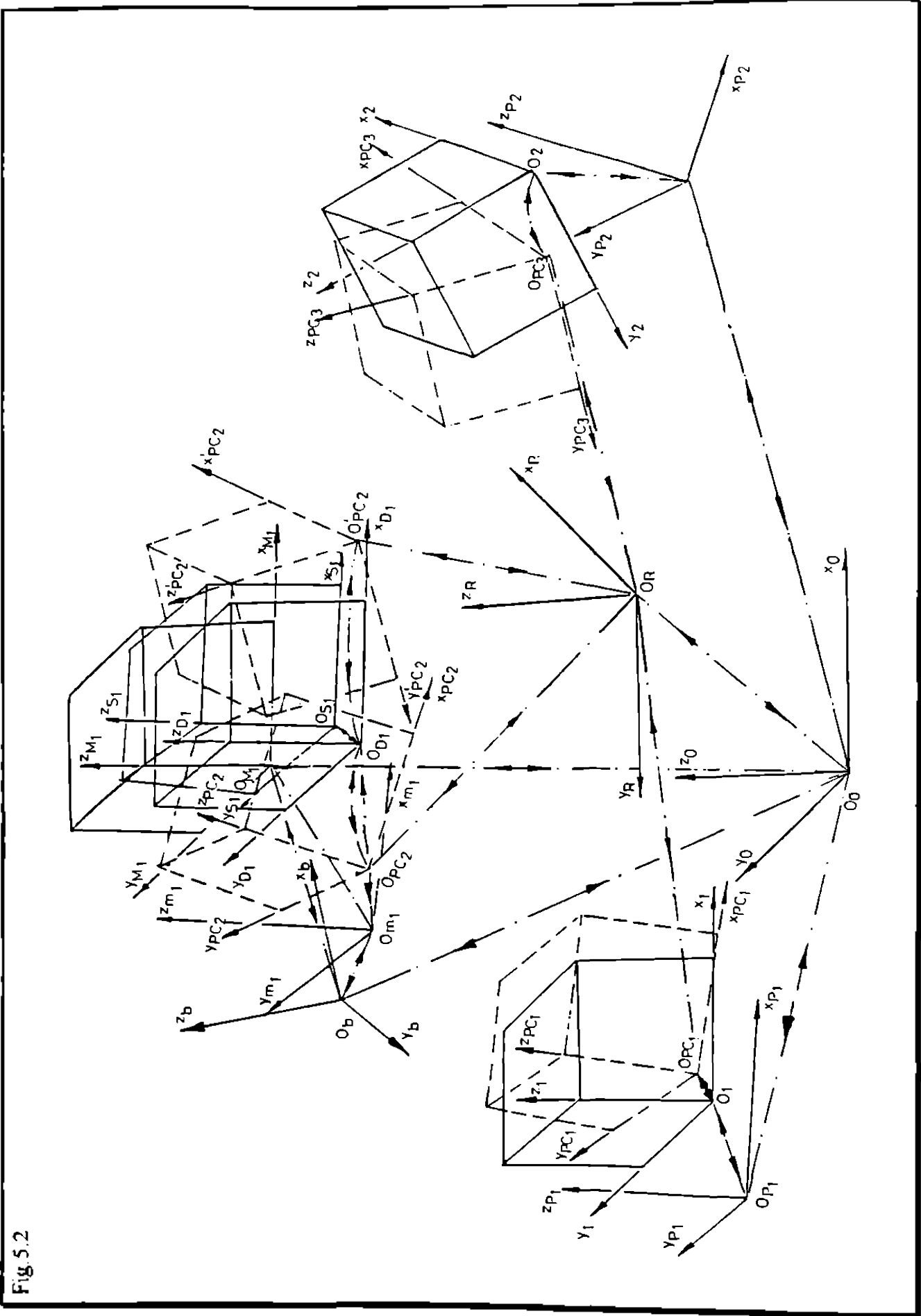
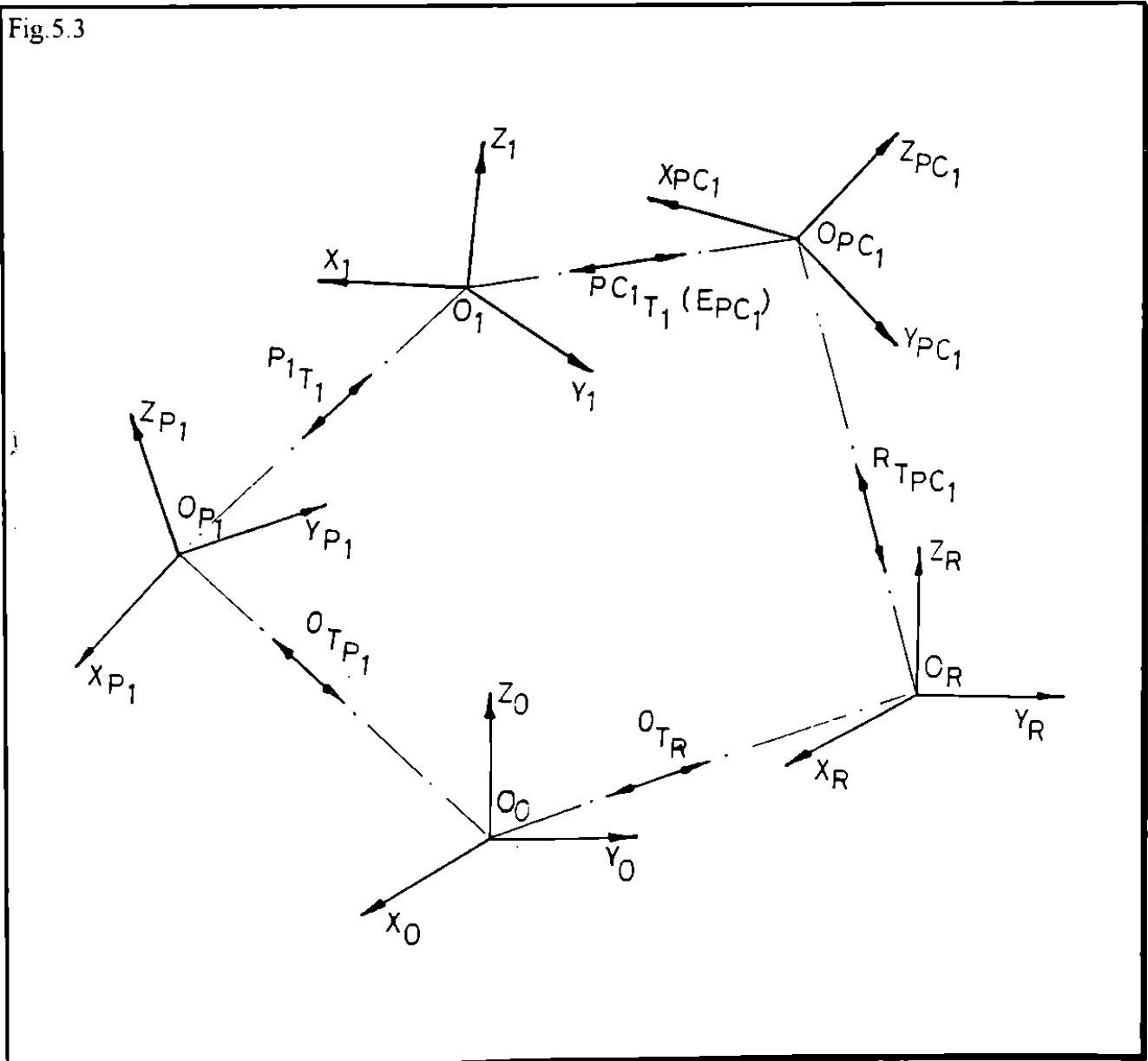


Fig. 5.2

5.2.1.1. Determinarea erorilor de situare în postul de lucru (1)

În postul de lucru 1, robotul R preia semifabricatul de pe paleta P_1 . Semifabricatul se află pe paletă în poziția definită de sistemul de axe $O_1x_1y_1z_1$ (fig.5.2 și fig.5.3), poziție în care robotul R trebuie să preia semifabricatul. În realitate însă punctul caracteristic al robotului nu atinge poziția ideală $O_1x_1y_1z_1$, ci poziția reală $O_{PC_1}x_{PC_1}y_{PC_1}z_{PC_1}$, deci apare o eroare de situare. Ansamblul de transformări în raport cu referința de bază $O_0x_0y_0z_0$ (fig.5.3) are loc după următoarea schemă:

$$\begin{array}{ccccccc}
 O_0x_0y_0z_0 & \xrightarrow{{}^0T_{P_1}} & O_{P_1}x_{P_1}y_{P_1}z_{P_1} & \xrightarrow{{}^{P_1}T_1} & O_1x_1y_1z_1 & \xleftarrow{{}^{PC_1}T_1 (E_{PC_1})} & \\
 \downarrow & & & & & & \uparrow \\
 & \xrightarrow{{}^0T_R} & O_Rx_Ry_Rz_R & \xrightarrow{{}^RT_{PC_1}} & O_{PC_1}x_{PC_1}y_{PC_1}z_{PC_1} & \rightarrow &
 \end{array} \quad (5.1),$$



în care:

$${}^0T_{P_1} \cdot {}^P T_1 = {}^0T_1 \quad (5.2),$$

$${}^0T_{R'} \cdot {}^R T_{PC_1} = {}^0T_{PC_1} \quad (5.3),$$

0T_1 - exprimând transformarea între referința $O_0x_0y_0z_0$ și poziția ideală $O_1x_1y_1z_1$ a semifabricatului pe paleta P_1 ;

${}^0T_{PC_1}$ - exprimând transformarea între referința $O_0x_0y_0z_0$ și poziția reală a P.C. al robotului, $O_{PC_1}x_{PC_1}y_{PC_1}z_{PC_1}$.

Se observă că:

$${}^0T_{PC_1} \cdot {}^0T_1 = {}^{PC_1}T_1 (E_{PC_1}) \quad (5.4),$$

în care ${}^{PC_1}T_1$ - reprezintă transformarea între poziția ideală și cea reală a P.C. al robotului, transformare care exprimă incapacitatea robotului de a situa efectorul său terminal în poziția ideală, comandată, sau cu alte cuvinte eroarea de situare a robotului, definind exactitatea lui de situare.

Aceste transformări ${}^{PC_1}T_1$ îi corespunde așadar matricea erorilor de situare corespunzătoare postului de lucru 1, E_{PC_1} , care are următoarea formă:

$$E_{PC_1} = \begin{pmatrix} n_{x,PC_1} - n_{x_1} & o_{x,PC_1} - o_{x_1} & a_{x,PC_1} - a_{x_1} & x_{PC_1} - x_1 \\ n_{y,PC_1} - n_{y_1} & o_{y,PC_1} - o_{y_1} & a_{y,PC_1} - a_{y_1} & y_{PC_1} - y_1 \\ n_{z,PC_1} - n_{z_1} & o_{z,PC_1} - o_{z_1} & a_{z,PC_1} - a_{z_1} & z_{PC_1} - z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.5).$$

Particularizări

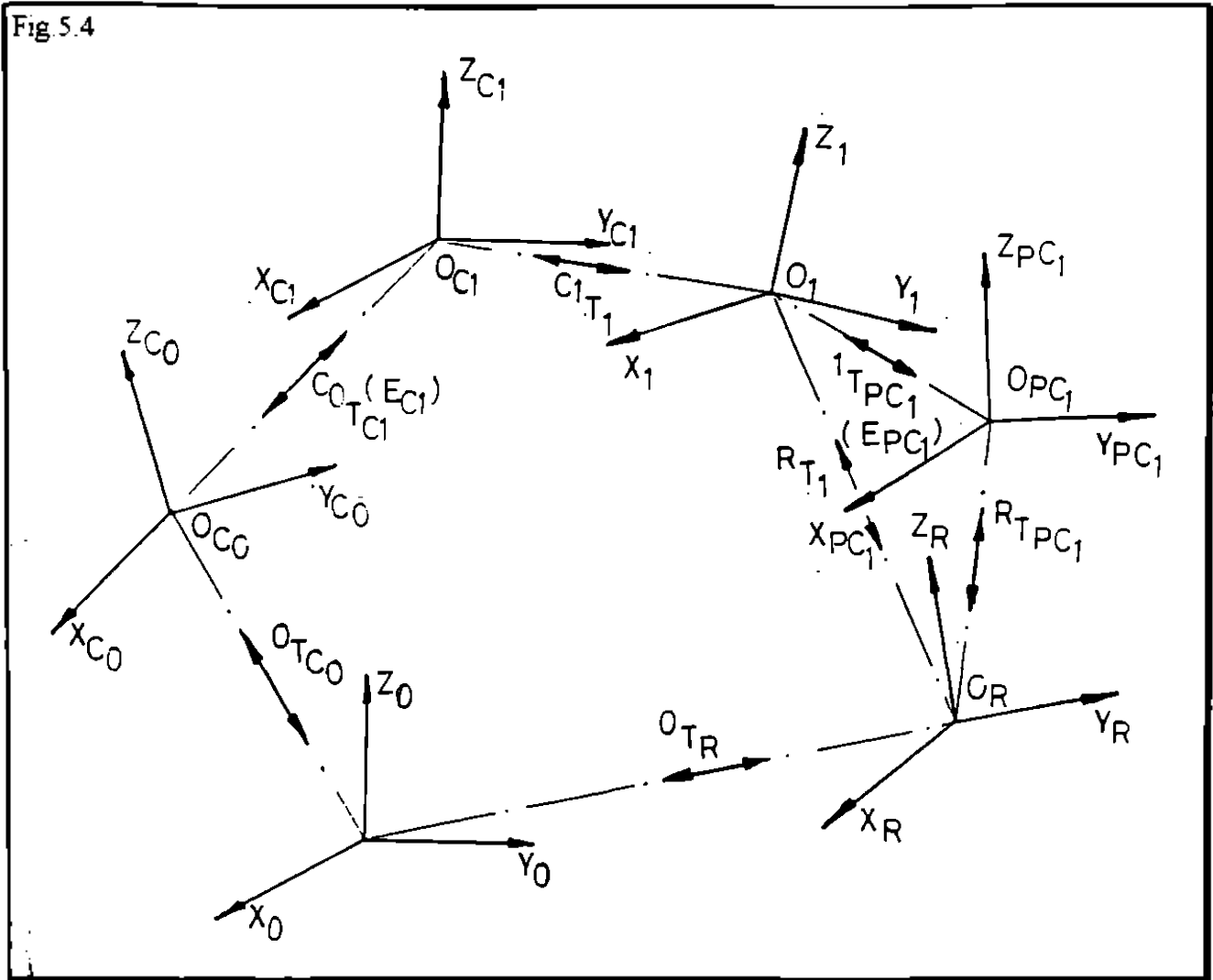
a) Preluarea semifabricatului de pe paletă fixă (fig.5.3)

În acest caz, transformarea:

$${}^0T_u = {}^0T_{P_i} \cdot {}^{P_i}T_i = ct. \quad (5.6),$$

pentru o anumită poziție, i , a semifabricatului pe paletă. Fiecărei poziții, i , de pe paletă îi corespunde o matrice de erori, E_{PC_u} , de forma (5.5). Așadar, pentru postul de lucru 1, E_{PC_u} este variabilă. Cunoașterea matricii erorilor de situare, E_{PC_u} este importantă, permițând reducerea acestor erori prin calibrarea robotului în postul (1) în limitele complianței admise a acestuia. Desigur, această operațiune este posibilă în postul (1) la valoarea $E_{PC_u, \text{max}}$.

b) Preluarea semifabricatului de pe un conveior, C_1 (fig.5.4)



În această situație, preluarea semifabricatului de către robot, de pe conveior se face în aceeași poziție, $O_1x_1y_1z_1$, poziție care însă este realizată de conveior cu o anumită eroare de indexare, E_{C_1} . Ansamblul de transformări, în această situație, se prezintă sub forma:

$$\begin{array}{ccccccc}
 \rightarrow & \xrightarrow{{}^0T_{C0}} & O_{C_0}x_{C_0}y_{C_0}z_{C_0} & \xrightarrow{{}^0T_{C1}(E_{C_1})} & & & \\
 \uparrow & & & & \downarrow & & \\
 O_0x_0y_0z_0 & \xrightarrow{{}^0T_{C1}} & O_{C_1}x_{C_1}y_{C_1}z_{C_1} & \rightarrow & \xrightarrow{{}^0T_1} & O_1x_1y_1z_1 & \xleftarrow{{}^R T_1(E_{K_1})} \\
 \downarrow & & & & & & \uparrow \\
 \rightarrow & \xrightarrow{{}^0T_R} & O_Rx_Ry_Rz_R & \rightarrow & \xrightarrow{{}^R T_{PC1}} & O_{PC_1}x_{PC_1}y_{PC_1}z_{PC_1} & \rightarrow \rightarrow
 \end{array} \quad (5.7)$$

În schema de mai sus, s-a notat cu $O_{C_0}x_{C_0}y_{C_0}z_{C_0}$ poziția ideală (comandată) de

indexare a conveiorului și cu $O_{C_1}x_{C_1}y_{C_1}z_{C_1}$, poziția reală a conveiorului, poziție din care robotul preia semifabricatul.

Așadar:

$${}^0T_{C_1} - {}^0T_{C_1} = {}^{C_0}T_{C_1} (E_{C_1}) \quad (5.8),$$

transformarea ${}^{C_0}T_{C_1}$ exprimând incapacitatea conveiorului de a se situa în poziția ideală, deci eroarea de situare a acestuia. Transformării ${}^{C_0}T_{C_1}$ îi corespunde așadar, matricea erorilor de situare ale conveiorului, E_{C_1} , de forma:

$$E_{C_1} = \begin{pmatrix} n_{x_{C_0}} - n_{x_{C_1}} & o_{x_{C_0}} - o_{x_{C_1}} & a_{x_{C_0}} - a_{x_{C_1}} & x_{C_0} - x_{C_1} \\ n_{y_{C_0}} - n_{y_{C_1}} & o_{y_{C_0}} - o_{y_{C_1}} & a_{y_{C_0}} - a_{y_{C_1}} & y_{C_0} - y_{C_1} \\ n_{z_{C_0}} - n_{z_{C_1}} & o_{z_{C_0}} - o_{z_{C_1}} & a_{z_{C_0}} - a_{z_{C_1}} & z_{C_0} - z_{C_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.9).$$

Cunoașterea matricii E_{C_1} permite reducerea erorii de situare a conveiorului, prin calibrarea acestuia, intervenind cu corecțiile necesare în comanda conveiorului.

În ceea ce privește matricea erorilor de situare $E_{R_{C_1}}$, se determină analog situației prezentate la cazul a), având forma dată de relația (5.5).

c) Preluarea semifabricatului de pe robocar, r

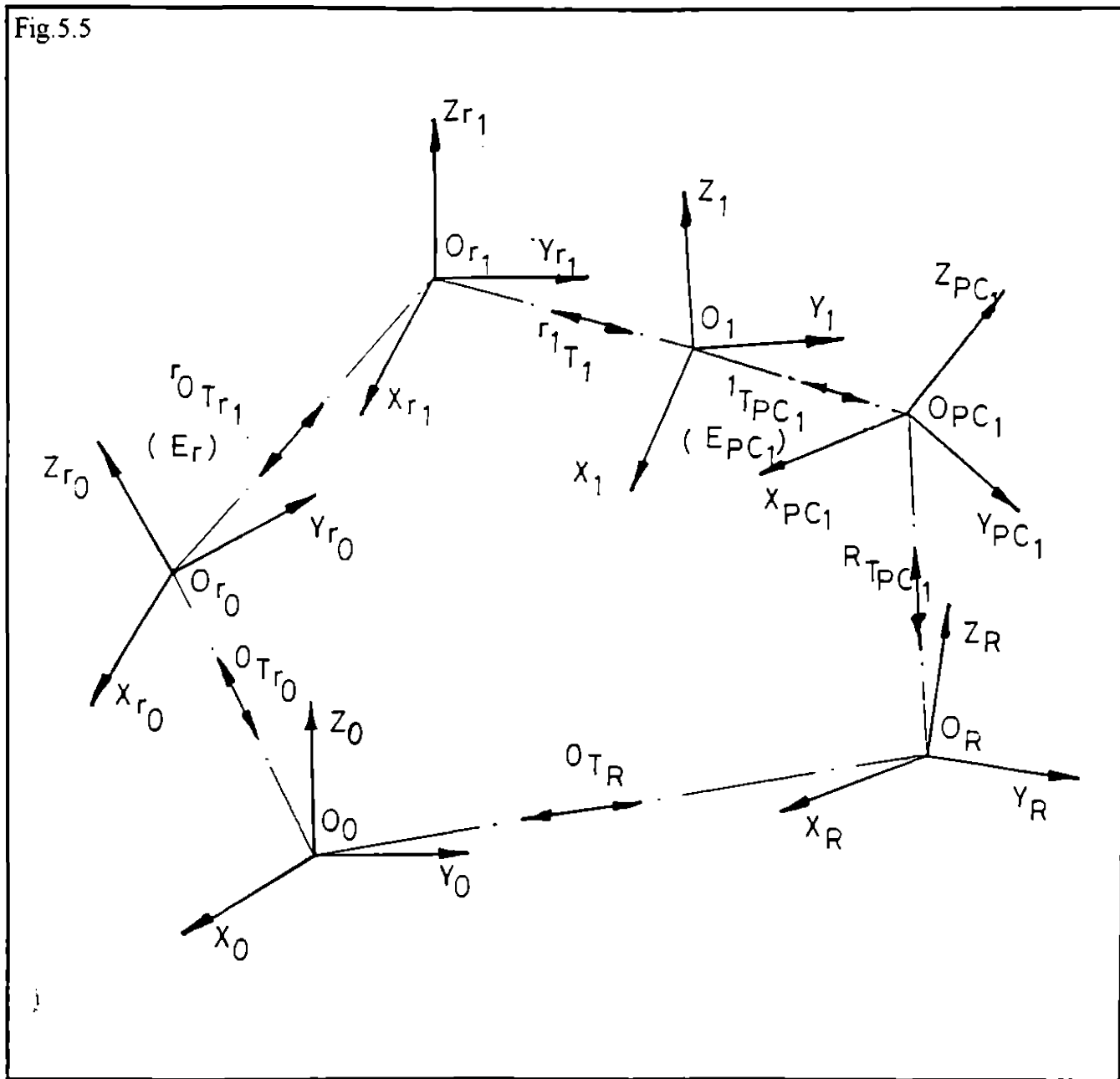
Problema se tratează analog cazului b). Preluarea semifabricatului de pe robocar se face în aceeași poziție, ideală, comandată, de situare a robocarului, $O_0x_0y_0z_0$, poziție realizată de robocar cu o anumită eroare, E_r , rezultată din faptul că el se situează într-o poziție reală, $O_1x_1y_1z_1$, diferită de poziția ideală, comandată $O_0x_0y_0z_0$ (fig. 5.5).

Ansamblul de transformări puse în evidență în fig. 5.5, se prezintă sub forma:

$$\begin{array}{ccccccc} \rightarrow & \xrightarrow{{}^0T_0} & O_0x_0y_0z_0 & \xrightarrow{{}^0T_1(E_r)} & & & \\ & \uparrow & & & \downarrow & & \\ O_0x_0y_0z_0 & \xrightarrow{{}^0T_1} & O_1x_1y_1z_1 & \rightarrow & \xrightarrow{{}^1T_1} & O_1x_1y_1z_1 & \xleftarrow{{}^{R_1}T_1(E_{R_1})} \\ & \downarrow & & & & & \uparrow \\ \rightarrow & \xrightarrow{{}^0T_R} & O_Rx_Ry_Rz_R & \rightarrow & \xrightarrow{{}^R T_{R_1}} & O_{R_1}x_{R_1}y_{R_1}z_{R_1} & \rightarrow \rightarrow \end{array} \quad (5.10),$$

Deci, transformarea:

Fig.5.5



$${}^0T_0 - {}^0T_1 = {}^0T_1 (E_r) \tag{5.11}$$

exprimă incapacitatea robocarului de a se situa în poziția comandată, (O_0, x_0, y_0, z_0) , deci eroarea de situare a acestuia, exprimată printr-o matrice de forma:

$${}^0T_1 = \begin{vmatrix} n_{x_0} - n_{x_1} & o_{x_0} - o_{x_1} & a_{x_0} - a_{x_1} & x_0 - x_1 \\ n_{y_0} - n_{y_1} & o_{y_0} - o_{y_1} & a_{y_0} - a_{y_1} & y_0 - y_1 \\ n_{z_0} - n_{z_1} & o_{z_0} - o_{z_1} & a_{z_0} - a_{z_1} & z_0 - z_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \tag{5.12}$$

Determinarea elementelor matricii E_r permite reducerea erorii de situare a

robocarului, E_r , prin calibrarea acestuia, intervenind cu corecțiile necesare, în programul de comandă al robotului.

Matricea erorilor de situare E_{PC} , se determina printr-o relație de forma (5.5) analog cazurilor a) și b)

5.2.1.2. Determinarea erorilor de situare în postul de lucru 2

În acest post de lucru, existența mai multor subansamble mobile ale mașinii unelte (masă, dispozitiv, cap mașină), generează mai multe categorii de erori de situare, specifice fiecărui subansamblu mobil la care se adaugă, desigur erorile de situare ale robotului, la depunerea piesei în dispozitiv, precum și la preluarea acesteia din dispozitiv. Evidențierea acestor categorii de erori face posibilă intervenția asupra diferitelor componente, în vederea diminuării acestor erori, care influențează în final eroarea de prelucrare a piesei

Apare așadar ca necesară micșorarea acestor erori în limita câmpului de toleranță admis pentru piesa respectivă.

1. Determinarea erorilor de situare a piesei în dispozitivul de lucru.

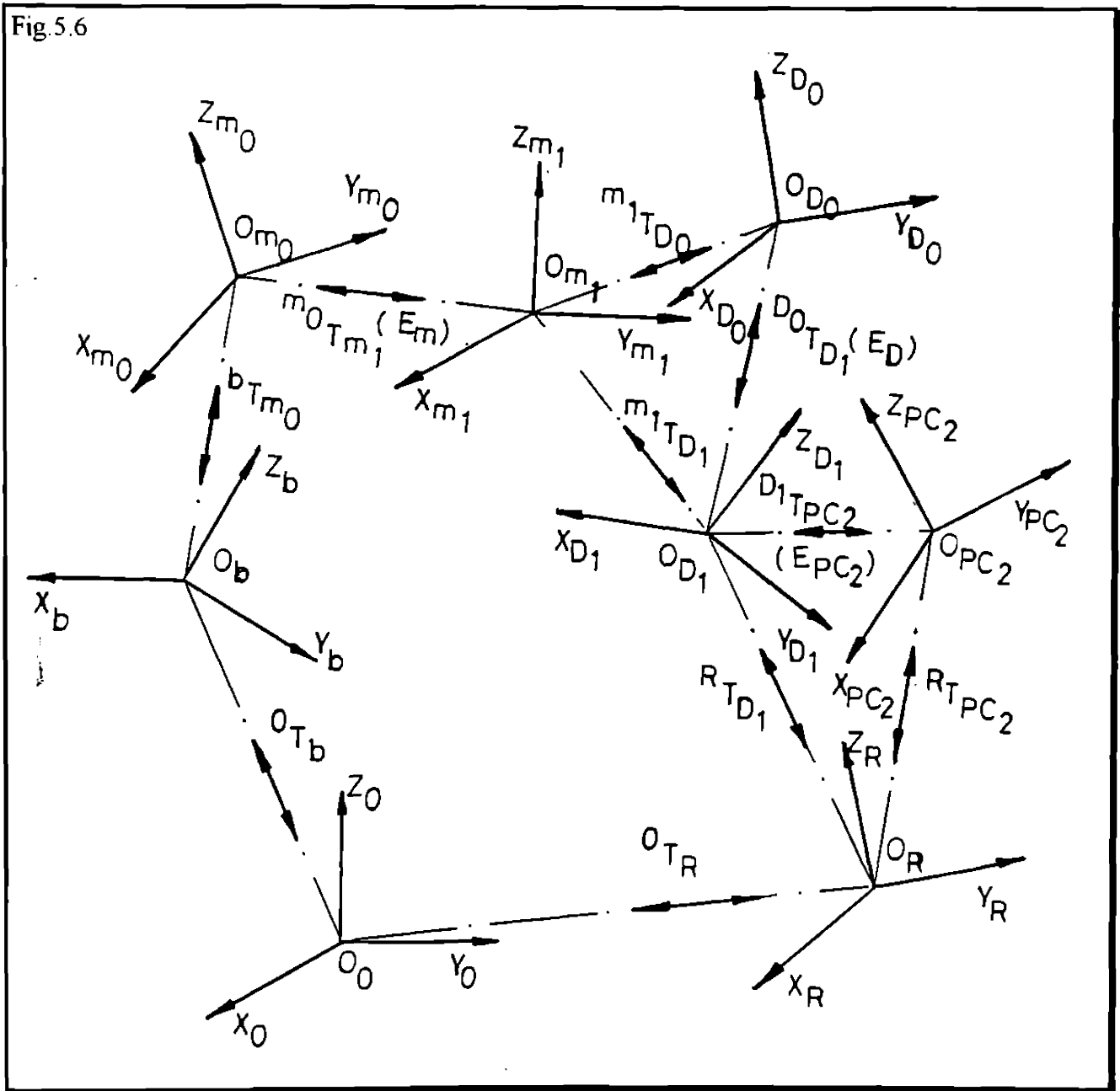
Pornind de la considerentul că robotul R așează piesa de prelucrat în dispozitivul de lucru D , care la rândul lui se află amplasat pe un subansamblu în mișcare, masa mașinii m , în această această secvență se pot decela trei tipuri de erori: erori de poziționare ale mesei mașinii, E_m , erori de fixare a piesei în dispozitiv, E_D și erori de situare de către robot a piesei în dispozitivul de lucru, E_{PC} , conform fig. 5.6.

Pentru a pune în evidență erorile de tip E_m și E_D , se acceptă un sistem de referință legat de batiul mașinii unelte, $O_b x_b y_b z_b$, sistem ce poziționează mașina în raport cu referința fixă a halei, $O_0 x_0 y_0 z_0$.

Ansamblul de transformări evidențiate mai sus, are loc după următoarea schemă generală:

$$\begin{array}{ccccccc}
 & \xrightarrow{bT_m} & O_{m_0} x_{m_0} y_{m_0} z_{m_0} & \xrightarrow{mT_m (E_m)} & & & \\
 & \uparrow & & & \downarrow & & \\
 O_0 x_0 y_0 z_0 & \xrightarrow{vT_b} & O_b x_b y_b z_b & \xrightarrow{bT_m} & O_m x_m y_m z_m & \xrightarrow{mT_{D_1}} & O_{D_1} x_{D_1} y_{D_1} z_{D_1} & \leftarrow & \\
 \downarrow & & \downarrow & & & & \uparrow & \uparrow & (5.10), \\
 & & & & \xrightarrow{mT_{D_0}} & O_{D_0} x_{D_0} y_{D_0} z_{D_0} & \xrightarrow{vT_{D_1} (E_{D_1})} & & \uparrow \\
 & \xrightarrow{vT_R} & O_R x_R y_R z_R & \xrightarrow{RTPC_2} & O_{PC_2} x_{PC_2} y_{PC_2} z_{PC_2} & \xrightarrow{\kappa_2 T_{D_1} (E_{PC_2})} & & & \\
 & & & & & & & &
 \end{array}$$

Fig.5.6



In batiul de transformări de mai sus, s-au acceptat următoarele notații:

$O_{m_0} x_{m_0} y_{m_0} z_{m_0}$ - poziția comandată (ideală) a mesei mașinii;

O_m, x_m, y_m, z_m - poziția reală (efectivă) a mesei mașinii;

O_D, x_D, y_D, z_D - poziția comandată a dispozitivului;

O_D, x_D, y_D, z_D - poziția reală a dispozitivului, poziție în care robotul trebuie să depună piesa;

$O_{PC}, x_{PC}, y_{PC}, z_{PC}$ - poziția efectivă a P.C. al robotului (poziție efectivă în care robotul așează piesa în dispozitiv).

Să analizăm pe rând cele trei categorii de erori ce apar la această secvență de lucru.

a) Determinarea erorii de poziționare a mesei mașinii, E_m (fig.5.7)

Apare ca diferență între poziția comandată pentru poziționarea mesei, O_m, x_m, y_m, z_m , și poziția reală, O_m, x_m, y_m, z_m , conform transformării următoare:

$$\begin{array}{ccc}
 \xrightarrow{{}^v T_{m_0}} & O_{m_0}, x_{m_0}, y_{m_0}, z_{m_0} & \xrightarrow{\quad} \\
 \uparrow & & \downarrow \\
 O_a, x_a, y_a, z_a \xrightarrow{{}^o T_a} & O_b, x_b, y_b, z_b & \rightarrow \\
 \downarrow & & \downarrow \\
 \xrightarrow{{}^v T_m} & O_m, x_m, y_m, z_m & \xleftarrow{{}^{m_0} T_m (E_m)}
 \end{array} \quad (5.14),$$

Aceste erori sunt generate de imprecizii ale lanțului cinematic de acționare a mesei mașinii, de imprecizii ale sistemului de acționare, de erori în programarea mișcărilor mesei etc.

În lanțul de transformări (5.14), ${}^o T_b = ct$, respectiv ${}^b T_{m_0} = ct$. Dar ${}^{m_0} T_m = var.$, deci și:

$${}^b T_m = {}^b T_{m_0} \cdot {}^{m_0} T_m = var. \quad (5.15),$$

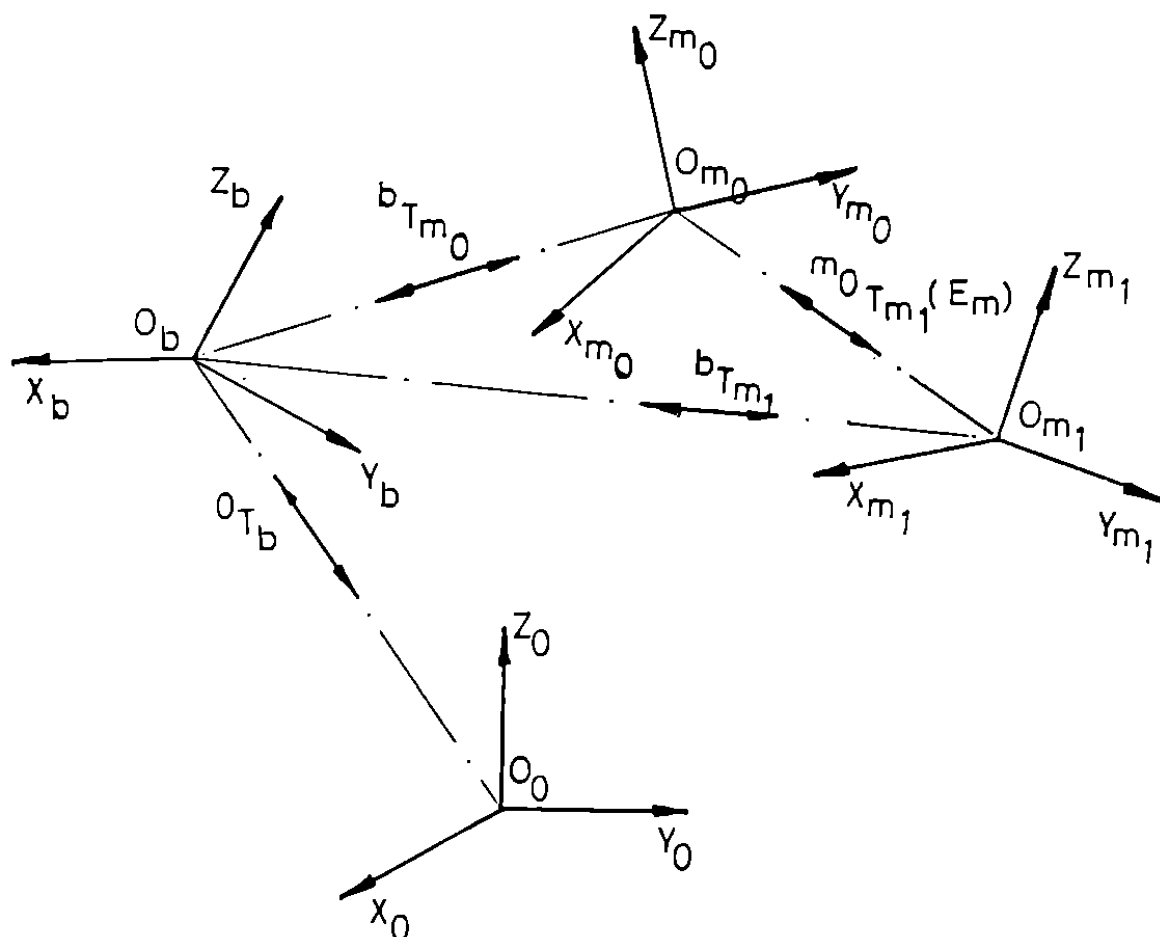
Matricea erorilor de situare a mesei mașinii, sub forma ei generală, este dată de:

$$E_m = \begin{pmatrix} n_{x_{m_0}} - n_{x_m} & o_{x_{m_0}} - o_{x_m} & a_{x_{m_0}} - a_{x_m} & x_{m_0} - x_m \\ n_{y_{m_0}} - n_{y_m} & o_{y_{m_0}} - o_{y_m} & a_{y_{m_0}} - a_{y_m} & y_{m_0} - y_m \\ n_{z_{m_0}} - n_{z_m} & o_{z_{m_0}} - o_{z_m} & a_{z_{m_0}} - a_{z_m} & z_{m_0} - z_m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.16).$$

Determinarea elementelor matricii E_m permite reducerea erorilor de situare a mesei prin introducerea corecțiilor necesare în comanda lanțului

cinematic de acționare a mesei mașinii.

Fig.5.7



b) Determinarea erorii de fixare a dispozitivului, E_d (fig.5.8)

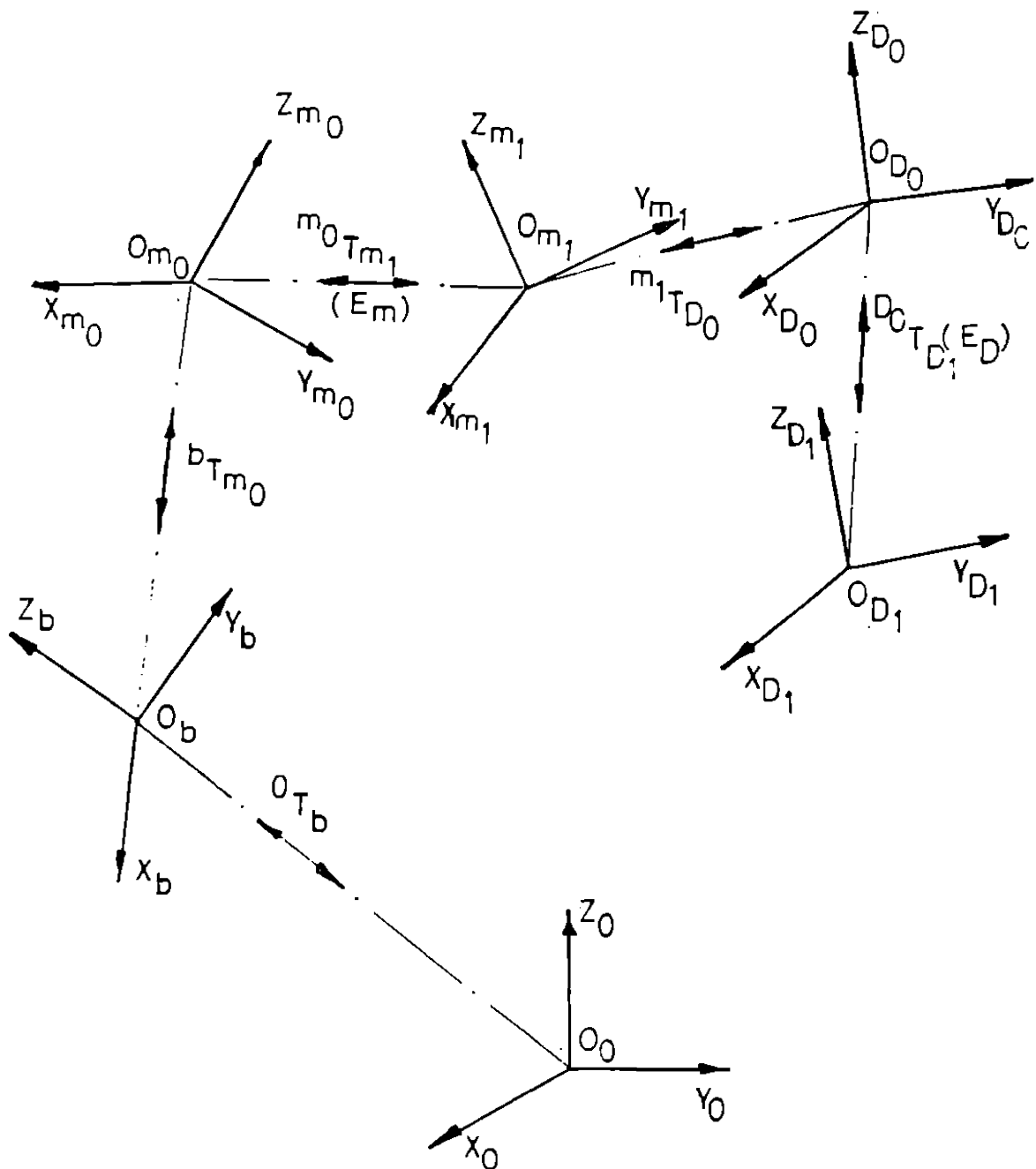
Apare ca diferență între poziția ideală a piesei în dispozitiv, $O_{D_0}x_{D_0}y_{D_0}z_{D_0}$ și poziția efectivă, reală, $O_{D_1}x_{D_1}y_{D_1}z_{D_1}$, evidențiată de următoarele transformări:

$$O_0x_0y_0z_0 \xrightarrow{{}^0T_b} O_bx_by_bz_b \xrightarrow{{}^bT_{m0}} O_{m_0}x_{m_0}y_{m_0}z_{m_0} \xrightarrow{{}^{m_0}T_{m_1}} O_{m_1}x_{m_1}y_{m_1}z_{m_1} \rightarrow$$

$$\begin{array}{c}
 \xrightarrow{{}^mT_{D_0}} O_{D_0}x_{D_0}y_{D_0}z_{D_0} \rightarrow \rightarrow \\
 \uparrow \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \downarrow \\
 \rightarrow \quad | \qquad \qquad \qquad \qquad \downarrow \\
 \downarrow \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \downarrow \\
 \xrightarrow{{}^mT_{D_1}} O_{D_1}x_{D_1}y_{D_1}z_{D_1} \xleftarrow{{}^{D_0}T_{D_1}(E_D)}
 \end{array}
 \tag{5.17},$$

Respectivele transformări sunt arătate în fig. 5.8

Fig. 5.8



Această categorie de erori este generată de imprecizii în execuția dispozitivului, în situarea acestuia pe masa mașinii unelte imprecizii în execuția și comanda sistemului de acționare automată a dispozitivului de lucru etc.

În lanțul de transformare (5.17) ${}^0T_b = ct.$, ${}^bT_{m_0} = ct.$, ${}^{m_0}T_{m_1} = var.$, ${}^{m_1}T_{D_0} = var.$ (în

raport cu (O_0, x_0, y_0, z_0) , dar constant în raport cu (O_m, x_m, y_m, z_m) , ${}^{D_0}T_{D_1} = \text{var.}$, deci și:

$${}^{0_0}T_{D_1} = {}^{0_0}T_{D_0} \cdot {}^{D_0}T_{D_1} = \text{var.} \quad (5.18).$$

Transformarea ${}^{D_0}T_{D_1}$ corespunde matricii erorilor de fixare a piesei în dispozitiv, E_d , exprimând incapacitatea dispozitivului de a situa piesa în poziția comandată, și are forma:

$${}^{(D_0)T_{D_1}} E_d = \begin{vmatrix} n_{x_{D_0}} - n_{x_{D_1}} & o_{x_{D_0}} - o_{x_{D_1}} & a_{x_{D_0}} - a_{x_{D_1}} & x_{D_0} - x_{D_1} \\ n_{y_{D_0}} - n_{y_{D_1}} & o_{y_{D_0}} - o_{y_{D_1}} & a_{y_{D_0}} - a_{y_{D_1}} & y_{D_0} - y_{D_1} \\ n_{z_{D_0}} - n_{z_{D_1}} & o_{z_{D_0}} - o_{z_{D_1}} & a_{z_{D_0}} - a_{z_{D_1}} & z_{D_0} - z_{D_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (5.19).$$

Eroarea E_d poate fi compensată prin acționarea asupra dispozitivului, fie asupra sistemului de acționare, fie prin introducerea corecțiilor corespunzătoare în secțiunea de program de comandă al celei, aferent dispozitivului de lucru.

c) Determinarea erorii de situare a piesei de către robot în dispozitiv, E_{PC_2} (fig.5.9)

Este determinată de imprecizia elementelor componente ale lanțului cinematic al mecanismului generator de traiectorie al robotului ce deservește mașina unealtă, precum și de o multitudine de alți factori, puși în evidență în capitolele anterioare.

Ansamblul de transformări ce pune în evidență această eroare este de forma:

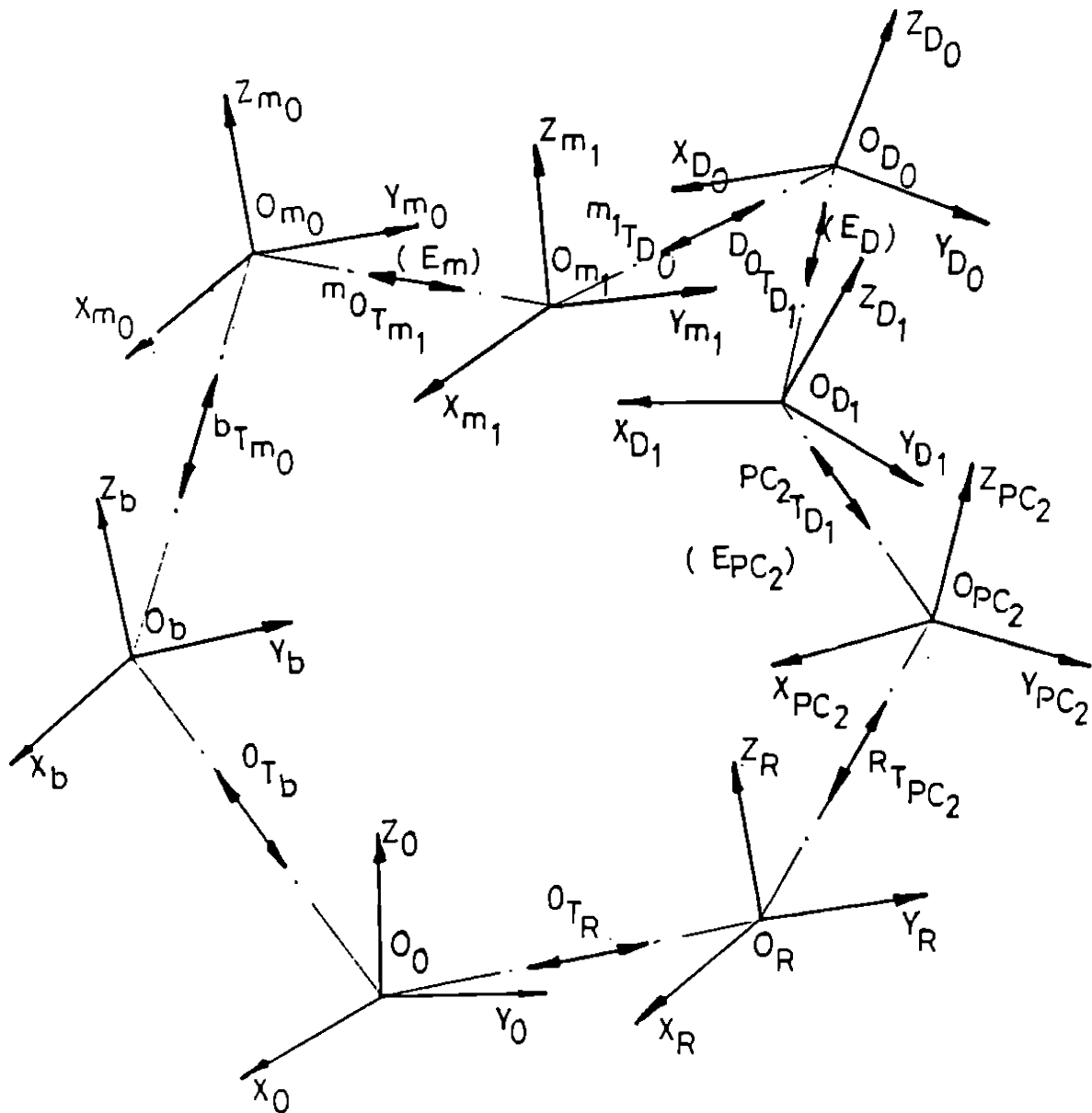
$$\begin{array}{ccccccc} O_0, x_0, y_0, z_0 & \xrightarrow{{}^0T_b} & O_b, x_b, y_b, z_b & \xrightarrow{{}^bT_m} & O_m, x_m, y_m, z_m & \xrightarrow{{}^mT_{D_1} (E_m)} & O_m, x_m, y_m, z_m & \xrightarrow{{}^mT_{D_0}} & \\ \downarrow & \xrightarrow{{}^0T_{D_0}} & O_{D_0}, x_{D_0}, y_{D_0}, z_{D_0} & \xrightarrow{{}^{D_0}T_{D_1} (E_D)} & O_{D_1}, x_{D_1}, y_{D_1}, z_{D_1} & \xleftarrow{{}^{PC_2}T_{D_1} (E_{PC_2})} & & & \\ \downarrow & & & & & & & \uparrow & \\ & \xrightarrow{{}^0T_R} & O_R, x_R, y_R, z_R & \xrightarrow{{}^R T_{PC_2}} & O_{PC_2}, x_{PC_2}, y_{PC_2}, z_{PC_2} & \longrightarrow & & & \end{array} \quad (5.20).$$

Transformarea ${}^{PC_2}T_{D_1}$ corespunde matricii erorii de situare a piesei de către robot în dispozitiv, E_{PC_2} , exprimând incapacitatea robotului de a situa piesa în dispozitiv în poziția comandată $O_{D_1}, x_{D_1}, y_{D_1}, z_{D_1}$ și are forma:

$${}^{(PC_2)T_{D_1}} E_{PC_2} = \begin{vmatrix} n_{x_{D_1}} - n_{x_{PC_2}} & o_{x_{D_1}} - o_{x_{PC_2}} & a_{x_{D_1}} - a_{x_{PC_2}} & x_{D_1} - x_{PC_2} \\ n_{y_{D_1}} - n_{y_{PC_2}} & o_{y_{D_1}} - o_{y_{PC_2}} & a_{y_{D_1}} - a_{y_{PC_2}} & y_{D_1} - y_{PC_2} \\ n_{z_{D_1}} - n_{z_{PC_2}} & o_{z_{D_1}} - o_{z_{PC_2}} & a_{z_{D_1}} - a_{z_{PC_2}} & z_{D_1} - z_{PC_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (5.21).$$

Eroarea E_{pc} poate fi compensată în două moduri:

Fig.5.9



- fie acționând asupra robotului (calibrarea robotului);

- fie acționând asupra mesei mașinii (E_m) și asupra dispozitivului (E_d) (calibrarea lanțului cinematic de poziționare a mesei și calibrarea dispozitivului).

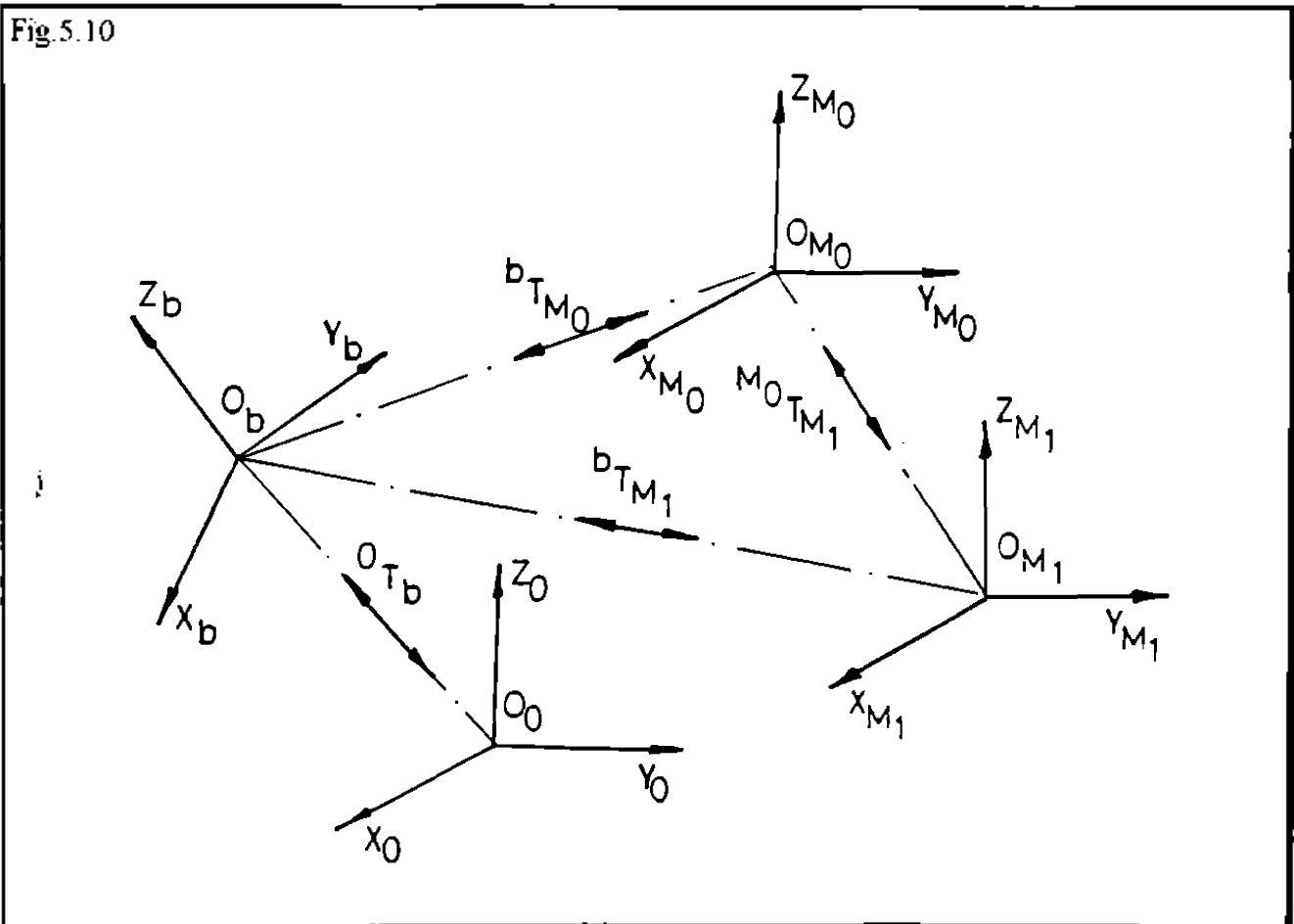
Există posibilitatea ca această eroare E_{pc} să fie corectată eventual numai de către dispozitiv (compensată de E_d).

2) Determinarea erorii de situare a capului de lucru al mașinii unelte, E_M (fig.5.10)

Această eroare apare ca diferență între poziția comandată (ideală) a capului mașinii în vederea prelucrării piesei fixate în dispozitivul de lucru, $O_{M_0}, x_{M_0}, y_{M_0}, z_{M_0}$, și poziția reală (efectivă) $O_{M_1}, x_{M_1}, y_{M_1}, z_{M_1}$, a acestuia.

Ansamblul de transformări care pune în evidență această eroare este:

$$\begin{array}{ccc}
 \xrightarrow{{}^0T_{M_0}} O_{M_0}, x_{M_0}, y_{M_0}, z_{M_0} \longrightarrow & & \\
 \uparrow & & \downarrow \\
 O_0, x_0, y_0, z_0 \xrightarrow{{}^0T_b} O_b, x_b, y_b, z_b \longrightarrow & & \downarrow \\
 \downarrow & & \downarrow \\
 \xrightarrow{{}^0T_{M_1}} O_{M_1}, x_{M_1}, y_{M_1}, z_{M_1} \xleftarrow{{}^{M_1}T_{M_0} \cdot E_M} & &
 \end{array} \quad (5.22),$$



Erorile de tip E_M pot fi generate de imprecizii ale lanțului cinematic de acționare a capului mașinii, imprecizii ale sistemului de acționare a capului mașinii, imprecizii ale sistemului de comandă sau erori de programare ale mișcării capului mașinii etc.

În lanțul de transformări (5.22), ${}^aT_b = ct$, ${}^bT_{M_0} = ct$, ${}^{M_0}T_{M_1} = \text{var}$. Ca urmare și:

$${}^bT_{M_1} = {}^bT_{M_0} \cdot {}^{M_0}T_{M_1} = \text{var}. \quad (5.23)$$

Matricea de erori, E_M , corespunzătoare transformării ${}^{M_0}T_{M_1}$, exprimând incapacitatea capului mașinii de a se situa (indexa) în poziția comandată $O_{M_0}x_{M_0}y_{M_0}z_{M_0}$, are forma:

$$E_M \quad ({}^{M_0}T_{M_1}) = \begin{pmatrix} n_{x_{M_0}} - n_{x_{M_1}} & o_{x_{M_0}} - o_{x_{M_1}} & a_{x_{M_0}} - a_{x_{M_1}} & x_{M_0} - x_{M_1} \\ n_{y_{M_0}} - n_{y_{M_1}} & o_{y_{M_0}} - o_{y_{M_1}} & a_{y_{M_0}} - a_{y_{M_1}} & y_{M_0} - y_{M_1} \\ n_{z_{M_0}} - n_{z_{M_1}} & o_{z_{M_0}} - o_{z_{M_1}} & a_{z_{M_0}} - a_{z_{M_1}} & z_{M_0} - z_{M_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.24)$$

Compensarea erorii definite de matricea E_M se poate realiza prin calibrarea lanțului cinematic de acționare a capului de lucru al mașinii unelte.

3. Determinarea erorii de fixare a sculei în capul mașinii, E_S (fig.5.11)

Eroarea E_S este determinată de diferența dintre poziția comandată a sculei, $O_{S_0}x_{S_0}y_{S_0}z_{S_0}$ și poziția reală, efectivă a sculei, $O_{S_1}x_{S_1}y_{S_1}z_{S_1}$ și este evidențiată de ansamblul de transformări:

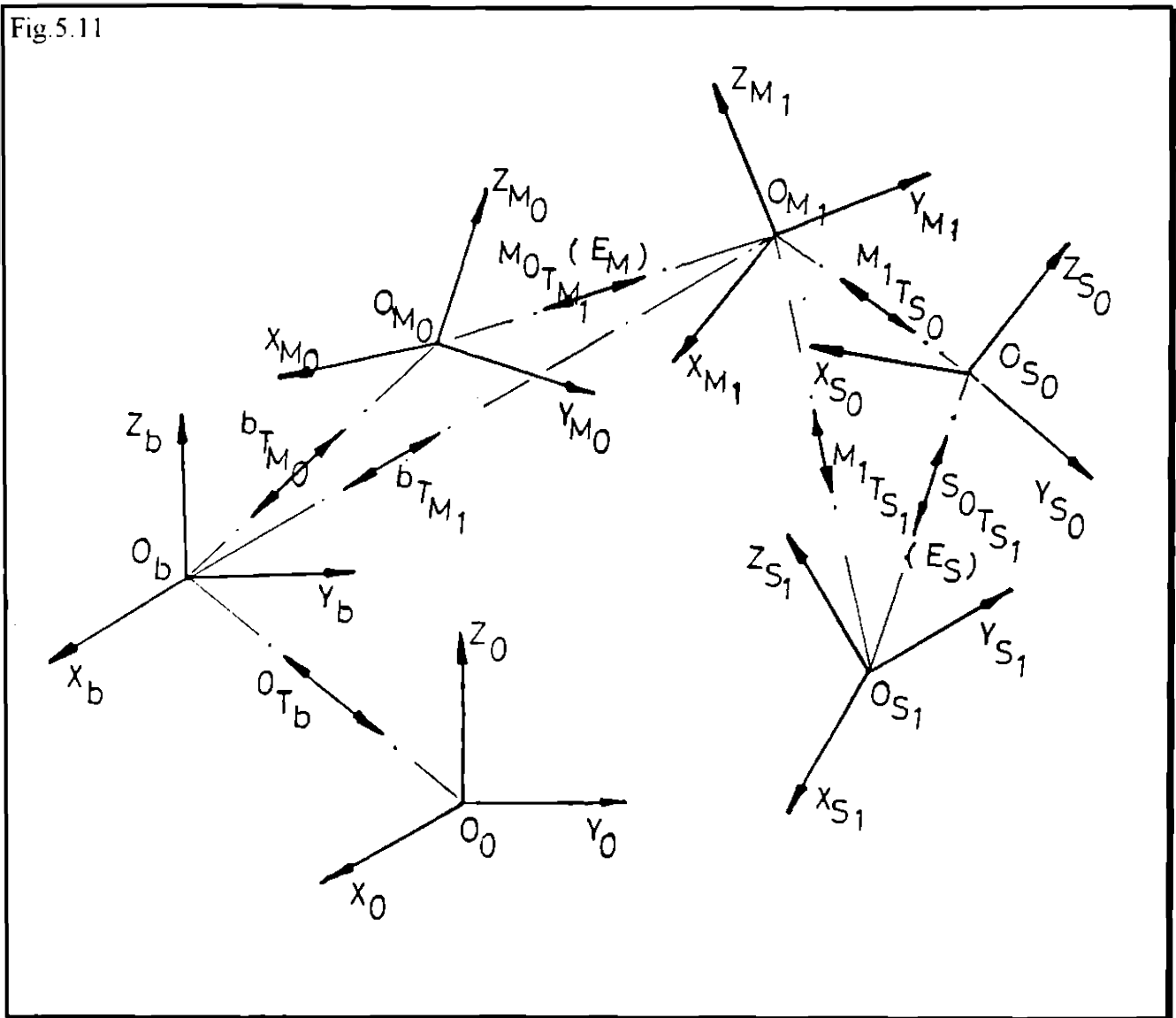
$$\begin{array}{ccccccc} & \xrightarrow{{}^aT_{M_0}} & O_{M_0}x_{M_0}y_{M_0}z_{M_0} & \xrightarrow{{}^{M_0}T_{M_1} (E_M)} & & & \\ & \uparrow & & & \downarrow & & \\ O_{S_0}x_{S_0}y_{S_0}z_{S_0} & \xrightarrow{{}^aT_b} & O_bx_by_bz_b & \xrightarrow{{}^bT_{M_1}} & O_{M_1}x_{M_1}y_{M_1}z_{M_1} & \xrightarrow{{}^{M_1}T_{S_1}} & O_{S_1}x_{S_1}y_{S_1}z_{S_1} \quad (5.25), \\ & & & \downarrow & & \uparrow & \\ & & & \xrightarrow{{}^{M_1}T_{S_0}} & O_{S_0}x_{S_0}y_{S_0}z_{S_0} & \xrightarrow{{}^{S_0}T_{S_1} (E_S)} & \end{array}$$

Erorile de tip E_S sunt determinate de imprecizii de proiectare și execuție ale dispozitivului de fixare a sculei, de imprecizii de situare a dispozitivului, respectiv în capul mașinii și de imprecizii de fixare a sculei în dispozitiv, dar și de eroarea de indexare a capului de lucru al mașinii, E_M .

Transformării ${}^{S_0}T_{S_1}$ îi corespunde matricea erorii de fixare a sculei, E_S , de forma:

$$E_S \quad ({}^{S_0}T_{S_1}) = \begin{pmatrix} n_{x_{S_0}} - n_{x_{S_1}} & o_{x_{S_0}} - o_{x_{S_1}} & a_{x_{S_0}} - a_{x_{S_1}} & x_{S_0} - x_{S_1} \\ n_{y_{S_0}} - n_{y_{S_1}} & o_{y_{S_0}} - o_{y_{S_1}} & a_{y_{S_0}} - a_{y_{S_1}} & y_{S_0} - y_{S_1} \\ n_{z_{S_0}} - n_{z_{S_1}} & o_{z_{S_0}} - o_{z_{S_1}} & a_{z_{S_0}} - a_{z_{S_1}} & z_{S_0} - z_{S_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.26)$$

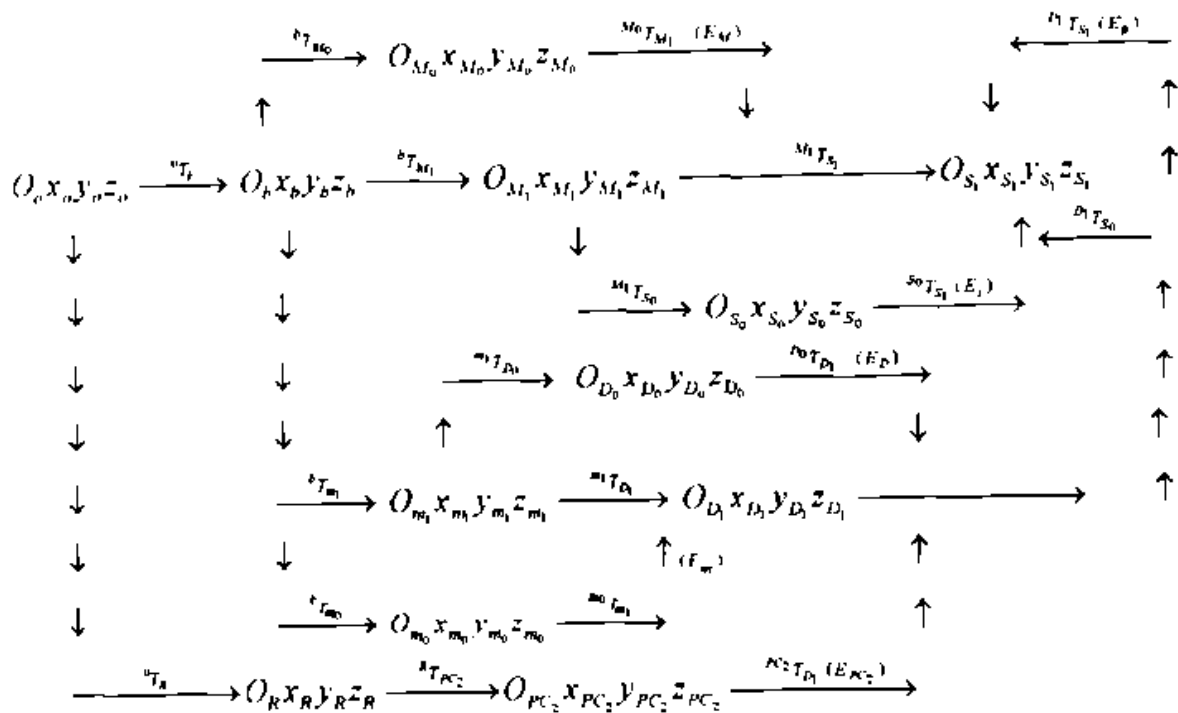
Fig.5.11



Matricea E_S poate fi, eventual, compensată prin acționare asupra dispozitivului de fixare a sculei în capul de lucru al mașinii sau intervenind asupra lui E_M .

4. Determinarea erorii de prelucrare a piesei fixate în dispozitiv, E_p (fig.5.12)

Această eroare este generată de diferența între poziția efectivă a piesei fixate în dispozitivul de lucru O_D, x_D, y_D, z_D și poziția efectivă a sculei, fixată în capul de lucru al mașinii, O_S, x_S, y_S, z_S , și corespunde unei succesiuni de transformări, după cum urmează:



(5.27),

Așadar, eroarea de prelucrare E_p , este determinată de:

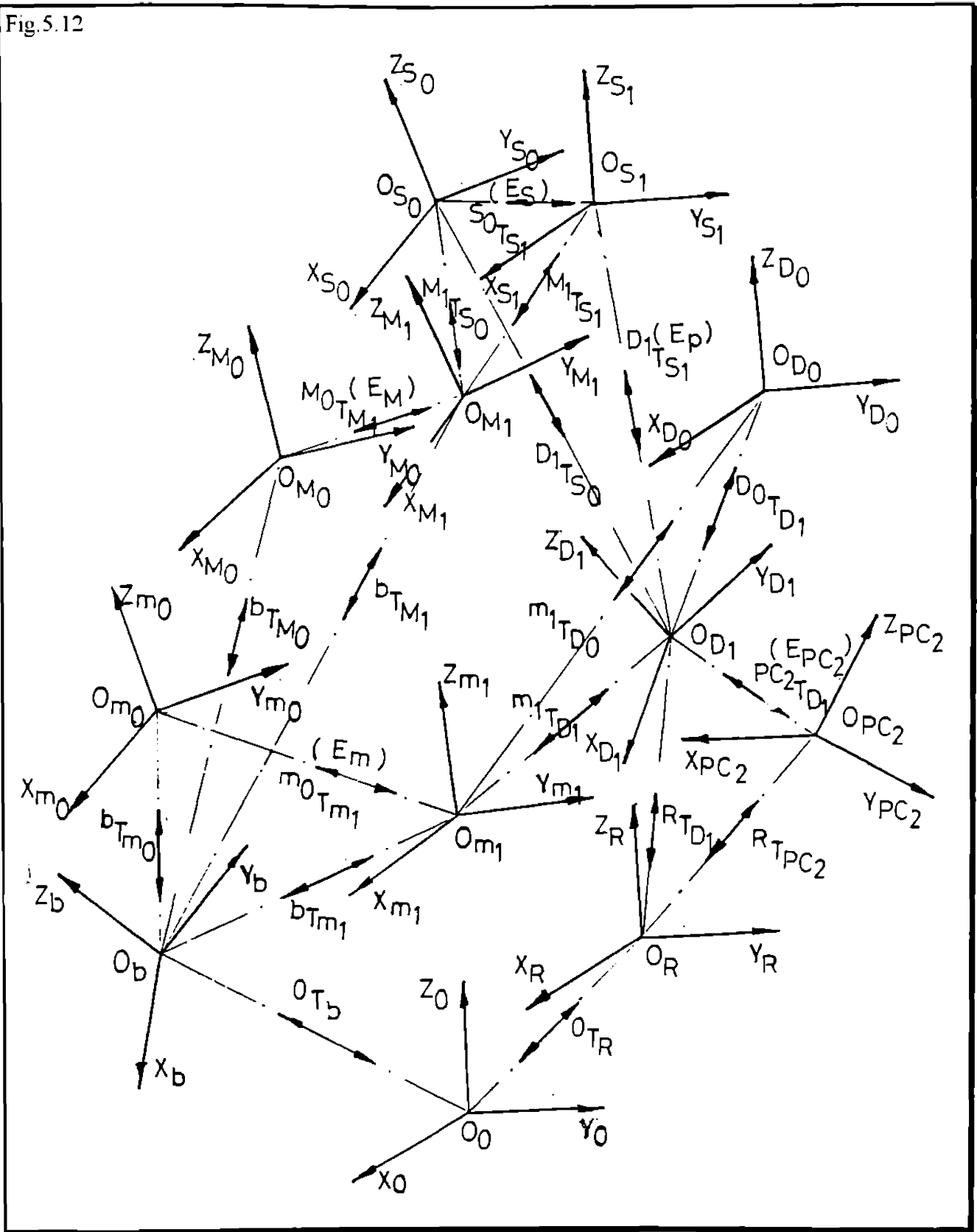
- eroarea de situare a mesei mașinii, E_m ;
- eroarea de fixare a piesei în dispozitiv, E_d ;
- eroarea de așezare a piesei de către robot în dispozitiv, E_{PC_2} ;
- eroarea de situare a capului de lucru al mașinii, E_M ;
- eroarea de fixare a sculei în capul de lucru al mașinii, E_S .

Apare ca necesară micșorarea erorii E_p , în vederea încadrării ei în câmpul de toleranțe admis pentru piesa ce se prelucurează. Aceasta se realizează prin:

- calibrarea lanțului cinematic de poziționare a mesei mașinii (compensarea erorii E_m);
- calibrarea dispozitivului (compensarea erorii E_d);
- calibrarea lanțului cinematic de acționare a capului de lucru al mașinii (compensarea erorii E_M);
- calibrarea robotului (compensarea erorii E_{PC_2});
- calibrarea dispozitivului de fixare a sculei în capul de lucru al mașinii (compensarea erorii E_S).

Matricea erorii de prelucrare, E_p , este de forma:

Fig.5.12



$${}^{D_1}T_{S_1} = \begin{bmatrix} n_{x_n} - n_{x_s} & o_{x_n} - o_{x_s} & a_{x_n} - a_{x_s} & x_{D_1} - x_{S_1} \\ n_{y_n} - n_{y_s} & o_{y_n} - o_{y_s} & a_{y_n} - a_{y_s} & y_{D_1} - y_{S_1} \\ n_{z_n} - n_{z_s} & o_{z_n} - o_{z_s} & a_{z_n} - a_{z_s} & z_{D_1} - z_{S_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.28).$$

Lanțul de transformări care evidențiază această eroare, este de forma:

$$\begin{array}{ccccccc}
 O_0 x_0 y_0 z_0 & \xrightarrow{{}^0T_b} & O_b x_b y_b z_b & \xrightarrow{{}^bT_{M_1}} & O_{M_1} x_{M_1} y_{M_1} z_{M_1} & \xrightarrow{{}^{M_1}T_{D_1}} & O_{D_1} x_{D_1} y_{D_1} z_{D_1} \leftarrow \\
 \downarrow & & & & & & \uparrow \\
 & \xrightarrow{{}^0T_R} & O_R x_R y_R z_R & \xrightarrow{{}^R T_{PC_2}} & O_{PC_2} x_{PC_2} y_{PC_2} z_{PC_2} & \xrightarrow{{}^{PC_2} T_{D_1} (E_{PC_2})} &
 \end{array} \quad (5.29),$$

Transformarea ${}^{PC_2}T_{D_1}$ corespunde matricii erorii de preluare a piesei de către robot, E_{PC_2} , care are forma:

$$E_{PC_2} = \begin{pmatrix} n_{x_{PC_2}} - n_{x_{D_1}} & o_{x_{PC_2}} - o_{x_{D_1}} & a_{x_{PC_2}} - a_{x_{D_1}} & x_{PC_2} - x_{D_1} \\ n_{y_{PC_2}} - n_{y_{D_1}} & o_{y_{PC_2}} - o_{y_{D_1}} & a_{y_{PC_2}} - a_{y_{D_1}} & y_{PC_2} - y_{D_1} \\ n_{z_{PC_2}} - n_{z_{D_1}} & o_{z_{PC_2}} - o_{z_{D_1}} & a_{z_{PC_2}} - a_{z_{D_1}} & z_{PC_2} - z_{D_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.30).$$

Compensarea erorii E_{PC_2} se realizează prin calibrarea robotului (intervenind cu corecțiile respective în comanda robotului).

5.2.1.3. Determinarea erorilor de situație în postul de lucru 3, E_{PC_3} (fig.5.14)

În postul de lucru 3, robotul așează piesa finită pe paleta P_2 . Piesa trebuie așezată pe paletă în poziția comandată, ideală, $O_2 x_2 y_2 z_2$. În realitate însă, P.C. al robotului nu atinge poziția comandată $O_2 x_2 y_2 z_2$, ci o poziție reală, $O_{PC_3} x_{PC_3} y_{PC_3} z_{PC_3}$, deci apare o eroare de situație, la depunerea piesei finite pe paleta 2, E_{PC_3} .

Această eroare este descrisă de un ansamblu de transformări de forma:

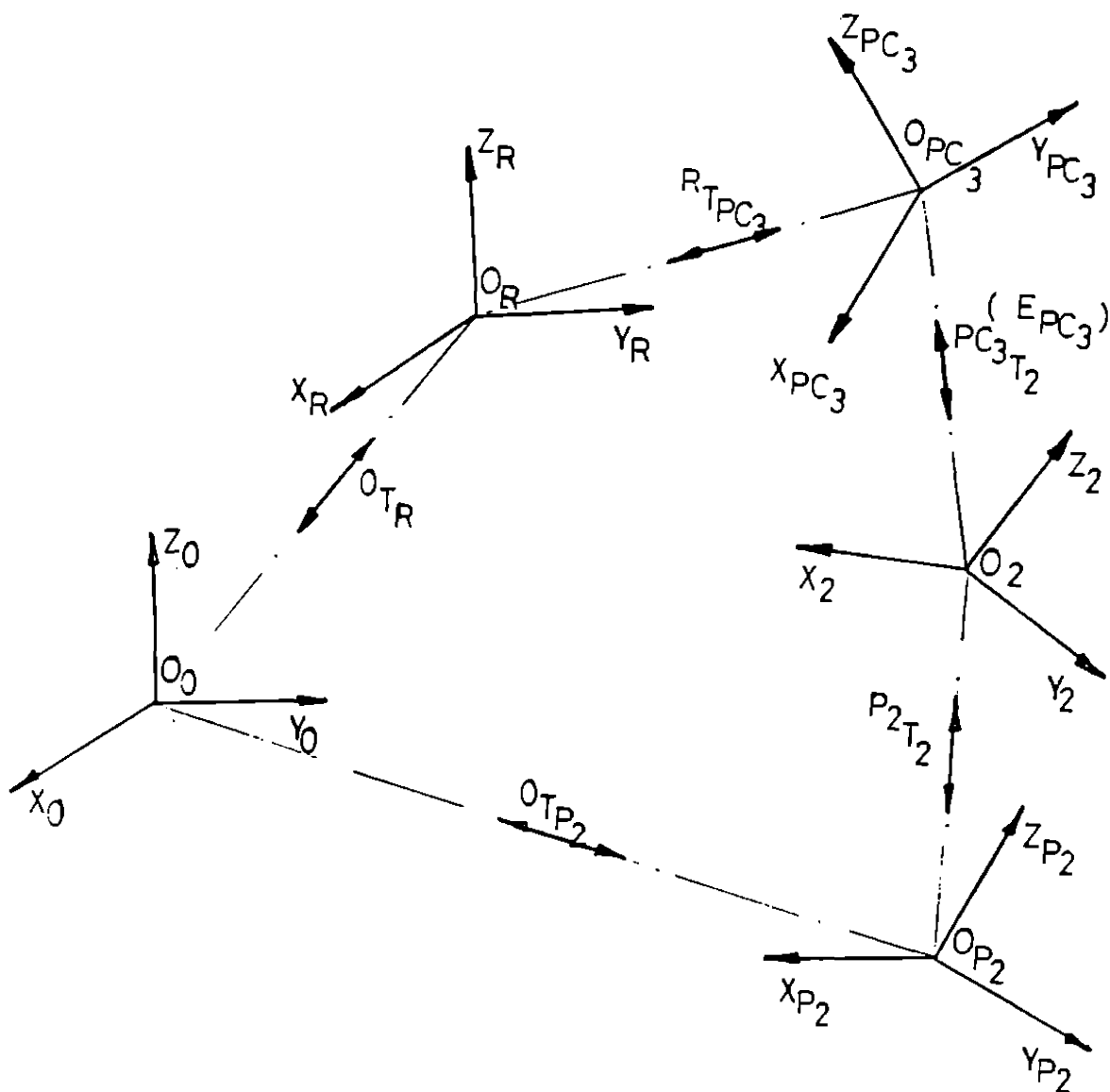
$$\begin{array}{ccccccc}
 O_0 x_0 y_0 z_0 & \xrightarrow{{}^0T_R} & O_R x_R y_R z_R & \xrightarrow{{}^R T_{PC_3}} & O_{PC_3} x_{PC_3} y_{PC_3} z_{PC_3} & \xrightarrow{{}^{PC_3} T_2 (E_{PC_3})} & \\
 \downarrow & & & & & & \downarrow \\
 & \xrightarrow{{}^0T_{P_2}} & O_{P_2} x_{P_2} y_{P_2} z_{P_2} & \xrightarrow{{}^{P_2} T_2} & O_2 x_2 y_2 z_2 & \longleftarrow &
 \end{array} \quad (5.31),$$

${}^0T_{P_2}$ - transformarea între referința $O_0 x_0 y_0 z_0$ și sistemul de referință $O_{P_2} x_{P_2} y_{P_2} z_{P_2}$, legat de paleta 2;

${}^{P_2}T_2$ - transformarea între sistemul $O_{P_2} x_{P_2} y_{P_2} z_{P_2}$ și poziția ideală a piesei pe paleta 2;

Transformarea ${}^{PC_3}T_2$ corespunde erorii de situație a piesei pe paleta 2, (E_{PC_3}), care are următoarea formă:

Fig.5.14



$${}^{PC_3}E_{PC_3} = \begin{pmatrix} n_{x_{PC_3}} - n_{x_2} & o_{x_{PC_3}} - o_{x_2} & a_{x_{PC_3}} - a_{x_2} & x_{PC_3} - x_2 \\ n_{y_{PC_3}} - n_{y_2} & o_{y_{PC_3}} - o_{y_2} & a_{y_{PC_3}} - a_{y_2} & y_{PC_3} - y_2 \\ n_{z_{PC_3}} - n_{z_2} & o_{z_{PC_3}} - o_{z_2} & a_{z_{PC_3}} - a_{z_2} & z_{PC_3} - z_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.32).$$

Eroarea E_{PC_3} poate fi compensată prin calibrarea robotului.

Concluzionând, cu privire la celula de fabricație flexibilă robotizată luată în studiu, se poate aprecia că, în cele trei posturi de lucru, precizia (de preluare a

semifabricatului, de prelucrare, respectiv de depozitare a piesei finite) este determinată de mai mulți factori, după cum urmează:

1. - în postul de lucru 1:
 - a) - exactitatea robotului
 - b) - exactitatea de indexare a conveiorului sau robocarului (dacă se utilizează un asemenea dispozitiv);
2. - în postul de lucru 2:
 - a) - exactitatea de situare a unei mașini unelte;
 - b) - exactitatea de situare a piesei în dispozitiv,
 - c) - exactitatea de poziționare a capului de lucru al mașinii;
 - d) - exactitatea de fixare a sculei de prelucrat în capul mașinii;
 - e) - exactitatea robotului.
3. - în postul de lucru 3:
 - a) - exactitatea robotului;
 - b) - exactitatea de indexare a conveiorului sau robocarului (dacă piesa finită se depune pe un asemenea dispozitiv).

Determinând erorile de situare ale componentelor celulei în cele trei posturi de lucru, printr-una dintre metodele propuse (spre exemplu ansamblu de doi teodoliți), se pot compara și constata care dintre componente introduc cele mai mari erori, precum și dacă domeniile de erori sunt compatibile cu operațiile executate în cele trei posturi de lucru, în caz contrar intervenindu-se cu corecțiile necesare în programul de comandă al celulei (calibrarea componentelor celulei).

Cele prezentate în capitolul de față al tezei de doctorat, pot fi utilizate, concret, în următoarele situații:

1. La proiectarea „layout”-ului unei celule de fabricație flexibilă robotizată: prin investigarea erorilor de situare în diferite zone ale spațiului de lucru al robotului ce urmează a fi utilizat în aplicația robotizată respectivă, se pot estima zonele din spațiul de lucru afectate de erori minime. Pe baza unui asemenea studiu se poate realiza o amplasare optimă a elementelor componente ale celulei, în concordanță cu domeniile de erori ale robotului.

2. Pentru o configurație de celulă dată, cunoscând domeniile de erori de situare ale elementelor componente ale celulei se poate amplasa robotul într-o poziție optimă, astfel încât să fie compatibil cu domeniile de erori ale

componentelor.

3. Într-o celulă de fabricație flexibilă robotizată dată, cunoscând erorile de situație ale componentelor celulei, precum și ale robotului în diferite posturi de lucru în care acționează, se poate realiza calibrarea componentelor și a robotului, pentru realizarea concordanței mai sus amintite, prin introducerea corecțiilor corespunzătoare, în programul de comandă al celulei.

5.3 Studiul de caz pentru celula de sudare cu robotul CLOOS-ROMAT-76

5.3.1. Prezentare generală

Celula de sudare este integrată Laboratorului de roboți industriali, aparținând Catedrei de Organe de Mașini și Mecanisme a Universității „Politehnica” din Timișoara. Ea face parte dintr-un sistem flexibil robotizat deservit de șase roboți (fig.5.15):

- robot RH (R1);
- robot REMT 2 (R2);
- robot MINIMOVER (R3);
- robot REMT 5 (R4);
- robot ROMAT-76 (R5);
- robot REMT 2 (R6).

În cadrul celulei de sudare, robotul ROMAT-76 efectuează cordoane sudate, subansamblul ce urmează a fi sudat fiind amplasat pe masa de poziționare rotativă 3 MP2, acționată pneumatic, prevăzută cu două posturi de lucru DL5 și DL5', dispuse la 180°.

Aducerea subansamblului de sudat în zona de lucru este realizată de către robocarul AGV, dar alimentarea dispozitivului de lucru DL5 respectiv DL5' se face manual, robocarul neavând un sistem propriu de manipulare, iar robotul ROMAT-76 nu poate îndeplini funcția de manipulare, fiind prevăzut cu cap de sudare.

Ca urmare, în studiul respectivei celule se va analiza postul de lucru, având două componente: robotul ROMAT-76 și masa de poziționare MP2 cu dispozitivele DL5 și DL5'.

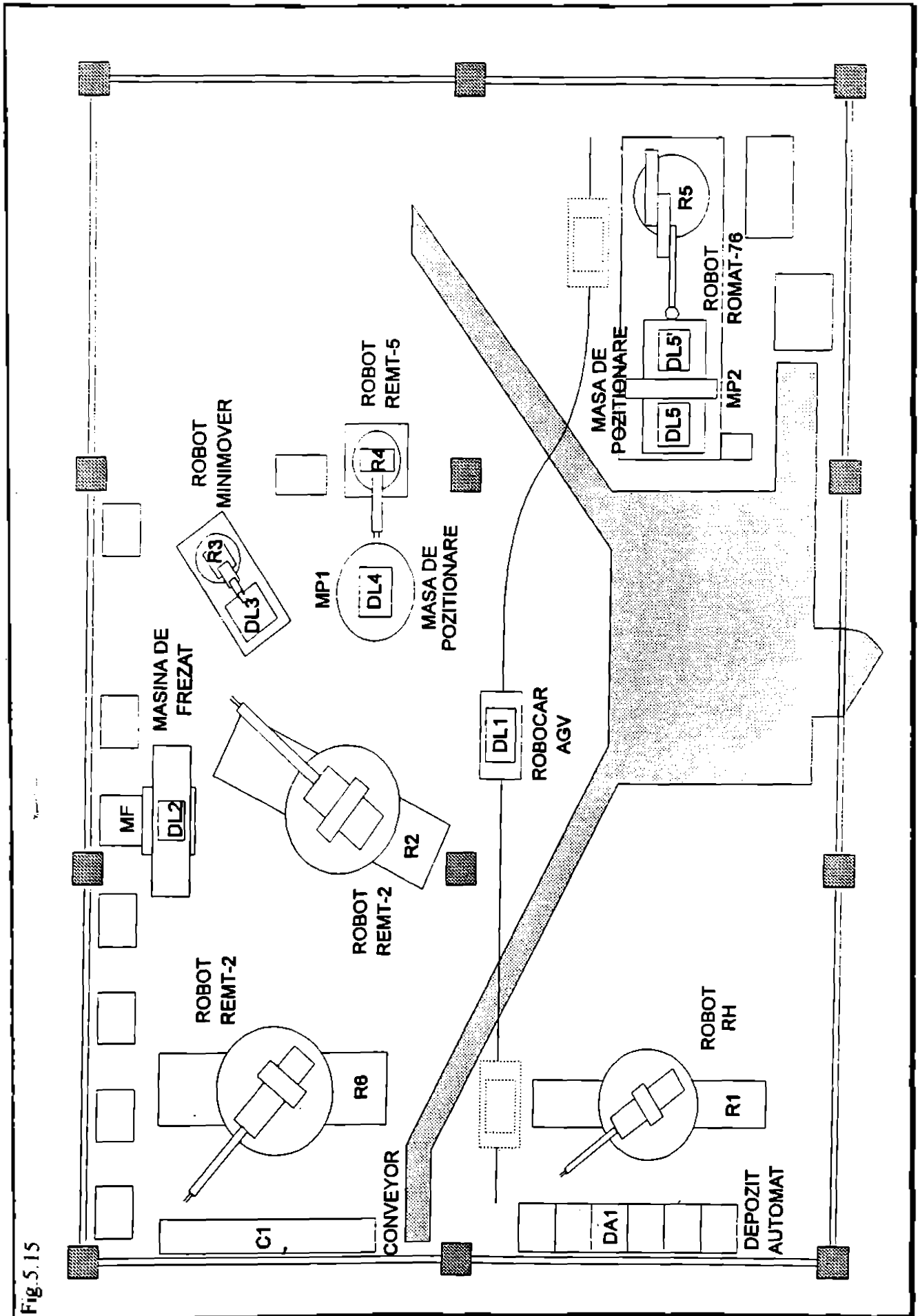


Fig.5.15

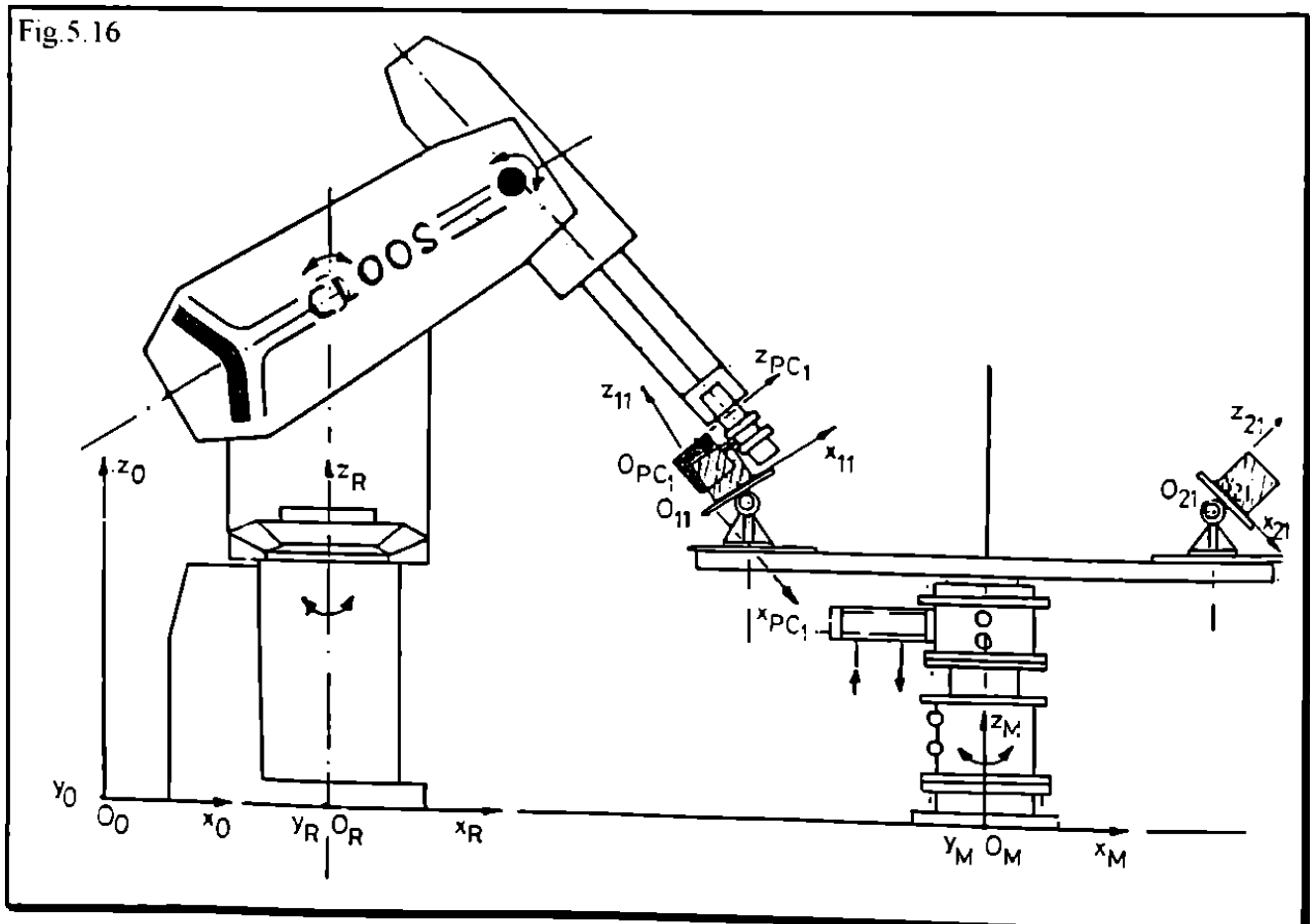
5.3.2. Determinarea erorilor de situare ale componentelor celulei de sudare

În raport cu un sistem de referință exterior, $O_0x_0y_0z_0$, aparținând universului (halei, atelierului) se poate studia situarea diferitelor componente ale celulei, atașând fiecăreia câte un sistem de axe (fig. 5.16 și fig. 5.17).

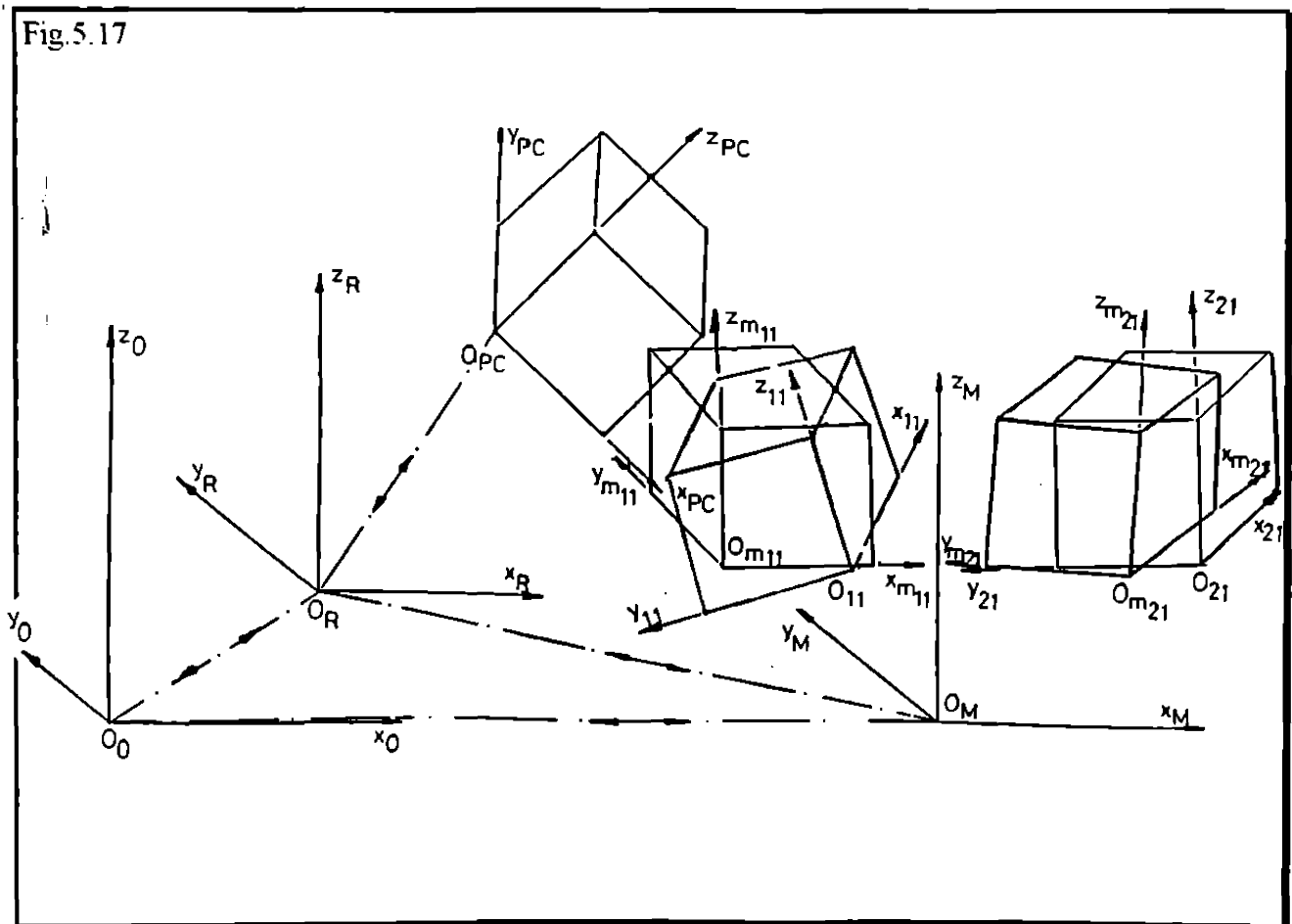
Sistemul de referință $O_0x_0y_0z_0$ poate fi legat de unul dintre cei doi teodoliți dacă, pentru măsurarea caracteristicilor de situare ale elementelor celulei se utilizează ansamblul de doi teodoliți (metode „la distanță”).

În figura 5.16 și 5.17, se utilizează următoarele notații:

- $O_0x_0y_0z_0$ - sistemul de referință atașat halei;
- $O_Rx_Ry_Rz_R$ - sistemul de referință atașat bazei robotului;
- $O_Mx_My_Mz_M$ - sistemul de referință atașat subansamblului fix al mesei de poziționare MP2;
- $O_1x_1y_1z_1$ - sistemul de referință atașat piesei aflate în dispozitivul de lucru 1 (DL5), în poziția ideală (comandată);



- O_1, x_1, y_1, z_1 - sistemul de referință atașat piesei aflate în dispozitivul de lucru 1 (DL5), în poziția reală;
- O_2, x_2, y_2, z_2 - sistemul de referință atașat piesei aflate în dispozitivul de lucru 2 (DL5'), în poziția comandată;
- $O_{21}, x_{21}, y_{21}, z_{21}$ - sistemul de referință atașat piesei aflate în dispozitivul de lucru 2 (DL5'), în poziția reală;
- $O_{m1}, x_{m1}, y_{m1}, z_{m1}$ - sistemul de referință atașat subansamblului mobil al mesei de poziționare MP2, în poziția 1 de indexare (DL5), corespunzătoare situației ideale;
- $O_{m1}, x_{m1}, y_{m1}, z_{m1}$ - sistemul de referință atașat subansamblului mobil al mesei de poziționare MP2, în poziția 1 de indexare (DL5), corespunzătoare situației reale;
- $O_{m2}, x_{m2}, y_{m2}, z_{m2}$ - sistemul de referință atașat subansamblului mobil al mesei de poziționare MP2, în poziția 2 de indexare (DL5'), corespunzătoare situației ideale;
- $O_{m2}, x_{m2}, y_{m2}, z_{m2}$ - sistemul de referință atașat subansamblului mobil al mesei de poziționare MP2, în poziția 2 de indexare (DL5'), corespunzătoare situației reale;
- $O_{PC}, x_{PC}, y_{PC}, z_{PC}$ - sistemul de referință atașat punctului caracteristic P.C. al robotului, definind situația reală (situația ideală a sistemului de referință atașat P.C. al



robotului coincide cu $O_{10}x_{10}y_{10}z_{10}$, pentru dispozitivul de lucru DL5, respectiv $O_{20}x_{20}y_{20}z_{20}$, pentru dispozitivul de lucru DL5').

Se menționează faptul că, pentru claritatea figurii, în fig.5.16, s-au reprezentat doar referințele reale.

1. Determinarea erorilor de indexare a mesei de poziționare MP2, în poziția 1, respectiv 2

Erorile de indexare a mesei de poziționare pot fi cauzate de imprecizii ale sistemului de acționare (variații ale presiunii agentului de lucru - aer comprimat), jocuri în cuple etc.

Eroarea de indexare a mesei (poziționare și orientare) apare ca diferență între poziția ideală, comandată pentru indexarea mesei, $O_{m10}x_{m10}y_{m10}z_{m10}$ în poziția 1 respectiv, $O_{m20}x_{m20}y_{m20}z_{m20}$ în poziția 2, și poziția reală în care se indexează masa, $O_{m11}x_{m11}y_{m11}z_{m11}$ în poziția 1, respectiv $O_{m21}x_{m21}y_{m21}z_{m21}$ în poziția 2 (fig.5.18).

Ansamblul de transformări ce definesc această eroare în poziția 1 de indexare, are loc după următoarea schemă:

$$\begin{array}{ccc}
 \xrightarrow{M T_{m10}} & O_{m10}x_{m10}y_{m10}z_{m10} & \longrightarrow \\
 \uparrow & & \downarrow \\
 O_o x_o y_o z_o \xrightarrow{O T_M} & O_M x_M y_M z_M \longrightarrow & \downarrow \\
 \downarrow & & \downarrow \\
 \xrightarrow{M T_{m11}} & O_{m11}x_{m11}y_{m11}z_{m11} & \xleftarrow{M^0 T_{m11} (E_{m1,2})}
 \end{array} \quad (5.33)$$

Ansamblul de transformări pentru poziția 2 de indexare este identic

În lanțul de transformări (5.33) ${}^0 T_M = ct$, ${}^M T_{m10} = ct$, dar ${}^M T_{m11} = var$. Ca urmare și ${}^{M^0} T_{m11} = var$, definind eroarea de indexare a mesei în poziția 1, respectiv 2 ($E_{m1,2}$).

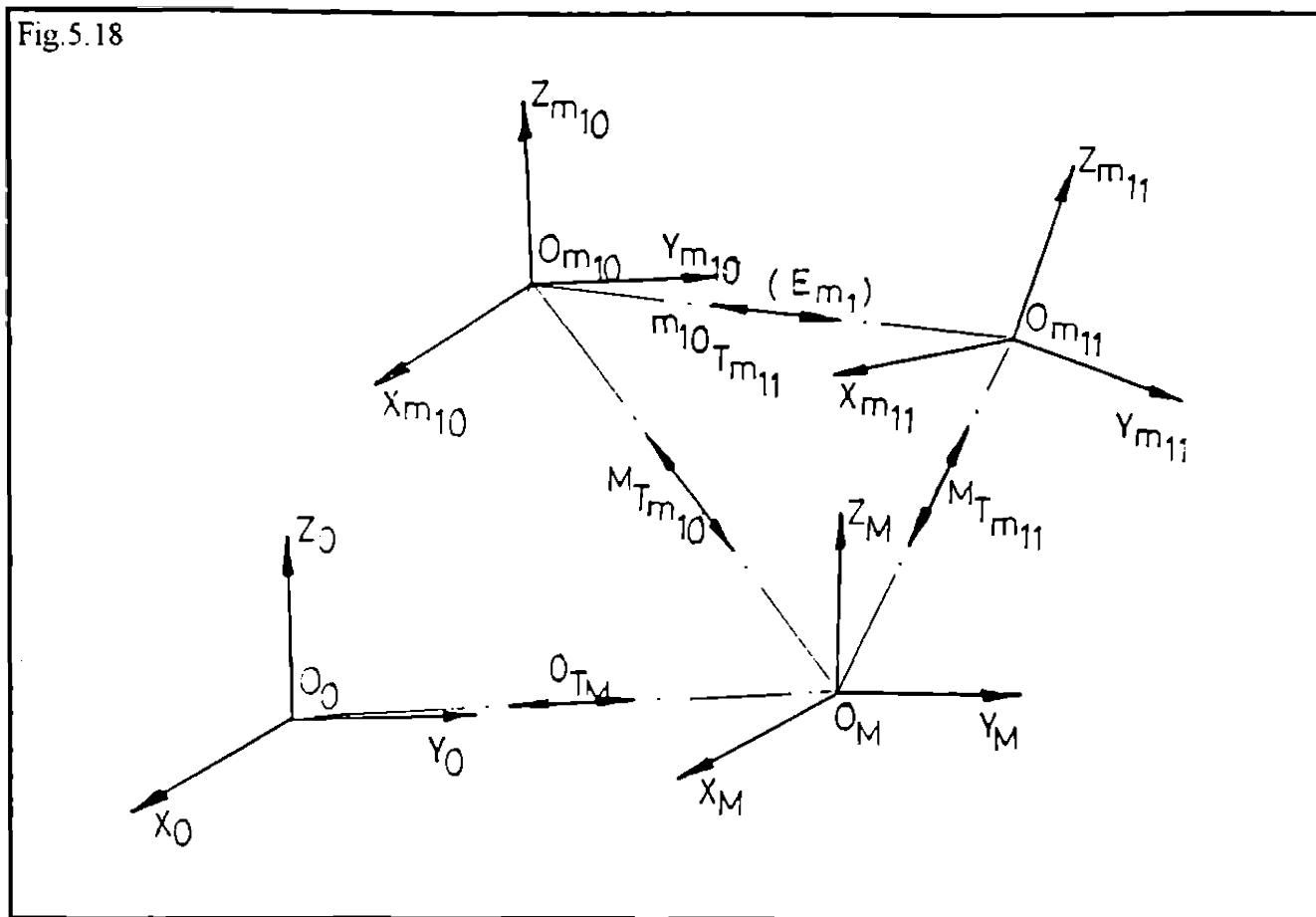
Matricea erorilor de indexare a mesei, sub forma ei generală, va fi:

$$E_{m1} = \begin{pmatrix} n_{x_{m10}} - n_{x_{m11}} & o_{x_{m10}} - o_{x_{m11}} & a_{x_{m10}} - a_{x_{m11}} & x_{m10} - x_{m11} \\ n_{y_{m10}} - n_{y_{m11}} & o_{y_{m10}} - o_{y_{m11}} & a_{y_{m10}} - a_{y_{m11}} & y_{m10} - y_{m11} \\ n_{z_{m10}} - n_{z_{m11}} & o_{z_{m10}} - o_{z_{m11}} & a_{z_{m10}} - a_{z_{m11}} & z_{m10} - z_{m11} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.34)$$

și exprimă incapacitatea mesei de poziționare de a se situa în poziția ideală,

comandată.

Fig.5.18



Diminuarea erorilor de tip $E_{m_{1,2}}$ se poate realiza astfel:

1) dacă erorile de indexare definite de relația (5.34) au valori semnificative, ele pot fi compensate prin acționare asupra poziționării piesei în dispozitiv (o compensare grosieră);

2) dacă erorile de indexare definite de relația (5.34) au valori mai mici, ele pot fi compensate în două moduri:

- a) prin intervenție asupra sistemului de acționare pneumatic al mesei;
- b) prin intervenție în programul de comandă a robotului.

2) Determinarea erorii de situare a piesei în dispozitivul de lucru DL5, respectiv DL5'

Este determinată de imprecizii în prelucrarea pieselor subansamblului ce urmează a fi sudat (toleranțe de fabricare), de imprecizii în uzinarea dispozitivului, de erori ale mecanismului de acționare, de erori de așezare a pieselor în dispozitivul de lucru etc.

Această eroare apare ca diferență între situarea ideală a subansamblului de sudat aflat în dispozitivul de lucru 1 sau 2 (DL5 sau DL5'), definită prin referința $O_{10}x_{10}y_{10}z_{10}$, respectiv $O_{20}x_{20}y_{20}z_{20}$ și situarea reală a respectivului subansamblu, situare afectată de erori, definită prin referința $O_{11}x_{11}y_{11}z_{11}$ pentru dispozitivul 1 (DL5) și $O_{21}x_{21}y_{21}z_{21}$ pentru dispozitivul 2 (DL5').

Transformările ce definesc această eroare, spre exemplu pentru dispozitivul 1, sunt redate de schema (5.35), respectiv fig. 5.19.

$$\begin{array}{ccc}
 & \xrightarrow{{}^M T_{m_0}} O_{m_0} x_{m_0} y_{m_0} z_{m_0} \xleftarrow{{}^M T_{m_0}(E_m)} & \\
 & \uparrow & \downarrow \\
 O_{00} x_{00} y_{00} z_{00} \xrightarrow{{}^0 T_M} O_{M0} x_{M0} y_{M0} z_{M0} & \rightarrow & \downarrow \\
 & \downarrow & \downarrow \\
 & \xrightarrow{{}^M T_{m_1}} O_{m_1} x_{m_1} y_{m_1} z_{m_1} \xrightarrow{{}^M T_{11}} & \\
 \xrightarrow{{}^M T_{11}} O_{11} x_{11} y_{11} z_{11} \xleftarrow{{}^M T_{10}(E_d)} & & \\
 \downarrow & \uparrow & \\
 \xrightarrow{{}^M T_{10}} O_{10} x_{10} y_{10} z_{10} & \longrightarrow &
 \end{array} \quad (5.35)$$

Problema se tratează în mod absolut similar și pentru dispozitivul 2.

Se observă faptul că eroarea de situare a piesei în dispozitivul de lucru, în poziția de lucru 1 sau 2 este influențată și de eroarea de indexare a mesei.

Matricea de erori este de forma:

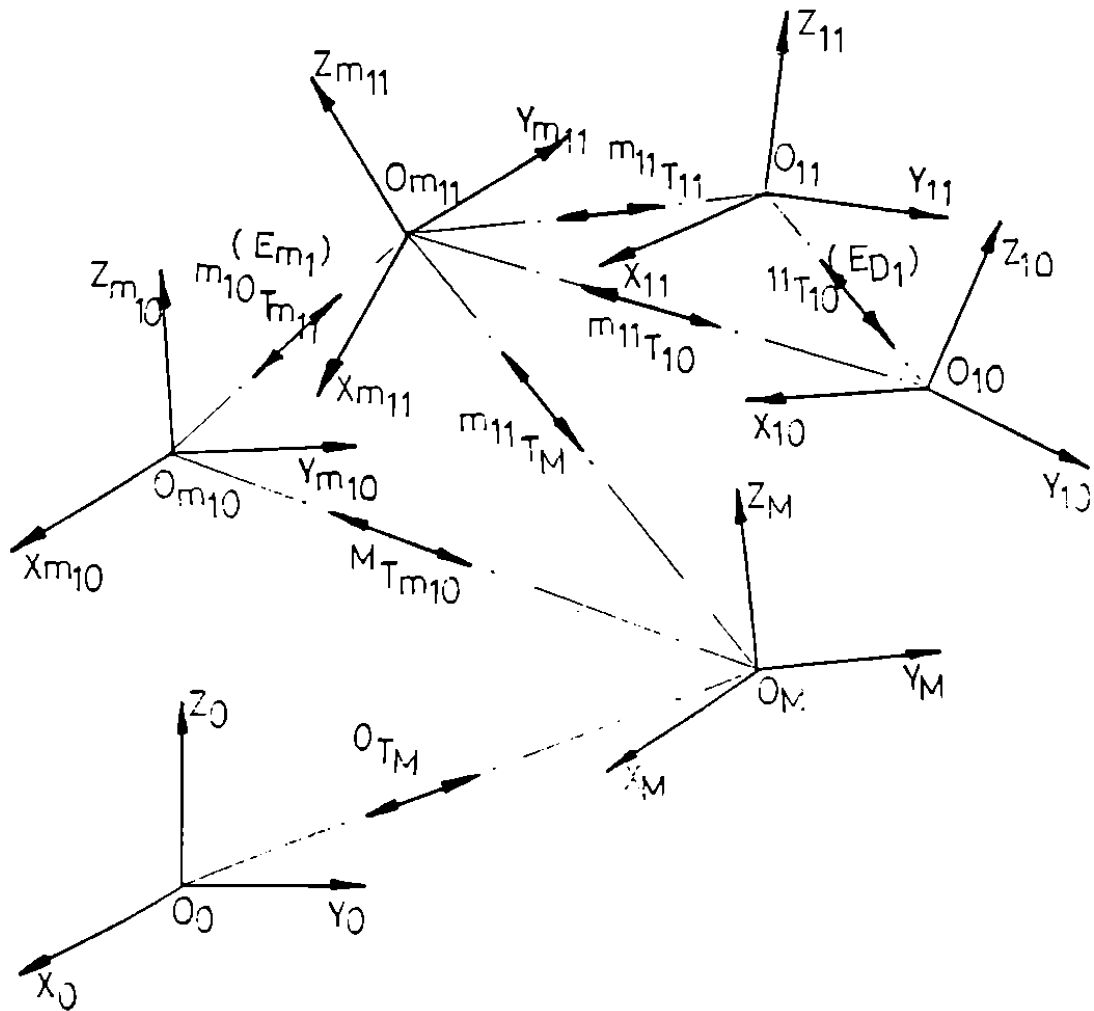
$$E_{d_1} = \begin{pmatrix} n_{x_{10}} - n_{x_{11}} & o_{x_{10}} - o_{x_{11}} & a_{x_{10}} - a_{x_{11}} & x_{10} - x_{11} \\ n_{y_{10}} - n_{y_{11}} & o_{y_{10}} - o_{y_{11}} & a_{y_{10}} - a_{y_{11}} & y_{10} - y_{11} \\ n_{z_{10}} - n_{z_{11}} & o_{z_{10}} - o_{z_{11}} & a_{z_{10}} - a_{z_{11}} & z_{10} - z_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.36)$$

Așadar, pentru celula de sudare dată, determinarea erorilor de situare ale robotului, respectiv ale mesei de poziționare și ale dispozitivului de lucru este utilă în scopul ameliorării preciziei cu care se execută operația de sudare în postul de lucru respectiv.

Având în vedere faptul că robotul ROMAT-76 utilizat în aplicația respectivă a fost calibrat la fabricare, având o precizie foarte bună, corespunzătoare aplicației în care este utilizat, rezultă că eventualele erori sunt generate de masa de poziționare și de dispozitivul de lucru. Rezultă că, pentru compensarea acestor erori se poate acționa:

- 1) fie asupra sistemului pneumatic de acționare a mesei de poziționare;

Fig. 5.19



2) fie asupra dispozitivului de lucru DL5, respectiv DL5²;

3) fie în programul de comandă al robotului, introducând corecțiile necesare, generate de erorile mai sus amintite, această operație neavând însă semnificația unei calibrări a robotului, ci o calibrare a celulei în ansamblu.

CAPITOLUL 6

CONTRIBUȚII LA ELABORAREA UNOR SOLUȚII CONSTRUCTIVE DE DISPOZITIVE ȘI STANDURI PENTRU MĂSURAREA EXACTITĂȚII ȘI REPETABILITĂȚII DE SITUARE LA ROBOȚII INDUSTRIALI ȘI SISTEME DE FABRICAȚIE FLEXIBILĂ ROBOTIZATE

Evaluarea performanțelor roboților industriali constituie cu siguranță, într-un domeniu nou cum este robotica, un preambul indispensabil dezvoltării acestei tehnologii.

Pentru utilizatori, încercarea roboților industriali permite cunoașterea și aprecierea caracteristicilor acestora, simplificând relațiile client-furnizor. Pentru producătorii de roboți, încercarea acestora constituie o sursă de perfecționare tehnică, favorizând evoluția performanțelor lor.

La nivel comercial, prezentarea unor caracteristici ale roboților, stabilite cu claritate și fondate pe încercări constituie un element determinant în alegere, pentru cumpărătorii potențiali de roboți.

Ținând seama de motivația mai sus prezentată, în capitolul de față se încearcă punerea la punct a unei instrumentații de măsurare a caracteristicilor de situație a roboților industriali și sistemelor de fabricație flexibilă robotizate, pentru ambele categorii de metode enunțate în capitolul 3.

6.1. Dispozitive pentru măsurarea caracteristicilor de situație după principiul metodelor locale

6.1.1. Cap de măsurare tridimensional pentru determinarea caracteristicilor de poziționare și orientare după distribuția $2 \times 2 \times 2$

Dispozitivul este constituit după principiul metodelor locale, utilizând ansamblul: cap de măsurare - corp de probă. Capul de măsurare materializează

distribuția $2 \times 2 \times 2$ a punctelor de contact ale palpatoarelor traductoarelor, pe fețele corpului de probă - cub calibrat.

Așadar, sistemul de măsurare conceput poate fi utilizat atât pentru determinarea exactității și repetabilității de poziționare, cât și de orientare. Metoda adoptată face parte din categoria metodelor cu contact, între instrumentele de măsură - traductoare inductive și corpul de probă - cub calibrat.

Dispozitivul propriu-zis se compune din patru brațe 1,2,3,4 (fig 6.1), care, prin rabatare și blocare la 90° materializează cele trei fețe ortogonale ce constituie triedrul dispozitivului de măsurare, 3D. Trei dintre aceste brațe 2,3,4 sunt rabatabile în jurul unor articulații 5, dispozitivul având posibilitatea de pliere, în vederea ambalării și transportului.

Pe fiecare braț 2, 3 și 4 se fixează câte două traductoare de poziție (inductive, tip TI2BB, autohtone). Poziția traductoarelor, în vederea măsurării, se stabilește în faza de "punere la zero" în așa fel încât să fie la jumătatea domeniului de măsurare.

Brațul 1 al dispozitivului, se fixează pe tija suport 8 cu ajutorul unui șurub special 9.

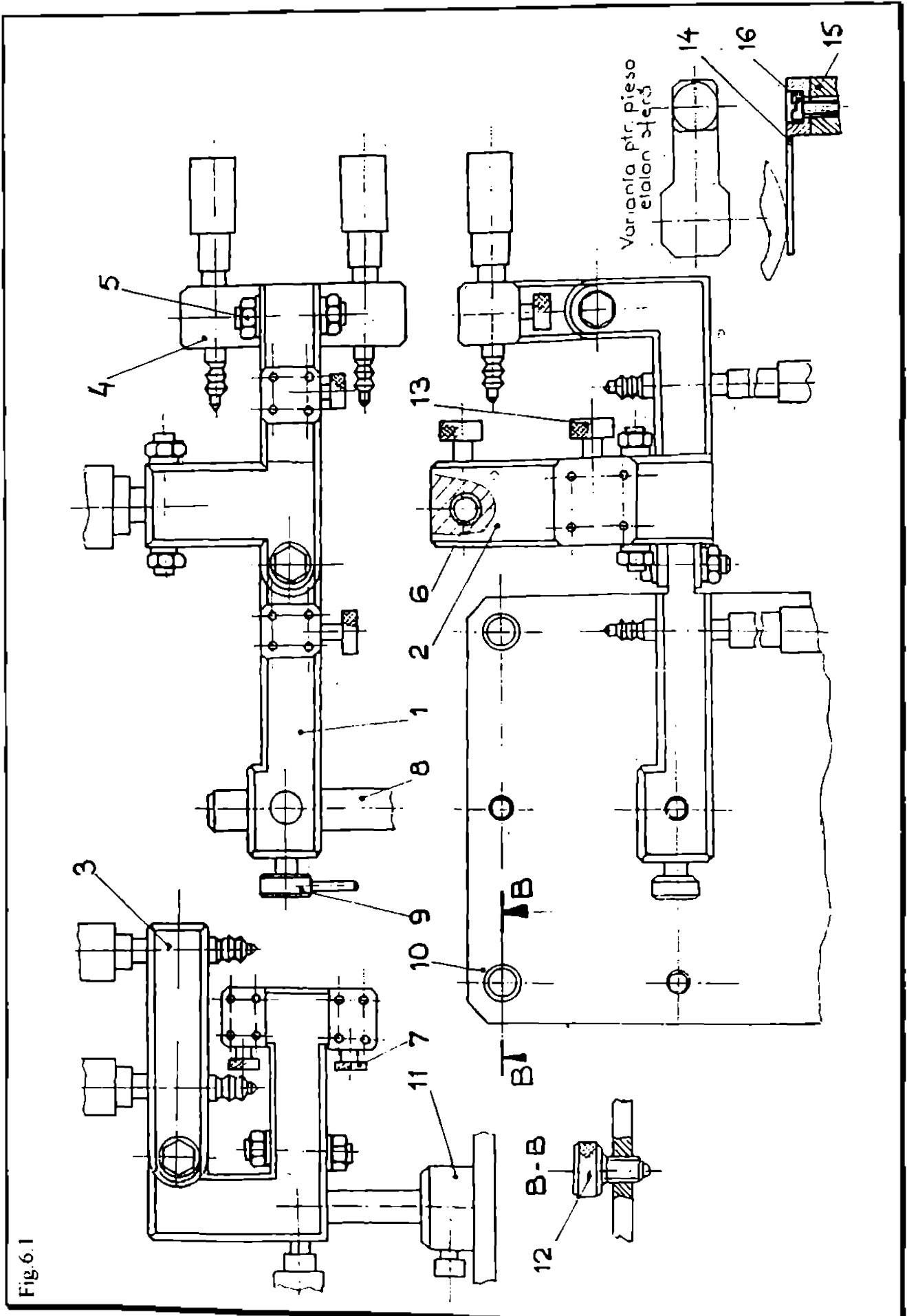
Întregul ansamblu se așează pe o placă de bază 10, blocându-se cu un șurub. Placa de bază este prevăzută cu șuruburile de reglare 12.

Dispozitivul prezentat poate fi folosit și pentru măsurători utilizând drept corp de probă - sferă calibrată. În acest scop, se demontează palpatorul propriu al traductorului și se înlocuiește cu un palpator cu suprafață plană de palpate 14. În acest caz nu sunt necesare decât trei palpatoare, câte unul pe fiecare braț; corpul de probă sferic nu permite decât determinarea exactității și repetabilității de poziționare.

Pentru efectuarea măsurătorilor se procedează în modul următor:

- se aduce efectorul terminal al robotului, care poartă corpul de probă - sfera sau cub, în poziția țintă;
- se poziționează dispozitivul 3D în raport cu corpul de probă și se inițializează traductoarele;
- se retrage efectorul terminal al robotului în poziția de start;
- se comandă revenirea lui de "n" ori în poziția țintă și se citesc abaterile înregistrate de traductoare.

Rezultatele măsurătorilor se prelucrează conform unui algoritm de calcul adecvat.



6.1.2. Cap de măsurare tridimensional pentru determinarea caracteristicilor de situare după distribuția $3 \times 2 \times 1$ sau $3 \times 3 \times 3$.

6.1.2.1. Cap de măsurare tridimensional cu retragerea manuală a traductoarelor.

Terminalul de măsurare conceput face parte din categoria dispozitivelor folosite în metodele locale, "clasice", de determinare a caracteristicilor de situare ale roboților industriali, utilizând ansamblul cap de măsurare - corp de probă (sferă sau cub), "cu contact" între palpatoarele instrumentelor de măsură (traductoare inductive) și corpul de probă.

Descrierea dispozitivului impune caracterizarea modului în care se comportă capul tridimensional în cele două situații, și anume, atunci când în brațul robotului este montat un corp de probă sub formă de sferă, respectiv sub formă de cub.

În cazul în care corpul de probă este o sferă calibrată, pe dispozitivul 3D se montează trei traductoare inductive.

În cazul corpului de probă sub formă de cub, dispozitivul este prevăzut cu șase traductoare (fig.6.2), montate în formula $3 \times 2 \times 1$ sau $3 \times 3 \times 3$, sau $2 \times 2 \times 2$ pe fețele capului tridimensional, funcție de algoritmul de calcul adoptat.

Dispozitivul se compune din corpul de bază (1), un triedru ortogonal drept, uzinat cu precizie, având montate pe el cele 6 traductoare (2), două flanșe, una superioară (4) pentru fixarea și poziționarea traductoarelor și una inferioară (5), pentru poziționarea bușelor (6) de ghidare a traductoarelor și de retragere a acestora, precum și nouă prezoane (7), câte 3 pe fiecare față a triedrului, pentru poziționarea celor două flanșe. Tijele traductoarelor sunt prevăzute cu niște prelungitoare (8) fiecare având câte un știft de fixare (9).

În momentul aducerii corpului de probă în dreptul capului tridimensional, cele 6 traductoare trebuie să fie retrase, pentru a evita eventuale coliziuni între corpul de probă purtat în efectorul terminal al robotului și palpatoarele traductoarelor. Retragerea acestora se realizează manual, prin bușele (6), prevăzute cu un canal de ghidare a știftului (9), montat pe tija traductorului. În situația în care tija traductorului este retrasă, știftul (9) se rotește la 90° , sprijinindu-se într-o degajare, prevăzută pe partea superioară a bușei (6).

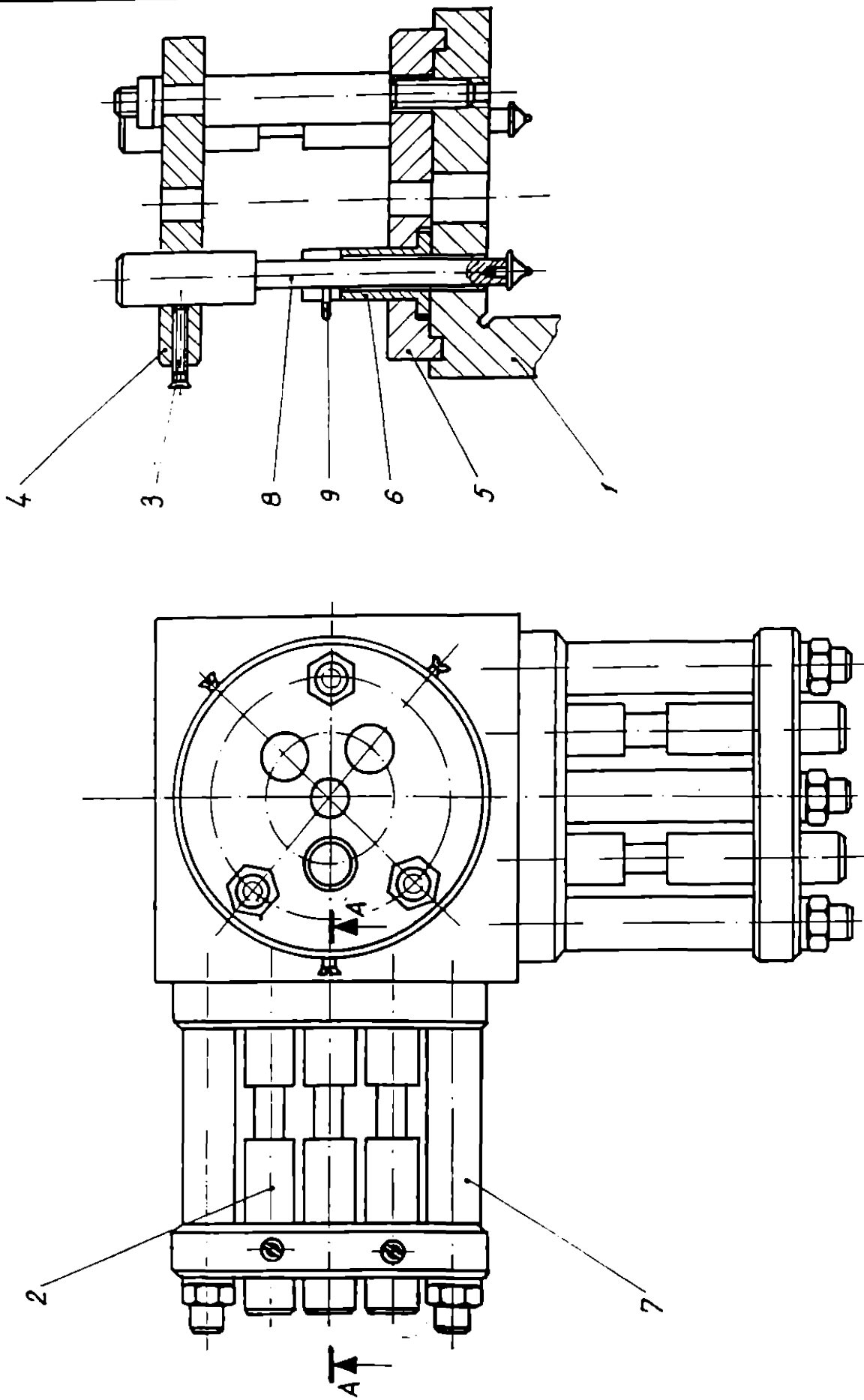


Fig.6.2

După aducerea corpului de probă în zona de acțiune a traductoarelor capului tridimensional, știftul de fixare este deblocat și alunecă în canalul bușei. Astfel tija traductorului coboară, palpând corpul de proba.

Întreg dispozitivul se fixează pe un suport ce permite două translații și o rotație, prin intermediul unei flanșe. Pentru efectuarea măsurătorilor se procedează în modul următor :

- a). - se aduce efectorul terminal al robotului, ce poartă corpul de probă (cub calibrat) în poziția "ȚINTĂ" (punct comandat);
- b). - se poziționează dispozitivul în raport cu corpul de probă, fixându-se traductoarele (cu ajutorul șuruburilor (3)), astfel încât să fie la jumătatea cursei active;
- c). - se inițializează traductoarele;
- d). - se retrage efectorul terminal al robotului în poziția "START".
- e). - se retrag traductoarele, în vederea evitării unei eventuale coliziuni;
- f). - se aduce din nou efectorul terminal al robotului în poziția "ȚINTĂ" și se citesc abaterile înregistrate de traductoare;
- g). - se repeta acțiunile a).....f) de "n" ori, apoi se prelucrează statistic rezultatele.

Soluția de dispozitiv prezentată permite determinarea exactității și repetabilității de situare a roboților industriali, utilizând mai multe metode și algoritmi de calcul: $3 \times 2 \times 1$; $3 \times 3 \times 3$; $2 \times 2 \times 2$.

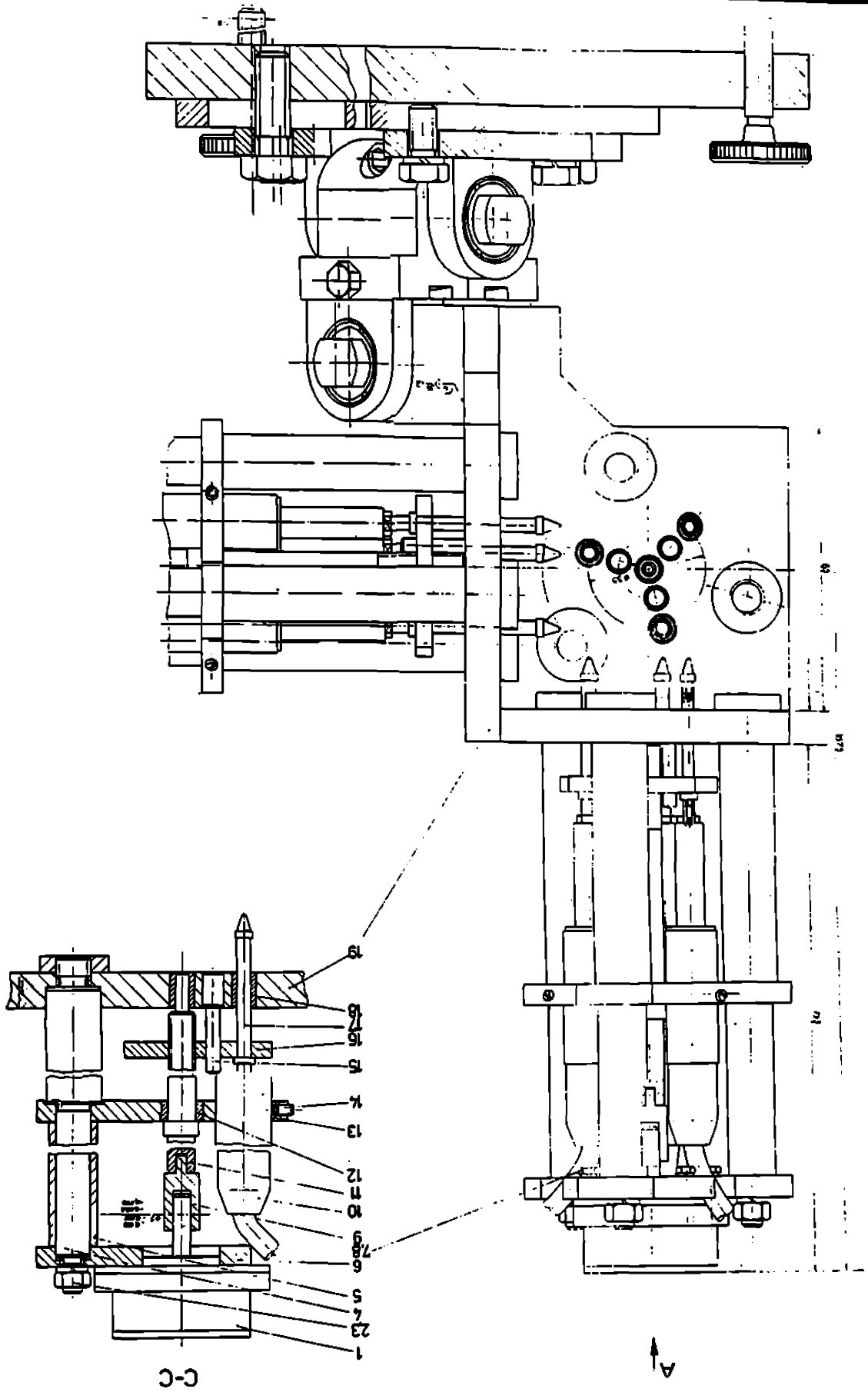
Permite, de asemenea, automatizarea prelevării și prelucrării rezultatelor prin interfațarea sistemului terminal de măsură și utilizarea unui calculator.

6.1.2.2. Cap de măsurare tridimensional cu retragerea traductoarelor prin acționare electrică.

Dispozitivul proiectat permite determinarea caracteristicilor de situare la roboți, după principiul metodelor locale, utilizând sistemul corp de probă (cub calibrat) - cap de măsurare, "cu contact" între palpatoarele traductoarelor inductive montate în terminal și corpul de probă.

Dispozitivul permite utilizarea a 6 sau 9 traductoare montate în formula $3 \times 2 \times 1$, $3 \times 3 \times 3$ sau $2 \times 2 \times 2$, funcție de algoritmul de calcul acceptat.

Fig. 6.3 (1/2)



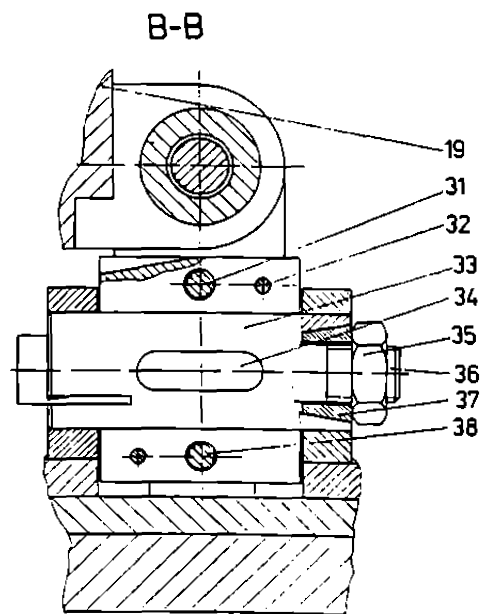
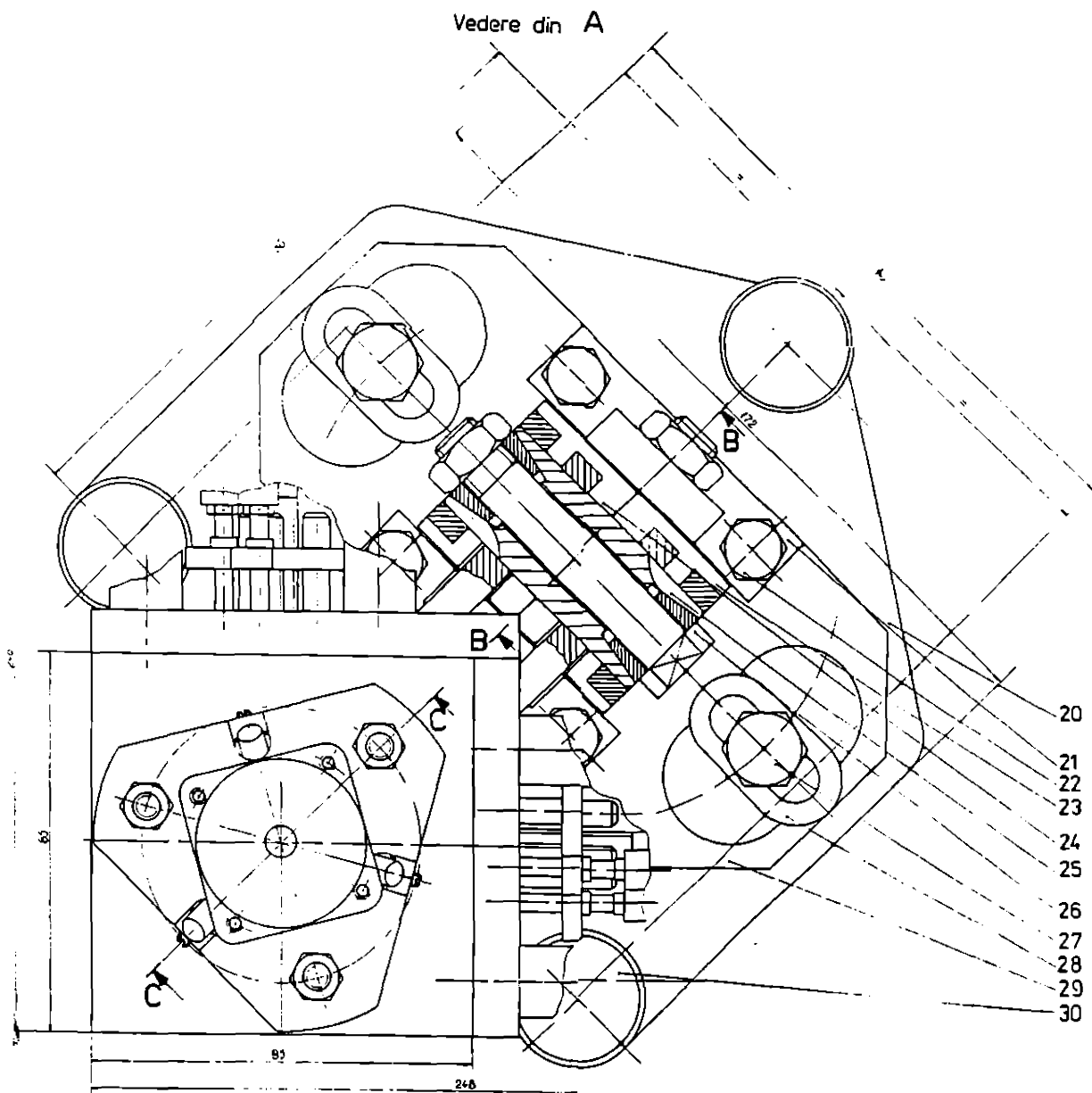


Fig. 6.3 (2/2)

Se compune din triedrul de referință (poz.19), uzinat cu precizie (fig.6.3, planșa 1/2 și 2/2), având montate pe cele trei fețe ortogonale, traductoarele inductive (poz.10) în formula aleasă.

Pentru a evita eventuala coliziune între palpatoarele traductoarelor și corpul de probă aflat în efectorul terminal al robotului și adus în poziția comandată, dispozitivul permite retragerea tijelor (poz.17) palpatoarelor traductoarelor prin acționarea unui motor electric pas cu pas (poz.1) Arborele acestuia este cuplat la un șurub (poz.11) pe care se deplasează placa - piuliță (poz.16) comună celor trei traductoare montate pe o față, retrăgând astfel tijele traductoarelor. Translația plăcii este ghidată de tijele (poz.15), iar traductoarele sunt fixate pe placa intermediară (poz.13), cu ajutorul știfturilor filetate, (poz.14). Tijele (poz.17) ale traductoarelor sunt ghidate, la rândul lor, de bușele de ghidare (poz.18), montate în plăcile triedrului.

Capul de măsurare are un dispozitiv propriu de poziționare - orientare, care permite trei rotații și trei translații (șase grade de libertate), facilitând astfel situarea capului de măsurare în raport cu corpul de probă, în vederea punerii "la zero" a sistemului de măsură.

Pentru efectuarea măsurătorilor, se procedează în același mod ca și la dispozitivul descris în paragraful 6.1.2.2.

Sistemul de măsurare descris permite automatizarea prelevării și prelucrării rezultatelor prin interfațarea dispozitivului de măsurare 3D și utilizarea unui calculator.

6.1.3. Cap de măsurare 2D pentru determinarea caracteristicilor de exactitate și repetabilitate pe traiectorie

Dispozitivul de măsurare este conceput după principiul metodelor „locale”, „cu contact” între palpatoarele instrumentelor de măsură (traductoare), amplasate pe capul de măsurare și o riglă etalon.

Dispozitivul propriu-zis se compune dintr-un diedru (1), executat cu mare precizie (fig.6.4), pe cele două fețe ortogonale ale acestuia fiind montate traductoarele inductive (3), în formula 3×3 sau 3×2 , funcție de algoritmul de calcul adoptat

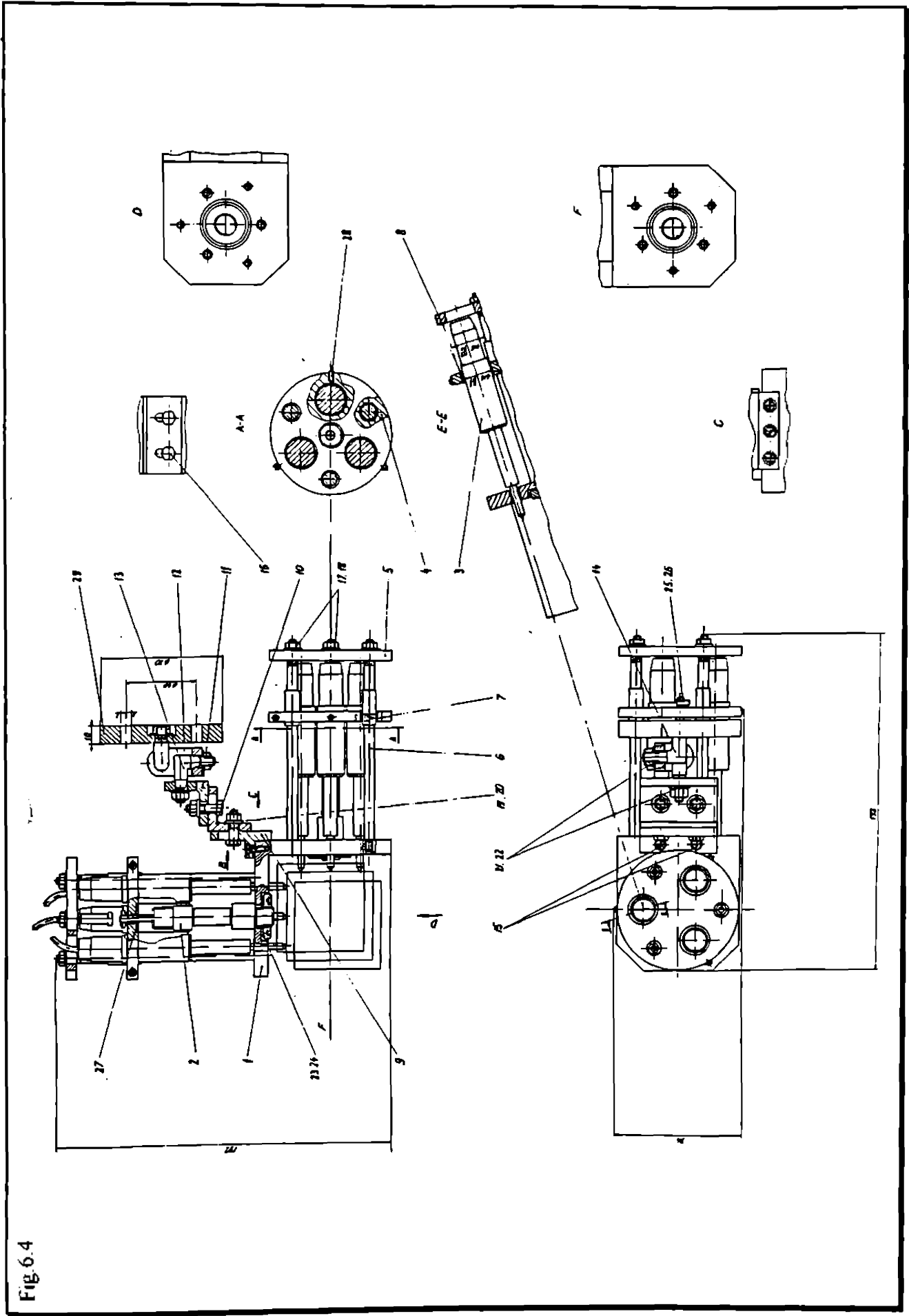


Fig. 6.4

Prin intermediul flanșei (29), dispozitivul se fixează pe interfața mecanică a robotului, fiind purtat, pe traiectoria comandată, de către brațul acestuia.

Traectoria ideală, comandată, este materializată de muchia unei rigle etalon cu secțiune pătrată (50×50) mm, amplasată în spațiul de lucru al robotului, într-o poziție cunoscută. Această traiectorie ideală este aproximată prin „n” puncte de precizie.

Robotul purtând dispozitivul de măsurare 2D, este comandat să urmărească această traiectorie ideală, aproximată prin cele „n” puncte de precizie, prin învățarea acestor „n” puncte țintă; muchia riglei etalon - traiectorie ideală materializează axa z a unui sistem de referință legat de aceasta. Așadar, cele „n” puncte de precizie sunt amplasate la diferite cote z_i , cunoscute.

După învățarea celor „n” puncte, robotul este comandat să urmărească traiectoria ideală, respectiv să atingă cele „n” puncte, de „m” ori într-un sens și de „m” ori în sens opus, efectuându-se măsurători în fiecare dintre cele „n” puncte memorate

Pentru a se evita o eventuală coliziune între capul de măsurare și rigla etalon la aducerea robotului în poziția de „start” pe traiectorie, dispozitivul 2D permite retragerea automată a tijelor palpatoarelor traductoarelor prin acționarea cu un motor pneumatic liniar (2). Tija acestuia este solidarizată cu placa mobilă (4), în care se află fixate cele trei traductoare, prin intermediul bușelor elastice (8) și a știfturilor filetate (28).

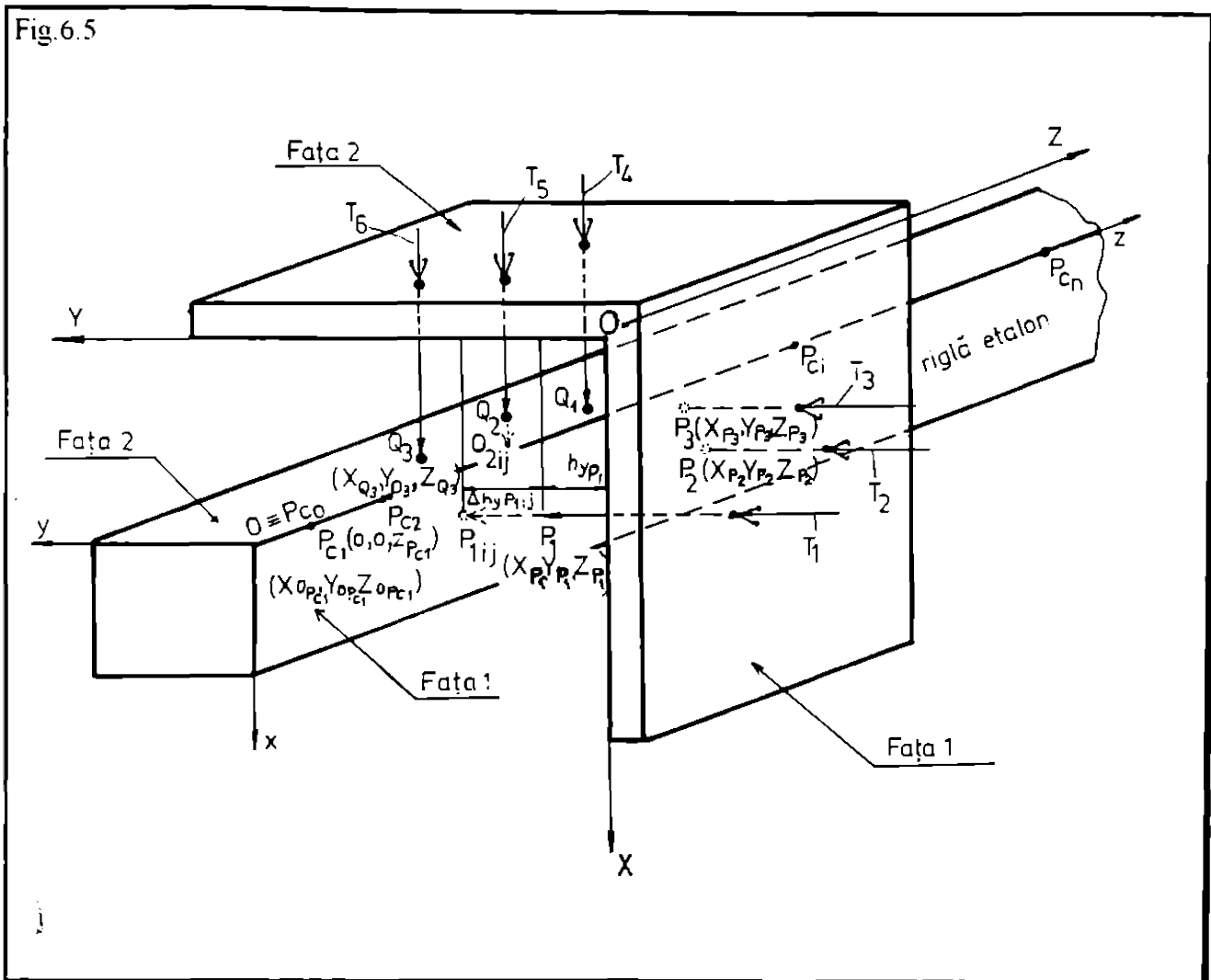
Ghidarea în mișcarea de translație a ansamblului placă mobilă - traductoare se realizează pe tije de ghidare (6).

Terminalul de măsurare este prevăzut cu un mecanism de orientare propriu, permițând trei rotații și două translații, care dă posibilitatea orientării terminalului în raport cu rigla etalon, în poziția de „start”, în vederea punerii la „zero” a acestuia. În acest scop, în poziția de „start” pe traiectorie, capul de măsurare 2D se orientează de așa manieră încât palpatoarele traductoarelor să atingă cele două fețe ortogonale ale riglei etalon, traductoarele poziționându-se astfel încât să se afle aproximativ la jumătatea domeniului de măsurare. În această poziție are loc inițializarea traductoarelor, capul de măsurare fiind pregătit pentru urmărirea traiectoriei comandate, definită prin cele „n” puncte de precizie.

Măsurătorile vizând abaterile de la traiectoria ideală, se fac la oprirea

robotului purtând capul de măsurare în cele „n” puncte de precizie, în conformitate cu recomandările ISO 9283:90.

Principiul de măsurare este pus în evidență în fig.6.5.



Traductoarele se află montate pe capul de măsurare 2D la cotele: $h_{1,2}$, $h_{1,3}$, $h_{1,n}$ pentru fața 1 a capului, respectiv $h_{2,4}$, $h_{2,5}$, $h_{2,n}$ pentru fața 2 a capului 2D. Pentru simplificarea algoritmului de calcul, se poate admite: $h_{1,2} - h_{1,3} = h_{1,n} = h_1$ și $h_{2,4} = h_{2,5} = h_{2,n} = h_2$.

La oprirea capului de măsurare într-unul din punctele de precizie, se măsoară abaterile $\Delta h_{1,2}$, $\Delta h_{1,3}$, $\Delta h_{1,n}$, respectiv $\Delta h_{2,4}$, $\Delta h_{2,5}$, $\Delta h_{2,n}$, $i=1, \dots, n$ reprezentând numărul de puncte de precizie ale traiectoriei, în care se fac măsurătorile și $j=1, \dots, m$, reprezentând numărul de repetări ale măsurătorilor.

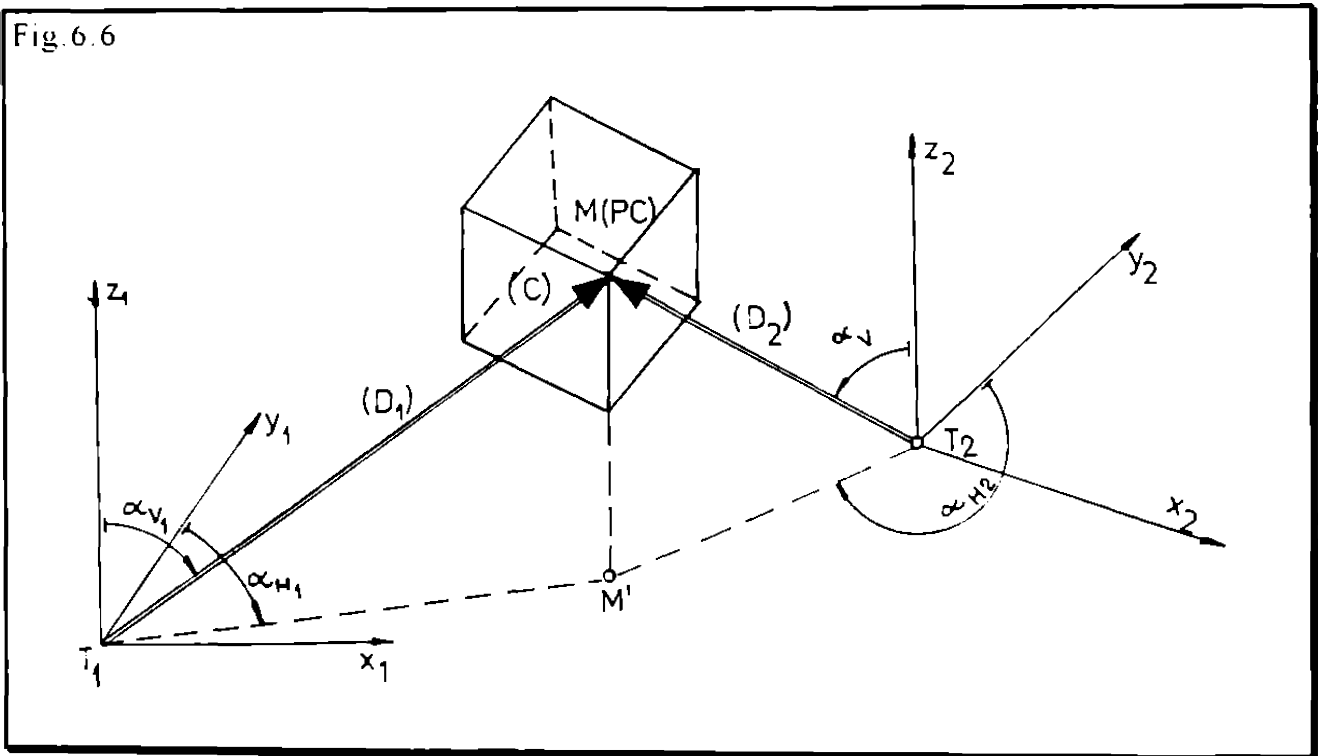
Funcție de aceste abateri, cu ajutorul unui algoritm de calcul adecvat, se determină exactitatea și repetabilitatea traiectoriei, conform ISO 9283:90.

6.2 Stand de măsurare după principiul metodelor "la distanță"

6.2.1. Stand pentru determinarea exactității și repetabilității de situație la roboți industriali utilizând un ansamblu de 2 teodoliți.

Standul realizat materializează principiul măsurărilor "la distanță" ale caracteristicilor de situație ale roboților industriali. În acest mod se elimină din sistemul de măsurare capul de măsurare, determinarea situației corpului de probă - cub calibrat - aflat în efectorul terminal al robotului industrial în raport cu un sistem de referință fix (legat de hală), realizându-se cu ajutorul a doi teodoliți (prin palpare optică).

Fig. 6.6



Principiul geometric de bază este simplu : un punct M de pe corpul de probă (în cazul de față un cub calibrat) purtat de efectorul terminal al robotului, vizat de cei doi teodoliți T_1 și T_2 , se găsește la intersecția a două drepte de vizare (D_1) și (D_2) în spațiu (fig.6.6).

Fiecare teodolit materializează un triedru particular, definit astfel (fig.6.6):

- axa z : axa principală a teodolitului (verticală în general)
- axa y : intersecția planului orizontal - perpendicular pe axa principală - și a planului vertical conținând direcția "zero" a cercului de unghiuri orizontale

(unghiuri alidadă)

- axa x perpendiculară pe y în planul orizontal, pentru formarea unui triedru (x,y,z) direct ;

- originea sistemului de axe : centrul de rotație al lunetei teodolitului

Cu aceste notații se pot determina ecuațiile dreptelor de vizare în triedrul propriu (T_1 și T_2).

Scriind transformările geometrice de trecere a celor două triedre particulare T_1 și T_2 în triedrul de referință de măsură R (care poate fi legat de hală sau de elementul fix al robotului), se pot determina ecuațiile acestor drepte (D_1) și (D_2) într-un sistem de coordonate unic și deci, coordonatele x,y , și z ale punctului M în acest sistem de coordonate.

În vederea determinării coordonatelor respective ale punctului M , se necesită parcurgerea a două faze .

a) determinarea situării celor doi teodoliți în raport cu sistemul de referință de măsură (x,y,z) , prealabilă măsurării propriu-zise a punctelor de pe corpul de probă.

Se stabilesc astfel transformările geometrice de trecere spre sistemul de referință de măsură. Această fază va fi reluată ori de câte ori se modifică poziția teodoliților în raport cu corpul de probă. Se menționează faptul că sistemul de referință $Oxyz$, poate fi chiar sistemul de referință al unuia dintre cei doi teodoliți.

b) Măsurarea propriu-zisă a punctelor, constând în vizarea acestora cu câte doi teodoliți cel puțin.

Această fază poate fi repetată de "n" ori, dacă baza de măsurare (poziția teodoliților) nu a fost modificată.

Standul este compus dintr-un bloc de doi teodoliți cu care se vizează un punct (sau 4 puncte) ale unui cub de măsurare, montat în efectorul terminal al robotului industrial (fig.6.7).

Teodolitul este un instrument de măsurare a unghiurilor, utilizat în topografie. Unghiul de rotire al teodolitului în plan orizontal, α_H , este indicat pe cercul alidadă, notat cu A, iar unghiul de rotire în plan vertical, α_V , este indicat pe cercul înălțimilor, notat cu H.

Creșterea preciziei de determinare a coordonatelor punctelor vizate cu luneta teodolitului (1) (fig.6.7), față de sistemul de axe particular, ales solidar cu standul, necesită determinarea cât mai precisă a distanței dintre teodoliți. Pentru a determina

cu o rezoluție cât mai mare unghiurile de rotație pe cercul alidadă (A), notat cu α_H și pe cercul înălțimilor (H), notat cu α_V se utilizează pentru fiecare un amplificator mecanic (2) și (4) și un traductor incremental de rotație tip TIRO (3) și (5), ca în fig.6.7

Semnalele de tip impuls date de TIRO sunt transmise către o interfață, care le convertește în sistem binar. Aceste semnale în sistem binar se pretează a fi prelucrate pe calculator.

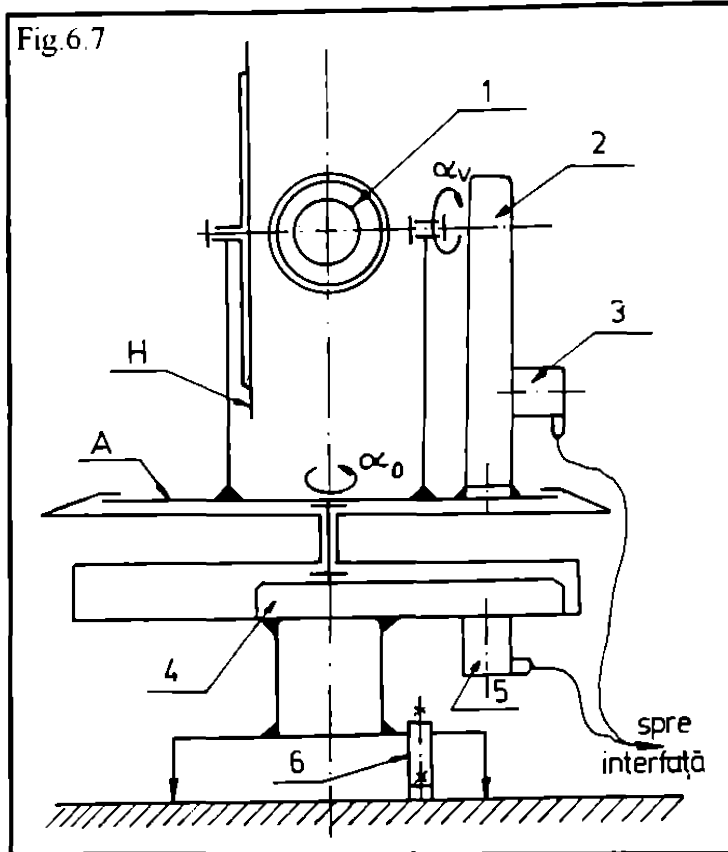
O importanță deosebită pentru prelevarea corectă a datelor o reprezintă rigiditatea suportului pe care sunt montați teodolizii. În acest scop, aceștia sunt fixați suplimentar cu o bridă (6) de acest suport (cu posibilitatea de ghidare și indexare a teodolizilor, precum și de măsurare a distanței dintre ei).

Pentru măsurători și cercetări experimentale, în cadrul prezentei teze de doctorat s-a utilizat un ansamblu de doi teodolizi electronici, cu prelevarea automată a datelor tip Zeiss REC ELTA. Modul de lucru și metodologia de măsurare se prezintă în detaliu în capitolul 7

Sistemul de prelevare a informațiilor

Vizarea unui punct cu un teodolit, se face, după cum s-a arătat anterior prin rotirea lunetei acestuia cu unghiurile α_H și α_V , după cercurile corespunzătoare. Astfel, determinarea abaterii Δh , conform fig.6.8, a unui punct curent față de un punct de referință ales, se va face cu relația:

$$\Delta h = L(\operatorname{tg}\alpha_c - \operatorname{tg}\alpha_r) \quad (6.1),$$



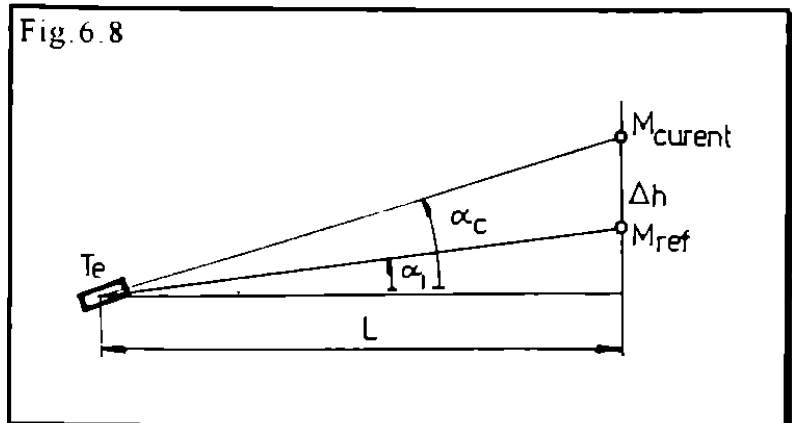
unde:

L - abscisa obiect a lunetei,
distanța între punctul vizat și
centrul optic al lunetei

α_c - unghiul de vizare curent

α_i - unghiul de vizare inițial

Luneta fiind un sistem
optic afocal, întrucât distanța



minimă de vizare este de 1 m, iar abaterea maximă admisă a unui robot performant este de 1 mm, aceasta face ca unghiul de rotație maxim pentru vizarea abaterii maxime (pt. $\alpha_i=0$), să fie $0^{\circ}3'26,26''$. Dar blocul de teodoliți este indicat să fie amplasat în afara spațiului de lucru al robotului (deci la o distanță de vizare minimă aproximativ de 2m), situație în care, pentru aceeași abatere minimă, unghiul de rotație al teodolitului este de $0^{\circ}1'43,13''$.

Cu aceste considerente, pentru a se obține abaterea poziției curente față de poziția prescrisă cu o precizie de $1\mu\text{m}$, este necesar să fie o valoare a diviziunii unghiului de rotație după cele două cercuri (alidadă și al înălțimilor) de $1''$, motiv pentru care se necesită utilizarea amplificatorului mecanic și prelevarea electrică a semnalelor (unghiul de rotație) cu TIRO 1000 sau TIRO 500.

Mișcarea de rotație, pentru a realiza această valoare a diviziunii, poate fi amplificată, pe cale mecanică utilizând un TRD amplificator, având 5-6 trepte cilindrice la care jocul de flanc să fie consumat unisens.

După amplasarea blocului de teodoliți și stabilirea distanței d , dintre aceștia (fig.6.9), fie prin vizare reciprocă, fie prin citire pe rigla gradată a suportului pe care sunt amplasați aceștia (mai puțin precis) se vizează punctele de pe cubul de probă aflat în efectorul terminal al robotului.

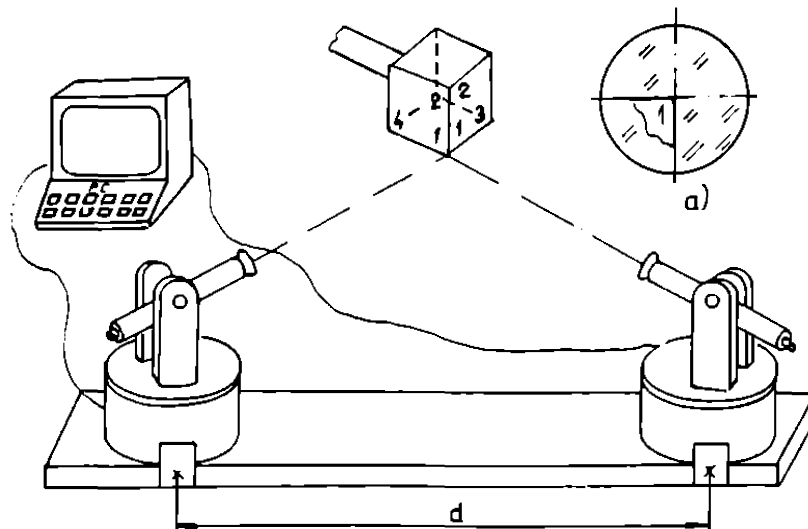
În acest scop fețele vizate ale cubului vor fi iluminate corespunzător și se va lipi hârtie albă sau reflectorizantă pe acestea pentru a se realiza un contrast cât mai bun între cub și decor. Cele patru puncte vizate sunt marcate cu cifre.

Vizarea cu luneta se face cu ajutorul unui reticul al cărui centru se suprapune cu punctul vizat, iar firele reticulare se vor suprapune cu muchiile ortogonale concurente în punctul vizat al cubului.

Se vizează fiecare dintre cele patru puncte de referință, se memorează și se

citesc unghiurile α_{H_i} , α_{V_i} , $i=1,2,3,4$. Acestea exprimă situarea cubului de probă în poziția "de zero" (de referință).

Fig.6.9



Se comandă readucerea R.I. în poziția de referință de "n" ori, citindu-se de fiecare dată, pentru punctele P_i ($i=1,2,3,4$), cele două unghiuri (α_{H_i} , α_{V_i} , $i=1,2,3,4$), aceste exprimând pozițiile curente ale cubului de probă. Datele înregistrate sunt prelucrate conform algoritmului descris în paragraful 3.2.1.

Dispozitivele prezentate anterior se utilizează și în cadrul unor sisteme de fabricație flexibilă robotizate, ele permițând stabilirea situației (poziționării și orientării), elementelor componente ale unei celule de fabricație flexibilă robotizată, în raport cu robotul, spre exemplu. Cunoașterea acestor caracteristici de situație ale componentelor unei celule de fabricație este necesară pentru sincronizarea acestora, pentru corelarea pozițiilor și mișcărilor obiectului manipulat cu cele ale manipulatorului, mașinilor de lucru, dispozitivelor de transport, dispozitivelor și sculelor folosite în procesul tehnologic, precum și pentru calibrarea componentelor celulei în conformitate cu cele prezentate în capitolul 5 al tezei.

Se pot astfel calcula funcțiile de poziție corespunzătoare elementelor componente, ceea ce permite sinteza funcțiilor de comandă ale robotului inclus într-un proces tehnologic dat.

Capitolul 6 sintetizează, așadar, cercetările și realizările proprii ale autoarei tezei în direcția conceperii și realizării unor dispozitive și standuri de măsurare a caracteristicilor de situație ale roboților industriali și sistemelor flexibile de fabricație flexibilă robotizate, în baza metodologiei propuse în capitolul 3 al tezei.

CAPITOLUL 7

CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND PERFORMANȚELE DE SITUARE LA ROBOȚI INDUSTRIALI ȘI SISTEME DE FABRICAȚIE FLEXIBILĂ ROBOTIZATE

7.1. Considerații generale

Capitolul de față se constituie într-o validare a noțiunilor teoretice expuse în capitolele 3, 4 și 5, precum și a soluțiilor constructive de standuri de încercare, prezentate în capitolul 6.

În acest sens, capitolul 7 este structurat în trei subcapitole distincte:

- subcapitolul 7.2 - Calibrarea modelului geometric al robotului REMT 5 - ca aplicație la problemele teoretice prezentate în capitolul 4;
- subcapitolul 7.3 - Cercetări experimentale privind performanțele de situare ale robotului CLOOS-ROMAT 76 - ca o verificare practică a metodelor și algoritmilor de calcul prezentați în capitolul 3;
- subcapitolul 7.4 - Cercetări experimentale privind performanțele de situare ale celulei de sudare cu robotul CLOOS-ROMAT 76 - ca aplicație la noțiunile teoretice originale prezentate în capitolul 5 al prezentei teze de doctorat.

7.2 Calibrarea modelului geometric al robotului REMT 5

În conformitate cu cele prezentate în capitolul 4, problema de situare (poziționare și orientare) poate fi aplicată, practic, pentru calibrarea unui robot inclus într-o aplicație dată, în scopul măririi preciziei acestuia, precizie influențată, predominant, de erorile dimensionale ale elementelor robotului.

Având în vedere faptul că erorile geometrice ale parametrilor dimensionali de tip Hartenberg-Denavit ai robotului au cea mai mare pondere (peste 90%) în eroarea totală a efectorului terminal, în continuare se va lua în considerare doar efectul acestor erori.

Prin calibrarea geometrică a robotului REMT 5 se urmărește diminuarea erorilor de situare ale efectorului terminal al robotului, introducând în modelul geometric valorile corectate ale parametrilor geometrici de tip Hartenberg-Denavit.

Procedura de calibrare cuprinde următoarele etape:

a) - modelarea funcțiilor robotului, respectiv stabilirea matricelor aferente modelului geometric direct al robotului;

b) - determinarea, prin măsurători directe, utilizând una dintre metodele prezentate în capitolul 3, a erorilor de situare ale efectorului terminal al robotului;

c) - determinarea, prin măsurători directe (utilizând în general traductoare tip TIRO), a parametrilor geometrici de tip Hartenberg-Denavit, (HD), variabili în cuplele robotului (q_i , respectiv d_i);

d) - utilizând ca date de intrare în modelul diferențial al erorilor (rel. 4.6), datele măsurate la punctele b) și c), precum și valorile nominale ale parametrilor HD, se determină erorile $\Delta\theta_i$, $\Delta\alpha_i$, Δa_i , Δd_i (și eventual $\Delta\beta_i$), care exprimă diferența între geometria reală și cea nominală a robotului;

e) - se corectează parametrii geometrici tip HD nominali cu valorile corecțiilor Dq_i , $\Delta\alpha_i$, Δa_i , Δd_i (și eventual $\Delta\beta_i$), determinându-se astfel parametrii corecțaji: θ^* , α^* , a^* , d^* (și eventual β^*), care se vor utiliza în continuare în modelul geometric al robotului, la programarea acestuia.

În general, se efectuează câteva iterații până la minimizarea erorilor efectorului terminal în limitele dorite.

7.2.1 Robotul industrial REMT 5 - prezentare generală

Robotul REMT 5 face parte din seria de roboți executați de S.C. "Electromotor" - S.A. din Timișoara.

Este un robot de transfer, destinat automatizării flexibile a unor procese tehnologice, deservirii mașinilor-unelte, montaj, etc., în special în domeniul industriei electrotehnice și electronice.

Dispozitivul de ghidare (fig. 7.1) al robotului REMT 5 este un lanț cinematic deschis, de tip RTTR, mecanismul generator de traiectorie având structura RTT, iar mecanismul de orientare având o singură rotație, R. Efectorul terminal, E.T., (dispozitiv de prehensiune), este prevăzut cu două bacuri a căror mișcare de

Tabelul 7.1

Modul rotație ①			Modul translatare verticală ②			Modul braț ③			Modul orientare ④			Modul prehensiune		
Viteză unghiulară maximă	Unghi maxim de rotație	Acționare	Viteză maximă	Cursă maximă	Acționare	Viteză maximă	Cursă maximă	Acționare	Viteză unghiulară maximă	Unghi maxim de rotație	Acționare	Sarcină maximă	Cursă cilindrilor	Acționare
[rad/s]	[°]	-	[m/s]	[mm]	-	[m/s]	[mm]	-	[rad/s]	[°]	-	[N]	[mm]	-
1,57	305	servomotor SRD-350	0,06	0,155	servomotor SRD-350	0,128	0,410	servomotor SRD-350	1,2	80	electrică	8	5	preluată

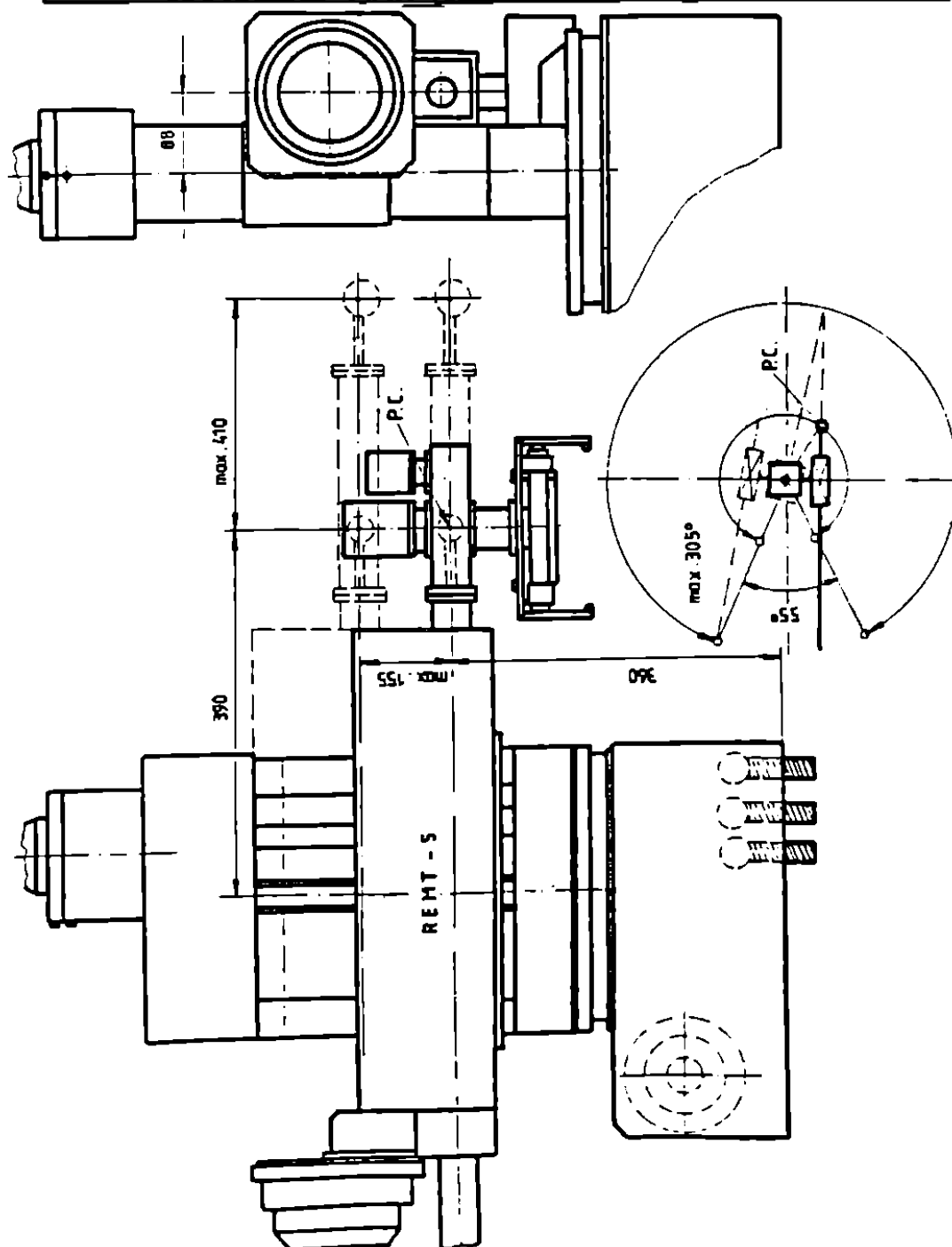


Fig. 7.1

translație are cursa maximă de 5 mm, având posibilitate de manipulare a unor obiecte cu greutate maximă de 50 N.

Urmărind structura lanțului cinematic al mecanismului generator de traiectorie, se observă că robotul REMT 5 generează un spațiu de lucru cilindric (fig. 7.1). Cursele maxime, precum și regimurile maxime ale vitezelor liniare și unghiulare pentru modulele componente sunt prezentate în tabelul 7.1.

Datorită traseelor de cabluri electrice de alimentare, precum și conducte pneumatice, spațiul de lucru util se restrânge cu un sector care se desfășoară pe 55° la axa spațiului de lucru cilindric.

Acționarea robotului REMT 5 este electrică, cu excepția dispozitivului de prehensiune, care este acționat pneumatic.

Se utilizează servomotoare electrice cu întrefier axial tip SRD 350. Sistemul de comandă al robotului este asigurat de un calculator tip ECAROM-881, completat cu echipamentele periferice necesare și interfață cu sistemul de acționare.

7.2.2 Stabilirea matricilor de transformare aferente modelului geometric direct al robotului REMT 5

Urmărindu-se schema cinematică a robotului REMT 5 (fig. 7.2), precum și forma generală a matricilor de transformare omogenă de tip Hartenberg-Denavit pentru cuple de rotație:

$$A_{nR} = \begin{vmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \alpha_n & \sin \theta_n \sin \alpha_n & a_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \alpha_n & -\cos \theta_n \sin \alpha_n & a_n \sin \theta_n \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (7.1)$$

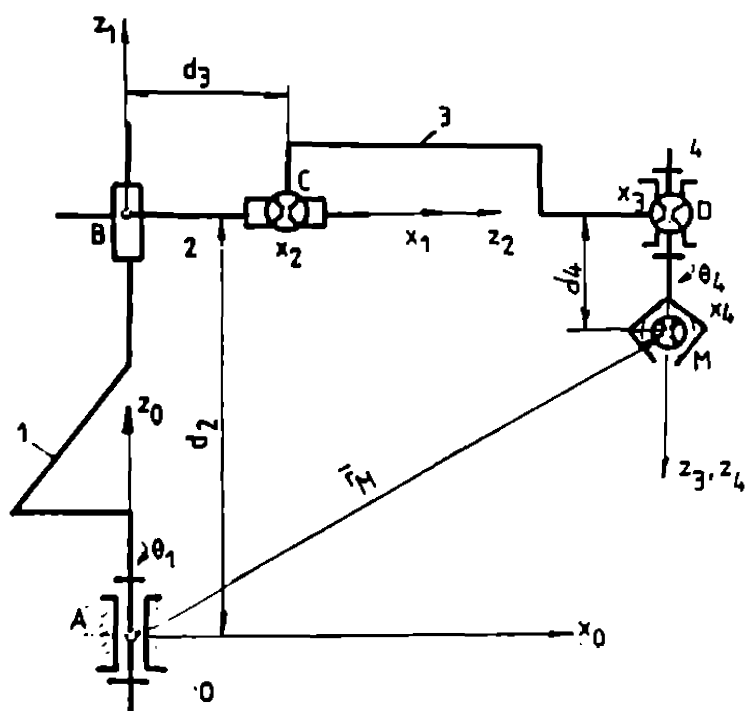
respectiv de translație:

$$A_{nT} = \begin{vmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \alpha_n & \sin \theta_n \sin \alpha_n & 0 \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \alpha_n & -\cos \theta_n \sin \alpha_n & 0 \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (7.2)$$

se pot scrie matricile de transformare pentru modelul geometric direct al robotului REMT 5. Se adoptă, pentru simplificarea scrierii, următoarele notații:

$$\cos \theta_n = c \theta_n, \quad \sin \theta_n = s \theta_n; \quad \cos \alpha_n = c \alpha_n; \quad \sin \alpha_n = s \alpha_n.$$

Fig. 7.2



Astfel, pentru cupla de rotație, A:

$$A_{1R} = \begin{vmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 \cdot \alpha_1 & s\theta_1 \cdot \alpha_1 & a_1 c\theta_1 \\ s\theta_1 & c\theta_1 \cdot \alpha_1 & -c\theta_1 \cdot \alpha_1 & a_1 s\theta_1 \\ 0 & \alpha_1 & \alpha_1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (7.3)$$

Pentru cupla de translație, B:

$$A_{2T} = \begin{vmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 \cdot \alpha_2 & s\theta_2 \cdot \alpha_2 & 0 \\ s\theta_2 & c\theta_2 \cdot \alpha_2 & -c\theta_2 \cdot \alpha_2 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & \alpha_2 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (7.4)$$

Tabel 7.2

Element	θ_n [°]	α_n [°]	a_n [mm]	d_n [mm]
1	$\theta_1 = 0 \div 305$	0	0	0
2	+ 90	- 90	0	$d_2 = 0 \div 155,36$
3	+ 90	0	0	$d_3 = 0 \div 410,3$

Pentru cupla de translație, C:

$$A_{3T} = \begin{vmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 \cdot c\alpha_3 & s\theta_3 \cdot s\alpha_2 & 0 \\ s\theta_3 & c\theta_3 \cdot c\alpha_3 & -c\theta_3 \cdot s\alpha_3 & 0 \\ 0 & s\alpha_3 & c\alpha_3 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (7.5)$$

Pentru cupla de rotație, D:

$$A_{4R} = \begin{vmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 \cdot c\alpha_4 & s\theta_4 \cdot s\alpha_4 & a_4 c\theta_4 \\ s\theta_4 & c\theta_4 \cdot c\alpha_4 & -c\theta_4 \cdot s\alpha_4 & a_4 s\theta_4 \\ 0 & s\alpha_4 & c\alpha_4 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (7.6)$$

Matricea generală de transformare pentru mecanismul generator de traiectorie tip RTT, se determină prin înmulțirea matricelor (7.3), (7.4) și (7.5). Astfel matricea 0T_3 este de forma:

$${}^0T_3 = A_{1R} A_{2T} A_{3T} = \begin{vmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (7.7)$$

în care:

$$\begin{aligned} f_{11} &= c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + s\theta_1 c\alpha_1 s\theta_2 c\theta_3 + s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 - c\theta_1 c\alpha_1 s\theta_2 s\theta_3 \\ f_{21} &= s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 c\alpha_1 s\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_2 c\alpha_2 s\theta_3 + c\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 c\alpha_2 s\theta_3 - \\ &\quad - c\theta_1 s\alpha_1 s\alpha_2 s\theta_3 \\ f_{31} &= s\alpha_1 s\theta_2 c\theta_3 + s\alpha_1 c\theta_2 c\alpha_2 s\theta_3 + c\alpha_1 s\alpha_2 s\theta_3 \\ f_{12} &= -c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 c\alpha_3 + s\theta_1 c\alpha_1 s\theta_2 s\theta_3 c\alpha_3 - c\theta_1 s\theta_2 c\alpha_2 c\theta_3 c\alpha_3 - s\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 \cdot \\ &\quad \cdot s\alpha_2 c\theta_3 c\alpha_3 + s\theta_1 s\alpha_1 s\alpha_2 c\theta_3 c\alpha_3 + c\theta_1 s\theta_2 s\alpha_2 s\alpha_3 + s\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 s\alpha_3 + \\ &\quad - s\theta_1 s\alpha_1 c\theta_2 c\alpha_2 s\alpha_3 \\ f_{22} &= -s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 c\alpha_3 - c\theta_1 c\alpha_1 s\theta_2 s\theta_3 c\alpha_3 - s\theta_1 s\theta_2 c\alpha_2 c\theta_3 c\alpha_3 + \\ &\quad + c\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 c\alpha_2 c\theta_3 c\alpha_3 - c\theta_1 s\alpha_1 s\alpha_2 c\theta_3 c\alpha_3 + s\theta_1 s\theta_2 s\alpha_2 s\alpha_3 - \\ &\quad - c\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 s\alpha_3 - c\theta_1 s\alpha_1 c\alpha_2 s\alpha_3 \\ f_{32} &= -s\alpha_1 s\theta_2 s\theta_3 c\alpha_3 + s\alpha_1 c\theta_2 c\alpha_2 c\theta_3 c\alpha_3 + c\alpha_1 s\alpha_2 c\theta_3 c\alpha_3 - s\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 s\alpha_3 + \\ &\quad \cdot c\alpha_1 c\alpha_2 s\alpha_3 \end{aligned} \quad (7.8)$$

$$\begin{aligned}
f_{13} &= c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 s\alpha_3 - s\theta_1 c\alpha_1 s\theta_2 s\theta_3 s\alpha_3 - c\theta_1 s\theta_2 c\alpha_2 c\theta_3 s\alpha_3 + \\
&+ s\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 c\theta_3 s\alpha_3 - s\theta_1 s\alpha_1 s\alpha_2 c\theta_3 s\alpha_3 - c\theta_1 s\theta_2 s\alpha_2 c\alpha_3 - \\
&+ s\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 c\alpha_3 + s\theta_1 s\alpha_1 c\alpha_2 c\alpha_3 \\
f_{23} &= s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 s\alpha_3 + c\theta_1 c\alpha_1 s\theta_2 s\theta_3 s\alpha_3 - s\theta_1 s\theta_2 c\alpha_2 c\theta_3 s\alpha_3 - \\
&- c\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 c\alpha_2 c\theta_3 s\alpha_3 + c\theta_1 s\alpha_1 s\alpha_2 c\theta_3 s\alpha_3 - s\theta_1 s\theta_2 s\alpha_2 c\alpha_3 - \\
&- c\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 c\alpha_3 - c\theta_1 s\alpha_1 c\alpha_2 c\alpha_3 \\
f_{33} &= s\alpha_1 s\theta_2 s\theta_3 s\alpha_3 - s\alpha_1 c\theta_2 c\alpha_2 c\theta_3 s\alpha_3 - c\alpha_1 s\alpha_2 c\theta_3 s\alpha_3 - s\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 c\alpha_3 - \\
&- c\alpha_1 c\alpha_2 c\alpha_3 \\
f_{14} &= c\theta_1 s\theta_2 s\alpha_2 d_3 + s\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 d_3 + s\theta_1 s\alpha_1 c\alpha_2 d_3 - s\theta_1 s\alpha_1 d_2 + a_1 c\theta_1 \\
f_{24} &= s\theta_1 s\theta_2 s\alpha_2 d_3 - c\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 d_3 - c\theta_1 s\alpha_1 c\alpha_2 d_3 - c\theta_1 s\alpha_1 d_2 - a_1 s\theta_1 \\
f_{34} &= -s\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 d_3 + c\alpha_1 c\alpha_2 d_3 + c\alpha_1 d_2 - d_1
\end{aligned}$$

Se menționează faptul că, datele inițiale necesare calibrării robotului REMT 5 au fost preluate după [V 9] măsurătorile fiind efectuate după principiul metodelor "locale", utilizând un cap de măsurare 3D - corp de probă sferă calibrată.

Intrucât măsurătorile vizând poziționarea efectorului terminal au fost efectuate doar pentru mecanismul generator al traiectoriei tip RTT, modulul de orientare a fost blocat. Așadar $A_{4R} \equiv 0$. Prin urmare, matricea generală de transformare omogenă necesară modelării geometriei robotului REMT 5, este 0T_3 , dată de relația (7.7).

Modelul geometric direct exprimă situarea efectorului terminal al robotului în raport cu sistemul de referință atașat bazei robotului (elementul fix), printr-o corespondență de forma:

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7.9)$$

Prin identificarea termenilor corespondenți din cele două matrici, se exprimă componentele versorilor $\bar{n}, \bar{o}, \bar{a}$ (ce descriu orientarea efectorului terminal), respectiv vectorului de poziție \bar{p} (ce descrie poziționarea efectorului terminal), funcție de parametri geometrici Hartenberg-Denavit.

Având în vedere faptul că datele inițiale prelevate după [V9] se referă doar la exactitatea de poziționare, nu și de orientare, în cele ce urmează se fac referiri la aspectul de poziționare al robotului REMT 5, respectiv reducerea, prin calibrare, a erorilor de poziționare ale acestuia .

7.2.3. Modelul diferențial al erorilor de poziționare

Prin identificarea termenilor corespondenți ce exprimă poziționarea, în cele două matrici din relația (7.9), se obține:

$$\begin{aligned} p_x &= c\theta_1 s\theta_2 s\alpha_2 d_3 + s\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 d_3 + s\theta_1 s\alpha_1 c\alpha_2 d_3 - s\theta_1 s\alpha_1 d_2 + a_1 c\theta_1 \\ p_y &= s\theta_1 s\theta_2 s\alpha_2 d_3 - c\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 d_3 - c\theta_1 s\alpha_1 c\alpha_2 d_3 - c\theta_1 s\alpha_1 d_2 + a_1 s\theta_1 \\ p_z &= -s\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 d_2 + c\alpha_1 c\alpha_2 d_3 + c\alpha_1 d_2 + d_1 \end{aligned} \quad (7.10)$$

Se scrie modelul diferențial al erorilor de poziționare astfel:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \left(\frac{\partial x}{\partial \theta_1}\right) \Delta \theta_1 + \left(\frac{\partial x}{\partial \alpha_1}\right) \Delta \alpha_1 + \left(\frac{\partial x}{\partial a_1}\right) \Delta a_1 + \left(\frac{\partial x}{\partial \theta_2}\right) \Delta \theta_2 + \left(\frac{\partial x}{\partial \alpha_2}\right) \Delta \alpha_2 + \\ &+ \left(\frac{\partial x}{\partial d_2}\right) \Delta d_2 + \left(\frac{\partial x}{\partial d_3}\right) \Delta d_3 \\ \Delta y &= \left(\frac{\partial y}{\partial \theta_1}\right) \Delta \theta_1 + \left(\frac{\partial y}{\partial \alpha_1}\right) \Delta \alpha_1 + \left(\frac{\partial y}{\partial a_1}\right) \Delta a_1 + \left(\frac{\partial y}{\partial \theta_2}\right) \Delta \theta_2 + \left(\frac{\partial y}{\partial \alpha_2}\right) \Delta \alpha_2 + \\ &+ \left(\frac{\partial y}{\partial d_2}\right) \Delta d_2 + \left(\frac{\partial y}{\partial d_3}\right) \Delta d_3 \\ \Delta z &= \left(\frac{\partial z}{\partial \alpha_1}\right) \Delta \alpha_1 + \left(\frac{\partial z}{\partial d_1}\right) \Delta d_1 + \left(\frac{\partial z}{\partial \theta_2}\right) \Delta \theta_2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \alpha_2}\right) \Delta \alpha_2 + \left(\frac{\partial z}{\partial d_2}\right) \Delta d_2 + \\ &+ \left(\frac{\partial z}{\partial d_3}\right) \Delta d_3 \end{aligned} \quad (7.11)$$

respectiv prin derivare:

$$\begin{aligned} \Delta x &= (-s\theta_1 s\theta_2 s\alpha_2 d_3 + c\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 d_3 + c\theta_1 s\alpha_1 c\alpha_2 d_3 - c\theta_1 s\alpha_1 d_2 - a_1 s\theta_1) \Delta \theta_1 + \\ &- (-s\theta_1 s\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 d_3 + s\theta_1 c\alpha_1 c\alpha_2 d_3 - s\theta_1 c\alpha_1 d_2) \Delta \alpha_1 + c\theta_1 \Delta a_1 + \\ &+ (c\theta_1 c\theta_2 s\alpha_2 d_3 - s\theta_1 c\alpha_1 s\theta_2 s\alpha_2 d_3) \Delta \theta_2 + (c\theta_1 s\theta_2 c\alpha_2 d_3 + s\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 c\alpha_2 d_3 - \\ &- s\theta_1 s\alpha_1 s\alpha_2 d_3) \Delta \alpha_2 - s\theta_1 s\alpha_1 \Delta d_2 + (c\theta_1 s\theta_2 s\alpha_2 + s\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 + \\ &+ s\theta_1 s\alpha_1 c\alpha_3) \Delta d_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta_y = & (c\theta_1 s\theta_2 s\alpha_2 d_3 + s\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 d_3 + s\theta_1 s\alpha_1 c\alpha_2 d_3 - s\theta_1 s\alpha_1 d_2 - a_1 c\theta_1) \Delta\theta_1 \\
& - (c\theta_1 s\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 d_3 - c\theta_1 c\alpha_1 c\alpha_2 d_3 - c\theta_1 c\alpha_1 d_2) \Delta\alpha_1 - s\theta_1 \Delta a_1 \\
& - (s\theta_1 c\theta_2 s\alpha_2 d_3 + c\theta_1 c\alpha_1 s\theta_2 s\alpha_2 d_3) \Delta\theta_2 - (s\theta_1 s\theta_2 c\alpha_2 d_3 - c\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 c\alpha_2 d_3 - \\
& + c\theta_1 s\alpha_1 s\alpha_2 d_3) \Delta\alpha_2 - c\theta_1 s\alpha_1 \Delta d_2 - (s\theta_1 s\theta_2 s\alpha_2 - c\theta_1 c\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 - \\
& - c\theta_1 s\alpha_1 c\alpha_2) \Delta d_3
\end{aligned} \tag{7.12}$$

$$\begin{aligned}
\Delta_z = & (-c\alpha_1 s\theta_2 s\alpha_2 d_2 - s\alpha_1 c\alpha_2 d_3 - s\alpha_1 d_2 - d_1) \Delta\alpha_1 - \Delta d_1 + (s\alpha_1 s\theta_2 s\alpha_2 d_2) \Delta\theta_2 + \\
& + (-s\alpha_1 c\theta_2 c\alpha_2 d_3 - c\alpha_1 s\alpha_2 d_3) \Delta\alpha_2 + (-s\alpha_1 c\theta_2 s\alpha_2 - c\alpha_1) \Delta d_2 - c\alpha_1 c\alpha_2 \Delta d_3
\end{aligned}$$

În relațiile (7.12) s-a notat: $\Delta p_x = \Delta x$; $\Delta p_y = \Delta y$ și $\Delta p_z = \Delta z$.

Valorile nominale ale parametrilor geometrici tip Hartenberg Denavit ai robotului REMT 5 sunt redată în tabelul 7.2.

Înlocuind valorile nominale constante ale parametrilor geometrici Hartenberg Denavit în relațiile (7.12) se obține:

$$\begin{aligned}
\Delta x = & (s\theta_1 d_3) \Delta\theta_1 + (-s\theta_1 d_2) \Delta\alpha_1 + c\theta_1 \Delta a_1 + (s\theta_1 d_3) \Delta\theta_2 + (-c\theta_1) \Delta d_3 \\
\Delta y = & (-c\theta_1 d_3) \Delta\theta_1 + (-c\theta_1 d_2) \Delta\alpha_1 + s\theta_1 \Delta a_1 + (-c\theta_1 d_3) \Delta\theta_2 + (-s\theta_1) \Delta d_3 \\
\Delta z = & \Delta d_1 + d_3 \Delta\alpha_2 + \Delta d_2
\end{aligned} \tag{7.13}$$

Scrind rel (7.13) pentru o poziție oarecare din spațiul de lucru al robotului, se obține :

- $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ - cunoscute (determinate prin măsurarea erorilor de poziție ale efectorului terminal);
- $\Delta\theta_1, \Delta d_2, \Delta d_3$ - cunoscute (determinate prin măsurarea cu traductoare de poziție);
- $\Delta\alpha_1, \Delta a_1, \Delta\theta_2, \Delta d_1, \Delta\alpha_2$ - necunoscute.

Se observă că sistemul (7.13) este nedeterminat. Această nedeterminare provine din faptul că s-au luat în considerare doar erorile de poziționare, nu și cele de orientare (datele prelevate după [V9] referindu-se doar la poziționare). Dacă s-ar fi luat în considerare ambele aspecte (poziționare și orientare) conform rel (7.9), s-ar fi obținut un sistem compatibil de 12 ecuații cu 12 necunoscute.

Prin urmare, se poate concluziona că, luarea în considerare doar a aspectului de poziționare permite o calibrare parțială, o compensare parțială a erorilor.

Spre exemplu, dacă în relația (7.13) se ia în considerare doar efectul abaterilor pozițiilor relative ale axelor cuplelor robotului (abateri de la paralelism și

perpendicularitate) în eroarea de poziționare a efectorului terminal, neglijând abaterile dimensionale ale elementelor ($\Delta a_i = 0$, $\Delta d_i = 0$), se ridică nedeterminarea, necunoscute fiind doar $\Delta\alpha_1$, $\Delta\theta_2$ și $\Delta\alpha_2$.

Cu această ipoteză, sistemul (7.13) devine:

$$\begin{aligned}\Delta x &= (s\theta_1 d_3) \Delta\theta_1 + (-s\theta_1 d_2) \Delta\alpha_1 + (s\theta_1 d_3) \Delta\theta_2 + (-c\theta_1) \Delta d_3 \\ \Delta y &= (-c\theta_1 d_3) \Delta\theta_1 + (-c\theta_1 d_2) \Delta\alpha_1 + (-c\theta_1 d_3) \Delta\theta_2 + (-s\theta_1) \Delta d_3 \\ \Delta z &= d_3 \Delta\alpha_2 + \Delta d_2\end{aligned}\quad (7.14)$$

7.2.4 Determinarea efectivă a erorilor parametrilor geometrici

$\Delta\alpha_1$, $\Delta\theta_2$, $\Delta\alpha_2$ pentru robotul REMT 5 și corectarea acestora

Pentru verificarea algoritmului de calcul propus se efectuează calculele pentru una din pozițiile testate, spre exemplu poz.5, tabelul 7.5 și tabelul 7.6 [V9]. Poziția 5 corespunde regimului de încercare:

$$\begin{aligned}c &= 50 \% c_{\max} \\ S U &= 50 \% S.U._{\max} \\ v &= 50 \% v_{\max}\end{aligned}$$

Așadar valorile nominale ale parametrilor geometrici, utilizați ca date inițiale în rel. (7.14), sunt redată în tabelul 7.3.

Tabel 7.3

Element	θ_n [°]	α_n [°]	a_n [mm]	d_n [mm]
1	152,5	0	0	0
2	+ 90	- 90	0	77,68
3	+ 90	0	0	205,15

Din tabelul 7.5 [V9]:

$$\begin{aligned}\Delta\theta_1 &= - 0,02^\circ \\ \Delta d_2 &= - 0,364 \text{ mm} \\ \Delta d_3 &= - 0,52 \text{ mm}\end{aligned}$$

Din tabelul 7.6 [V9]:

$$\begin{aligned}\Delta x &= + 0,700 \text{ mm} \\ \Delta y &= + 0,650 \text{ mm} \\ \Delta z &= - 0,660 \text{ mm}\end{aligned}$$

Cu aceste date inițiale, relațiile (7.14) devin:

$$\begin{aligned} -35,81 \Delta\alpha_1 - 94,574 \Delta\theta_2 &= 1,189 \\ 68,9 \Delta\alpha_1 + 181,96 \Delta\theta_2 &= 0,4655 \\ 205,15 \Delta\alpha_2 &= -0,296 \end{aligned} \quad (7.15)$$

Rezolvând sistemul (7.15) rezultă:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_2 &= -0,43^\circ \\ \Delta\alpha_1 &= -0,755^\circ \\ \Delta\alpha_2 &= -0,082^\circ \end{aligned} \quad (7.16)$$

Cu valorile definite în rel.(7.16) se corectează parametri geometrici θ_2 , α_1 , α_2 , determinându-se valorile corectate ale acestora:

$$\begin{aligned} \theta_2^* &= \theta_{2n} + \Delta\theta_2 = 90,43^\circ \\ \alpha_1^* &= \alpha_{1n} + \Delta\alpha_1 = -0,755^\circ \\ \alpha_2^* &= \alpha_{2n} + \Delta\alpha_2 = -90,082^\circ \end{aligned} \quad (7.17)$$

În tabelul 7.4 sunt redate valorile corectate prin calibrare ale parametrilor Hartenberg Denavit luați în considerare:

Tabel 7.4

Element	θ^* [°]	α^* [°]	a^* [mm]	d^* [mm]
1	152,5	0,755	0	0
2	+ 90,43	- 90,082	0	77,68
3	+ 90	0	0	205,15

Pentru a estima dacă prin procesul de calibrare s-a redus eroarea de poziționare a efectorului terminal al robotului se procedează astfel:

- se calculează valorile nominale ale coordonatelor punctului caracteristic al efectorului terminal ($p_{x_n}, p_{y_n}, p_{z_n}$) introducând în modelul geometric, rel (7.10), valorile nominale ale parametrilor geometrici Hartenberg Denavit, prezentați în tabelul 7.3.

Se obțin :

$$\begin{aligned} p_{x_n} &= 181,96 \text{ mm} \\ p_{y_n} &= -94,574 \text{ mm} \\ p_{z_n} &= 77,68 \text{ mm} \end{aligned} \quad (7.18)$$

- față de aceste coordonate nominale, punctul caracteristic a fost atins cu erorile.

$$\begin{aligned} \Delta_x &= + 0,700 \text{ mm} \\ \Delta_y &= + 0,650 \text{ mm} \\ \Delta_z &= - 0,660 \text{ mm} \end{aligned} \quad (7.19)$$

măsurate la efectorul terminal;

- se calculează valorile corectate ale coordonatelor punctului caracteristic al efectorului terminal (p_x^*, p_y^*, p_z^*), introducând în modelul geometric, rel (7.10), valorile corectate $\theta^*, \alpha^*, a^*, d^*$ ale parametrilor Hartenberg Denavit din tabelul 7.4.

Se obțin:

$$\begin{aligned} p_x^* &= 182,263 \text{ mm} \\ p_y^* &= -94,077 \text{ mm} \\ p_z^* &= 77,9032 \text{ mm} \end{aligned} \quad (7.20)$$

- se calculează erorile $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1$, în raport cu poziția nominală. Se obțin:

$$\begin{aligned} \Delta_{x1} &= + 0,303 \text{ mm} \\ \Delta_{y1} &= + 0,797 \text{ mm} \\ \Delta_{z1} &= - 0,2232 \text{ mm} \end{aligned} \quad (7.21)$$

7.2.5. Concluzii

Prin studiul de caz mai sus prezentat s-a urmărit verificarea practică a metodelor și algoritmului de calibrare propuse în capitolul 4, precum și punerea în evidență a necesității practice de a studia și elabora metodologii de determinare a performanțelor roboților industriali, îndeosebi a performanțelor de situare, ceea ce constituie obiectul prezentei teze de doctorat.

Se observă că, prin calibrarea modelului geometric, după prima iterație, erorile de poziționare ale efectorului terminal al robotului s-au redus cu 43% pentru p_x , cu 33,81 % pentru p_y și cu 76% pentru p_z .

Se pot efectua, desigur, mai multe iterații până la obținerea preciziei dorite.

În studiul prezentat s-a luat în considerare doar aspectul de poziționare, datele inițiale disponibile, [V9], referindu-se numai la acest aspect. Se menționează faptul că un studiu mai aprofundat ține seama și de erorile de orientare în calibrarea modelului geometric.

Se mai menționează că, pentru studiu a fost acceptat robotul REMT 5, acesta nefiind calibrat la fabricare, spre deosebire de alți roboți aflați la dispoziție în Laboratorul de roboți industriali al Catedrei de Organe de Mașini și Mecanisme (spre exemplu, CLOOS-ROMAT 76).

Modelul geometric îmbunătățit, corectat, obținut prin folosirea parametrilor dimensionali corecți, θ^* , α^* , a^* și d^* poate fi implementat în unitatea de comandă a robotului, presupunând însă și utilizarea unui algoritm de calcul iterativ.

Dacă acest lucru nu este posibil a fi realizat, se adaptează sistemul de programare "off-line" al robotului, prin modificarea țintei, în așa fel încât efectorul terminal să se apropie cât mai mult de ținta dorită, în spațiul de lucru al robotului, este ceea ce se poate denumi "țintă falsă".

Dacă se notează ținta dorită cu X_d , ținta atinsă de efectorul terminal fără corecții cu $X_n \neq X_d$ și ținta modificată cu X_m , se poate scrie cu o bună aproximație:

$$X_m = X_d + (X_d - X_n) = 2X_d - X_n = 2X_d - f_i[f_n^{-1}(X_d)] \quad (7.22)$$

Ținta modificată, X_m , este prezentată unității de control, care, prin modelul geometric invers, calculează:

$$q_m = f_n^{-1}(X_m) \quad (7.23)$$

q_m fiind coordonatele generalizate în cuplele cinematice ale robotului.

În acest algoritm este necesar să se utilizeze așadar 2 modele geometrice nominale inverse și un model geometric îmbunătățit direct.

În ceea ce privește robotul REMT 5 luat în studiu rezultatele măsurării performanțelor de situație atestă o precizie medie, motiv pentru care a fost utilizat

pentru manipulări mai puțin exacte. Având însă în vedere condițiile de pionierat în domeniul roboticii precum și componentele tipizate la care a existat posibilitatea de accesare în momentul executării acestora, seria de roboți REMT 5 reprezintă o realizare notabilă a industriei românești.

Se poate concluziona însă, pe baza celor prezentate în subcapitolul de față că, prin calibrarea, chiar și numai a modelului său geometric, erorile de situare se reduc, ceea ce ar permite utilizarea robotului REMT 5 în aplicații de mai mare precizie (montaj de componente electronice, manipulări de piese cu precizie mai mare etc).

7.3. Cercetări experimentale privind performanțele de situare ale robotului CLOOS-ROMAT 76

7.3.1. Robotul CLOOS-ROMAT 76. Prezentare generală

Robotul CLOOS-ROMAT 76, face parte din familia de roboți ROMAT ai firmei CLOOS, caracterizați prin aceea că au domenii de lucru flexibile, fiind destinați operațiilor de sudare și tăiere, prin procedee clasice sau prin procedee neconvenționale (cu laser, cu jet de apă, etc).

Roboții tip ROMAT (56, 66, 76, 76S, 106) se construiesc în două variante:

- pentru exploatare în poziție "așezat pe sol";
- pentru exploatare în poziție "suspendat".

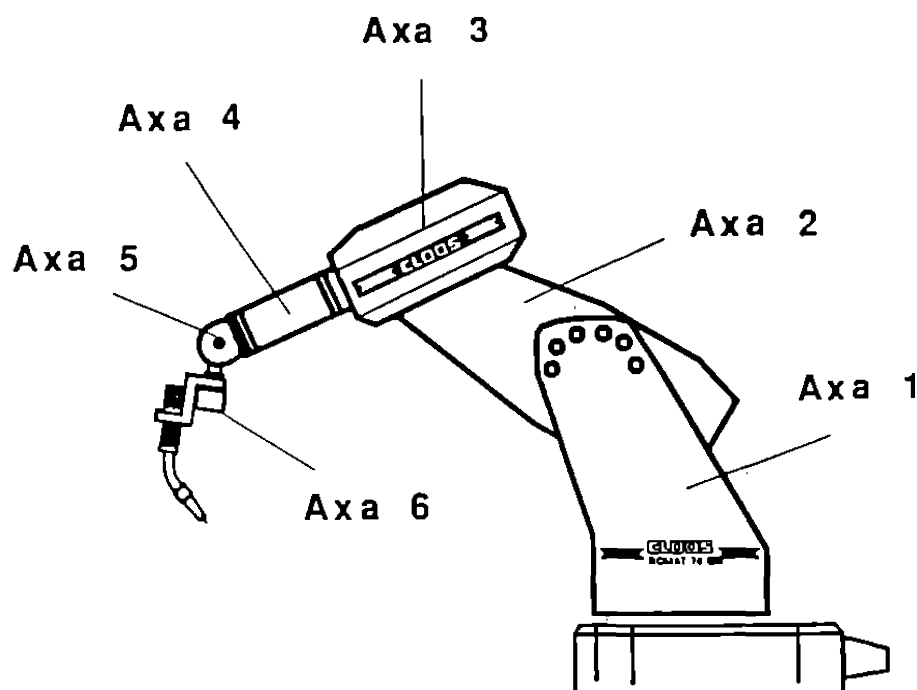
Sunt roboți dotați cu sistem de programare universal și sistem de urmărire a rostului fiabil, controlat prin arc electric.

Robotul aflat în Laboratorul de roboți industriali al Universității "Politehnica" din Timișoara și utilizat în cercetările experimentale întreprinse în cadrul prezentei teze de doctorat este de tip ROMAT 76.

Dispozitivul de ghidare al robotului ROMAT 76 este un lanț cinematic deschis (fig. 7.3), având mecanismul generator de traiectorie tip RRR (axele 1, 2 și 3) și mecanismul de orientare cu trei rotații (axele 4, 5 și 6). Efactorul terminal al robotului este un cap de sudare cu electrod filiform.

Urmărind schema cinematică a mecanismului generator de traiectorie al robotului ROMAT 76 (fig. 7.4), se observă că acesta generează un spațiu de lucru sferic.

Fig. 7.3



Caracteristicile tehnice sunt prezentate de asemenea în fig. 7.4.

Acționarea robotului ROMAT 76 este electrică cu motoare de curent continuu, iar pentru echilibrare se utilizează un motor pneumatic liniar. Robotul CLOOS-ROMAT 76 este prevăzut cu sistem de avans automat adaptiv al electrodului filiform, precum și cu sistem de curățire automată a electrodului.

Robotul este dotat cu un sistem de comandă în construcție modulară, având trei categorii de module:

- modul de sarcină;
- modul de calcul (calculator);
- modul de servoreglare.

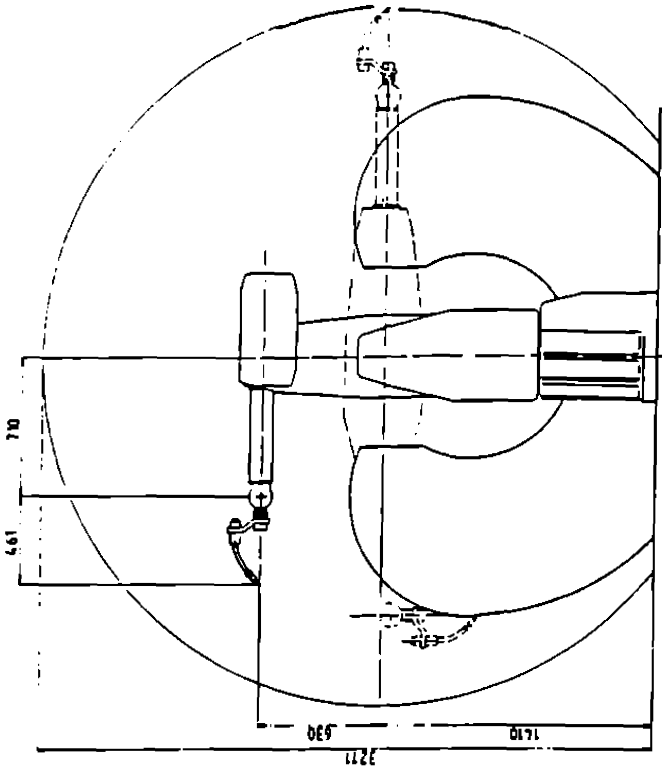
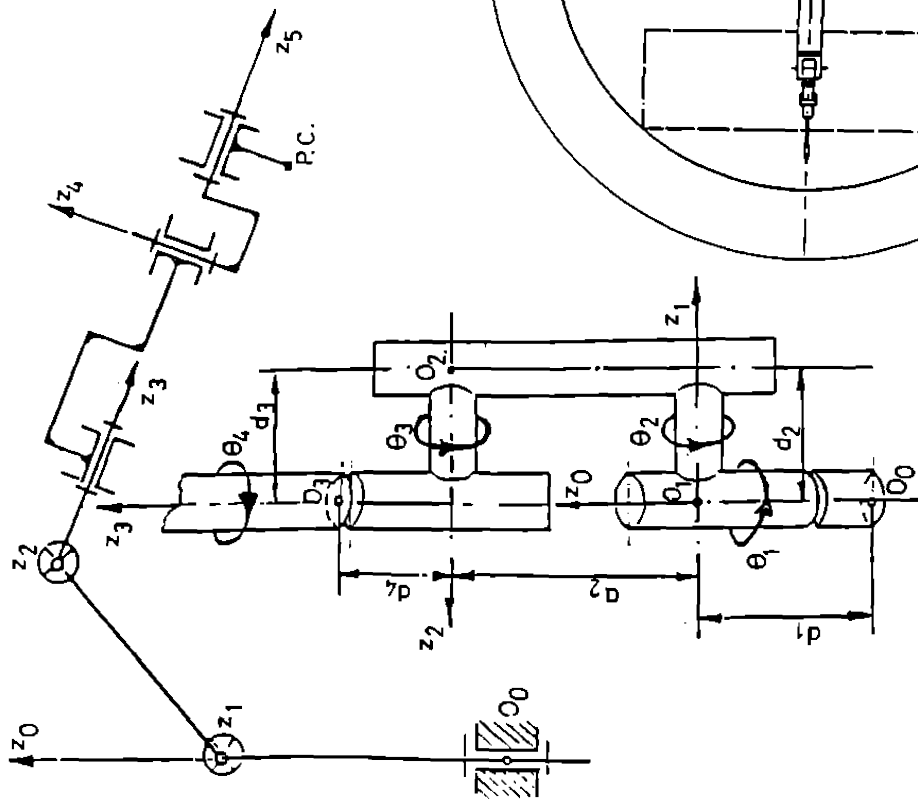
Aceste module sunt amplasate în dulapul de comandă tip ROTROL, prevăzut cu un sistem propriu de răcire cu aer, pentru a asigura o temperatură optimă în interiorul lui, evitându-se supraîncălzirea.

Programarea robotului poate fi realizată în două sisteme de referință

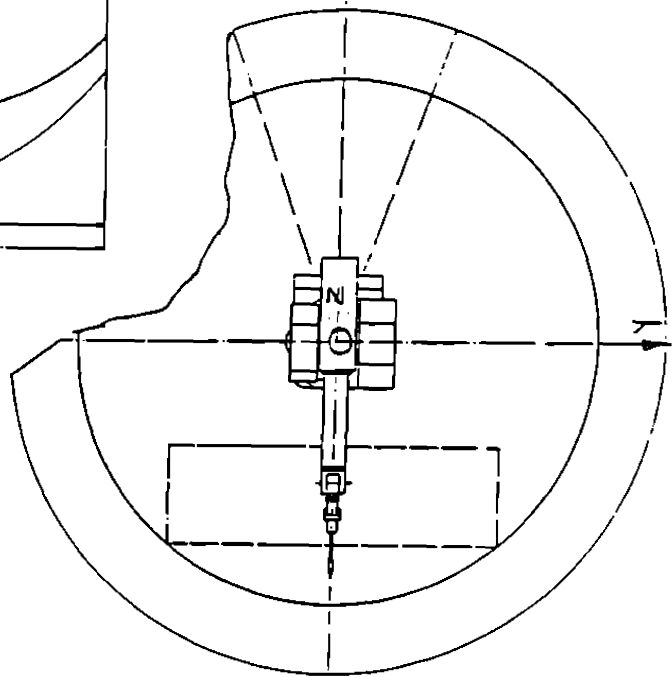
- sistem de coordonate -robot (coordonate articulare) -RC;
- sistem de coordonate carteziene -CC.

În sistemul RC, situarea punctului caracteristic, P.C., al efectorului terminal se exprimă în număr de impulsuri ale traductoarelor de poziție amplasate în

Fig. 7.4



- Caracteristici tehnice:**
- Configuratie mecanica: 1 cuple de rotatie, 6 axe
 - Motoare: 1 motor de curent continuu cu excitatie prin magneti permanenti
 - Sarcina utila: 10 kg
 - Fixare de pozitionare: $\pm 0,2$ mm
 - Volum de lucru: semisferic
 - Unghiuri de rotatie:
 - axa 1: 320°
 - axa 2: 240°
 - axa 3: 270°
 - axa 4: 320°
 - axa 5: 180°
 - axa 6: 450°
 - Viteze maxime:
 - axa 1: 148 °/s
 - axa 2: 130 °/s
 - axa 3: 165 °/s
 - axa 4: 250 °/s
 - axa 5: 250 °/s
 - axa 6: 240 °/s
 - Baza: 450x560 mm
 - Greutate: 1 285 kg



articulații. Aceste traductoare incrementale, la roboți ROMAT 56, 66, 76 și 76S sunt integrate unității motoare. În tabelul 7.5 este prezentată corespondența impuls/grad pentru cele 6 axe, la roboții din familia ROMAT.

Tabel 7.5

Axa	Romat 56	Romat 66/76/76S	Romat 106
1	157,300	154,413	138,888
2	148,872	145,625	277,777
3	148,363	225,151	185,185
4	180,513	102,988	138,888
5	175,210	126,061	83,332
6	109,203	99,737	62,496

Programarea în sistemul de coordonate carteziene, CC, se poate realiza în trei sisteme de coordonate diferite, funcție de necesitățile utilizatorului:

- sistemul de coordonate de bază (CC), legat de baza robotului;
- sistemul de coordonate al mecanismului de orientare;
- sistemul de coordonate al piesei, legat de piesa aflată în lucru.

Sistemul de coordonate de bază, (fig.7.5), este legat de baza robotului, originea lui aflându-se în punctul de intersecție al axei z al primei cuple de rotație (axa1) cu placa de bază. Axa z este axa 1, cu sensul pozitiv în sensul structurii mecanice (conform recomandărilor ISO).

Sistemul de coordonate al mecanismului de orientare este reprezentat în fig. 7.6.

Punctul caracteristic P.C., al robotului este vârful sârmei de sudare (fig.7.7)

Cele trei sisteme de coordonate carteziene sunt numerotate, după cum urmează.

- 1 - sistem de coordonate de bază;
- 2 - sistem de coordonate al mecanismului de orientare;
- 3 - sistem de coordonate al piesei.

Fig. 7.5

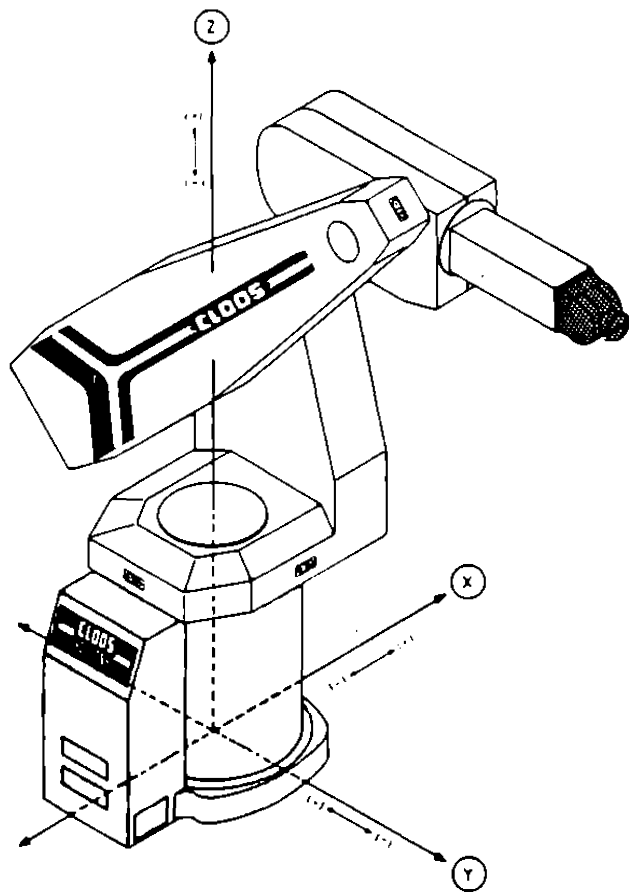
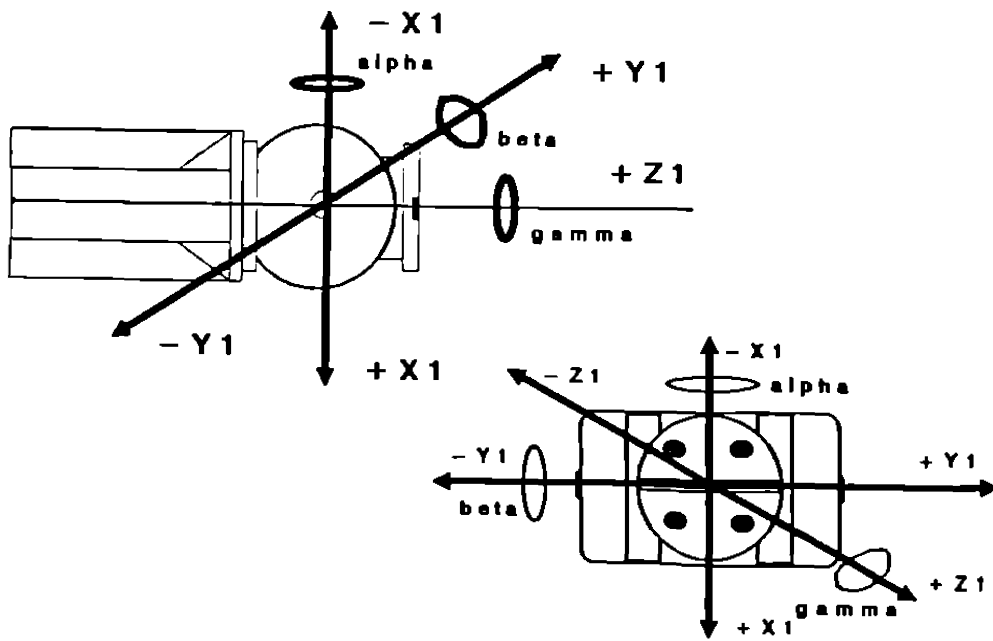
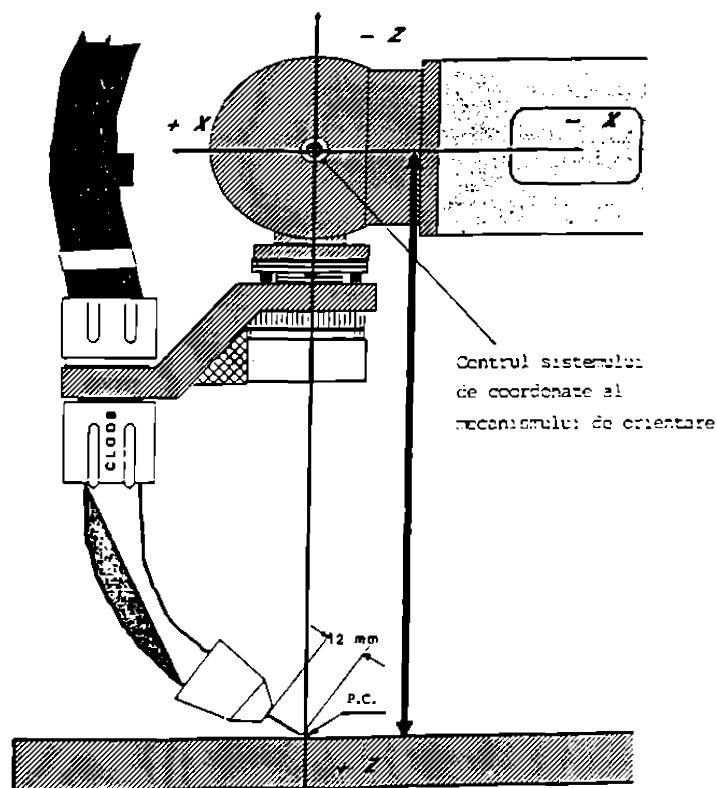


Fig. 7.6



La programare se selectează unul dintre cele 3 sisteme. Robotul își va realiza deplasările prin mișcări paralele cu axele x , y , z al sistemului de coordonate cartezian ales.

Fig. 7.7



Pentru programul de încercări privind caracteristicile de situație ale robotului ROMAT 76 și ale celulei de sudare, s-a selectat sistemul de coordonate CC de bază (numărul 1), deplasările robotului în punctele comandate fiind raportate la acest sistem de coordonate.

7.3.2. Stand pentru determinarea performanțelor de situație la roboți și sisteme de fabricație flexibilă robotizată, utilizând un ansamblu de două tahimetre electronice tip REC-ELTA.

7.3.2.1. Tahimetru electronic tip REC-ELTA. Prezentare generală.

Aparatul este un instrument complex, produs al firmei Carl Zeiss, care permite atât măsurarea unghiurilor orizontale (H_2) și verticale (V), cât și măsurarea distanțelor prin telemetrare, îmbinând caracteristicile unui teodolit și ale unui telemetru.

Caracteristicile majore ale aparatului REC ELTA, cu cap de măsurare ELTA și dispozitiv de înregistrare și calcul REC, sunt :

ELTA:

- citire electronică (incrementală) a unghiurilor orizontale (H_z) și verticale (V);
- telemetru electro-optic în infraroșu, folosind metoda comparație - fază;
- compensator pentru corectarea înclinării axei verticale;
- înregistrarea automată a temperaturii și presiunii atmosferice;
- generator de semnal acustic;
- panou cu trei taste pentru pornire-oprire aparat;
- display cu cristale lichide (LCD);

REC:

- 24 taste cu funcții simple la REC, cod color al grupelor de taste, intrare alfa numerică, taste soft divers, cu funcții suplimentare;
- display grafic (240 × 38 pixels), cu patru linii cu câte 40 de caractere fiecare și cu spectru larg de vizualizare;
- interfață accesibilă cu utilizatorul, cu meniu și moduri interactive (atribuție ecran/taste);
- selectare directă a părților importante de program, indiferent de nivelul curent al programului;
- programe utilitare orientate pe tipuri de aplicații;
- memorie interschimbabilă MEM E (memorie nevolatilă, cu o capacitate de aprox. 2000 de înregistrări);
- interfață RS 232 C pentru date de intrare-ieșire.

Aparatul REC ELTA se compune deci din:

- tahimetru electronic ELTA - cap de măsurare;
- REC E - unitate de comandă, calcul și înregistrare.

Este prezentat în fig. 7.8 și are următoarele părți componente principale:

- display ELTA (6) - afișare măsurători primare;
- display REC E (14) afișare valori măsurate și / sau calculate și informații utilitare, afișare grafice;
- panou de comandă ELTA (31) - pornire oprire instrument, cu trei butoane;

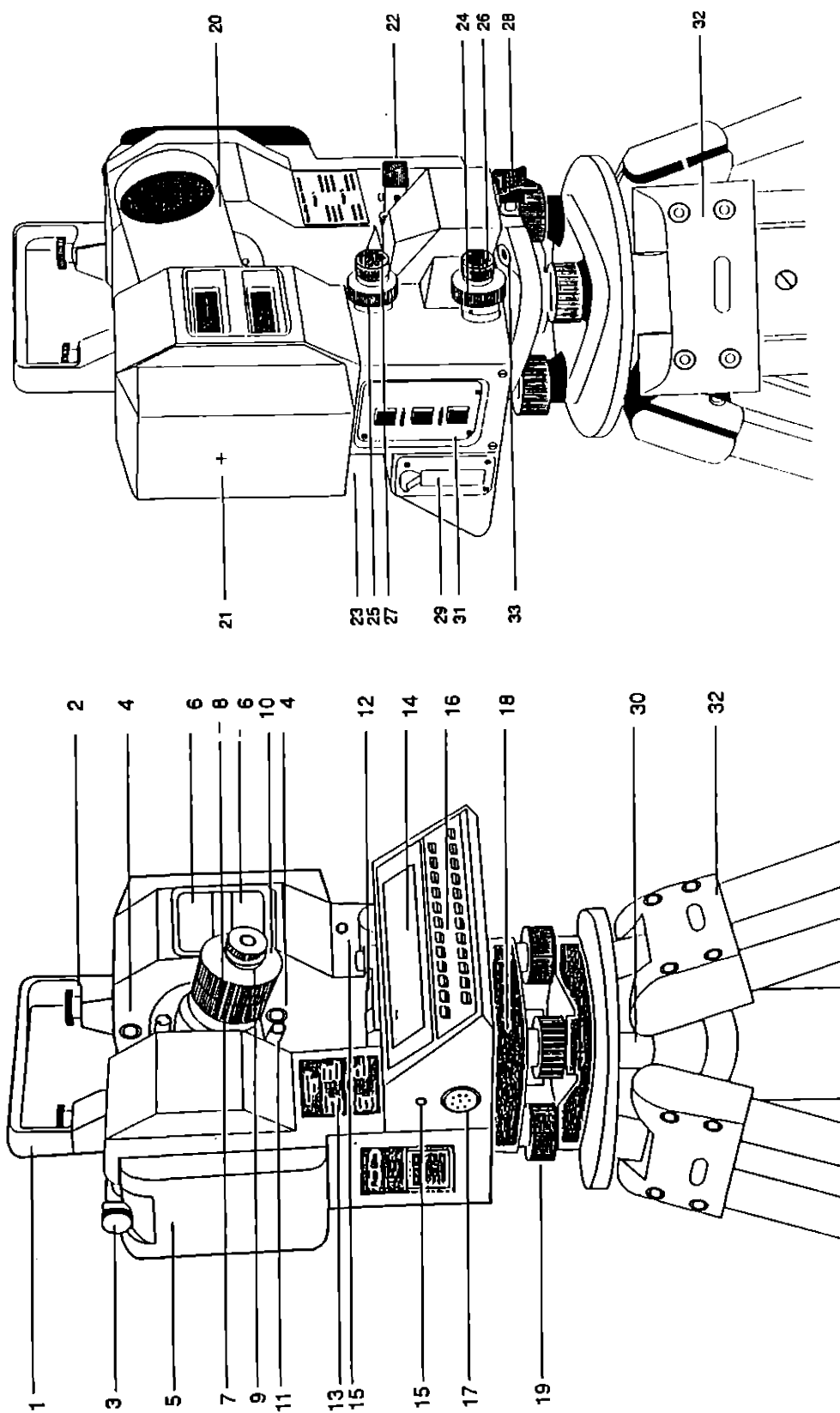


Fig 7.8

- panou de comandă REC (16)
 - taste HARD: 24 taste cu funcții simple;
 - taste SOFT: funcții accesate direct din programe;
- înregistrare:
 - memorie MEME (9) interschimbabilă cu capacitate de stocare de aproximativ 2000 de înregistrări, nevolatilă pentru un an;
 - conectare on-line prin interfață RS 232C (17);
- putere furnizată:
 - baterii reîncărcabile NiCd de 4,8 V și 1,8 A, suficiente pentru aproximativ 8 ore de funcționare ;
- senzori (23);
 - măsurare automată a temperaturii și presiunii aerului;
- generator de semnal acustic (15) - indicând funcțiile specificate;

Aparatul realizează compensarea automată a efectului înclinării axei sale verticale, atât la măsurarea unghiurilor orizontale H_z , cât și verticale V , utilizând în acest scop un compensator cu lichid cu două axe.

Fiind dotat cu senzori de temperatură și presiune, tahimetrul REC-ELTA înregistrează automat abaterea de la valorile standard de temperatură și presiune, compensând automat efectul acestora la citirea unghiurilor H_z și V , respectiv distanțelor măsurate.

De asemenea, la măsurarea distanțelor se realizează compensarea automată a efectului razei de curbură a pământului.

Toate aceste compensări se efectuează prin activarea meniului inițial, prin intermediul tastelor SOFT.

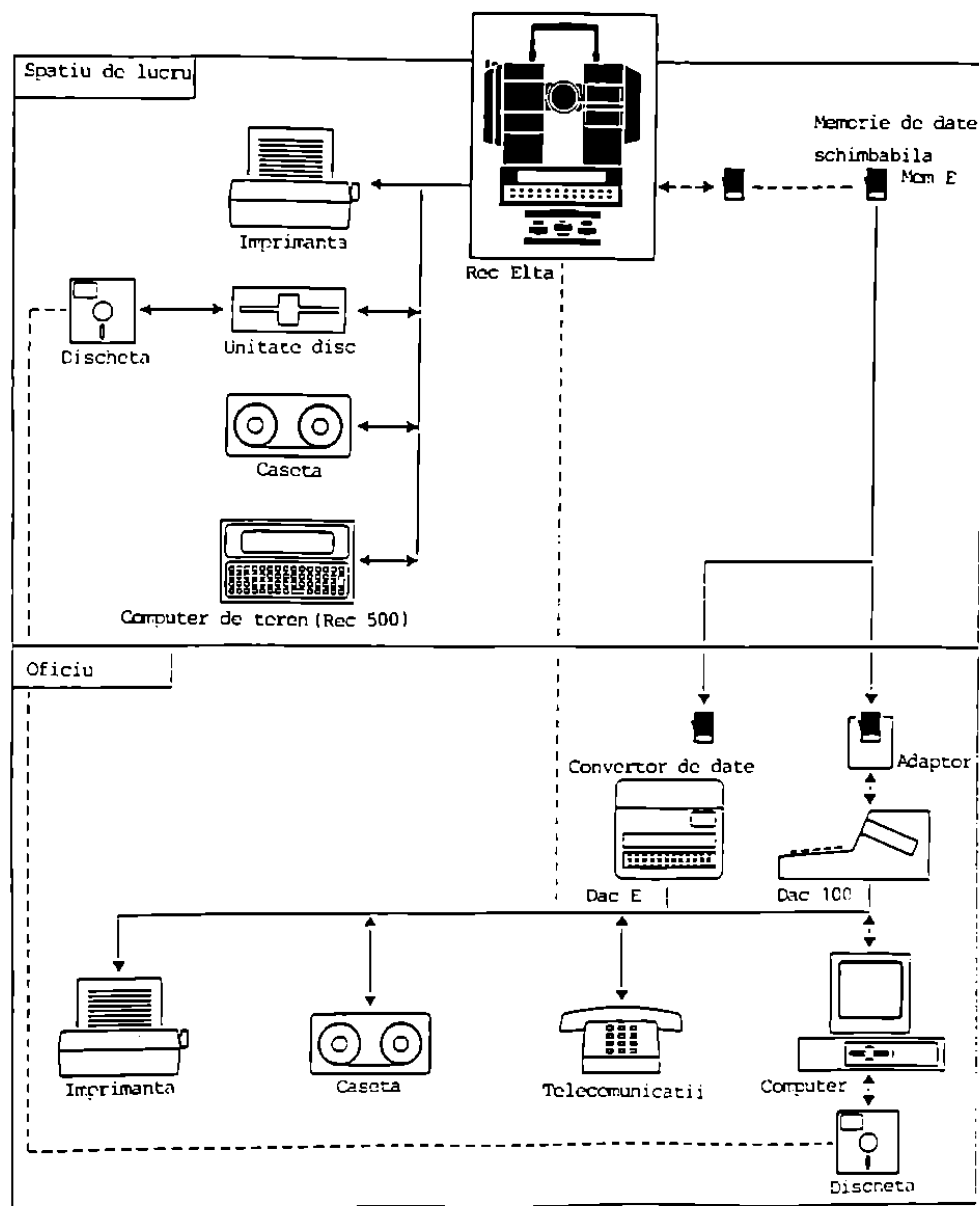
Cu privire la precizia aparatului:

- la măsurarea unghiurilor, abaterea standard, după DIN 18723 este:
 - pentru unghiurile H_z : 0,6" / 0,2 mgrds;
 - pentru unghiurile V : 0,6" / 0,2 mgrds;
- la măsurarea distanțelor, abaterea standard este de 0,2 mm.

Se precizează că aparatul a fost utilizat în cadrul tezei pentru măsurarea unghiurilor H_z și V .

Aparatul REC-ELTA are posibilitatea de a fi conectat la un calculator PC, pentru a asigura transferul de date inițiale și prelucrarea acestora în conformitate cu algoritmul de calcul adoptat.

Fig. 7.9



De altfel, posibilitățile de conectare ale REC-ELTA sunt multiple, după cum se vede în fig. 7.9.

Se menționează faptul că, pentru măsurătorile efectuate la robotul CLOOS ROMAT 76, condițiile de lucru (în hală), au permis conectarea aparatului REC-

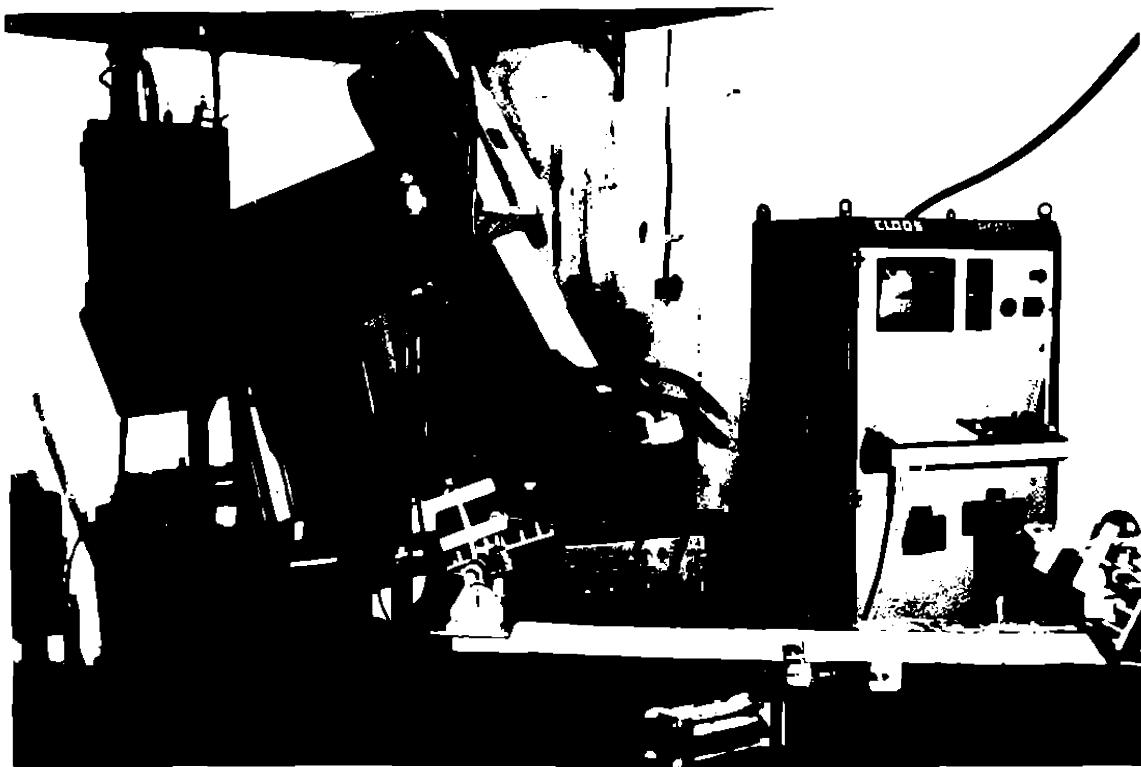
ELTA direct la un calculator PC, facilitând astfel preluarea datelor inițiale și prelucrarea acestora.

7.3.2.2. Stand și metodă pentru determinari experimentale ale performanțelor de situare

Standul utilizat materializează principiul metodelor "la distanță" pentru determinarea caracteristicilor de situare ale roboților industriali, prezentate în capitolul 3 al tezei de doctorat, eliminând din sistemul de măsurare capul de măsurare 3D.

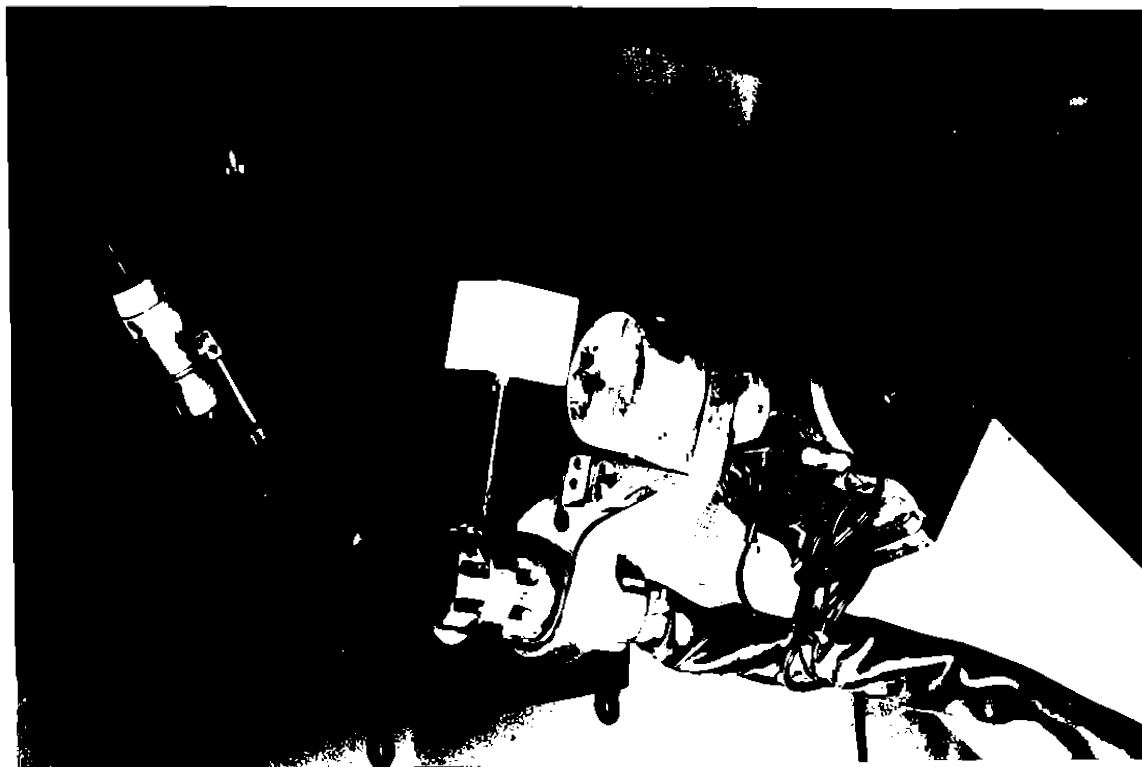
În scopul efectuării măsurărilor privind performanțele de situare, robotul CLOOS ROMAT 76 a fost dotat cu un corp de probă - cub calibrat, având latura de 50 mm (fig. 7.10)

Fig. 7.10



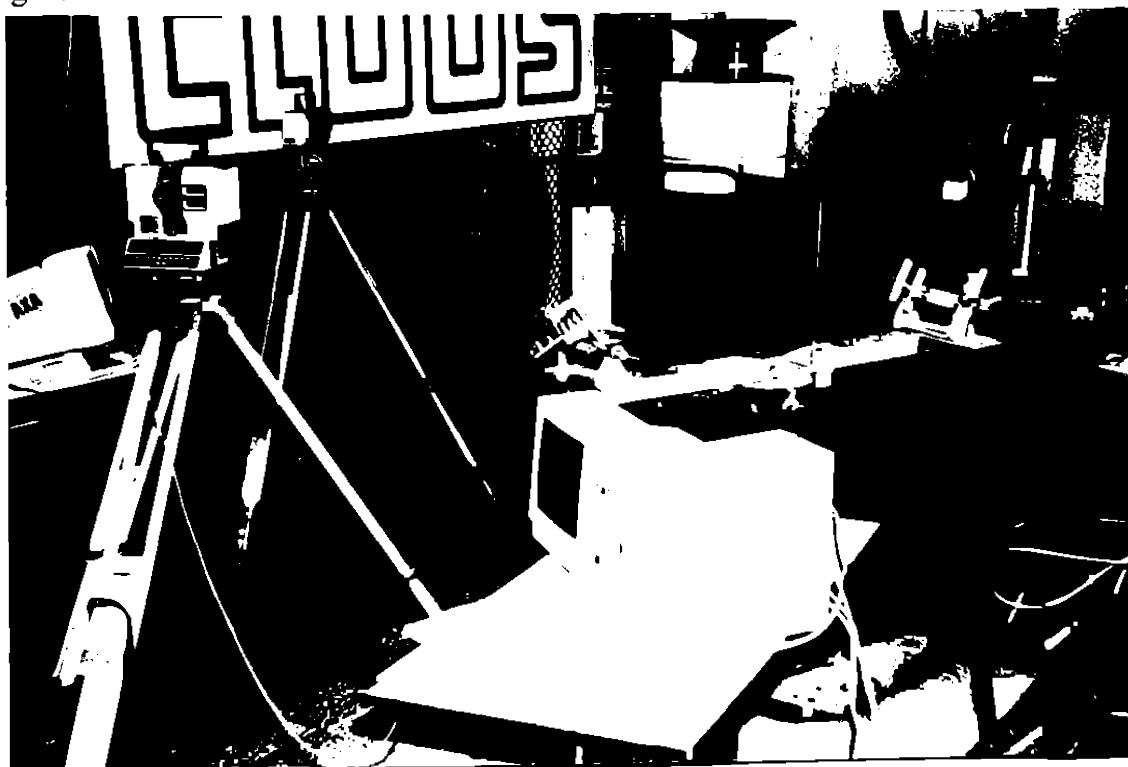
Pentru a putea fi reperat cu ușurință în raport cu decorul, pe fețele cubului s-a lipit hârtie albă, reflectorizantă, iar cele patru vârfuri vizate ale cubului au fost marcate cu cifre după cum se poate vedea în detaliul prezentat în fig. 7.11.

Fig 7.11



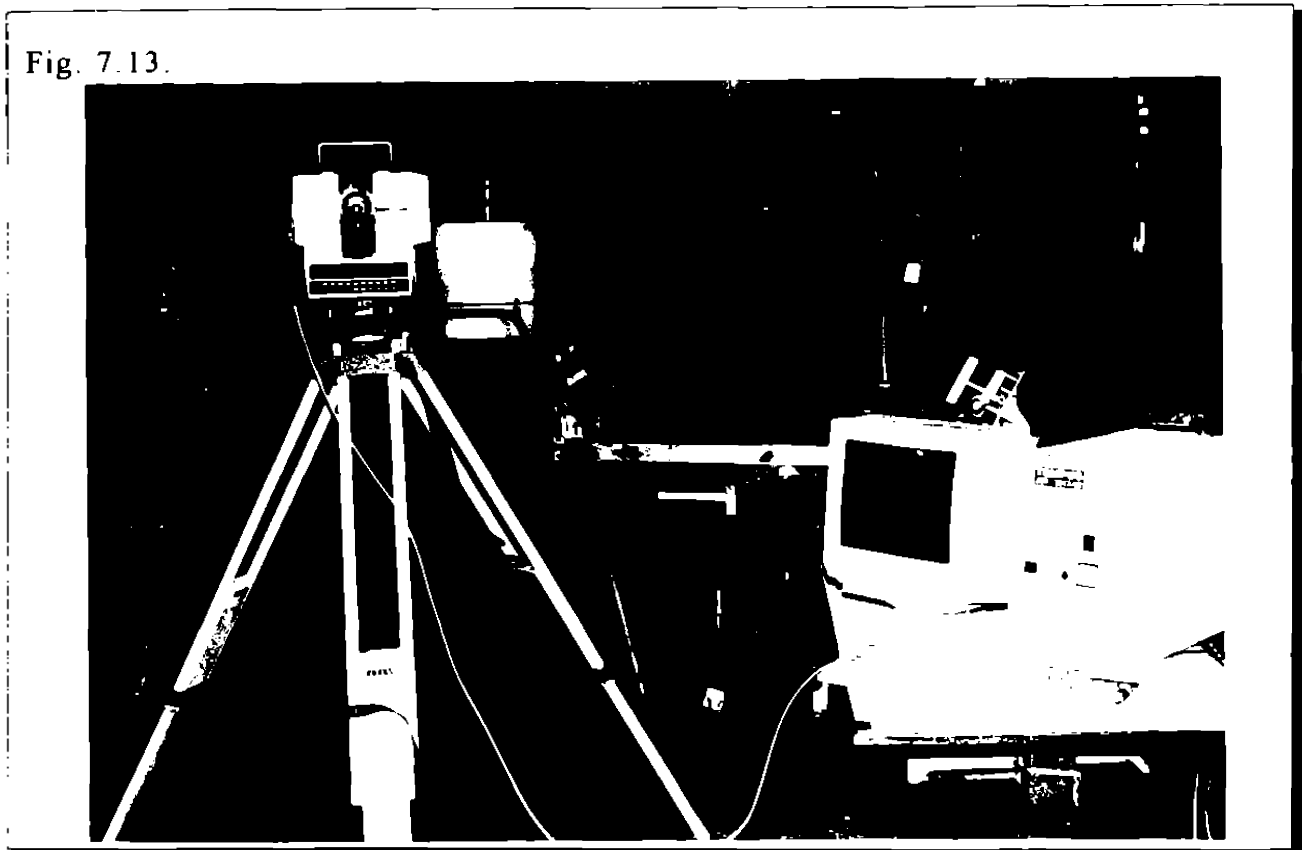
Pentru măsurători s-au utilizat două tahimetre electronice REC-Elta, amplasate în raport cu robotul după cum se vede în fig. 7.12

Fig 7.12



Prin interfața proprie fiecărui aparat, acestea au fost conectate la câte un calculator PC, în scopul prelevării automate a datelor de intrare pentru algoritmul de calcul utilizat la prelucrarea datelor experimentale.

Figura 7.13 prezintă în detaliu tahimetrul REC-ELTA utilizat.



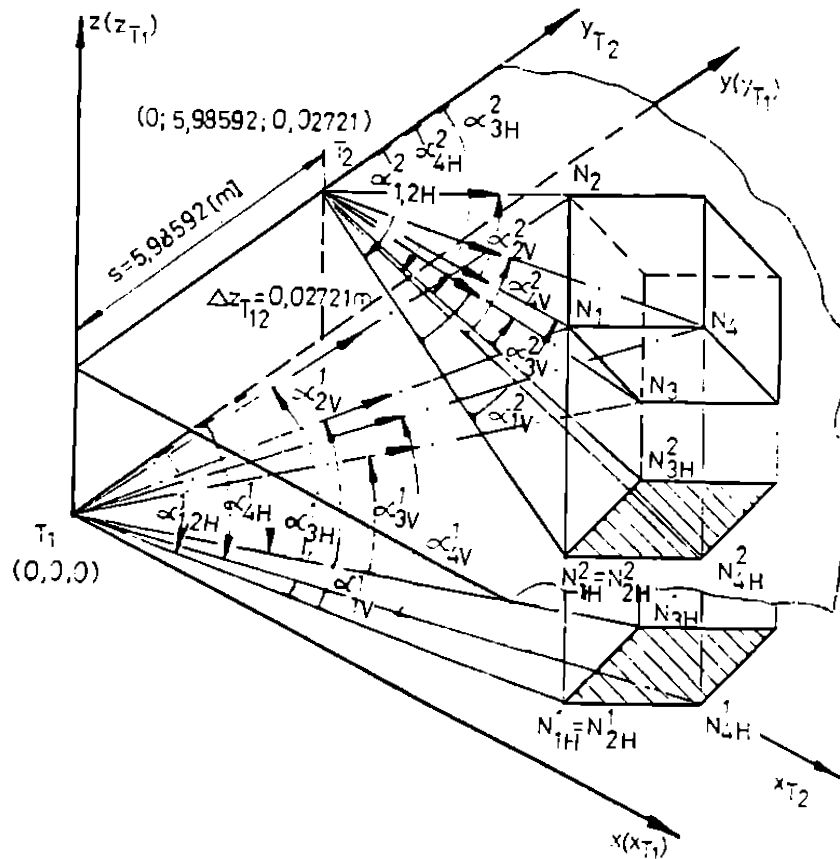
Principiul de măsurare de bază este simplu: un punct de pe corpul de probă (în cazul de față un vârf al cubului calibrat), purtat de efectorul terminal al robotului, vizat de cele două aparate REC-ELTA, T_1 și T_2 , se află la intersecția a două drepte de vizare (fig. 7.12 și fig. 7.14).

Măsurând unghiurile celor două drepte de vizare în plan orizontal ($\alpha_H = H_2$) și în plan vertical ($\alpha_V = V$), cu ajutorul celor două tahimetre, după cum se observă în fig. 7.14, și, apoi folosind din topografie metoda "intersecției înainte" (capitolul 3, subcapitolul 3.3.1), se determină coordonatele punctului vizat.

Se vizează pe rând, cele patru vârfuri ale cubului corp de probă, N_1 , N_2 , N_3 și N_4 și se determină coordonatele acestora în modul arătat mai sus.

Aceste coordonate sunt exprimate în raport cu un sistem de axe legat de unul dintre tahimetre (fig. 7.14), respectiv T_1 , originea acestui sistem de axe fiind centrul optic al aparatului.

Fig. 7.14



Intrucât pentru calculul coordonatelor punctelor vizate este necesară cunoașterea poziției centrului optic al celui de-al doilea aparat, aceasta s-a determinat prin vizare reciprocă între cele două aparate. S-au determinat astfel coordonatele centrului optic al tahimetrului nr.2, $T_2(0; 5,98592; 0,02721)$ în raport cu T_1 (fig.7.14). Se menționează faptul că aceste coordonate sunt exprimate în [m], unitate de măsură pentru distanțe selectată în meniul inițial al programului aparatului.

S-a creat, în acest mod, baza de măsurare, bază nemodificată pe tot parcursul determinărilor experimentale.

Pentru măsurătorile efectuate la robotul CLOOS-ROMAT 76, ținta este reprezentată de:

- cele 4 vârfuri marcate cu cifre ale cubului calibrat;
- vârful sârmei - electrod de sudare.

7.3.3. Program al cercetărilor experimentale

Prin programul de încercări experimentale conceput s-a urmărit verificarea practică, pentru situații concrete, a metodei și algoritmului de calcul a caracteristicilor de situare la roboți și sisteme de fabricație flexibilă robotizate propuse în capitolul 3 al tezei, subcapitolul 3.3.1.

7.3.3.1. Caracteristici testate

Au fost luate în studiu și supuse testării, următoarele caracteristici de situare ale robotului CLOOS-ROMAT 76:

1. - exactitatea de poziționare unidirecțională;
2. - repetabilitatea de poziționare unidirecțională;
3. - exactitatea de orientare unidirecțională;
4. - repetabilitatea de orientare unidirecțională;
5. - variația exactității de poziționare unidirecțională;
6. - exactitatea de poziționare a distanței .

Toate încercările au fost făcute în conformitate cu recomandările ISO 9283:90 "Manipulating Industrial Robot- Performance Criteria and Related Test Methods".

Testările s-au făcut în condițiile atmosferice normale în care lucrează robotul (în hală), aparatele fiind dotate (după cum s-a specificat) cu senzori de temperatură și presiune, realizându-se automat corectarea parametrilor mășurați funcție de condițiile atmosferice sezizate. De asemenea, încercările s-au făcut în condiții de repaos în activitatea industrială (duminică) pentru a se evita influența vibrațiilor asupra măsurătorilor.

Cu privire la viteza de deplasare între pozițiile de încercare specificate, s-a optat, în conformitate cu ISO 9283: 90, pentru viteza maximă, respectiv 100% din viteza nominală.

Cu privire la mărimea sarcinii aplicate interfeței mecanice, dacă se consideră drept sarcină nominală masa electrodului de sudură filiform împreună cu subansamblul prin intermediul căruia se montează pe interfața mecanică a robotului, iar cubul de probă împreună cu piesa intermediară cu care se montează pe acest subansamblu având o masă de 1,3 kg (fig. 7.11), se poate considera că încercările s-au efectuat la o încărcare depășind încărcarea nominală (aprox. 113%)

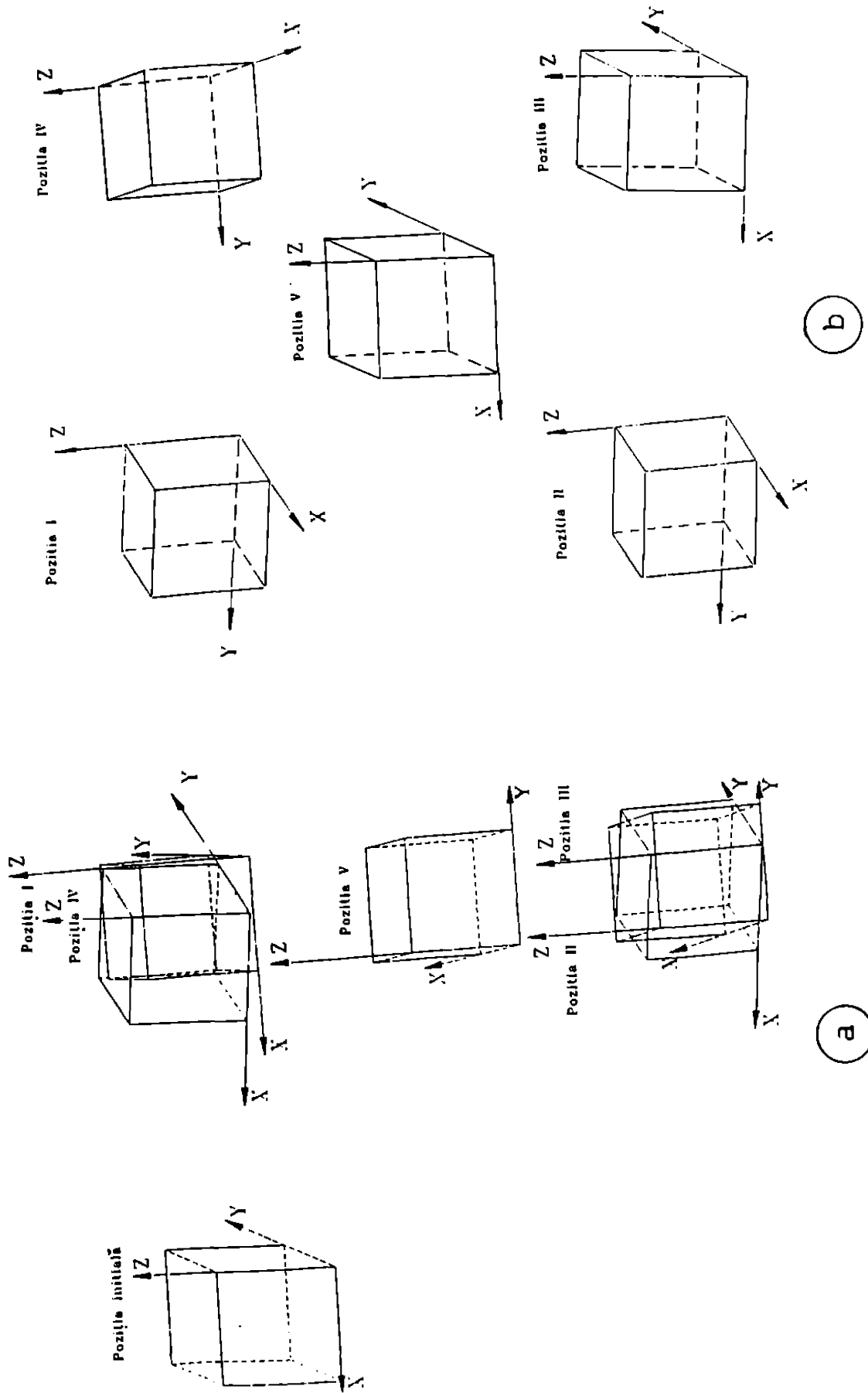
7.3.3.2. Derularea măsurătorilor

Măsurătorile vizând caracteristicile de exactitate și repetabilitate de situare (poziționare și orientare) s-au efectuat pentru un număr de cinci poziții de încercare (punctele P_1, P_2, P_3, P_4, P_5), amplasate în zona cea mai utilizată din spațiul de lucru al robotului, pe un plan situat în interiorul unui cub imaginar înscris în spațiul de lucru, conform ISO 9283 - 90. Amplasarea punctelor de încercare, în raport cu poziția de referință a robotului (poziția inițială) se poate observa în fig. 7.15. a) și b).

Punctele de încercare au fost memorate în calculatorul robotului prin învățare, după care s-a comandat robotul să revină în punctele învățate, în următoarea succesiune: $P_1 \rightarrow P_5 \rightarrow P_4 \rightarrow P_3 \rightarrow P_2 \rightarrow P_1$, efectuându-se 10 cicluri de măsurători (câte 10 măsurători pentru fiecare dintre cele 5 poziții testate). În fiecare poziție, au fost vizate cu cele 2 tahimetre patru vârfuri ale cubului de probă, N_1, N_2, N_3, N_4 , (fig. 7.14), măsurându-se unghiurile $H_z^1 \equiv \alpha_H^1$ și $V^1 \equiv \alpha_V^1$, respectiv $H_z^2 \equiv \alpha_H^2$ și $V^2 \equiv \alpha_V^2$.

Unghiurile respective (800 de valori) sunt prezentate în așa numitul "carnet de teren", anexa 1.

Cu aceste valori de unghiuri H_z și V , prin metoda "intersecției înainte", s-au calculat coordonatele x, y, z , ale punctelor N_1, N_2, N_3 și N_4 vizate, acestea constituindu-se în date inițiale pentru algoritmul de calcul a exactității și repetabilității de situare (poziționare și orientare), (anexa 2).



În acest scop au fost utilizate cele două calculatoare PC la care au fost conectate, prin interfața proprie, cele două tahimetre.

Pentru determinarea caracteristicii de exactitate de poziționare a distanței, (AD), se utilizează măsurătorile aferente punctelor de încercare P_1 și P_3 .

Pentru determinarea caracteristicii de variație a exactității de poziționare multidirecțională (vAP) s-a efectuat un alt set de măsurători pentru o poziție comandată, apropierea de această poziție realizându-se pe trei traiectorii diferite, câte 10 repetări pentru fiecare traiectorie.

Se menționează faptul că a fost vizat doar vârful N_1 al cubului, întrucât a fost luat în considerare numai aspectul de poziționare. Datele inițiale (coordonatele punctelor) sunt prezentate în tabelul 7.6.

Se mai specifică faptul că toate încercările au fost efectuate deplasând robotul în poziția comandată prin acționarea simultană a tuturor cuplelor sale motoare pentru a cumula în eroarea efectului terminal, efectul erorilor generate de toate mișcărilor robotului.

Tabel 7.6

Nr. crt	Poziția 1			Poziția 2			Poziția 3		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1.	7.04939	1.82838	2.11029	7.04915	1.82821	2.11111	7.04968	1.82915	2.11055
2.	7.04945	1.82859	2.11002	7.04961	1.82832	2.11048	7.04965	1.82872	2.11078
3.	7.04942	1.82847	2.11021	7.04925	1.82805	2.11032	7.04928	1.82835	2.11025
4.	7.04931	1.82854	2.11015	7.04915	1.82779	2.11048	7.04939	1.82842	2.11062
5.	7.04928	1.82831	2.11049	7.04912	1.82835	2.11055	7.04958	1.82841	2.11041
6.	7.04935	1.82825	2.11019	7.04925	1.82868	2.11024	7.04991	1.82905	2.11059
7.	7.04926	1.82857	2.11035	7.04931	1.82848	2.11079	7.04948	1.82858	2.11078
8.	7.04948	1.82865	2.11048	7.04935	1.82865	2.11071	7.04915	1.82855	2.11045
9.	7.04924	1.82844	2.11045	7.04952	1.82871	2.11052	7.04955	1.82872	2.11062
10	7.04943	1.82839	2.11015	7.04935	1.82849	2.11055	7.04958	1.82861	2.11075

7.3.3.3 Prelucrarea rezultatelor experimentale

Utilizând algoritmul prezentat în subcapitolul 3.3.1, cu ajutorul programului EXCEL, s-a efectuat prelucrarea rezultatelor experimentale, în vederea determinării caracteristicilor de situație testate.

Pentru a facilita efectuarea calculului matematic în EXCEL, relațiile de calcul aferente au fost sistematizate în tabelul 7.7.

Valori de calcul intermediare precum și valorile finale ale caracteristicilor de situație testate sunt prezentate în anexa 3 după cum urmează:

- POZIȚIONARE ROBOT - PUNCTUL P1, P2, P3, P4, P5: exactitate de poziționare, repetabilitate de poziționare, exactitate de orientare, repetabilitate de orientare ;
- EXACTITATE DE POZIȚIONARE A DISTANȚEI - ROBOT;
- VARIAȚIA EXACTITĂȚII DE POZIȚIONARE MULTIDIREȚIONALĂ;

Se menționează faptul că, în algoritmul de calcul, datele inițiale (coordonatele x, y, z) sunt exprimate în [m] unitate de măsură pentru distanțe selectată în meniul inițial al aparatelor REC-ELTA utilizate pentru măsurători. Ca urmare, și parametri de poziționare calculați sunt exprimați în [m]. Parametri de orientare sunt exprimați în [°].

Analizând rezultatele obținute prin prelucrarea datelor experimentale, se pot formula câteva concluzii:

1. - algoritmul de calcul propus și utilizat la prelucrarea datelor experimentale permite determinarea componentelor exactității și repetabilității de situație (poziționare și orientare), în vederea exprimării acestora sub formă matricială, limbaj matematic unitar, utilizat în robotică. Acest aspect a fost luat în considerare în prezentarea valorilor calculate ale caracteristicilor de situație. Spre exemplu, exactitatea de poziționare în punctul P₁, AP₁, se poate exprima sub forma:

$$AP_1 = \begin{vmatrix} AP_{nx} & AP_{ox} & AP_{ax} & AP_x \\ AP_{ny} & AP_{oy} & AP_{ay} & AP_y \\ AP_{nz} & AP_{oz} & AP_{az} & AP_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1,71E-05 & 4,5E-06 & 6,54E-06 & 0,000277 \\ 9,94E-06 & 4,08E-06 & 5,6E-06 & 0,000320 \\ 4E-08 & -0,00018 & 7,65E-06 & -7,5E-05 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (7.24)$$

2. - algoritmul de calcul propus utilizează un limbaj matematic simplu și ușor accesibil, ceea ce permite folosirea unor programe de calcul matematic profesionale, existente pe piață (EXCEL, MATHCAD etc). Nu se necesită așadar elaborarea unui soft special pentru utilizarea acestui algoritmu;

3. - valorile parametrilor de situare obținute prin calcul confirmă atât corectitudinea algoritmului utilizat pentru prelucrarea datelor experimentale, cât și a metodei utilizate pentru efectuarea măsurătorilor;

4. - analizând valorile exactității și repetabilității de poziționare și orientare obținute prin calcul, se constată că se încadrează în valorile prescrise pentru robotul CLOOS-ROMAT 76 analizat;

5. - din analiza parametrilor exactității de situare calculați în cele 5 puncte din spațiul de lucru, alese în conformitate cu recomandările ISO 9283 90, se constată că aceștia prezintă valori minime în punctul P3 : $AP = 0,188141$ mm

$$AP_a = 0,0012002^\circ$$

$$AP_b = 0,0003057^\circ$$

$$AP_c = 0,0017056^\circ$$

Se poate concluziona că această poziție este optimă pentru aplicații cu robotul respectiv, în zona spațiului de lucru analizată;

6. - prin compararea valorilor parametrilor de exactitate și repetabilitate de situare calculați în cele cinci puncte din spațiul de lucru, se constată că atât exactitatea cât și repetabilitatea de poziționare variază între pozițiile analizate în limita a $(0 \div 0,2)$ mm;

7. - distanța între două puncte din spațiul de lucru (P1 și P3), prezintă o exactitate de poziționare de 0,18 mm;

8. - la abordarea unui punct din spațiul de lucru din trei direcții diferite (trei traiectorii diferite), exactitatea de poziționare multidirecțională prezintă o variație de 0,4 mm;

9. - posibilitatea de prelevare automată a parametrilor mășurați și conectarea prin interfață proprie a aparatelor de măsură la un calculator tip PC performant, pe care este implementat în EXCEL algoritmul de calcul respectiv, permite derularea foarte rapidă atât a măsurătorilor propriu-zise cât și a prelucrării datelor experimentale, în vederea determinării parametrilor de situare ai unui robot

Tabel 7.7

Scop	Nr. crt.	Mărime	Simbol; Relație de calcul
Exactitate de poziționare (R); (C)	1	Poziții comandate	$x_{Nic}; y_{Nic}; z_{Nic}; i = 1 \div 4;$
	2	Poziții real atinse	$x_j; y_j; z_j; j = 1 \div 10$
	3	Medie coord. x atinse	$\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} x_j$
	4	Medie coord. y atinse	$\bar{y} = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} y_j$
	5	Medie coord. z atinse	$\bar{z} = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} z_j$
	6	Comp. x a AP	$AP_x = \bar{x} - x_{Nic}$
	7	Comp. y a AP	$AP_y = \bar{y} - y_{Nic}$
	8	Comp. z a AP	$AP_z = \bar{z} - z_{Nic}$
	9	Exactitate poziționare	$AP = (AP_x^2 + AP_y^2 + AP_z^2)^{1/2}$
Repetabilitate de poziționare (R)	10	Dist. punct atins - val. medie	$l_j = [(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2]^{1/2}$
	11	Distanța medie	$\bar{l} = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} l_j$
	12	Abatere med. pătratică	$S_l = \left[\frac{1}{9} \sum_{j=1}^{10} (l_j - \bar{l})^2 \right]^{1/2}$
	13	Repetab. de poziționare	$RP = \bar{l} + 3S_l$
Exactitate de orientare (R); (C)	14	Medie poz. atinse punct N_3 (comp. x)	$a = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} x_{N3j}; j = 1 \div 10$
	15	Diferența pct.comandal-pct. med N_3 (comp. x)	$M_m = [x_{N3c} - a]$
	16	Medie poz. atinse pct. N_1 (comp. x)	$b = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} x_{N1j}; j = 1 \div 10$

Tabel 7.7 (continuare)

Scop	Nr. crt.	Mărime	Simbol; Relație de calcul
Exactitate de orientare (R); (C)	17	Dif. pct. comandat-pct. mediu N_1 (comp. x)	$N_{xn} = [x_{N1c} - b] \equiv N_{xo} \equiv N_{xa}$
	18	Exact. de orientare (comp. nx)	$AP_{nx} = \frac{1}{50} [M_{xn} - N_{xn}]$
	19	Medie poz atinse pct. N_3 (comp. y)	$c = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} y_{N3j}; \quad j = 1 \div 10$
	20	Diferență pct. comandat - pct. mediu N_3 (comp. y)	$M_{yn} = [y_{N3c} - c]$
	21	Medie poz. atinse pct. N_1 (comp. y)	$d = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} y_{N1j}; \quad j = 1 \div 10$
	22	Dif. pct. comandat- pct. mediu N_1 (comp. y)	$N_{yn} = [y_{N1c} - d] \equiv N_{yo} \equiv N_{ya}$
	23	Exact. de orientare (comp. ny)	$AP_{ny} = \frac{1}{50} [M_{yn} - N_{yn}]$
	24	Medie poz. atinse pct. N_3 (comp. z)	$l = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} z_{N3j}; \quad j = 1 \div 10$
	25	Dif. pct. comandat - pct. mediu N_3 (comp. z)	$M_{zn} = [z_{N3c} - e]$
	26	Med. poz. atinse pct. N_1 (comp. z)	$f = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} z_{N1j}; \quad j = 1 \div 10$
	27	Dif. pct. comandat - pct. mediu N_1 (comp. z)	$N_{zn} = [z_{N1c} - f] \equiv N_{zo} \equiv N_{za}$
	28	Exactitatea de orientare (comp. nz)	$AP_{nz} = \frac{1}{50} [M_{zn} - N_{zn}]$
	29	Exactitatea de orientare (comp. n)	$AP_n = (AP_{nx}^2 + AP_{ny}^2 + AP_{nz}^2)^{1/2}$
	30	Exactitatea de orientare ISO (axa a)	$AP_{aISO} = 90^\circ - \arccos AP_n$
31	Medie poz. atinse pct. N_4 (comp. x)	$k = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} x_{N4j}; \quad j = 1 \div 10$	

Tabel 7.7 (continuare)

Scop	Nr. crt.	Mărime	Simbol; Relație de calcul
Exactitate de orientare (R): (C)	32	Dif.pct. comandat-pct. mediu N_4 (comp. x)	$M_{x0} = [x_{N4c} - k]$
	33	Exact. de orientare (comp. o_x)	$AP_{ox} = \frac{1}{50} [M_{x0} - N_{x0}]$
	34	Medie poz. atinse pct. N_4 (comp. y)	$l = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} y_{N4j}; \quad j=1+10$
	35	Dif. pct. comandat- pct. mediu N_4 (comp. y)	$M_{y0} = [y_{N4c} - l]$
	36	Exact. de orientare (comp. o_y)	$AP_{oy} = \frac{1}{50} [M_{y0} - N_{y0}]$
	37	Medie poz. atinse pct. N_4 (comp. z)	$m = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} z_{N4j}; \quad j=+10$
	38	Dif. pct. comandat-pct. mediu N_4 (comp. z)	$M_{z0} = [z_{N4c} - m]$
	39	Exactitatea de orientare (comp. o_z)	$AP_{oz} = \frac{1}{50} [M_{z0} - N_{z0}]$
	40	Exactitatea de orientare (comp. o)	$AP_o = (AP_{ox}^2 + AP_{oy}^2 + AP_{oz}^2)^{1/2}$
	41	Exactitatea de orientare ISO (axa b)	$AP_{bISO} = 90^\circ - \arccos(AP_o)$
	42	Medie poz. atinse pct. N_2 (comp. px)	$g = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} x_{N2j}; \quad j=1+10$
	43	Dif. pct. comandat-pct. mediu N_2 (comp. x)	$M_{x2} = [x_{N2c} - g]$
	44	Exactitatea de orientare (comp. ax)	$AP_{ax} = \frac{1}{50} [M_{x2} - N_{x2}]$
	45	Medie poz. atinse pct N_2 (comp. y)	$h = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} y_{N2j}; \quad h=1+10$
	46	Dif. pct. comandat-pct mediu N_2 (comp. y)	$M_{y2} = [y_{N2c} - h]$

Tabel 7.7 (continuare)

Scop	Nr. crt.	Mărime	Simbol; Relație de calcul
Exactitate de orientare (R); (C)	47	Exactit. de orientare (comp. ay)	$AP_{ay} = \frac{1}{50} [M_{ya} - N_{ya}]$
	48	Medie poz. atinse pct N ₂ (comp. z)	$i = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} z_{N2j}; \quad j = 1 \div 10$
	49	Dif. pct. comandat-pct. mediu N ₂ (comp. z)	$M_{za} = [z_{N2c} - i]$
	50	Exactitatea de orientare (comp. az)	$AP_{az} = \frac{1}{50} [M_{za} - N_{za}]$
	51	Exactitatea de orientare (comp. a)	$AP_a = (AP_{ax}^2 + AP_{ay}^2 + AP_{az}^2)^{1/2}$
	52	Exactitatea de orientare ISO (axa c)	$AP_{cISO} = 90^\circ - \arccos(AP_a)$
Repetabilitate de orientare (R); (C)	53	Dif. punct. atins-val. medie N ₃ (comp. px)	$A_j = (x_{N3j} - a)$
	54	Dif. poz. atins.-val. medie N ₁ (comp. x)	$B_j = (x_{N1j} - b)$
	55	Media diferențelor (comp. nx)	$S_1 = \sum_{j=1}^{10} (A_j - B_j)^2$
	56	Repetabilitate de orientare (comp. nx)	$RP_{nx} = \pm \sqrt{\frac{1}{50} S_1}$
	57	Dif. pct. atins-val. medie N ₃ (comp. y)	$C_j = (y_{N3j} - c)$
	58	Dif. pct. atins-val. medie N ₁ (comp. y)	$D_j = (y_{N1j} - d)$
	59	Media diferențelor (comp. ny)	$S_2 = \sum_{j=1}^{10} (C_j - D_j)^2$
60	Repetabilitate de orientare (comp. ny)	$RP_{ny} = \pm \sqrt{\frac{1}{50} S_2}$	
61	Dif. pct. atins-val. medie N ₃ (comp. z)	$E_j = (z_{N3j} - e)$	

Tabel 7.7 (continuare)

Scop	Nr. crt.	Mărime	Simbol; Relație de calcul
Repetabilitate de orientare (R); (C)	62	Dif. pct. atins-val. medie N_1 (comp. z)	$F_j = (z_{N1j} - f)$
	63	Media diferențelor (comp. nz)	$S_3 = \sum_{j=1}^{10} (E_j - F_j)^2$
	64	Repetabilitate de orientare (comp. nz)	$RP_{nz} = \pm \sqrt{\frac{1}{50} S_3}$
	65	Repetabilitate de orientare (comp. n)	$RP_n = [RP_{nx}^2 + RP_{ny}^2 + RP_{nz}^2]^{1/2}$
	66	Repetabilitate de orientare ISO (axa a)	$RP_{a ISO} = 90^\circ - \arccos (RP_n)$
	67	Dif. pct. atins-val. medie N_4 (comp. x)	$G_j = (x_{N4j} - k)$
	68	Media diferențelor (comp. ox)	$S_4 = \sum_{j=1}^{10} (G_j - B_j)^2$
	69	Repetabilitatea de orientare (comp ox)	$RP_{ox} = \pm \sqrt{\frac{1}{50} S_4}$
	70	Dif. pct. atins-val medie N_4 (comp. y)	$I_j = (y_{N4j} - l)$
	71	Media diferențelor (comp oy)	$S_5 = \sum_{j=1}^{10} (I_j - D_j)^2$
	72	Repetabilitate de orientare (comp. oy)	$RP_{oy} = \pm \sqrt{\frac{1}{50} S_5}$
	73	Dif. pct. atins-val medie N_4 (comp. z)	$K_j = (z_{N4j} - m)$
	74	Media diferențelor (comp. oz)	$S_6 = \sum_{j=1}^{10} (K_j - F_j)^2$
	75	Repetabilitate de orientare (comp. oz)	$RP_{oz} = \pm \sqrt{\frac{1}{50} S_6}$
	76	Repetabilitate de orientare (comp. o)	$RP_o = [RP_{ox}^2 + RP_{oy}^2 + RP_{oz}^2]^{1/2}$

Tabel 7.7 (continuare)

Scop	Nr. crt.	Mărime	Simbol; Relație de calcul
Repetabilitate de orientare (R); (C)	77	Repetabilitate de orientare ISO (axab)	$RP_{b ISO} = 90^\circ - \arccos (RP_a)$
	78	Dif. pct. atins-val medie N_2 (comp. x)	$L_j = (x_{N2j} - g)$
	79	Media diferențelor (comp. ax)	$S_7 = \sum_{j=1}^{10} (L_j - B_j)^2$
	80	Repetabilitate de orientare (comp. ax)	$RP_{ax} = \pm \sqrt{\frac{1}{50} S_7}$
	81	Dif. pct. atins-val medie N_2 (comp. y)	$P_j = (y_{N2j} - h)$
	82	Media diferențelor (comp. ay)	$S_8 = \sum_{j=1}^{10} (P_j - D_j)^2$
	83	Repetabilitate de orientare (comp ay)	$RP_{ay} = \pm \sqrt{\frac{1}{50} S_8}$
	84	Dif. pct. atins-val medie N_2 (comp. z)	$R_j = (z_{N2j} - l)$
	85	Media diferențelor (comp. az)	$S_9 = \sum_{j=1}^{10} (R_j - F_j)^2$
	86	Repetabilitate de orientare (comp. az)	$RP_{az} = \pm \sqrt{\frac{1}{50} S_9}$
	87	Repetabilitate de orientare (comp. a)	$RP_a = [RP_{ax}^2 + RP_{ay}^2 + RP_{az}^2]^{1/2}$
	88	Repetabilitate de orientare ISO (axa c)	$RP_{c ISO} = 90^\circ - \arccos (RP_a)$
Exactitate de poziționare a distanței (R)	89	Poziții comandate	$(x_{N1c}, y_{N1c}, z_{N1c}); (x_{N3c}, y_{N3c}, z_{N3c})$
	90	Poziții real atinse	$(x_{1j}, y_{1j}, z_{1j}); (x_{3j}, y_{3j}, z_{3j}); j = 1 \div 10$
	91	Distanța comandată (comp. x)	$D_{cx} = x_{cN1} - x_{cN3} $
	92	Distanța comandată (comp. y)	$D_{cy} = y_{cN1} - y_{cN3} $

Tabel 7.7 (continuare)

Scop	Nr. crt.	Mărime	Simbol; Relație de calcul
Exactitate de poziționare a distanței (R)	93	Distanța comandată (comp. z)	$D_{\alpha} = z_{cN_1} - z_{cN_3} $
	94	Distanța comandată	$D_c = (D_{\alpha}^2 + D_{\alpha y}^2 + D_{\alpha z}^2)^{1/2}$
	95	Distanță medie real atinsă (comp. x)	$\bar{D}_x = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} x_{1j} - x_{3j} $
	96	Distanța medie real atinsă (comp. y)	$\bar{D}_y = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} y_{1j} - y_{3j} $
	97	Distanța medie real atinsă (comp. z)	$\bar{D}_z = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} z_{1j} - z_{3j} $
	98	Distanța medie atinsă	$\bar{D} = [D_x^2 + D_y^2 + D_z^2]^{1/2}$
	99	Exactitatea de poziționare a distanței	$AP = D_c - \bar{D}$
Variația esențială de poziționare multidirecțională (R)	100	Poziția comandată	$(x_{N_{1c}}, y_{N_{1c}}, z_{N_{1c}})$
	101	Poziții real atinse	(x_{kj}, y_{kj}, z_{kj}) ; $j = 1 \div 10$ $k = 1 \div 3$
	102	Coordonatele punctelor medii (comp. x)	$\bar{x}_{kj} = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} x_{kj}$
	103	Coordonatele punctelor medii (comp. y)	$\bar{y}_{kj} = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} y_{kj}$
	104	Coordonatele punctelor medii (comp. z)	$\bar{z}_{kj} = \frac{1}{10} \sum_{j=1}^{10} z_{kj}$
	105	Distanța între poz. medii (pct. 1-2)	$D_1 = [(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)^2 + (\bar{y}_1 - \bar{y}_2)^2 + (\bar{z}_1 - \bar{z}_2)^2]^{1/2}$
	106	Distanța între poz. medii (pct. 1-3)	$D_2 = [(\bar{x}_1 - \bar{x}_3)^2 + (\bar{y}_1 - \bar{y}_3)^2 + (\bar{z}_1 - \bar{z}_3)^2]^{1/2}$
107	Distanța între poz. medii (pct. 2-3)	$D_3 = [(\bar{x}_2 - \bar{x}_3)^2 + (\bar{y}_2 - \bar{y}_3)^2 + (\bar{z}_2 - \bar{z}_3)^2]^{1/2}$	

Tabel 7.7 (continuare)

	Nr. crt.	Mărime	Simbol; Relație de calcul
	108	Variația exactității de poz. multidirecțională	$vAP = \max(D_1, D_2, D_3)$

7.4. Cercetări experimentale privind performanțele de situare pentru componentele celulei de sudare utilizând robotul CLOOS-ROMAT 76.

7.4.1. Celula de sudare- prezentare generală

Celula de sudare cu robotul CLOOS-ROMAT 76 este amplasată în Laboratorul de roboți industriali ai Universității "Politehnica" din Timișoara. Se compune din robotul respectiv și o masă de poziționare rotativă cu două poziții de tamponare opuse (fig. 7.16) și este destinată efectuării de cordoane sudate unor subansamble diverse. Subansamblul de sudat se fixează pe masa de poziționare, fiind adus în zona de lucru de către un robocar.

O prezentare în detaliu a celulei este redată în subcapitolul 5.3.

7.4.2. Program al cercetărilor experimentale

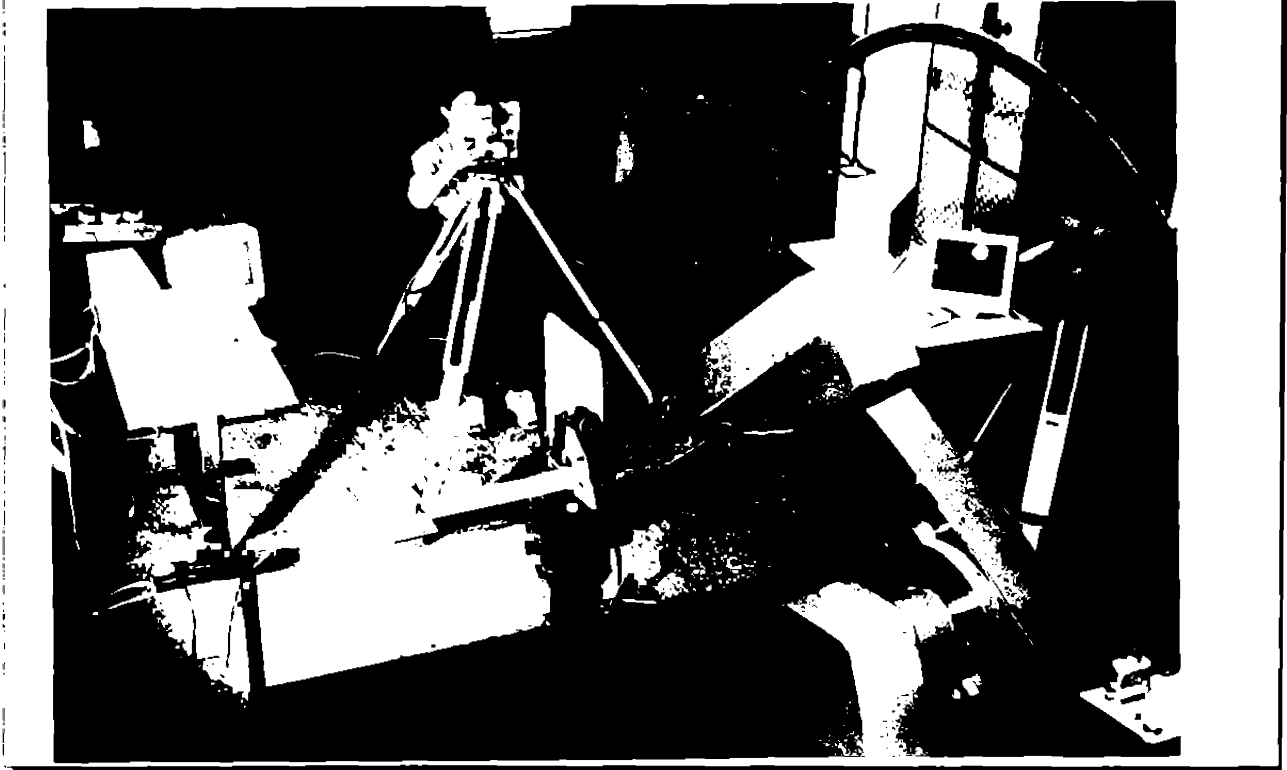
Prin programul de încercări experimentale conceput s-a urmărit determinarea caracteristicilor de exactitate și repetabilitate de situare pentru unele componente ale celulei. Pentru robot aceste caracteristici au fost determinate în subcapitolul 7.3, astfel încât în subcapitolul de față se urmărește determinarea caracteristicilor de situare pentru masa de poziționare, în scopul stabilirii unor corelații între cele două componente, în vederea compensării erorilor din sistem.

Programul de încercări urmărește două aspecte:

- 1- determinarea caracteristicilor de situare ale mesei de poziționare,

2- determinarea simultană a caracteristicilor de poziționare pentru robot și masa de poziționare.

Fig.7.16



7.4.2.1. Derularea măsurătorilor

Ambele categorii de măsurători au fost efectuate în aceleași condiții de încercare ca și pentru robot, cu parametrii de viteză și sarcină neschimbați. S-a utilizat același corp de probă - cub calibrat, fixat în dispozitivul de lucru al mesei de poziționare după cum se observă în fig. 7.17

În vederea efectuării măsurătorilor propriu-zise s-au utilizat aceleași două tahimetre electronice REC-ELTA, amplasate în aceeași configurație în raport cu robotul și masa de poziționare, deci păstrând neschimbată baza de măsurare.

Măsurătorile s-au desfășurat în două etape:

1. Determinarea caracteristicilor de situare ale mesei de poziționare

În acest scop, cubul calibrat a fost fixat în dispozitivul de lucru al mesei (fig. 7.17), cele 4 vârfuri ale sale, notate cu cifre, N_1, N_2, N_3, N_4 , fiind vizate simultan cu cele două aparate. S-au efectuat 10 măsurători, prin readucerea mesei în poziția inițială, comandată. Cu valorile unghiurilor H , și V măsurate de cele două aparate, analog subcapitolului 7.3, s-au determinat coordonatele x, y, z , ale celor 4 puncte vizate, N_1, N_2, N_3, N_4 , prezentate în tabelul de date inițiale, tabelul 7.8.

Fig.7.17



2. Determinarea simultană a caracteristicilor de poziționare pentru robot și masa de poziționare

Pentru efectuarea acestei categorii de măsurători s-a procedat în modul următor: masa de poziționare având cubul calibrat fixat în dispozitivul de lucru, a fost adusă în poziția inițială (poziție comandată). Întrucât s-a considerat numai aspectul de poziționare, nu și cel de orientare, a fost vizat cu cele două tahimetre numai vârful N_1 al cubului, stabilindu-se astfel coordonatele x, y, z ale punctului N_1 comandat.

Tabel 7.8

Nr.crt	x	y	z		Nr.crt	x	y	z
1.1	5.49878	1.76519	1.08785	← N4 →	6.1	5.49878	1.76718	1.08858
1.2	5.45255	1.76072	1.10759	N1	6.2	5.45224	1.76292	1.10769
1.3	5.44861	1.81082	1.10968	N2	6.3	5.44855	1.81235	1.10983
1.4	5.43312	1.76149	1.06173	N3	6.4	5.43302	1.76322	1.06211
2.1	5.49941	1.76377	1.08811	N4	7.1	5.49861	1.76731	1.08844
2.2	5.45289	1.75934	1.10755	N1	7.2	5.45222	1.76301	1.10793
2.3	5.44903	1.80884	1.10963	N2	7.3	5.44849	1.81315	1.11011
2.4	5.43361	1.75972	1.06172	N3	7.4	5.43284	1.76362	1.06240
3.1	5.50428	1.76791	1.08795	N4	8.1	5.49851	1.76745	1.08878
3.2	5.45256	1.76179	1.10792	N1	8.2	5.45212	1.76302	1.10803
3.3	5.44863	1.81222	1.10985	N2	8.3	5.44853	1.81286	1.11019
3.4	5.43285	1.76256	1.06183	N3	8.4	5.43276	1.76384	1.06213
4.1	5.49871	1.76653	1.08875	N4	9.1	5.49871	1.76727	1.08868
4.2	5.45235	1.76231	1.10759	N1	9.2	5.45222	1.76304	1.10804
4.3	5.44863	1.81152	1.11011	N2	9.3	5.44865	1.81258	1.11032
4.4	5.44072	1.76545	1.06123	N3	9.4	5.43295	1.76384	1.06188
5.1	5.49892	1.76678	1.08866	N4	10.1	5.49871	1.76767	1.08874
5.2	5.45231	1.76235	1.10769	N1	10.2	5.45249	1.76288	1.10804
5.3	5.44863	1.81211	1.11009	N2	10.3	5.44857	1.81289	1.11015
5.4	5.43286	1.76303	1.06185	N3	10.4	5.43311	1.76375	1.06203

Tabel 7.9

Nr.crt.	Robot			Masa poziționare		
	x	y	z	x	y	z
1	5.45255	1.76072	1.10759	5.45255	1.76072	1.10759
2	5.45245	1.76065	1.10755	5.45289	1.75934	1.10755
3	5.45256	1.76071	1.10765	5.45256	5.45256	1.10792
4	5.45291	1.76079	1.10757	5.45235	1.76231	1.10759
5	5.45256	1.76080	1.10761	5.45231	1.76235	1.10769
6	5.45253	1.76075	1.10759	5.45224	1.76292	1.10769
7	5.45248	1.76066	1.10762	5.45222	1.76301	1.10793
8	5.45254	1.76071	1.10757	5.45212	1.76302	1.10803
9	5.45258	1.76075	1.10764	5.45222	1.76304	1.10804
10	5.45262	1.76067	1.10762	5.45249	1.76288	1.10804

În această poziție comandată a lui N_1 (cubul fiind menținut în această poziție) s-a adus robotul, prin învățare, manevrându-l cu cea mai mică viteză și cu multă atenție, astfel încât vârful sârmei electrod de sudare (punctul său caracteristic) să atingă vârful N_1 al cubului. S-a memorat această poziție în calculatorul robotului și s-a retras robotul în poziția de referință. Poziția memorată s-a considerat poziție comandată pentru robot. S-au efectuat 10 încercări prin aducerea alternativă a robotului, respectiv a mesei de poziționare în poziția comandată, vizându-se alternativ vârful sârmei electrod de sudare (P.C. al robotului), respectiv vârful N_1 al cubului aflat pe masa de poziționare.

Coordonatele x , y , z , ale pozițiilor atinse de P.C. al robotului (vârful sârmei), respectiv de vârful N_1 al cubului aflat pe masa de poziționare sunt redată în tabelul 7.9.

Această încercare s-a efectuat în scopul determinării exactității și repetabilității de poziționare a celor două componente ale celulei în același punct din spațiul de lucru al robotului, pentru o comparație pertinentă a caracteristicilor de poziționare ale robotului și mesei de poziționare.

7.4.2.2 Prelucrarea datelor experimentale

Prelucrarea datelor experimentale s-a efectuat utilizând același algoritm prezentat în subcapitolul 3.3.1, elaborat în conformitate cu recomandările ISO 9283 : 90. Pentru calcul a fost utilizat programul EXCEL, întocmai ca și la încercarea robotului CLOOS-ROMAT 76.

Valorile calculate ale caracteristicilor de situare testate, precum și valori de calcul intermediare sunt prezentate în anexa 4, structurate pe cele două categorii de măsurători.

1. Caracteristici de situare ale mesei de poziționare

Sunt denumite: POZIȚIONARE CELULĂ, EXACTITATE DE ORIENTARE CELULĂ, REPETABILITATE DE ORIENTARE CELULĂ.

Analizând rezultatele obținute prin prelucrarea datelor experimentale se pot formula câteva concluzii:

1. - în ceea ce privește aspectul de poziționare, se constată că masa se poziționează cu o eroare mult mai mare decât robotul. Aceasta se datorează faptului că poziționarea mesei se realizează prin tamponare la capăt de cursă și nu prin indexare. Astfel valoarea exactității de poziționare a mesei este de aproximativ 3 ori mai mare decât a robotului, iar valoarea repetabilității de poziționare de aproximativ 5 ori. Aceste constatări vin să confirme ipotezele teoretice enunțate în capitolul 5, subcapitolul 5.3, cu privire la performanțele de poziționare a componentelor: robot, masă de poziționare, ale celulei de sudare studiate, având în vedere faptul că robotul ROMAT 76, utilizat în aplicație, a fost calibrat la fabricație;

2. - analizând valorile obținute pentru caracteristicile de orientare (exactitate și repetabilitate) ale mesei de poziționare, se constată că, acestea au valori comparabile cu cele ale robotului. Această constatare se explică prin aceea că masa de poziționare execută o singură mișcare (rotație după axa z), ca urmare orientarea mesei nu este afectată de erori mari. În consecință, în matricea erorii de situație a mesei, rel. (5.34), termenii referitori la orientare pot fi neglijați.

2. Determinarea simultană a caracteristicilor de poziționare robot-masă de poziționare

Sunt denumite: ROBOT CELULĂ ÎNCERCĂRI SIMULTANE.

Analizând rezultatele obținute prin prelucrarea datelor experimentale vizând comportamentul, din punctul de vedere al poziției, al robotului și mesei de poziționare în același punct din spațiul de lucru, se pot formula următoarele concluzii:

1. - în zona mesei de poziționare, parametri de poziționare au valori mai mici decât în cele 5 puncte analizate la încercarea robotului (subcapitolul 7.3). Astfel $AP = 0,05 \text{ mm}$ și $RP = 0,4 \text{ mm}$.

Se poate deci concluziona că, în celulă, masa de poziționare a fost amplasată în zona de lucru optimă;

2. - prin compararea caracteristicilor de poziționare ale robotului și mesei în același punct din spațiul de lucru, se evidențiază clar diferențele privind precizia celor două componente. Astfel, pentru robot: $AP = 0,05 \text{ mm}$ și $RP = 0,4 \text{ mm}$, iar pentru masa de poziționare: $AP = 1,4 \text{ mm}$ și $RP = 3,2 \text{ mm}$.

Prin urmare, componenta asupra căreia se necesită a se acționa în scopul îmbunătățirii preciziei de operare în această zonă a spațiului de lucru, este masa de poziționare. Dacă nu există posibilitatea de compensare a erorilor de poziționare ale mesei prin acțiune asupra sistemului său de comandă, respectiv asupra programului de comandă în celulă aferent mesei, se poate acționa asupra robotului, prin introducerea respectivelor compensări în programul robotului. Această operațiune nu semnifică însă o calibrare a robotului, ci o calibrare a celulei în ansamblu.

Se menționează faptul că rezultatele prelucrării tuturor datelor experimentale sunt prezentate valoric, potrivit recomandărilor ISO 9946: 1991: "Manipulating Industrial Robots - Presentation of Characteristics. S-a acceptat această modalitate de prezentare a caracteristicilor de situare întrucât cercetările experimentale întreprinse în cadrul tezei au urmărit verificarea practică a metodei de testare și algoritmului de calcul propus și nu studierea influenței diferiților factori asupra evoluției performanțelor robotului CLOOS - ROMAT 76.

CAPITOLUL 8

CONSIDERAȚII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE. APLICAȚII ȘI PERSPECTIVE

8.1. Concluzii finale și perspective ale cercetării în domeniu.

După apariția primilor roboți industriali, un important efort a fost făcut de numeroase țări industrializate, pe de o parte în direcția elaborării unor normative privind terminologia utilizată în robotică și pe de altă parte în direcția conceperii unor metodologii de încercare a roboților și de punere la punct a aparaturii necesare. Utilitatea testării performanțelor roboților industriali, derivă din necesitatea stabilirii unui limbaj comun pentru constructorii și utilizatorii de roboți industriali, în scopul comparării, sub aspect calitativ și al eficienței economice, a acestora.

Deoarece caietele de sarcini și notițele tehnice ale constructorilor de roboți nu conțin întodeauna precizări asupra tuturor caracteristicilor necesare acestora, există, în lume, preocupări foarte recente cu privire la elaborarea unor metodologii și a unor normative în domeniu.

Lucrarea de față, prin tematica propusă, aduce o contribuție în acest sens.

Un studiu bibliografic aprofundat întreprins de autoare în domeniul preocupărilor recente, la nivel mondial, în ceea ce privește performanțele roboților industriali a condus la formularea unor direcții de cercetare în domeniu, direcții corespunzând tematicii tezei de doctorat și care au fost atinse în cadrul prezentei lucrări. S-au abordat astfel unele aspecte cum ar fi:

- definirea cu un plus de precizie a performanțelor de situație ale roboților și sistemelor de fabricație flexibilă robotizată;
- definirea unor metodologii de încercare;
- elaborarea unor algoritmi de calcul corespunzători, simpli și ușor de exploatat practic;

- definirea unei instrumentații de măsură unitare pentru testarea performanțelor de situație la roboți și sisteme de fabricație flexibilă robotizată (se specifică faptul că metodele-test prezentate în capitolul 2 sunt în stadiul de cercetare la diferite universități și instituții, în țări cu tradiție în domeniul construcției de roboți: Japonia, SUA, Suedia, Germania, Franța, Italia, Anglia)

Aceste preocupări au la bază experiența acumulată în cadrul Colectivului multidisciplinar de roboți industriali ai Politehnicii Timișorene, în care a activat și autoarea. În calitate de membră a acestui colectiv, autoarea a participat la rezolvarea unor lucrări contractuale de cercetare-proiectare cu întreprinderi din țară, unele dintre acestea axate perfect pe tema prezentei teze de doctorat. [C5], [C6].

Se pot evidenția ca tendințe pentru viitoare încercări, unele direcții cum ar fi:

- proceduri de încercare comparativă a diferitelor categorii de roboți;
- studierea și elaborarea unor metode de încercare și pentru alte categorii de performanțe: de traiectorie, de încărcare, etc;
- definirea unor proceduri de încercare specifice diferitelor aplicații robotizate, etc.

8.2. Contribuții teoretice

Principalele contribuții aduse de lucrarea de față în domeniul cercetării performanțelor roboților industriali și sistemelor de fabricație flexibilă robotizată se regăsesc, cu diferite ponderi, în fiecare capitol al lucrării și se prezintă sub formă sintetică în cele ce urmează:

Capitolul 1

- evidențierea unor preocupări mondiale recente privind construcția de roboți industriali și aplicații ale acestora;
- evidențierea aspectelor corelației structură-mecanică - performanțe ale roboților industriali;

Capitolul 2

- evidențierea principalelor caracteristici de performanță în vederea încercării roboților industriali,

- definirea, cu mai multă acuratețe, a caracteristicilor de performanță propuse de ISO 9283: 90;

- definirea, cu un plus de precizie, a caracteristicilor de situare (poziționare și orientare) ale roboților industriali;

- o sistematizare în clasificarea metodelor de încercare la roboții industriali.

Capitolul 3

- contribuții la dezvoltarea algoritmului de calcul a caracteristicilor de situare după metoda $3 \times 2 \times 1$, respectiv determinarea exactității de poziționare și orientare;

- elaborarea metodei de determinare a exactității și repetabilității de situare la roboți industriali, utilizând distribuția $3 \times 3 \times 3$;

- elaborarea algoritmului de calcul a exactității de poziționare utilizând distribuția $3 \times 3 \times 3$;

- elaborarea algoritmului de calcul a exactității de orientare pentru distribuția $3 \times 3 \times 3$;

- elaborarea metodei de determinare a caracteristicilor de situare la roboți și sisteme de fabricație flexibilă robotizată, utilizând doi teodoliți;

- elaborarea algoritmului de calcul a exactității și repetabilității de poziționare pentru metoda de testare utilizând doi teodoliți;

- elaborarea algoritmului de calcul a exactității și repetabilității de orientare pentru metoda de testare utilizând doi teodoliți;

- elaborarea metodei de determinare a caracteristicilor de situare la roboți utilizând un telemetru laser;

- elaborarea algoritmului de calcul pentru determinarea matricii de situare la roboți, pentru metoda de testare utilizând un telemetru laser;

Capitolul 4

- aplicarea metodologiei de determinare a performanțelor de situare a roboților industriali la calibrarea modelului geometric al acestora;

Capitolul 5

- aplicarea problemei de situare în cazul componentelor unui sistem flexibil robotizat;

- identificarea erorilor de situare ale componentelor unei celule de fabricație flexibilă robotizată;
- exprimarea lanțului de transformări aferent fiecărei categorii de erori identificate;
- stabilirea matricilor de erori pentru fiecare componentă a sistemului;
- evidențierea efectului acestor erori în procesul tehnologic aferent celulei de fabricație flexibilă robotizată;
- stabilirea modalităților de compensare a efectului acestor erori prin calibrarea componentelor celulei sau a celulei în ansamblul ei;
- elaborarea unui studiu de caz pentru celula de sudare cu robotul CLOOS-ROMAT 76;
- formularea concluziilor privind posibilitățile de compensare a erorilor pentru celula de sudare cu robotul ROMAT 76;

Capitolul 7

- elaborarea modelului geometric direct generalizat pentru robotul REMT 5;
- stabilirea modelului diferențial al erorilor de poziționare pentru robotul REMT 5;
- calibrarea parțială (luând în considerare doar aspectul de poziționare) a modelului geometric al robotului industrial REMT 5;

8.3. Contribuții în domeniul aplicațiilor practice și industriale

Se evidențiază următoarele contribuții:

Capitolul 6

- proiectarea și realizarea unui cap de măsurare tridimensional pentru determinarea caracteristicilor de situare după distribuția $2 \times 2 \times 2$ și elaborarea metodei de încercare corespunzătoare (contract [C5]);
- proiectarea și realizarea unui cap de măsurare tridimensional pentru determinarea caracteristicilor de situare după distribuția $3 \times 2 \times 1$ sau $3 \times 3 \times 3$ (executat cu ocazia elaborării proiectului de diplomă al primilor studenți francezi, sosiți în Catedra O.M.M. în acest scop, prin mobilitate TEMPUS JEP 3517, și utilizat apoi pentru lucrări în laboratorul de roboți);

- proiectarea unui cap de măsurare 3D cu retragerea traductoarelor prin acționare electrică;

- proiectarea unui cap de măsurare bidimensional (2D) pentru determinarea caracteristicilor de exactitate și repetabilitate pe traiectorie și elaborarea metodei-test corespunzătoare;

- conceperea unei platforme de măsurare (stand) a caracteristicilor de situare la roboți și sisteme de fabricație flexibilă robotizată, utilizând doi teodoliți optici (utilizată pentru lucrări în Laboratorul de roboți)

Capitolul 7

- conceperea unei platforme de măsurare (stand) a caracteristicilor de situare la roboți și sisteme de fabricație flexibilă robotizată, utilizând un ansamblu de două tahimetre electronice REC ELTA (utilizată pentru determinări experimentale în cadrul tezei).

În afara preocupărilor tezei, s-a proiectat și realizat un dispozitiv de fixare a piesei pe masa mașinii de frezat a celulei de prelucrări mecanice din Laboratorul de roboți industriali.

8.4. Contribuții în domeniul cercetării și încercărilor experimentale

Sunt cuprinse în capitolul 7 al tezei și se pot sintetiza astfel:

- elaborarea metodei de măsurare a caracteristicilor de situare la roboți și sisteme de fabricație flexibilă robotizată utilizând două tahimetre electronice tip REC ELTA;

- testarea, prin metoda de mai sus, pentru robotul CLOOS ROMAT 76, a următoarelor caracteristici:

- exactitate de poziționare unidirecțională;
- repetabilitate de poziționare unidirecțională;
- exactitate de orientare unidirecțională;
- repetabilitate de orientare unidirecțională;
- exactitate de poziționare a distanței;
- variația exactității de poziționare multidirecțională;

- variația exactității de poziționare multidirecțională;
- prelucrarea datelor experimentale utilizând algoritmul propus în subcapitolul 3.3.1 al tezei, cu ajutorul programului EXCEL, în vederea determinării valorilor caracteristicilor de situare testate;
- testarea, prin aceeași metodă, a caracteristicilor de situare pentru celula de sudare cu robotul CLOOS ROMAT 76;
- testarea comparativă a caracteristicilor de situare ale robotului și mesei de poziționare din celula de sudare;
- prelucrarea datelor experimentale utilizând același algoritm;

Încercările experimentale întreprinse în cadrul tezei evidențiază câteva concluzii și anume:

1. - metoda de determinare a caracteristicilor de situare utilizând două tahimetre REC ELTA (sau doi teodoliți electronici) este validată de rezultatele testelor întreprinse;
2. - algoritmul de calcul corespunzător metodei, propus în teză este corect, fiind confirmat de rezultatele obținute prin prelucrarea datelor experimentale,
3. - algoritmul de calcul este simplu și ușor accesibil, ceea ce permite folosirea unor programe de calcul matematic profesioniste (EXCEL, MATHCAD etc), aflate la dispoziție pe piață;
4. - metoda și algoritmul de calcul propus permit exprimarea matricială a valorilor caracteristicilor de situare, în concordanță cu limbajul matematic unitar, utilizat în robotică;
5. - se evidențiază caracterul de generalizare a metodei și algoritmului de calcul propus, pentru orice element component al celulei (amplasarea cubului calibrat pe diferite componente sau subansamble mobile ale acestora nu constituie o problemă dificilă) și nu numai;
6. - metoda propusă este ușor aplicabilă în mediu industrial (aparatele de măsură sunt portabile), baza de măsurare fiind simplă de realizat;
7. - metoda de încercare propusă este rapidă, permițând efectuarea încercărilor în timp real. Acest lucru este posibil datorită modalității de prelevare automată a parametrilor mășurați și de prelucrare automată a datelor experimentale, aparatele având posibilitatea de cuplare, prin interfața proprie, la câte un calculator PC performant.

Se poate deci concluziona că, în ceea ce privește măsurarea performanțelor roboților industriali, lucrarea de față a adus valoroase contribuții, evoluția față de sistemele de măsurare propuse în contractul [C5] fiind evidentă.

Punerea la punct a unor metodologii și standuri de determinare a performanțelor roboților industriali își găsește utilitatea practică atât pentru calibrarea unor roboți la fabricare și calibrarea componentelor sistemelor de fabricație flexibilă robotizată, cât și pentru măsurarea unor caracteristici de performanță, la achiziționarea unui robot de pe piață.

În acest sens, lucrarea de față constituie un început pentru punerea la punct a unui laborator autorizat de încercări pentru roboți și sisteme de fabricație flexibilă robotizată în țara noastră.

Nu se poate încheia această lucrare fără a se sublinia faptul că, dacă obiectivele propuse prin tematica tezei de doctorat au fost îndeplinite, aceasta s-a datorat formării autoarei ca specialist în domeniul roboticii în cadrul Colectivului de roboți industriali ai *Politehnicii* din Timișoara precum și perfecționării, prin stagiul de specializare în Franța, la I.U.T. Bethune, în cadrul mobilităților prin proiectul TEMPUS JEP 3517.

BIBLIOGRAFIE

- [A1] Andre, Guy: Capteurs d'environnement en robotique. La perception des efforts. Techniques de l'Ingenieur, nr. 4/1991.
- [A2] Antonescu, P.: Sinteza manipuloarelor, Universitatea "Politehnica", București, 1993.
- [B1] Berg, J.L.: - Ein Meß-und Berechnungsverfahren zur Bestimmung und Verbesserung spezieller Kenngrößen beliebiger Industrieroboter, Ph.D. Thesis, Universität der Bundeswehr, Hamburg, 1990.
- [C1] Chen, W.Z.: Position Control Experiments using vision, The International Journal of Robotics Research, nr 3/ 1994, Massachusetts Institute of Technology
- [C2] Coiffet, P.: Les Robots. Hermes Publishing, Paris, France, 1981.
- [C3] Craig, J.J.: Introduction to Robotics, Mechanics and Control, Stanford University, SUA, 1986
- [C4] Crișan, I., ș.a.: Sisteme flexibile de montaj cu roboți și manipuloare, Editura tehnică, București, 1988.
- [C5] ***: Contract nr. 6/10.01.1989 "Set de dispozitive și aparate pentru verificarea performanțelor funcționale ale roboților industriali din producția proprie a beneficiarului"- beneficiar I M M U M Baia Mare.
- [C6] ***: Contract nr. 2281/46, faza 2/1992: "Cercetări fundamentale orientate și aplicative privind realizarea S.I. de fabricație integrate cu calculatorul. Sistem de măsurare a preciziei de situare a roboților din sistemele de fabricație integrate cu calculatorul", beneficiar Ministerul Educației și Învățământului
- [C7] ***: Culegeri de texte prelucrate - Roboți industriali. INID, București, 1987.
- [C8] Ching-Cheng Wang: Extrinsic Calibration of a Vision Sensor Mounted on a Robot - IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 8, nr. 2, april. 1992

- [C9] Courtois, M.: Determination tridimensionnelle a l'aide de deux theodolites. These de l'ESGT au CNAM d'Evry, sept, 1983
- [C10] ***: CLOOS-ROMAT^R - Roboter mit flexiblen Arbeitsbereichen - Carl Cloos Sveisstechnic GmbH D 6342, Haigher, 1990.
- [C11] ***: CLOS-ROMAT 76 Service Manual.
- [C12] Cojocaru, G; Kovacs, Fr.: Roboți în acțiune Probleme ale sintezei sistemelor de fabricație flexibilă, Ed. Facla, Timișoara, 1986.
- [C13] Cojocaru G; Kovacs Fr.: Roboți în acțiune. Sisteme flexibile și fabricația de serie, Ed. Facla, Timișoara, 1985.
- [D1] Decker, S.: Dynamisches, externes Roboterbahnmeßsystem, Ph.D. Thesis, Institute of Flexible Automation, Viena, 1990.
- [D2] Dielmann, H.: Informationsverarbeitung in der Robotik, Springer Lehrbuch, Berlin 1991.
- [D3] Drimer, D.ș.a.: Roboți industriali și manipuloare, Ed. Tehnică, București, 1985.
- [D4] Davidovici, A. : Modelarea, simularea și comanda manipuloarelor și a roboților industriali, Ed. Tehnică, București, 1986.
- [D5] Dombre, E.: Analyse des performances des robots manipulateurs flexibles et redundans. Contribution a leur modelisation et a leur coommande, These de Doctorat, Montpellier, France, 1981.
- [F1] Fohanno, T.: Evaluation des performances mecanique des robots industriels. Etat de la Robotique en France, tome 2, Industrie, 1982
- [F2] ***: Financial Times, 27 sept. 1995
- [F3] Fariboz Behi ș.a.: Parametric Indentification for Industrial Manipulators Using Experimental Modal Analysis, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol 7, nr.5, oct, 1991
- [G1] Gellman, M.: Utilisation des theodolites en mecanique. Les systemes de mesure par intersection (SMI) - Techniques de l'ingenieur, nr. 7/1991.
- [G2] Guilloteau, T.: Topometrie industrielle a courte distance, These de l'ENSAIS a Strasbourg, janv. 1988.

- [G3] Guittel, J. La robotique medicale, Ed. Hermes, Paris, 1988
- [G4] Geo-Ry Tang & s.a.: A Study of Three Robot Calibration Methods Based on Flat Surfaces, Mech.Mach.Theory, vol 29,nr. 2, 1994
- [G5] Gondran, M.: Informatique et metrologie, Ed. Castella, Paris, 1990
- [G6] Gafițanu, M. & s.a.: Elemente finite și de frontieră ca aplicații la calculul organelor de mașini, Ed. Tehnică, București, 1987
- [G7] Gogu, Gr.: Optimizarea modelării cuplelor și elementelor cinematice ale roboților industriali (partea I, II, III), Simpozion Prasic '94, Brașov 1994
- [H1] Hartenberg R.S., Denavit, J.: Kynematic Synthesis of linkages, Mc Graw-Hill, Book Company, New York, 1964
- [H2] Hanqi, Zhuang: A Note on the Use of Identification Jacobians for Robot Calibration, The International Jurnal of Robotics-Research, nr 1, vol 14, febr 1995
- [H3] Hanqi, Zhuang: A Complete and Parametrically Continuous Kinematic Model for Robot Manipulators. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol 8, nr.4, aug. 1992
- [H4] Heginbotham, W.; Tewari, N.K.: The Performance Testing of Positioning Systems in Industrial Automation. The Industrial Robot, Nottingham, U.K., dec 1975
- [H5] Handra-Luca, V.: Funcții de transmitere în studiul mecanismelor, Ed. Academiei, București, 1983
- [H6] Handra-Luca, V. & s.a.: Determinarea abaterilor poziționale ale mecanismelor de prindere și centrare, Simpozion RI-MTM 1984, Timișoara
- [I1] Ishii, M. & s.a.: A New Approach to Improve Absolute Positioning Accuracy of Robot Manipulators. Jurnal of Robotic Systems, 4 (1), 1987
- [I2] Ispas, V.: Aplicațiile cinematicii în construcția manipuloarelor și roboților industriali, Ed. Academiei Române, București, 1990
- [I3] Ispas, V. & s.a.: Roboți industriali, Ed. Dacia, Cluj-Napoca, '85

- [14] Iacob, Caius: Matematici clasice și moderne (vol. 1,2,3), Ed. Tehnică, București 1978
- [J1] Joonhong Lim; Dong H. Chyung: Admissible Trayectory Determination for Two Cooperating Robot, Robotica, International Journal of Information, Education and Research in Robotics, vol. 6, pg. 107 ÷ 113, 1988
- [J2] Jubin, M.; Malosse, R.: Cellules flexibles d'usinage -methodologie de conception, CETIM, Raport d'etude nr. 103-350, Centre Tehnique des industries mecaniques, 1987
- [K1] Kovacs, Fr.; Rădulescu, C.: Roboți industriali, vol. I și II, Litografia Universității Tehnice Timișoara 1992.
- [K2] Kovacs, Fr.: Manipulatoare, roboți și aplicațiile lor industriale, Editura Facla, Timișoara, 1982
- [K3] Kovacs, Fr., ș.a.: Sisteme de fabricație flexibilă robotizată, Litografia Universității Tehnice, Timișoara, 1994.
- [K4] Kovacs, Fr.; Văcărescu, V.: Metodă de măsurare a exactității de situare a R.I., folosind un telemetru laser, Al XI-lea Simpozion național R.I.-MTM 1992, vol 3, pg.1-7.
- [K5] Kovacs, Fr.; Văcărescu, V., ș.a.: Considerații asupra incertitudinii de poziționare a robotului REMT 5 (partea I, II), Simpozion național de R.I., Baia Mare , 1989
- [K6] Kovacs, Fr.; Gheorghiu, N.; Văcărescu, V. ș.a.: Program și metode pentru urmărirea și determinarea performanțelor R.I., Simpozion național de R.I., Baia Mare, 1989.
- [K7] Kovacs, Fr.; Văcărescu, I.N.; Văcărescu, V.: Considerații asupra matricilor de transformare în analiza pozițională a lanțurilor cinematice ale R.I., Simpozion internațional SYROM '89, București 1989.
- [K8] Kovacs, Fr.; Perju, D.; Văcărescu, V.; ș.a.: Metodologie pentru încercarea funcțională a R.I., Simpozion MERO '91, București, 1991
- [K9] Kovacs, Fr.: Contribuții la elaborarea unor metode unitare de sinteză a mecanismelor , Teză de doctorat, Inst Politehnic Timișoara, 1969
- [K10] Kees van den Doel; Dinesh, K. Pai: Performance Measurement for Robot Manipulators. A Unified Approach-The International Jurnal of Robotics Research, nr.1,

- vol.1, Febr. 1996
- [L1] Lurgeau, C.: Capteurs d'environnement en robotique. La perception globale: capteurs de vision et capteurs telemetriques, Techniques de l'Ingenieur, France, nr.4/1988
- [L2] Liegeois, A Analyse de performances et C.A.O., Tome 7, Hermes Publishing, France, 1984
- [L3] Liu, T.S.: A Reliability Approach to Evaluating Robot Accuracy-Performance, Mech.Mach Theory, vol. 29, nr.1/1993, Pergamon Press Ltd. Great Britain.
- [L4] Lovasz, E.Ch; Văcărescu, V.; Văcărescu, I.N.: Metodă optică de determinare a capacității de centrare a dispozitivelor de prehensiune, Analele Universității Oradea, mai 1995
- [L5] Leung Ying Tat: Performance Analysis of Synchronous Production Lines, IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol.7, nr.1, febr. 1991
- [M1] Ming-Yih Lee, ș.a.: Kinematic/Kinetic Performance Analysis and Synthesis Measures of Multi-DOF Mechanismes, Mech.Mach. Theory, vol.28, nr.5, 1993
- [M2] Masanobu, Koga; ș.a.: Coordinated Motion Control of Robot Arms Based on the Virtual Internal Model, IEEE Transactions on Robotics and Automations, vol 3, nr 1, febr 1992.
- [M3] Morris, R. Driels: Vision-Based Automatic Theodolite for Robot Calibration, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.7, nr.3, june 1991
- [M4] Masamitsu Okamura: Integrated Design and Assembly Analysis of Compliant Parts with Uncertainty Modeling and Control of Compliant and Rigid Motion Systems. ASME, vol.31, 1991
- [M5] Muhamad J.Mirza ș.a. : Performance Evaluation of a Class of M-Estimators for Surface Parameter Estimation in Noisy Range Data, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.9, nr.1, febr 1993
- [M6] Micu, C ș.a.: Aparate și sisteme de măsurare în construcția de mașini, Ed. Tehnică, București 1980
- [M7] ***: Mică enciclopedie matematică, Ed. Tehnică, București, 1982

- [N1] Nof, S.: Handbook of Industrial Robotics, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1992
- [N2] Negrean, Iuliu: Contribuții privind optimizarea parametrilor cinematici și dinamici în vederea măririi preciziei în funcționarea roboților, Teză de doctorat, Cluj Napoca, Universitatea Tehnică, 1995
- [P1] Padilla, P.: Production mecanique. Fabrication generale, Bordas, Paris, 1986
- [P2] Paul, R.P.: Robot Manipulators. Mathematics, Programming and Control. Cambridge, The MIT Press, 1981.
- [P3] Prenninger, J.P.: Position and Orientation Measurement of Industrial Robots using Laser Tracking Techniques in 6 Degrees of Freedom. Ph.D. Thesis, Institute of Flexible Automation, Viena, 1992.
- [P4] Priel, M.: Evaluation des performances des robots industriels, Techniques de l'Ingenieur, nr. 4/1988.
- [P5] Priel, M.: Caracteristiques, performances et choix, AFNOR, Paris, 1990.
- [P6] Perju, D.; Mateaș, M; ș.a.: Propuneri pentru aprecierea globală a calității performanțelor roboților industriali, București SYROM '93.
- [P7] Perju, D.; Ciupală, V. (Văcărescu, V.); Maniu, I Determinarea preciziei geometrice a mecanismelor generatoare de traiectorie, Simpozion PRASIC '82, Brașov, 1982
- [P8] Perju, D; ș.a. Criterii de performanță /indicatori de calitate pentru roboți industriali, Simpozion MTM '92, Timișoara, 1992
- [P9] Perju, D.; Mateaș, M. ș a.; Una posible estructuración de los criterios de marca de los robots industriales, Sevilla, 1993
- [P10] Psang Dain Liu ș.a.: Accuracy Analysis of Planar Linkages by the Matrix Method, Mech.Mach. Theory, vol. 27, nr.5, 1992
- [P11] Popescu, P; ș.a.: Relații de analiză cinematică a mecanismului robotului RRR-RRR, acționat de motoare de curent continuu, Simpozion RI-MTM, 1988 Cluj Napoca

- [R1] Ranky, P.G.: Robot Modeling Control and Applications with Software, I.F.S. Publications, Ltd. U.K., Springer Verlag, 1985
- [R2] Renders, J.M.: Kinematic Calibration and Geometrical Parameter Identification for Robots, I.E.E.E. Transaction, on Robotics and Automation, vol.7, nr.6/1991.
- [R3] Rodde, G.: Les systemes de production-modelisation et performances, Hermes Publishing, Paris, 1989
- [R4] *** : "Roboter-Zeitschrift fur Automation, Heft 4, Landsberg, aug. 1998
- [R5] *** : Europaischer ROBOTER-Markt 1992, Verlag moderne Industrie, Landsberg, Germany, 1992
- [R6] *** : Roboter Zeitschrift fur Automation, Heft 6, Landsberg, Germany, nov. 1991.
- [R7] *** : Robotersysteme-Journal of Autonom Systems, Springer Verlag, Germany, vol.8, nr.3/1992
- [R8] *** : Roboter-Zeitschrift fur Automation, Landsberg, Germany, mai 1995.
- [R9] *** : Europaischer ROBOTER-Markt 1994, Verlag moderne Industrie, Landsberg, Germany, 1994
- [R10] *** : Roboter-Portrait einer Branche, Landsberg, Germany, 1993
- [R11] *** : Roboter-Zeitschrift fur Automation, Landsberg, Germany, mai, 1995
- [R12] *** : Europaischer ROBOTER-Markt 1995, Markt 1995, Verlag moderne Industrie, Landsberg, Germany, febr.1995
- [R13] Renders, Jean-Michel: Kinematics Calibration an Geometrical Parameter Identification for Robots, IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol 7, nr.6, 1991
- [S1] Stefiu, C.E.: Măsurări geometrice în construcția de mașini, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1988.
- [S2] *** : Internațional Standard ISO 9283:1990, Manipulating Industrial Robots. Performances Criteria and Related Test Methodes

- [S3] *** : Normalisation française NFX-07-001/1986. Resultats de mesures, AFNOR, Paris.
- [S4] *** : International Standard ISO/TR 8373/1990. Robots manipulateurs industriels-vocabulaire.
- [S5] *** : International Standard ISO 9946/1990 Manipulating Industrial Robots. Presentation of Characteristics.
- [S6] *** : International Standard ISO 9787/1990. Manipulating industrial robots. Coordinate Systems and Motions.
- [S7] *** : V.D.I.-Richtlinie 2861/1987. Einsatzspezifische Kenngrößen von Industrierobotern. Prüfung der Kenngrößen, Stuttgart.
- [S8] *** : Normalisation française E 61-103. Robots manipulateurs industriels. Performances, AFNOR, Paris, 1986.
- [S9] Shen, Y.: An Uncertainty Analysis Method for Coordinate Referencing in Manufacturing Systems: Journal of Engineering for Industry, febr.1995.
- [S10] *** : VDI-Z Bd 129(1987), nr.3-S.57-62- Positioniergenauigkeit von Industrierobotern, Geodatische Methoden eröffnen Wege zu ihren Verbesserung.
- [S11] *** : VDI/VDE- Gesellschaft Meß-und Automatisierungstechnik-Industrieroboter Messen und Prüfen, Bericht 14, 1987, Stuttgart
- [S12] Snyder W E.: Industrial Robots. Computer Interfacing and Control-Prentice/Hall International, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1985
- [T1] Ting-Yung Wen, J.: The Attitude Control Problem, IEEE Transactions on Automatic Control, vol 36, nr. 10/1991.
- [V1] Văcărescu, V.; Văcărescu, I.: Analiza pozițională a dispozitivului de ghidare al robotului RSL-1, Simpozion național, PRASIC '90, vol.I, lucr.37, Braşov
- [V2] Văcărescu, V., ş.a.: Considerații asupra exactității și repetabilității de situare la R.I. (partea I, II). Al VI-lea Simpozion internațional SYROM '93,pg.273-280, București

- [V3] Văcărescu, V.; Văcărescu, I.: Expriamarea matricială a exactității de situare la R.I., Al XI-lea Simpozion național RI-MTM '92, pg.1-5, Timișoara
- [V4] Văcărescu, V.; Văcărescu, I.: Cap de măsurare tridimensional pentru determinarea exactității și repetabilității de situare la R.I. Al XI-lea Simpozion național MTM-RI '92, lucr.22, vol.3, Timișoara
- [V5] Văcărescu, V.; Kovacs, Fr. ș.a.: O nouă metodă de determinare a matricii erorii de situare la R.I. (partea I, II), Al XI-lea Simpozion național MTM-RI '92, vol.3, lucr.23, 24.
- [V6] Văcărescu, V.; Lovasz, E.; Văcărescu, I.: Metodă și tehnică de determinare a exactității de situare pentru R.I. (partea I, II), Analele Universității Tehnice, Oradea, mai 1994
- [V7] Văcărescu, V.; Văcărescu, I.: Model de calcul pentru determinarea exactității de poziționare și orientare după metoda $3 \times 3 \times 3$ (partea I,II), Al XII-lea Simpozion național MTM-R.I. '94, Timișoara
- [V8] Văcărescu, V.: Fundamentarea teoretică și practică a parametrului de performanță-exactitate de situare a R.I., Analele Universității Tehnice Oradea, mai 1995
- [V9] Văcărescu, I.N.: Sinteza structurală și dimensională optimală a mecanismelor generatoare de traiectorie din construcția roboților industriali, Teză de doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1989
- [V10] Văcărescu, V.: Contribuții la studiul unui set unitar de aparate și dispozitive pentru încercarea roboților industriali și a sistemelor de fabricație flexibilă robotizate, Referat pentru doctorat nr.2, Universitatea "Politehnica" din Timișoara, 1996
- [V11] Văcărescu, V.: Stadiul actual al cercetărilor și realizărilor în domeniul încercării performanțelor roboților industriali și a sistemelor flexibile robotizate, Referat pentru doctorat nr.1, Universitatea "Politehnica" din Timișoara, 1993
- [V12] Văcărescu, I. N.; Văcărescu, V.: Determinarea erorilor de poziționare la mecanismele generatoare de traiectorie, Simpozion național ROBOT '86, Brașov, 1986

- [V13] Văcărescu, I. Erori de poziționare absolute și relative la dispozitivul de ghidare, Sesiunea de comunicări științifice pentru tineret, U.M. Timișoara, 1988.
N.; Văcărescu, V.:
- [V14] Văcărescu, I. Analiza cinematică a robotului REMT-5, Al treilea Simpozion de roboți industriali, Cluj Napoca, 1988.
N.; Văcărescu, V.:
- [V15] Văcărescu, I. Considerații asupra sintezei structurale a lanțurilor cinematice componente ale MGT, Simpozion internațional SYROM '89, București 1989.
N.; Văcărescu, V.:
- [V16] Văcărescu, I. Cercetări experimentale privind unele caracteristici funcționale ale robotului REMT-5, Simpozion național ROBOT '89, Baia Mare, 1989.
N.; Văcărescu, V.:
- [V17] Văcărescu, V.; Văcărescu, I.N. și a. Dispozitiv tridimensional (3D) pentru determinarea exactității și incertitudinii de poziționare și orientare la R.I., Simpozion național ROBOT '89, Baia Mare, 1989.
- [V18] Văcărescu, I. Optimizarea traiectoriei și a legilor de mișcare a punctului caracteristic (partea I, II) Al XII-lea Simpozion Național de R.I., Timișoara, 1994.
N.; Văcărescu, V.:
- [V19] Vukobratovic, M.: Accuracy of the Robot Positioning and Orientation Assessed via ith Manufacturing Tolerances, Mech Mach. Theory, nr.1, vol.30, 1995
- [V20] Vicent, R. Topometrie spațiale a courte distance, Revue XYZ nr.11, Association Francaise de Topographie
- [V21] Vincze, M., Prenninger, J.P.: A Laser Tracking System to Measure Position and Orientation of Robot and Effectors under Motion. The International Journal of Robotics Research, vol 13, nr.4/1994, Massachusetts Institute of Technology.
- [V22] Vukobratovic, M.: Kinematics and Trajectory Sinthesis of Manipulation Robots, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, 1986
- [V23] Vukobratovic, M.: Real-Time Dynamics of Manipulation Robots, Spinger Verlag, Germany, 1985
- [V24] Vukobratovic, M.: Non-Adaptive and Adaptive Control of Manipulation Robots, Springer Verlag, Germany, 1985

-
- [W1] Warnecke, H.J.; Industrieroboter-Handbuch für Industrie und Schraft, R.D.: Wissenschaft, Springer Verlag, Berlin, 1990
- [W2] Warnecke, H.J.: Resultats of the Examination of Industrial Robots on a Test Stuttgart, IPA- Stuttgart, 1989
- [W3] Warnecke, H.J.: Entwicklungstendenzen in der Montage-IPA Stuttgart, 1988
- [W4] Warnecke, H.J.: Industrieroboter, Band 4, Krausskopf-Verlag, GmbH, Mainz, 1979
- [W5] Wloka, W.D.: Robotersysteme, Technische Grundlagen (vol.1,2,3), Springer Verlag, Berlin, 1992
- [W6] Wen Ting-Yung John: The Attitude Control Problem, IEEE Transactions on Automatic Control, vol 36, nr.10, oct.1991
- [W7] Wloka, W.D.: Robotersimulation, Springer Verlag, Germany, 1991
- [W8] Weijiang Zhao : Sensorgeführte Industrieroboter zur Bahnverfolgung, Hauser Verlag, Germany, 1990

ANEXA 1

MĂSURĂTORI ROBOT ROMAT-76

1 PROIECT :Robot
 2 Aufr.Nr.:
 3 Beobacht.:
 4 Reflektor:35
 5 Instr.Nr.:196394
 6 DATA 02.06.1996
 7 OPERATOR :
 8 INTR. VALORI m 1.000000 ih 1.5700 ih 1.5700
 9 INTR. VALORI (T/P AUTOM.) T_ 23 P 100.5 A 0.0000
 10 100
 11 MASURARE/E-HZ-V
 12 101 V E 5.9859 Hz 0.0000 V1 99.7112
 13 INTR. VALORI m 1.000000 ih 2.0000 ih 1.4800
 14 INTR. VALORI (T/P AUTOM.) T_ 23 P 100.5 A 0.0000
 15 101
 16 MASURARE/E-HZ-V
 17 100 V E 5.9829 Hz 200.0000 V1 99.1762
 18 MASURARE/HZ-V

POZIȚIA I.

20 10	Hz	16.5485	V1	97.6990
21 11	Hz	16.6795	V1	97.5815
491 12	Hz	16.8200	V1	97.2035
492 13	Hz	17.0735	V1	97.7520
493 14	Hz	16.5470	V1	97.7035
494 15	Hz	16.6815	V1	97.5860
495 16	Hz	16.8235	V1	97.2045
496 17	Hz	17.0735	V1	97.7520
497 18	Hz	16.5525	V1	97.6990
498 19	Hz	16.6800	V1	97.5850
499 20	Hz	16.8165	V1	97.2045
500 21	Hz	17.0730	V1	97.7515
501 22	Hz	16.5480	V1	97.7025
502 23	Hz	16.6825	V1	97.5835
503 24	Hz	16.8200	V1	97.2030
504 25	Hz	17.0735	V1	97.7530
505 26	Hz	16.5500	V1	97.7030
506 27	Hz	16.6805	V1	97.5855
507 28	Hz	16.8205	V1	97.2035
508 29	Hz	17.0755	V1	97.7560
509 30	Hz	16.5495	V1	97.6995

510	31	Hz	16.6820	V1	97.5860
511	32	Hz	16.8205	V1	97.2030
512	33	Hz	17.0740	V1	97.7535
513	34	Hz	16.5470	V1	97.7005
514	35	Hz	16.6800	V1	97.5865
515	36	Hz	16.8210	V1	97.2055
516	37	Hz	17.0725	V1	97.7540
517	38	Hz	16.5475	V1	97.7035
518	39	Hz	16.6830	V1	97.5855
519	40	Hz	16.8230	V1	97.2010
520	41	Hz	17.0745	V1	97.7525
521	42	Hz	16.5495	V1	97.7015
522	43	Hz	16.6855	V1	97.5860
523	44	Hz	16.8220	V1	97.2015
524	45	Hz	17.0740	V1	97.7530
525	46	Hz	16.5500	V1	97.7015
526	47	Hz	16.6830	V1	97.5860
527	48	Hz	16.8225	V1	97.2005
528	49	Hz	17.0735	V1	97.7555
129	10	Hz	65.9562	V1	90.1718
130	11	Hz	67.2352	V1	89.7260
131	12	Hz	67.1921	V1	88.5798
132	13	Hz	67.9280	V1	90.4466
133	14	Hz	65.9612	V1	90.1708
134	15	Hz	67.2310	V1	89.7208
135	16	Hz	67.1966	V1	88.5790
136	17	Hz	67.9466	V1	90.4450
137	18	Hz	65.9600	V1	90.1714
138	19	Hz	67.2310	V1	89.7192
139	20	Hz	67.1918	V1	88.5776
140	21	Hz	67.9404	V1	90.4460
141	22	Hz	65.9578	V1	90.1748
142	23	Hz	67.2324	V1	89.7208
143	24	Hz	67.1874	V1	88.5820
144	25	Hz	67.9454	V1	90.4492
145	26	Hz	65.9648	V1	90.1820
146	27	Hz	67.2318	V1	89.7232
147	28	Hz	67.1928	V1	88.5798
148	29	Hz	67.9394	V1	90.4446
149	30	Hz	65.9582	V1	90.1774
150	31	Hz	67.2344	V1	89.7190
151	32	Hz	67.1946	V1	88.5742
152	33	Hz	67.9418	V1	90.4440
153	34	Hz	65.9568	V1	90.1724
154	35	Hz	67.2310	V1	89.7192
155	36	Hz	67.1940	V1	88.5804
156	37	Hz	67.9442	V1	90.4466
157	38	Hz	65.9530	V1	90.1778
158	39	Hz	67.2352	V1	89.7230

159 40	Hz	67.1910	V1	88.5834
160 41	Hz	67.9418	V1	90.4456
161 42	Hz	65.9568	V1	90.1756
162 43	Hz	67.2326	V1	89.7192
163 44	Hz	67.1960	V1	88.5836
164 45	Hz	67.9430	V1	90.4488
165 46	Hz	65.9586	V1	90.1746
166 47	Hz	67.2320	V1	89.7220
167 48	Hz	67.1942	V1	88.5840
168 49	Hz	67.9456	V1	90.4472

POZIȚIA II.

=====

529 200	Hz	17.1285	V1	97.5850
530 201	Hz	17.2715	V1	97.4595
531 202	Hz	17.4120	V1	97.0710
532 203	Hz	17.6730	V1	97.6375
533 204	Hz	17.1250	V1	97.5855
534 205	Hz	17.2705	V1	97.4600
535 206	Hz	17.4110	V1	97.0680
536 207	Hz	17.6750	V1	97.6365
537 208	Hz	17.1275	V1	97.5855
538 209	Hz	17.2715	V1	97.4615
539 210	Hz	17.4140	V1	97.0660
540 211	Hz	17.6740	V1	97.6360
541 212	Hz	17.1265	V1	97.5830
542 213	Hz	17.2715	V1	97.4575
543 214	Hz	17.4130	V1	97.0730
544 215	Hz	17.6740	V1	97.6370
545 216	Hz	17.1295	V1	97.5840
546 217	Hz	17.2720	V1	97.4595
547 218	Hz	17.4130	V1	97.0680
548 219	Hz	17.6735	V1	97.6390
549 220	Hz	17.1290	V1	97.5835
550 221	Hz	17.2720	V1	97.4615
551 222	Hz	17.4100	V1	97.0660
552 223	Hz	17.6735	V1	97.6375
553 224	Hz	17.1275	V1	97.5855
554 225	Hz	17.2745	V1	97.4585
555 226	Hz	17.4130	V1	97.0710
556 227	Hz	17.6750	V1	97.6375
557 228	Hz	17.1250	V1	97.5855
558 229	Hz	17.2745	V1	97.4590
559 230	Hz	17.4120	V1	97.0685
560 231	Hz	17.6740	V1	97.6385
561 232	Hz	17.1315	V1	97.5825
562 233	Hz	17.2715	V1	97.4595
563 234	Hz	17.4120	V1	97.0685

564	235	Hz	17.6745	V1	97.6380
565	236	H γ	17.1280	V1	97.5835
566	237	Hz	17.2720	V1	97.4595
567	238	Hz	17.4100	V1	97.0685
568	239	Hz	17.6755	V1	97.6385
169	200	H γ	72.0166	V1	89.5498
170	201	Hz	73.4342	V1	89.0872
171	202	Hz	73.3348	V1	87.9034
172	203	Hz	74.0578	V1	89.8638
173	204	Hz	72.0510	V1	89.5468
174	205	Hz	73.4356	V1	89.0832
175	206	Hz	73.3314	V1	87.9016
176	207	Hz	74.0590	V1	89.8636
177	208	Hz	72.0472	V1	89.5444
178	209	H γ	73.4394	V1	89.0874
179	210	Hz	73.3332	V1	87.8978
180	211	Hz	74.0582	V1	89.8646
181	212	Hz	72.0462	V1	89.5474
182	213	Hz	73.4408	V1	89.0962
183	214	Hz	73.3386	V1	87.8980
184	215	Hz	74.0704	V1	89.8680
185	216	Hz	72.0510	V1	89.5474
186	217	Hz	73.4396	V1	89.0956
187	218	Hz	73.3334	V1	87.9004
188	219	Hz	74.0580	V1	89.8702
189	220	Hz	72.0512	V1	89.5456
190	221	Hz	73.4398	V1	89.0948
191	222	Hz	73.3264	V1	87.9018
192	223	Hz	74.0628	V1	89.8668
193	224	H γ	72.0448	V1	89.5520
194	225	Hz	73.4320	V1	89.0830
195	226	Hz	73.3330	V1	87.9014
196	227	Hz	74.0634	V1	89.8648
197	228	Hz	72.0500	V1	89.5444
198	229	Hz	73.4334	V1	89.0884
199	230	Hz	73.3304	V1	87.9026
200	231	Hz	74.0630	V1	89.8628
201	232	Hz	72.0482	V1	89.5424
202	233	Hz	73.4318	V1	89.0916
203	234	Hz	73.3290	V1	87.9016
204	235	Hz	74.0654	V1	89.8660
205	236	Hz	72.0478	V1	89.5438
206	237	Hz	73.4342	V1	89.0884
207	238	Hz	73.3336	V1	87.9020
208	239	Hz	74.0628	V1	89.8636

POZIȚIA III.

=====

569 300	Hz	17.2600	V1	100.0700
570 301	Hz	17.3990	V1	99.9185
571 302	Hz	17.3385	V1	99.4975
572 303	Hz	17.8230	V1	99.9165
573 304	Hz	17.2605	V1	100.0680
574 305	Hz	17.3970	V1	99.9185
575 306	Hz	17.3105	V1	99.4965
576 307	Hz	17.8230	V1	99.9120
577 308	Hz	17.2600	V1	100.0705
578 309	Hz	17.3995	V1	99.9175
579 310	Hz	17.3110	V1	99.4950
580 311	Hz	17.8250	V1	99.9110
581 312	Hz	17.2565	V1	100.0730
582 313	Hz	17.4005	V1	99.9185
583 314	Hz	17.3445	V1	99.4955
584 315	Hz	17.8245	V1	99.9125
585 316	Hz	17.2575	V1	100.0720
586 317	Hz	17.4000	V1	99.9165
587 318	Hz	17.3440	V1	99.4935
588 319	Hz	17.8225	V1	99.9115
589 320	Hz	17.2600	V1	100.0705
590 321	Hz	17.3980	V1	99.9195
591 322	Hz	17.3445	V1	99.4950
592 323	Hz	17.8245	V1	99.9115
593 324	Hz	17.2605	V1	100.0705
594 325	Hz	17.3985	V1	99.9180
595 326	Hz	17.3455	V1	99.4940
596 327	Hz	17.8230	V1	99.9110
597 328	Hz	17.2580	V1	100.0700
598 329	Hz	17.3990	V1	99.9165
599 330	Hz	17.3430	V1	99.4950
600 331	Hz	17.8240	V1	99.9125
601 332	Hz	17.2600	V1	100.0700
602 333	Hz	17.3995	V1	99.9180
603 334	Hz	17.3110	V1	99.4960
604 335	Hz	17.8245	V1	99.9115
605 336	Hz	17.2605	V1	100.0715
606 337	Hz	17.4010	V1	99.9170
607 338	Hz	17.3435	V1	99.4915
608 339	Hz	17.8240	V1	99.9125
209 300	Hz	72.3972	V1	97.9342
210 301	Hz	73.7424	V1	97.3816
211 302	Hz	73.2420	V1	95.9638
212 303	Hz	74.2492	V1	97.4160
213 304	Hz	72.3950	V1	97.9274

214 305	Hz	73.7344	V1	97.3790
215 306	Hz	73.2496	V1	95.9588
216 307	Hz	74.2620	V1	97.4138
217 308	Hz	72.3984	V1	97.9288
218 309	Hz	73.7334	V1	97.3786
219 310	Hz	73.2526	V1	95.9576
220 311	Hz	74.2580	V1	97.4212
221 312	Hz	72.4002	V1	97.9282
222 313	Hz	73.7304	V1	97.3802
223 314	Hz	73.2424	V1	95.9540
224 315	Hz	74.2574	V1	97.4156
225 316	Hz	72.3974	V1	97.9378
226 317	Hz	73.7296	V1	97.3822
227 318	Hz	73.2448	V1	95.9578
228 319	Hz	74.2582	V1	97.4146
229 320	Hz	72.3988	V1	97.9370
230 321	Hz	73.7314	V1	97.3852
231 322	Hz	73.2420	V1	95.9530
232 323	Hz	74.2632	V1	97.4180
233 324	Hz	72.4072	V1	97.9392
234 325	Hz	73.7342	V1	97.3732
235 326	Hz	73.2394	V1	95.9606
236 327	Hz	74.2592	V1	97.4184
237 328	Hz	72.4022	V1	97.9306
238 329	Hz	73.7424	V1	97.3830
239 330	Hz	73.2546	V1	95.9538
240 331	Hz	74.2580	V1	97.4208
241 332	Hz	72.3992	V1	97.9392
242 333	Hz	73.7294	V1	97.3824
243 334	Hz	73.2424	V1	95.9588
244 335	Hz	74.2598	V1	97.4156
245 336	Hz	72.4010	V1	97.9382
246 337	Hz	73.7398	V1	97.3846
247 338	Hz	73.2478	V1	95.9530
248 339	Hz	74.2582	V1	97.4142

POZIȚIA IV.

609 400	Hz	16.5855	V1	100.0705
610 401	Hz	16.7190	V1	99.9215
611 402	Hz	16.6725	V1	99.5120
612 403	Hz	17.1345	V1	99.9140
613 404	Hz	16.5935	V1	100.0705
614 405	Hz	16.7245	V1	99.9185
615 406	Hz	16.6730	V1	99.5105
616 407	Hz	17.1340	V1	99.9155
617 408	Hz	16.5885	V1	100.0675
618 409	Hz	16.7175	V1	99.9215

619 410	Hz	16.6680	V1	99.5100
620 411	Hz	17.1355	V1	99.9110
621 412	Hz	16.5855	V1	100.0700
622 413	Hz	16.7190	V1	99.9195
623 414	Hz	16.6695	V1	99.5095
624 415	Hz	17.1345	V1	99.9145
625 416	Hz	16.5890	V1	100.0675
626 417	Hz	16.7215	V1	99.9210
627 418	Hz	16.6730	V1	99.5085
628 419	Hz	17.1385	V1	99.9135
629 420	Hz	16.5890	V1	100.0665
630 421	Hz	16.7230	V1	99.9185
631 422	Hz	16.6730	V1	99.5095
632 423	Hz	17.1340	V1	99.9160
633 424	Hz	16.5885	V1	100.0710
634 425	Hz	16.7220	V1	99.9195
635 426	Hz	16.6720	V1	99.5095
636 427	Hz	17.1335	V1	99.9140
637 428	Hz	16.5920	V1	100.0705
638 429	Hz	16.7225	V1	99.9185
639 430	Hz	16.6675	V1	99.5110
640 431	Hz	17.1370	V1	99.9120
641 432	Hz	16.5910	V1	100.0705
642 433	Hz	16.7230	V1	99.9190
643 434	Hz	16.6715	V1	99.5095
644 435	Hz	17.1360	V1	99.9150
645 436	Hz	16.5925	V1	100.0665
646 437	Hz	16.7210	V1	99.9195
647 438	Hz	16.6720	V1	99.5080
648 439	Hz	17.1360	V1	99.9165
249 400	Hz	66.3388	V1	98.0070
250 401	Hz	67.5742	V1	97.4734
251 402	Hz	67.1200	V1	96.1044
252 403	Hz	68.2100	V1	97.5114
253 404	Hz	66.3404	V1	98.0044
254 405	Hz	67.5740	V1	97.4758
255 406	Hz	67.1148	V1	96.1132
256 407	Hz	68.2040	V1	97.5140
257 408	Hz	66.3380	V1	97.9986
258 409	Hz	67.5722	V1	97.4760
259 410	Hz	67.1152	V1	96.1162
260 411	Hz	68.2006	V1	97.5076
261 412	Hz	66.3384	V1	98.0018
262 413	Hz	67.5722	V1	97.4780
263 414	Hz	67.1126	V1	96.1124
264 415	Hz	68.2010	V1	97.5096
265 416	Hz	66.3360	V1	98.0122
266 417	Hz	67.5742	V1	97.4722
267 418	Hz	67.1142	V1	96.1174

268 419	Hz	68.2022	V1	97.5096
269 420	Hz	66.3308	V1	98.0032
270 421	Hz	67.5708	V1	97.4766
271 422	Hz	67.1120	V1	96.1168
272 423	Hz	68.2058	V1	97.5100
273 424	H γ	66.3328	V1	98.0122
274 425	H γ	67.5704	V1	97.4776
275 426	Hz	67.1136	V1	96.1134
276 427	Hz	68.2012	V1	97.5088
277 428	Hz	66.3332	V1	98.0022
278 429	Hz	67.5698	V1	97.4802
279 430	Hz	67.1130	V1	96.1176
280 431	Hz	68.2010	V1	97.5098
281 432	Hz	66.3362	V1	97.9980
282 433	H γ	67.5676	V1	97.4716
283 434	Hz	67.1168	V1	96.1148
284 435	Hz	68.2000	V1	97.5098
285 436	Hz	66.3352	V1	98.0064
286 437	Hz	67.5698	V1	97.4758
287 438	Hz	67.1132	V1	96.1138
288 439	Hz	68.2024	V1	97.5078

POZIȚIA V.

=====

649 500	Hz	16.9275	V1	99.0090
650 501	H γ	17.0650	V1	98.8480
651 502	Hz	17.0150	V1	98.4330
652 503	Hz	17.4855	V1	98.8385
653 504	Hz	16.9270	V1	99.0075
654 505	H γ	17.0635	V1	98.8470
655 506	Hz	17.0125	V1	98.4305
656 507	Hz	17.4850	V1	98.8405
657 508	Hz	16.9285	V1	99.0065
658 509	Hz	17.0665	V1	98.8450
659 510	Hz	17.0160	V1	98.4325
660 511	Hz	17.4860	V1	98.8410
661 512	Hz	16.9270	V1	99.0070
662 513	Hz	17.0665	V1	98.8465
663 514	Hz	17.0110	V1	98.4340
664 515	Hz	17.4845	V1	98.8405
665 516	Hz	16.9295	V1	99.0060
666 517	Hz	17.0645	V1	98.8450
667 518	Hz	17.0140	V1	98.4310
668 519	Hz	17.4860	V1	98.8410
669 520	Hz	16.9305	V1	99.0040
670 521	Hz	17.0655	V1	98.8460
671 522	Hz	17.0130	V1	98.4325

672 523	Hz	17.4655	V1	98.8430
673 524	Hz	16.9285	V1	99.0015
674 525	Hz	17.0630	V1	98.8460
675 526	Hz	17.0105	V1	98.4305
676 527	Hz	17.1865	V1	98.8435
677 528	H γ	16.9260	V1	99.0090
678 529	Hz	17.0645	V1	98.8475
679 530	Hz	17.0175	V1	98.4305
680 531	Hz	17.1860	V1	98.8435
681 532	Hz	16.9260	V1	99.0065
682 533	H γ	17.0940	V1	98.8440
683 534	Hz	17.0165	V1	98.4300
684 535	Hz	17.1820	V1	98.8410
685 536	Hz	16.9295	V1	99.0065
686 537	H γ	17.0645	V1	98.8460
687 538	Hz	17.0150	V1	98.4310
688 539	Hz	17.1865	V1	98.8435
289 500	Hz	69.4024	V1	94.3830
290 501	Hz	70.6840	V1	93.8166
291 502	Hz	70.2098	V1	92.4490
292 503	Hz	71.2660	V1	93.9232
293 504	Hz	69.3918	V1	94.3814
294 505	Hz	70.6908	V1	93.8140
295 506	Hz	70.2102	V1	92.4544
296 507	Hz	71.2666	V1	93.9214
297 508	H γ	69.4074	V1	94.3876
298 509	Hz	70.6932	V1	93.8142
299 510	Hz	70.2144	V1	92.4574
300 511	Hz	71.2670	V1	93.9204
301 512	H γ	69.4020	V1	94.3860
302 513	Hz	70.6886	V1	93.8174
303 514	Hz	70.2030	V1	92.4514
304 515	Hz	71.2698	V1	93.9211
305 516	Hz	69.3964	V1	94.3854
306 517	Hz	70.6818	V1	93.8126
307 518	Hz	70.2156	V1	92.4526
308 519	Hz	71.2696	V1	93.9226
309 520	Hz	69.4000	V1	94.3822
310 521	H γ	70.6820	V1	93.8108
311 522	Hz	70.2092	V1	92.4552
312 523	Hz	71.2710	V1	93.9240
313 524	Hz	69.3990	V1	94.3770
314 525	Hz	70.6850	V1	93.8114
315 526	Hz	70.2052	V1	92.4532
316 527	Hz	71.2672	V1	93.9212
317 528	Hz	69.4026	V1	94.3816
318 529	Hz	70.6890	V1	93.8054
319 530	Hz	70.2104	V1	92.4540
320 531	Hz	71.2684	V1	93.9242

321	532	Hz	69.3976	V1	94.3844
322	533	Hz	70.6962	V1	93.8156
323	534	Hz	70.2188	V1	92.4520
324	535	Hz	71.2690	V1	93.9248
325	536	Hz	69.3976	V1	94.3786
326	537	Hz	70.6896	V1	93.8118
327	538	Hz	70.2064	V1	92.4554
328	539	Hz	71.2640	V1	93.9232

POZIȚIA INIȚIALĂ

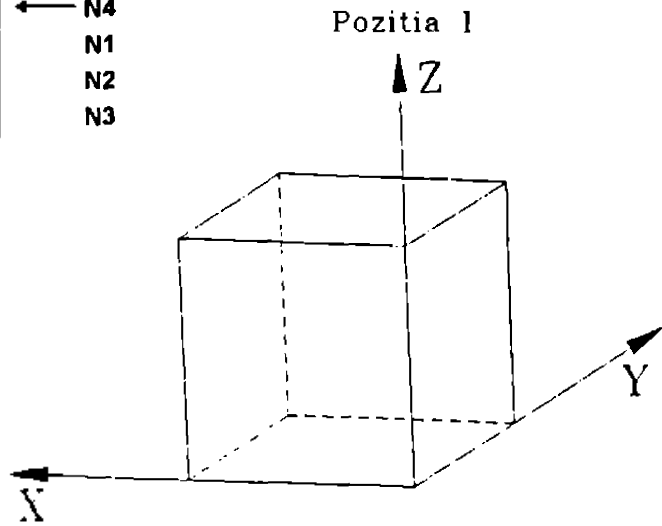
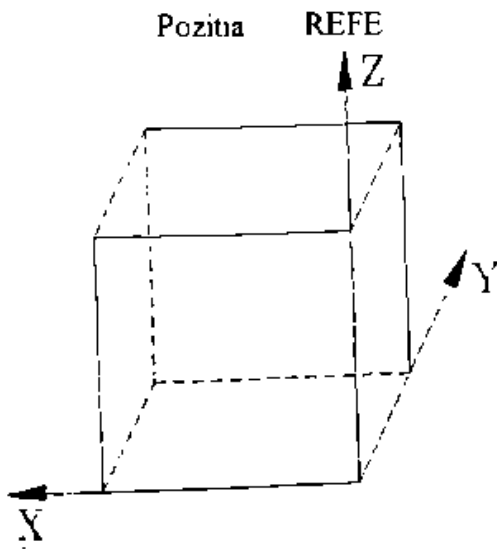
=====

689	600	Hz	16.0335	V1	95.3010
690	601	Hz	16.1560	V1	95.2660
691	602	Hz	16.1350	V1	94.8320
692	603	Hz	16.5805	V1	95.2505
693	604	Hz	16.8985	V1	94.8865
330	600	Hz	65.2050	V1	82.0694
331	601	Hz	66.5334	V1	81.8596
332	602	Hz	66.4684	V1	80.4718
333	603	Hz	67.2320	V1	82.1348
334	604	Hz	72.6890	V1	80.5028

ANEXA 2

POZITIA INITIALA			
Nr Crt.	Xc	Yc	Zc
0.11	7,10525	1,88972	1,83583
0.12	7,05593	1,89223	1,84735
0.13	7,06912	1,91245	1,89196
0.14	7,05453	1,93872	1,82843

← N4
N1
N2
N3

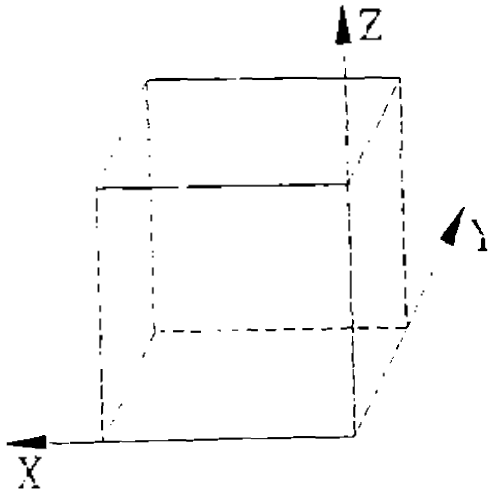


Nr Crt.	X	Y	Z
1.01	7,10524	1,88971	1,83582
1.02	7,05591	1,89223	1,84735
1.03	7,06912	1,91245	1,89199
1.04	7,05453	1,93874	1,82844
1.11	7,10495	1,88945	1,83534
1.12	7,05632	1,89255	1,84727
1.13	7,06926	1,91283	1,89181
1.14	7,05373	1,93845	1,82844
1.21	7,10544	1,89022	1,83587
1.22	7,05613	1,89236	1,84735
1.23	7,06885	1,91194	1,89173
1.24	7,05394	1,93845	1,82854
1.31	7,10513	1,88968	1,83548
1.32	7,05636	1,89264	1,84745
1.33	7,06932	1,91257	1,89203
1.34	7,05376	1,93846	1,82835
1.41	7,10495	1,88981	1,83546
1.42	7,05604	1,89233	1,84725
1.43	7,06916	1,91257	1,89196
1.44	7,05422	1,93886	1,82801

← N4 →
N1
N2
N3
← N4 →
N1
N2
N3
← N4 →
N1
N2
N3
← N4 →
N1
N2
N3

Nr Crt.	X	Y	Z
1.51	7,10525	1,88982	1,83588
1.52	7,05614	1,89255	1,84715
1.53	7,06903	1,91253	1,89201
1.54	7,05393	1,93854	1,82867
1.61	7,10512	1,88954	1,83575
1.62	7,05611	1,89237	1,84713
1.63	7,06914	1,91256	1,89179
1.64	7,05372	1,93832	1,82823
1.71	7,10534	1,88961	1,83536
1.72	7,05622	1,89267	1,84725
1.73	7,06945	1,91283	1,89225
1.74	7,05402	1,93866	1,82846
1.81	7,10535	1,88985	1,83567
1.82	7,05653	1,89303	1,84727
1.83	7,06915	1,91265	1,89211
1.84	7,05394	1,93854	1,82835
1.91	7,10523	1,88993	1,83565
1.92	7,05631	1,89277	1,84728
1.93	7,06924	1,91273	1,89225
1.94	7,05373	1,93841	1,82804

Pozitia REFE



Nr Crt.	X	Y	Z
2.51	6,87638	1,89608	1,84069
2.52	6,82789	1,89919	1,85302
2.53	6,84018	1,91892	1,89711
2.54	6,82553	1,94503	1,83348
2.61	6,87601	1,89553	1,84058
2.62	6,82778	1,89907	1,85293
2.63	6,84028	1,91679	1,89741
2.64	6,82559	1,94528	1,83362
2.71	6,87638	1,89604	1,84071
2.72	6,82769	1,89918	1,85267
2.73	6,84038	1,91919	1,89759
2.74	6,82545	1,94513	1,83368
2.81	6,87632	1,89578	1,84087
2.82	6,82759	1,89917	1,85316
2.83	6,84013	1,91904	1,89588
2.84	6,82504	1,94487	1,83352
2.91	6,87627	1,89613	1,84078
2.92	6,82769	1,89918	1,85301
2.93	6,84028	1,91911	1,89738
2.94	6,82548	1,94512	1,83329

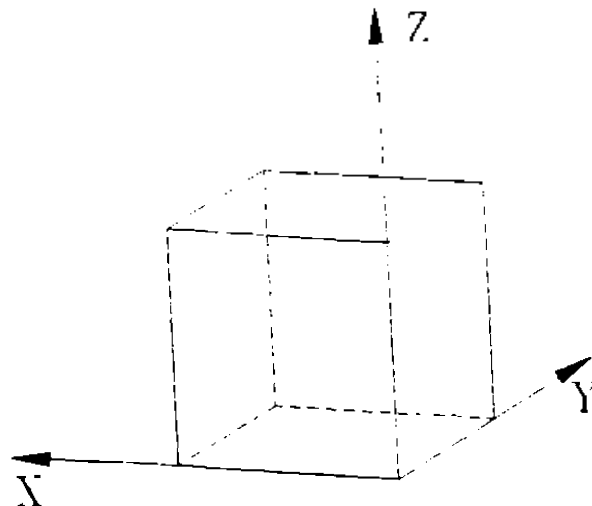
POZITIA INITALA

Nr Crt.	Xc	Yc	Zc
0.21	6,87605	1,89599	1,84095
0.22	6,82815	1,89959	1,85288
0.23	6,84043	1,91909	1,89742
0.24	6,82529	1,84521	1,83343

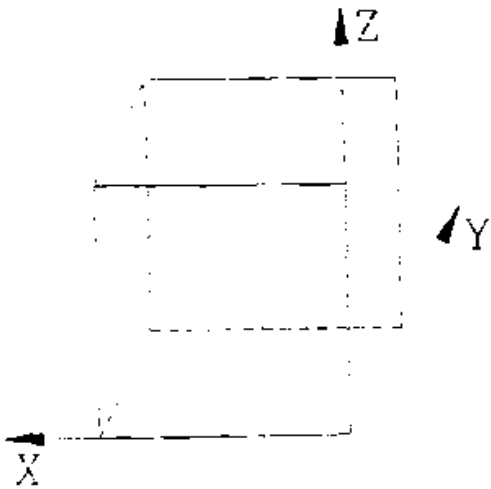
N4
N1
N2
N3

Nr Crt.	X	Y	Z
2.01	6,87629	1,89609	1,84089
2.02	6,82771	1,89922	1,85268
2.03	6,84038	1,91883	1,89763
2.04	6,82532	1,94502	1,83351
2.11	6,87651	1,89601	1,84068
2.12	6,82807	1,89962	1,85313
2.13	6,84033	1,91908	1,89712
2.14	6,82539	1,94517	1,83347
2.21	6,87613	1,89559	1,84058
2.22	6,82812	1,89958	1,85304
2.23	6,84038	1,91903	1,89742
2.24	6,82529	1,94512	1,83341
2.31	6,87649	1,89647	1,84105
2.32	6,82802	1,89933	1,85302
2.33	6,84043	1,91902	1,89742
2.34	6,82527	1,94513	1,83338
2.41	6,87643	1,89601	1,84089
2.42	6,82791	1,89932	1,85302
2.43	6,84011	1,91867	1,89739
2.44	6,82542	1,94528	1,83339

Pozitia II



Pozitia REFE

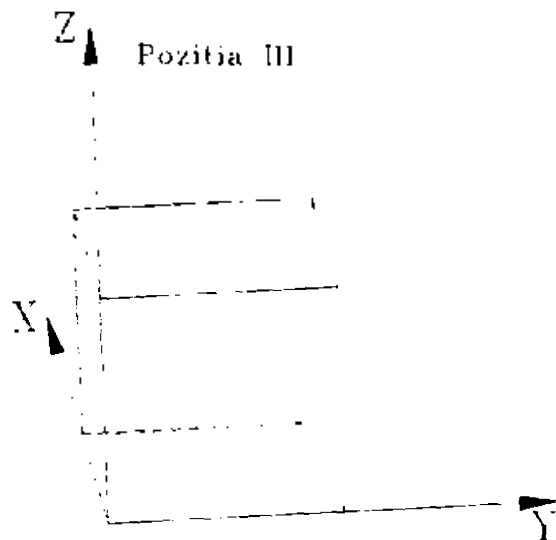


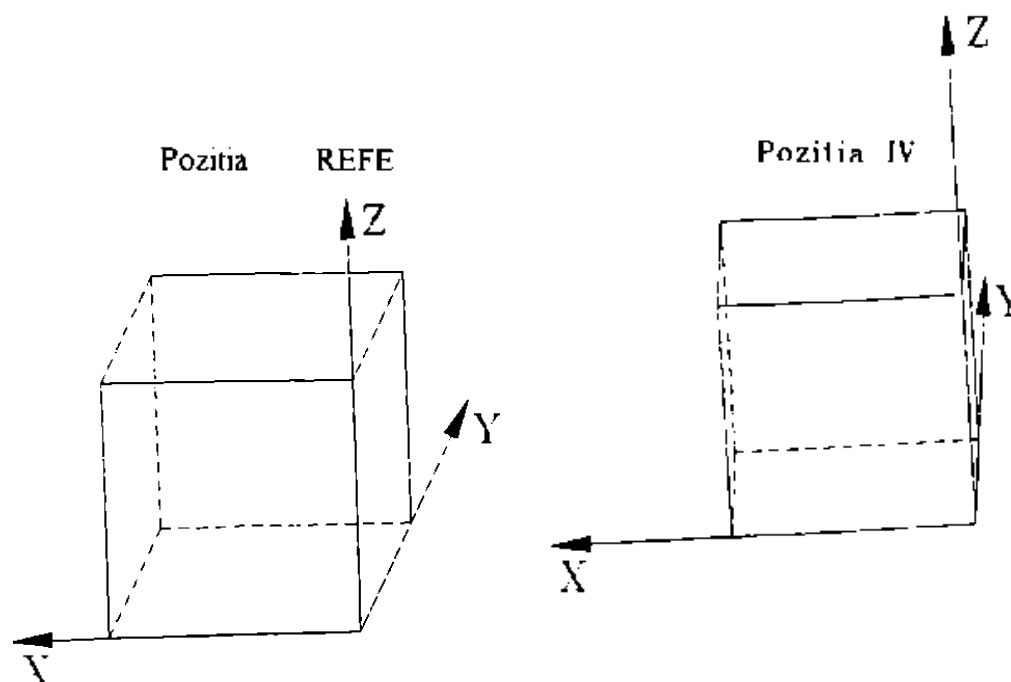
Nr Crt.	X	Y	Z
3.51	6,87002	1,90958	1,56188
3.52	6,82268	1,91249	1,57913
3.53	6,83969	1,91033	1,62601
3.54	6,82613	1,96258	1,58003
3.61	6,87009	1,90974	1,56219
3.62	6,82293	1,91239	1,57913
3.63	6,83954	1,91043	1,62618
3.64	6,83559	1,96237	1,57979
3.71	6,86987	1,90962	1,56192
3.72	6,82313	1,91273	1,57917
3.73	6,83958	1,91088	1,62629
3.74	6,82583	1,96274	1,57993
3.81	6,86957	1,90911	1,56158
3.82	6,82333	1,91278	1,57915
3.83	6,84002	1,91103	1,62633
3.84	6,82578	1,96272	1,57982
3.91	6,86978	1,90933	1,56166
3.92	6,82331	1,91279	1,57931
3.93	6,82987	1,91104	1,62654
3.94	6,82569	1,96235	1,57991

POZITIA INITIALA			
Nr Crt.	Xc	Yc	Zc
0.31	6,86959	1,90958	1,56187
0.32	6,82302	1,91249	1,57931
0.33	6,84018	1,91122	1,62628
0.34	6,82569	1,96251	1,57978

- N4
- N1
- N2
- N3

Nr Crt.	X	Y	Z
3.01	6,86987	1,90957	1,56189
3.02	6,82309	1,91249	1,57903
3.03	6,84001	1,91103	1,62629
3.04	6,82558	1,96261	1,57987
3.11	6,86959	1,90962	1,56193
3.12	6,82301	1,91251	1,57915
3.13	6,84018	1,91123	1,62637
3.14	6,82569	1,96247	1,57991
3.21	6,86958	1,90929	1,56193
3.22	6,82271	1,91248	1,57928
3.23	6,83941	1,91071	1,62627
3.24	6,82577	1,96258	1,57979
3.31	6,86988	1,90963	1,56193
3.32	6,82333	1,91271	1,57928
3.33	6,84002	1,91103	1,62631
3.34	6,82569	1,96258	1,57983
3.41	6,86983	1,90963	1,56188
3.42	6,82304	1,91279	1,57912
3.43	6,83978	1,91087	1,62619
3.44	6,82569	1,96259	1,57991





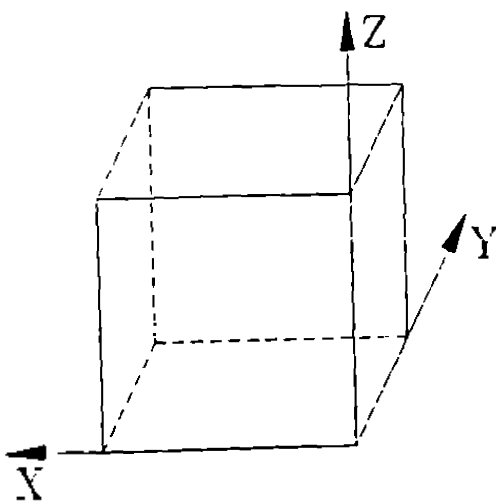
Nr Crt.	X	Y	Z
4.01	7,09017	1,89013	1,56187
4.02	7,04341	1,89349	1,57902
4.03	7,06072	1,89258	1,62604
4.04	7,04613	1,94357	1,57993
4.11	7,09066	1,89123	1,56187
4.12	7,04379	1,89425	1,57929
4.13	7,06102	1,89269	1,62618
4.14	7,04631	1,94357	1,57965
4.21	7,09047	1,89062	1,56222
4.22	7,04344	1,89334	1,57904
4.23	7,06061	1,89203	1,62631
4.24	7,04661	1,94375	1,58023
4.31	7,09023	1,89012	1,56187
4.32	7,04355	1,89353	1,57921
4.33	7,06076	1,89232	1,62633
4.34	7,04652	1,94366	1,57977
4.41	7,09063	1,89058	1,56224
4.42	7,04357	1,89378	1,57903
4.43	7,06103	1,89273	1,62639
4.44	7,04671	1,94425	1,57994

Nr Crt.	X	Y	Z
4.51	7,09078	1,89069	1,56233
4.52	7,04381	1,89415	1,57927
4.53	7,06111	1,89272	1,62631
4.54	7,04624	1,94363	1,57963
4.61	7,09065	1,89056	1,56181
4.62	7,04382	1,89388	1,57924
4.63	7,06091	1,89263	1,62629
4.64	7,04633	1,94351	1,57994
4.71	7,09085	1,89111	1,56192
4.72	7,04382	1,89402	1,57931
4.73	7,06059	1,89203	1,62613
4.74	7,04662	1,94401	1,58015
4.81	7,09071	1,89089	1,56192
4.82	7,04403	1,89413	1,57927
4.83	7,06071	1,89251	1,62634
4.84	7,04665	1,94387	1,57975
4.91	7,09095	1,89113	1,56236
4.92	7,04382	1,89378	1,57915
4.93	7,06087	1,89257	1,62651
4.94	7,04651	1,94391	1,57963

POZITIA INITIALA			
Nr Crt.	Xc	Yc	Zc
0.41	7,09048	1,89058	1,56187
0.42	7,04342	1,89388	1,57933
0.43	7,06059	1,89263	1,62625
0.44	7,04657	1,94352	1,57983

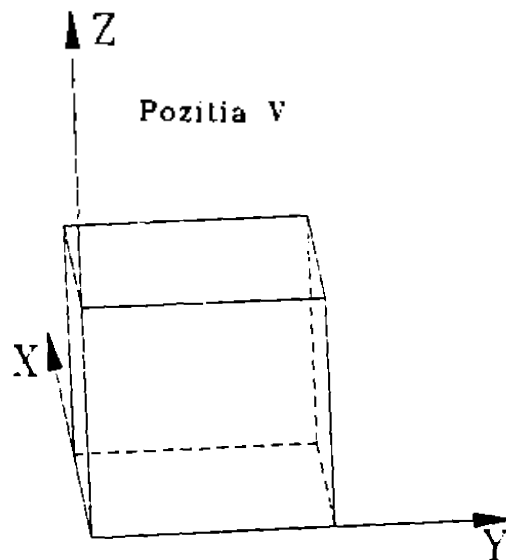
← N4
N1
N2
N3

Pozitia REFE



Nr Crt.	X	Y	Z
5.51	6,97691	1,90051	1,68311
5.52	6,93032	1,90358	1,70032
5.53	6,94725	1,90215	1,74745
5.54	6,93655	1,95347	1,70092
5.61	6,97678	1,90026	1,68313
5.62	6,93004	1,90321	1,70028
5.63	6,94721	1,90182	1,74758
5.64	6,95366	1,95367	1,70089
5.71	6,97651	1,89979	1,68258
5.72	6,92991	1,90333	1,70009
5.73	6,94735	1,90262	1,74762
5.74	6,93282	1,95364	1,70089
5.81	6,97674	1,89994	1,68287
5.82	6,92958	1,90325	1,70048
5.83	6,94703	1,90235	1,74768
5.84	6,93252	1,95301	1,70109
5.91	6,97688	1,90042	1,68293
5.92	6,92993	1,90335	1,70036
5.93	6,94741	1,90239	1,74763
5.94	6,93303	1,95378	1,70092

Pozitia V



Nr Crt.	X	Y	Z
5.01	6,97628	1,90002	1,68258
5.02	6,93012	1,90351	1,70009
5.03	6,94735	1,90229	1,74733
5.04	6,93281	1,95347	1,70135
5.11	6,97691	1,90015	1,68272
5.12	6,92979	1,90324	1,70023
5.13	6,94711	1,90201	1,74765
5.14	6,93277	1,95347	1,70118
5.21	6,97694	1,90022	1,68295
5.22	6,92975	1,903659	1,70039
5.23	6,94725	1,90244	1,74741
5.24	6,93278	1,95355	1,70111
5.31	6,97684	1,90005	1,68284
5.32	6,93001	1,90355	1,70025
5.33	6,94728	1,90191	1,74723
5.34	6,93264	1,95344	1,70121
5.41	6,97701	1,90036	1,68285
5.42	6,93025	1,90342	1,70037
5.43	6,94702	1,90211	1,74751
5.44	6,93286	1,95358	1,70115

POZITIA INITIALA			
Nr Crt.	Xc	Yc	Zc
0.51	6,97687	1,90002	1,68285
0.52	6,92981	1,90361	1,70036
0.53	6,94713	1,90189	1,74745
0.54	6,93282	1,95337	1,70111

← N4
N1
N2
N3

ANEXA 3

POZITIONARE ROBOT

PUNCTUL P1

POZITIA INITIALA			
Nr Crt.	Xc	Yc	Zc
0.11	7,10525	1,88972	1,83583
0.12	7,05593	1,89223	1,84735
0.13	7,06912	1,91245	1,89196
0.14	7,05453	1,93872	1,82843

3,2096E-08 1,4885E-08 2,073E-09 2,121E-10 9,907E-08
 2,2716E-08 1,7325E-10 1,976E-08 1,824E-10 4,352E-10

← N4
 N1
 N2
 N3

LS 1.92E-07

Li: 0,000443 0,0001418 0,0002183 0,000249267 0,00057858
 0,0001131 0,0002507 0,0001233 0,000277334 0,00024297

LB= 0,000264 SL= 0,000145907

SLJ: 5,972E-05 4,067E-05 1,518E-05 4,85421E-06 0,00010492
 5,024E-05 4,387E-06 4,686E-05 4,50139E-06 6,9536E-06

XB YB ZB
 7,056207 1,89255 1,847275

Apx	Apy	Apz	AP
0,000277	0,00032	-7,5E-05	0,00042983
			RP
			0,000701551

Exactitatea de pozilionare

Repetabilitatea de pozilionare

Nr Crt.	X	Y	Z
1.01	7,10524	1,88971	1,83582
1.02	7,05591	1,89223	1,84735
1.03	7,06912	1,91245	1,89199
1.04	7,05453	1,93874	1,82844
1.11	7,10495	1,88945	1,83534
1.12	7,05632	1,89255	1,84727
1.13	7,06926	1,91283	1,89181
1.14	7,05373	1,93845	1,82844
1.21	7,10544	1,89022	1,83587
1.22	7,05613	1,89236	1,84735
1.23	7,06885	1,91194	1,89173
1.24	7,05394	1,93845	1,82854
1.31	7,10513	1,88966	1,83548
1.32	7,05636	1,89264	1,84745
1.33	7,06932	1,91257	1,89203
1.34	7,05376	1,93846	1,82835
1.41	7,10495	1,88981	1,83546
1.42	7,05604	1,89233	1,84725
1.43	7,06916	1,91257	1,89196
1.44	7,05422	1,93885	1,82801

← N4 →
 N1
 N2
 N3
 ← N4 →
 N1
 N2
 N3
 ← N4 →
 N1
 N2
 N3
 ← N4 →
 N1
 N2
 N3

Nr Crt.	X	Y	Z
1.51	7,10525	1,88982	1,83588
1.52	7,05614	1,89255	1,84715
1.53	7,06903	1,91253	1,89201
1.54	7,05393	1,93854	1,82867
1.61	7,10512	1,88954	1,83575
1.62	7,05611	1,89237	1,84713
1.63	7,06914	1,91256	1,89179
1.64	7,05372	1,93832	1,82823
1.71	7,10534	1,88961	1,83536
1.72	7,05622	1,89267	1,84725
1.73	7,06945	1,91283	1,89225
1.74	7,05402	1,93866	1,82846
1.81	7,10535	1,88985	1,83567
1.82	7,05653	1,89303	1,84727
1.83	7,06915	1,91265	1,89211
1.84	7,05394	1,93854	1,82835
1.91	7,10523	1,88993	1,83565
1.92	7,05631	1,89277	1,84728
1.93	7,06924	1,91273	1,89225
1.94	7,05373	1,93841	1,82804

EXACTITATEA DE ORIENTARE

P1

a	7,053952
b	7,056207
c	1,938543
d	1,89255
e	1,828353
f	1,847275
g	7,069172
h	1,912566
i	1,900993
k	7,1052
L	1,88976
m	1,835628

Mxn	0,000578	APnx=	1,71E-05
Nxn	-0,00028		
MyN	0,000177	APny=	9,94E-06
Nyn	-0,00032		
Mzn	7,7E-05	APnz=	4E-08
Nzn	7,5E-05		

APn=	1,88E-05	
APa C=	1,87E-05	rad
APa ISO=	2,29E-05	grd

Mxa	-5,2E-05	APax=	4,5E-06
Nxa	-0,00028		
Mya	-0,00012	APay=	4,08E-06
Nya	-0,00032		
Mza	-0,00903	APaz=	-0,00018
Nza	-2E-05		

APa=	0,0%	
APc C=	1,87E-05	rad
APc ISO=	5,81E-05	grd

Mxo	5E-05	APox=	5,54E-06
Nxo	-0,00028		
Myo	-4E-05	APoy=	5,6E-06
Nyo	-0,00032		
Mzo	0,000202	APoz=	7,65E-06
Nzo	-0,00018		

APo=	1,18E-05	
APb C=	1,97E-05	rad
APb ISO=	2,00E-05	grd

REPETABILITATEA DE ORIENTARE

P1

Nr Crt.	X	Y	Z		Nr Crt.	X	Y	Z	
1.01	7,10524	1,88971	1,83582	← N4 →	1.51	7,10525	1,88982	1,83588	
1.02	7,05591	1,89223	1,84735		N1	1.52	7,05614	1,89255	1,84715
1.03	7,06912	1,91245	1,89199		N2	1.53	7,06903	1,91253	1,89201
1.04	7,05453	1,93874	1,82844		N3	1.54	7,05393	1,93854	1,82867
1.11	7,10495	1,88945	1,83534	N4	1.61	7,10512	1,88954	1,83575	
1.12	7,05632	1,89255	1,84727	N1	1.62	7,05611	1,89237	1,84713	
1.13	7,06926	1,91283	1,89181	N2	1.63	7,06914	1,91256	1,90179	
1.14	7,05373	1,93845	1,82844	N3	1.64	7,05372	1,93832	1,82823	
1.21	7,10544	1,89022	1,83587	N4	1.71	7,10534	1,88961	1,83536	
1.22	7,05613	1,89236	1,84735	N1	1.72	7,05622	1,89267	1,84725	
1.23	7,06885	1,91194	1,89173	N2	1.73	7,06945	1,91283	1,89225	
1.24	7,05394	1,93845	1,82854	N3	1.74	7,05402	1,93866	1,82846	
1.31	7,10513	1,88966	1,83548	N4	1.81	7,10535	1,88985	1,83567	
1.32	7,05636	1,89264	1,84745	N1	1.82	7,05653	1,89303	1,84727	
1.33	7,06932	1,91257	1,89203	N2	1.83	7,06915	1,91265	1,89211	
1.34	7,05376	1,93846	1,82835	N3	1.84	7,05394	1,93854	1,82835	
1.41	7,10495	1,88981	1,83546	N4	1.91	7,10523	1,88993	1,83565	
1.42	7,05604	1,89233	1,84725	N1	1.92	7,05631	1,89277	1,84728	
1.43	7,06916	1,91257	1,89196	N2	1.93	7,06924	1,91273	1,89225	
1.44	7,05422	1,93886	1,82801	N3	1.94	7,05373	1,93841	1,82804	

	XN	YN	ZN
4	7,1052	1,88976	1,835628
1	7,056207	1,89255	1,847275
2	7,069172	1,912566	1,900993
3	7,053952	1,938543	1,828353

a	7,053952
b	7,056207
c	1,938543
d	1,89255
e	1,828353
f	1,847275
g	7,069172
h	1,912566
i	1,900993
k	7,1052
L	1,88976
m	1,835628

S1=	1.431E-06
S2=	1.066E-06
S3=	4.684E-07
S4=	4.678E-07
S5=	9.332E-07
S6=	5.214E-07
S7=	3.451E-07
S8=	5.712E-07
S9=	0.0125224

A	B	C	D	E	F
0,000578	-0,000297	0,000197	-0,00032	8,7E-05	7,5E-05
-0,000222	0,000113	-9,3E-05	0	8,7E-05	-5E-06
-1,2E-05	-7,7E-05	-9,3E-05	-0,00019	0,000187	7,5E-05
-0,000192	0,000153	-8,3E-05	9E-05	-3E-06	0,000175
0,000268	-0,000167	0,000317	-0,00022	-0,000343	-2,5E-05
-2,2E-05	-6,7E-05	-0,00032	0	0,000317	-0,000125
-0,000232	-9,7E-05	-0,000223	-0,00018	-0,000123	-0,000145
6,8E-05	1,3E-05	0,000117	0,00012	0,000107	-2,5E-05
-1,2E-05	0,000323	-3E-06	0,00048	-3E-06	-5E-06
-0,000222	0,000103	-0,000133	0,00022	-0,000313	5E-06

G	I	K	L	P	R
4E-05	-5E-05	0,000192	-5,2E-05	-0,000116	-0,009003
-0,00025	-0,00031	-0,000288	8,8E-05	0,000264	-0,009183
0,00024	0,00046	0,000242	-0,000322	-0,000626	-0,009263
-7E-05	-0,0001	-0,000148	0,000148	4E-06	-0,008963
-0,00025	5E-05	-0,000168	-1,2E-05	4E-06	-0,009033
5E-05	6E-05	0,000252	-0,000142	-3,6E-05	-0,008983
-6E-05	-0,00022	0,000122	-3,2E-05	-6E-06	0,000797
0,00014	-0,00015	-0,000288	0,000278	0,000264	-0,072953
0,00015	9E-05	4,2E-05	-2,2E-05	8,4E-05	-0,008883
3E-05	0,00017	2,2E-05	6,8E-05	0,000164	-0,008743

RPnx= 0,000169	RPn= 0,00024354	
RPny= 0,000146	RPa C= 1,57055279	rad
RPnz= 9,66E-05	RPa ISO= 0,01395387	grd
RPox= 9,67E-05	RPo= 0,00019608	
RPoy= 0,000137	RPb C= 1,57060024	rad
RPoz= 0,000102	RPb ISO= 0,01123471	grd
RPax= 8,31E-05	RPa= 0,01582613	
RPay= 0,000107	RPc C= 1,55496954	rad
RPaz= 0,015826	RPc ISO= 0,90680827	grd

POZITIONARE ROBOT

PUNCTUL P2

POZITIA INITIALA			
Nr Crt.	Xc	Yc	Zc
0.21	6,87605	1,89599	1,84095
0.22	6,82815	1,89959	1,85288
0.23	6,84043	1,91909	1,89742
0.24	6,82529	1,94521	1,83343

3,3771E-09 2,2568E-08 1,961E-08 6,885E-09 5,411E-09
 2,7383E-08 1,4628E-09 7,318E-09 3,207E-08 5,407E-09
 N4
 N1
 N2
 N3
 LS 1,31E-07

Li: 0,0003257 0,0001173 0,0004076 0,000185927 0,000341113
 0,000433 0,0002293 0,0003631 8,84816E-05 0,00019403

LB= 0,000268 SL= 0,000120774

SLJ: 1,937E-05 5,008E-05 4,668E-05 2,72139E-05 2,452E-05
 5,516E-05 1,275E-05 2,851E-05 5,96368E-05 2,4512E-05

XB YB ZB
 6,827847 1,899286 1,852958

Apx Apy Apz
 -0,0003 -0,0003 8,8E-05

AP

0,000438143

← Exactitatea de pozitionare

RP

0,000628043

← Repetabilitatea de pozitionare

Nr Crt.	X	Y	Z
2.01	6,87629	1,89609	1,84089
2.02	6,82771	1,89922	1,85268
2.03	6,84038	1,91883	1,89763
2.04	6,82532	1,94502	1,83351
2.11	6,87651	1,89601	1,84068
2.12	6,82807	1,89952	1,85313
2.13	6,84033	1,91908	1,89712
2.14	6,82539	1,94517	1,83347
2.21	6,87613	1,89559	1,84058
2.22	6,82812	1,89958	1,85304
2.23	6,84038	1,91903	1,89742
2.24	6,82529	1,94512	1,83341
2.31	6,87649	1,89647	1,84105
2.32	6,82802	1,89933	1,85302
2.33	6,84043	1,91902	1,89742
2.34	6,82527	1,94513	1,83338
2.41	6,87643	1,89601	1,84089
2.42	6,82791	1,89932	1,85302
2.43	6,84011	1,91867	1,89739
2.44	6,82542	1,94528	1,83339

N4
 N1
 N2
 N3
 N4
 N1
 N2
 N3
 N4
 N1
 N2
 N3
 N4
 N1
 N2
 N3
 N4
 N1
 N2
 N3

Nr Crt.	X	Y	Z
2.51	6,87638	1,89608	1,84089
2.52	6,82789	1,89919	1,85302
2.53	6,84018	1,91892	1,89711
2.54	6,82553	1,94503	1,83348
2.61	6,87601	1,89553	1,84058
2.62	6,82778	1,89907	1,85293
2.63	6,84028	1,91879	1,89741
2.64	6,82559	1,94528	1,83362
2.71	6,87638	1,89604	1,84071
2.72	6,82769	1,89918	1,85267
2.73	6,84038	1,91919	1,89759
2.74	6,82545	1,94513	1,83368
2.81	6,87632	1,89578	1,84087
2.82	6,82759	1,89917	1,85316
2.83	6,84013	1,91904	1,89688
2.84	6,82504	1,94487	1,83352
2.91	6,87627	1,89613	1,84078
2.92	6,82769	1,89918	1,85301
2.93	6,84028	1,91911	1,89738
2.94	6,82548	1,94512	1,83329

EXACTITATEA DE ORIENTARE

P2

Mxn	-8,8E-05	APnx=	-7,8E-06
Nxn	0,000303		
MyN	9,5E-05	APny=	-4,2E-06
Nyn	0,000304		
Mzn	-4,5E-05	APnz=	8,6E-07
Nzn	-8,8E-05		

APn=	5,91E-06	
APa=	1,570787	rad
APa ISO=	0,000787	grad

a	6,825378
b	6,827847
c	1,945115
d	1,899286
e	1,833475
f	1,852968
g	6,840288
h	1,918968
i	1,897335
k	6,876321
L	1,895973
m	1,840772

Mxa	0,000142	APax=	-3,2E-06
Nxa	0,000303		
Mya	0,000122	APay=	-3,6E-06
Nya	0,000304		
Mza	8,5E-05	APaz=	1,88E-06
Nza	-8,9E-06		

APa=	5,28E-06	
APc=	1,570787	rad
APc ISO=	0,000787	grad

Mxo	-0,00027	APox=	-1,1E-05
Nxo	0,000303		
Myo	1,7E-05	APoy=	-5,7E-06
Nyo	0,000304		
Mzo	0,000178	APoz=	3,66E-06
Nzo	-5,2E-06		

APo=	1,33E-05	
APb=	1,570787	rad
APb ISO=	0,000787	grad

REPETABILITATEA DE ORIENTARE

P2

Nr Crt.	X	Y	Z
2.01	6,87629	1,89609	1,84089
2.02	6,82771	1,89922	1,85268
2.03	6,84038	1,91883	1,89763
2.04	6,82532	1,94502	1,83351
2.11	6,87651	1,89601	1,84068
2.12	6,82807	1,89962	1,85313
2.13	6,84033	1,91908	1,89712
2.14	6,82539	1,94517	1,83347
2.21	6,87613	1,89559	1,84058
2.22	6,82812	1,89958	1,85304
2.23	6,84038	1,91903	1,89742
2.24	6,82529	1,94512	1,83341
2.31	6,87649	1,89647	1,84105
2.32	6,82802	1,89933	1,85302
2.33	6,84043	1,91902	1,89742
2.34	6,82527	1,94513	1,83338
2.41	6,87643	1,89601	1,84089
2.42	6,82791	1,89932	1,85302
2.43	6,84011	1,91867	1,89739
2.44	6,82542	1,94528	1,83339

N4

N1

N2

N3

N4

N1

N2

N3

N4

N1

N2

N3

N4

N1

N2

N3

N4

N1

N2

N3

Nr Crt.	X	Y	Z
2.51	6,87638	1,89608	1,84069
2.52	6,82789	1,89919	1,85302
2.53	6,84018	1,91892	1,89711
2.54	6,82553	1,94503	1,83348
2.61	6,87601	1,89553	1,84058
2.62	6,82778	1,89907	1,85293
2.63	6,84028	1,91879	1,89741
2.64	6,82559	1,94528	1,83362
2.71	6,87638	1,89604	1,84071
2.72	6,82769	1,89918	1,85267
2.73	6,84038	1,91919	1,89759
2.74	6,82545	1,94513	1,83368
2.81	6,87632	1,89578	1,84087
2.82	6,82759	1,89917	1,85316
2.83	6,84013	1,91904	1,89688
2.84	6,82504	1,94487	1,83352
2.91	6,87627	1,89613	1,84078
2.92	6,82769	1,89918	1,85301
2.93	6,84028	1,91911	1,89738
2.94	6,82548	1,94512	1,83329

	XN	YN	ZN
4	6,876321	1,895973	1,840772
1	6,827847	1,899286	1,852968
2	6,840288	1,918968	1,897335
3	6,825378	1,945115	1,833475

a	6,825378
b	6,827847
c	1,945115
d	1,899286
e	1,833475
f	1,852968
g	6,840288
h	1,918968
i	1,897335
k	6,876321
L	1,895973
m	1,840772

S1=	4,76E-07
S2=	3,7E-07
S3=	5,53E-07
S4=	4,13E-07
S5=	9,83E-07
S6=	4,62E-07
S7=	2,97E-07
S8=	4,27E-07
S9=	0,004065

A	B	C	D	E	F
-5,8E-05	-0,00014	-9,5E-05	-6,6E-05	3,5E-05	-0,000288
1,2E-05	0,000223	5,5E-05	0,000334	-5E-06	0,000162
-8,8E-05	0,000273	5E-06	0,000294	-6,5E-05	7,2E-05
-0,00011	0,000173	1,5E-05	4,4E-05	-9,5E-05	5,2E-05
4,2E-05	6,3E-05	0,000165	3,4E-05	-8,5E-05	5,2E-05
0,000152	4,3E-05	-6,6E-05	-9,6E-05	5E-06	5,2E-05
0,000212	-6,7E-05	0,000165	-0,00022	0,000145	-3,8E-05
7,2E-05	-0,00016	1,5E-05	-0,00011	0,000205	-0,000298
-0,00034	-0,00026	-0,00024	-0,00012	4,5E-05	0,000192
0,000102	-0,00016	5E-06	-0,00011	-0,000185	4,2E-05

G	I	K	L	P	R
-3,1E-05	0,000117	0,000118	9,2E-05	-0,000138	0,000295
0,000189	3,7E-05	-9,2E-05	4,2E-05	0,000112	-0,000215
-0,00019	-0,00038	-0,00019	9,2E-05	6,2E-05	8,5E-05
0,000169	0,000497	0,000278	0,000142	5,2E-05	8,5E-05
0,000109	3,7E-05	0,000118	-0,00018	-0,000298	5,5E-05
5,9E-05	0,000107	-8,2E-05	-0,00011	-4,8E-05	-0,000225
-0,00031	-0,00044	-0,00019	-8E-06	-0,000178	7,5E-05
5,9E-05	6,7E-05	-6,2E-05	9,2E-05	0,000222	-0,064045
-1E-06	-0,00019	9,8E-05	-0,00016	7,2E-05	-0,000455
-5,1E-05	0,000157	8E-06	-8E-06	0,000142	4,5E-05

RPnx= 9,76E-05	RPn= 0,000167294
RPny= 8,6E-05	RPa C= 1,570629033 rad
RPnz= 0,000105	RPa ISO= 0,009585257 grd
RPox= 9,09E-05	RPo= 0,000192764
RPoy= 0,00014	RPb C= 1,570603563 rad
RPoz= 9,61E-05	RPb ISO= 0,01104454 grd
RPax= 7,71E-05	RPa= 0,00901709
RPay= 9,24E-05	RPc C= 1,561779115 rad
RPaz= 0,009016	RPc ISO= 0,516648193 grd

POZITIONARE ROBOT

PUNCTUL P3

POZITIA INITIALA			
Nr Crt.	Xc	Yc	Zc
0.31	6,86959	1,90958	1,56187
0.32	6,82302	1,91249	1,57931
0.33	6,84018	1,91122	1,62628
0.34	6,82569	1,96251	1,57978

N4	4,8209E-09	1,8112E-08	1,483E-08	1,901E-09
N1	2,1401E-08	3,5331E-12	1,652E-08	6,614E-09
N2	3,1129E-09	5,136E-09		
N3				
			LS	8,42E-08

Li:	0,0001951	0,0003991	0,0003863	0,000308118	0,00032031
	0,0001182	0,0002626	0,000136	0,000163186	0,00033618
LB=	0,000265	SL=	9,67256E-05		
	2,314E-05	4,486E-05	4,06E-05	1,45347E-05	1,8598E-05
	4,876E-05	6,266E-07	4,284E-05	2,71096E-05	2,3889E-05

	XB	YB	ZB
	6,823056	1,912616	1,579175

Apx	Apy	Apz
3,6E-05	0,000126	-0,00013

AP
0,000198141
RP
0,000554691

Exactitatea de pozitionare

Repetabilitatea de pozitionare

Nr Crt.	X	Y	Z
3.01	6,86987	1,90957	1,56189
3.02	6,82309	1,91249	1,57903
3.03	6,84001	1,91103	1,62629
3.04	6,82558	1,96261	1,57987
3.11	6,86959	1,90962	1,56193
3.12	6,82301	1,91251	1,57915
3.13	6,84018	1,91123	1,62637
3.14	6,82569	1,96247	1,57991
3.21	6,86958	1,90929	1,56193
3.22	6,82271	1,91248	1,57928
3.23	6,83941	1,91071	1,62627
3.24	6,82577	1,96258	1,57979
3.31	6,86988	1,90963	1,56193
3.32	6,82333	1,91271	1,57928
3.33	6,84002	1,91103	1,62631
3.34	6,82569	1,96258	1,57983
3.41	6,86983	1,90963	1,56188
3.42	6,82304	1,91279	1,57912
3.43	6,83978	1,91087	1,62619
3.44	6,82569	1,96259	1,57991

N4
N1
N2
N3
N4
N1
N2
N3
N4
N1
N2
N3
N4
N1
N2
N3
N4
N1
N2
N3

Nr Crt	X	Y	Z
3.51	6,87002	1,90958	1,56188
3.52	6,82268	1,91249	1,57913
3.53	6,83969	1,91033	1,62601
3.54	6,82613	1,96258	1,58003
3.61	6,87009	1,90974	1,56219
3.62	6,82293	1,91239	1,57913
3.63	6,83954	1,91043	1,62618
3.64	6,83559	1,96237	1,57979
3.71	6,86987	1,90962	1,56192
3.72	6,82313	1,91273	1,57917
3.73	6,83958	1,91088	1,62629
3.74	6,82583	1,96274	1,57993
3.81	6,86957	1,90911	1,56158
3.82	6,82333	1,91278	1,57915
3.83	6,84002	1,91103	1,62633
3.84	6,82578	1,96272	1,57982
3.91	6,86978	1,90933	1,56166
3.92	6,82331	1,91279	1,57931
3.93	6,82987	1,91104	1,62654
3.94	6,82569	1,96235	1,57991

EXACTITATEA DE ORIENTARE

P3

Mxn	-0,00105	APnx=	-2,04E-05
Nxn	-3,6E-05		
MyN	-4,9E-05	APny=	1,54E-06
Nyn	-0,00013		
Mzn	-9,9E-05	APnz=	-4,68E-06
Nzn	0,000135		

APn=	2,095E-06	
APa=	1,57077E-04	rad
APa ISO=	9,001230E	grd

a	6,826744
b	6,823056
c	1,962559
d	1,912616
e	1,579879
f	1,579175
g	6,83881
h	1,910858
i	1,626278
k	6,869808
L	1,909512
m	1,561879

Mxa	0,00137	APax=	2,812E-05
Nxa	-3,6E-05		
Mya	0,000362	APay=	9,76E-06
Nya	-0,00013		
Mza	2E-06	APaz=	4,59E-07
Nza	-2,1E-05		

APa=	2,977E-06	
APc=	1,57077E-04	rad
APc ISO=	9,001230E	grd

Mxo	-0,00022	APox=	-3,64E-06
Nxo	-3,6E-05		
Myo	6,8E-05	APoy=	3,88E-06
Nyo	-0,00013		
Mzo	-9E-06	APoz=	4,154E-07
Nzo	-3E-05		

APo=	5,339E-06	
APb=	1,57077E-04	rad
APb ISO=	9,001230E	grd

REPETABILITATEA DE ORIENTARE

P3

Nr Crt.	X	Y	Z		Nr Crt.	X	Y	Z
3.01	6.86987	1.90957	1.56189	← N4 →	3.51	6.87002	1.90958	1.56188
3.02	6.82309	1.91249	1.57903	N1	3.52	6.82268	1.91249	1.57913
3.03	6.84001	1.91103	1.62629	N2	3.53	6.83969	1.91033	1.62601
3.04	6.82558	1.96261	1.57987	N3	3.54	6.82613	1.96258	1.58003
3.11	6.86959	1.90962	1.56193	N4	3.61	6.87009	1.90974	1.58219
3.12	6.82301	1.91251	1.57915	N1	3.62	6.82293	1.91239	1.57913
3.13	6.84018	1.91123	1.62637	N2	3.63	6.83954	1.91043	1.62618
3.14	6.82569	1.96247	1.57991	N3	3.64	6.83559	1.96237	1.57979
3.21	6.86958	1.90929	1.56193	N4	3.71	6.86987	1.90962	1.56192
3.22	6.82271	1.91248	1.57928	N1	3.72	6.82313	1.91273	1.57917
3.23	6.83941	1.91071	1.62627	N2	3.73	6.83958	1.91088	1.62629
3.24	6.82577	1.96258	1.57979	N3	3.74	6.82583	1.96274	1.57993
3.31	6.86988	1.90963	1.56193	N4	3.81	6.86957	1.90911	1.56158
3.32	6.82333	1.91271	1.57928	N1	3.82	6.82333	1.91278	1.57915
3.33	6.84002	1.91103	1.62631	N2	3.83	6.84002	1.91103	1.62633
3.34	6.82569	1.96258	1.57983	N3	3.84	6.82578	1.96272	1.57982
3.41	6.86983	1.90963	1.56188	N4	3.91	6.86978	1.90933	1.56166
3.42	6.82304	1.91279	1.57912	N1	3.92	6.82331	1.91279	1.57931
3.43	6.83978	1.91087	1.62619	N2	3.93	6.82987	1.91104	1.62654
3.44	6.82569	1.96259	1.57991	N3	3.94	6.82569	1.96235	1.57991

	XN	YN	ZN
4	6.869808	1.909512	1.561879
1	6.823056	1.912616	1.579175
2	6.83881	1.910858	1.626278
3	6.826744	1.962559	1.579879

a	6.826744
b	6.823056
c	1.962559
d	1.912616
e	1.579879
f	1.579175
g	6.83881
h	1.910858
i	1.626278
k	6.869808
L	1.909512
m	1.561879

S1=	9.046E-05
S2=	2.346E-07
S3=	1.458E-07
S4=	9.406E-07
S5=	7.816E-07
S6=	3.704E-07
S7=	9.431E-05
S8=	5.608E-07
S9=	0.0021497

A	B	C	D	E	F
-0,001164	3,4E-05	5,1E-05	-0,00013	-9E-06	-0,00014
-0,001054	-4,6E-05	-8,9E-05	-0,00011	3,1E-05	-2,5E-05
-0,000974	-0,00035	2,1E-05	-0,00014	-8,9E-05	0,000106
-0,001054	0,000274	2,1E-05	9,4E-05	-4,9E-05	0,000105
-0,001054	-1,6E-05	3,1E-05	0,000174	3,1E-05	-5,5E-05
-0,000614	-0,00038	-0,00013	-0,00013	0,000151	-4,5E-05
0,000846	-0,00013	-0,00019	-0,00023	-8,9E-05	-4,5E-05
-0,000914	7,4E-05	0,000181	0,000114	5,1E-05	-5E-06
-0,000964	0,000274	0,000161	0,000164	-5,9E-05	-2,5E-05
-0,001054	0,000254	-0,00021	0,000174	3,1E-05	0,000135

G	I	K	L	P	R
6,2E-05	5,8E-05	1,1E-05	0,0012	0,000172	1,2E-05
-0,000218	0,000108	5,1E-05	0,00137	0,000372	9,2E-05
-0,000228	-0,00022	5,1E-05	0,0006	-0,000148	-8E-06
7,2E-05	0,000118	5,1E-05	0,00121	0,000172	3,2E-05
2,2E-05	0,000118	1E-06	0,00097	1,2E-05	-8,8E-05
0,000212	6,8E-05	1E-06	0,00088	-0,000528	-0,00027
0,000282	0,000228	0,000311	0,00073	-0,000428	-9,8E-05
6,2E-05	0,000108	4,1E-05	0,00077	2,2E-05	-0,04637
-0,000238	-0,0004	-0,0003	0,00121	0,000172	5,2E-05
-2,8E-05	-0,00018	-0,00022	-0,00894	0,000182	0,000262

RPnx= 0,001345	RPn= 0,00134789	
RPny= 6,85E-05	RPa C= 1,56944844	rad
RPnz= 5,4E-05	RPa ISO= 0,07722836	grd
RPox= 0,000137	RPo= 0,00020458	
RPoy= 0,000125	RPb C= 1,57059175	rad
RPoz= 8,61E-05	RPb ISO= 0,01172155	grd
RPax= 0,001373	RPa= 0,00670004	
RPay= 0,000106	RPc C= 1,56409623	rad
RPaz= 0,006557	RPc ISO= 0,38388707	grd

POZITIONARE ROBOT

PUNCTUL P4

POZITIA INITIALA			
Nr Crt.	Xc	Yc	Zc
0.41	7,09048	1,89058	1,56187
0.42	7,04342	1,89388	1,57933
0.43	7,06059	1,89263	1,62625
0.44	7,04657	1,94352	1,57983

← N4
N1
N2
N3

2,1513E-08	4,4866E-11	5,936E-08	5,472E-11	1,221E-08
1,0097E-08	4,0433E-08	7,148E-09	1,545E-08	4,221E-08
LS				2,08E-07

Li:

0,0004829	0,0003429	0,0005799	0,000343642	0,00044673
0,0004367	0,0001352	0,0002517	0,000211967	0,00013081
LB=		0,000336	SL= 0,000152204	

SLJ:

4,889E-05	2,233E-05	8,12E-05	2,46578E-05	3,6829E-05
3,348E-05	6,703E-05	2,818E-05	4,1426E-05	6,848E-05

XB	YB	ZB
7,043708	1,893835	1,579183

Apx	Apy	Apz
0,000286	-4,5E-05	-0,00015

AP
0,0003247
RP
0,000792856

Exactitatea de pozitionare

Repetabilitatea de pozitionare

Nr Crt.	X	Y	Z
4.01	7,09017	1,89013	1,56187
4.02	7,04341	1,89349	1,57902
4.03	7,06072	1,89258	1,62604
4.04	7,04613	1,94357	1,57993
4.11	7,09066	1,89123	1,56187
4.12	7,04379	1,89425	1,57929
4.13	7,06102	1,89269	1,62618
4.14	7,04631	1,94357	1,57965
4.21	7,09047	1,89062	1,56222
4.22	7,04344	1,89334	1,57904
4.23	7,06061	1,89203	1,62631
4.24	7,04661	1,94375	1,58023
4.31	7,09023	1,89012	1,56187
4.32	7,04355	1,89353	1,57921
4.33	7,06076	1,89232	1,62633
4.34	7,04652	1,94366	1,57977
4.41	7,09063	1,89058	1,56224
4.42	7,04357	1,89378	1,57903
4.43	7,06103	1,89273	1,62639
4.44	7,04671	1,94425	1,57994

← N4 →
N1
N2
N3
N4
N1
N2
N3
N4
N1
N2
N3
N4
N1
N2
N3
N4
N1
N2
N3

Nr Crt.	X	Y	Z
4.51	7,09078	1,89069	1,56233
4.52	7,04381	1,89415	1,57927
4.53	7,06111	1,89272	1,62631
4.54	7,04624	1,94363	1,57963
4.61	7,09065	1,89056	1,56181
4.62	7,04382	1,89388	1,57924
4.63	7,06091	1,89263	1,62629
4.64	7,04633	1,94351	1,57994
4.71	7,09085	1,89111	1,56192
4.72	7,04382	1,89402	1,57931
4.73	7,06059	1,89203	1,62613
4.74	7,04662	1,94401	1,58015
4.81	7,09071	1,89089	1,56192
4.82	7,04403	1,89413	1,57927
4.83	7,06071	1,89251	1,62634
4.84	7,04665	1,94387	1,57975
4.91	7,09095	1,89113	1,56235
4.92	7,04382	1,89378	1,57915
4.93	7,06087	1,89257	1,62651
4.94	7,04651	1,94391	1,57963

EXACTITATEA DE ORIENTARE

P4

a	7,046463
b	7,043706
c	1,943773
d	1,893635
e	1,579862
f	1,579183
g	7,060633
h	1,892481
l	1,626283
k	7,09061
L	1,890706
m	1,562041

Mxn	0,000107	APnx=	7,86E-06
Nxn	-0,00029		
MyN	-0,00025	APny=	-6E-06
Nyn	4,5E-05		
Mzn	-3,2E-05	APnz=	-3,6E-06
Nzn	0,000147		

APn=	1,05E-06
APa=	1,570799 rad
APa ISO=	0,000601 grad

Mxa	-0,00024	APax=	8,6E-07
Nxa	-0,00029		
Mya	0,000149	APay=	2,08E-06
Nya	4,5E-05		
Mza	-3,3E-05	APaz=	-4,5E-07
Nza	-1E-05		

APa=	2,3E-06
APc=	1,570794 rad
APc ISO=	0,000132 grad

Mxo	-0,00013	APox=	3,12E-06
Nxo	-0,00029		
Myo	-0,00013	APoy=	-3,4E-06
Nyo	4,5E-05		
Mzo	-0,00017	APoz=	-3,4E-06
Nzo	-2,3E-06		

APo=	5,73E-06
APb=	1,570791 rad
APb ISO=	0,000328 grad

A	B	C	D	E	F
-0.0003	-0.0003	-0.0002	-0.00034	6.8E-05	-0.000163
-0.0002	8.4E-05	-0.0002	0.000415	-0.000212	0.000107
0.00015	-0.00027	-2.3E-05	-0.00049	0.000366	-0.000143
5.7E-05	-0.00016	-0.00011	-0.0003	-9.2E-05	2.7E-05
0.00025	-0.00014	0.000477	-5.5E-05	7.8E-05	-0.000153
-0.0002	0.000104	-0.00034	0.000315	-0.000232	8.7E-05
-0.0001	0.000114	-0.00026	4.5E-05	7.8E-05	5.7E-05
0.00016	0.000114	0.000237	0.000185	0.000288	0.000127
0.00019	0.000324	9.7E-05	0.000295	-0.000112	8.7E-05
4.7E-05	0.000114	0.000137	-5.5E-05	-0.000232	-3.3E-05

G	I	K	L	P	R
-0.0004	-0.00058	-0.00017	-0.00011	9.9E-05	-0.000243
5E-05	0.000524	-0.00017	0.000167	0.000209	-0.000103
-0.0001	-8.6E-05	0.000179	-0.00022	-0.000451	2.7E-05
-0.0004	-0.00059	-0.00017	-7.3E-05	-0.000161	4.7E-05
2E-05	-0.00013	0.000199	0.000197	0.000249	0.000107
0.00017	-1.6E-05	0.000289	0.000277	0.000239	2.7E-05
4E-05	-0.00015	-0.00023	7.7E-05	0.000149	7E-06
0.00024	0.000404	-0.00012	-0.00024	-0.000451	-0.046653
1E-04	0.000184	-0.00012	-0.00012	2.9E-05	5.7E-05
0.00034	0.000424	0.000319	3.7E-05	8.9E-05	0.000227

RPnx= 0.000111	RPn= 0.00023909
RPny= 0.000176	RPa C = 1.57055723 rad
RPnz= 0.000118	RPa ISO = 0.01369907 grd
RPox= 6.92E-05	RPo= 0.00018374
RPoy= 0.000123	RPb C= 1.57061258 rad
RPoz= 0.000118	RPb ISO= 0.01052775 grd
RPax= 0.000103	RPa= 0.00661814
RPay= 0.000132	RPc C= 1.56417814 rad
RPaz= 0.006616	RPc ISO= 0.379194 grd

POZITIONARE ROBOT

PUNCTUL P5

POZITIA INITIALA			
Nr Crt.	Xc	Yc	Zc
0.51	6,97687	1,90002	1,68285
0.52	6,92981	1,90361	1,70036
0.53	6,94713	1,90189	1,74745
0.54	6,93282	1,95337	1,70111

N4	1,0713E-09	1,4436E-08	7,229E-09	1,67E-08
N1	7,0087E-10	3,7528E-09	7,202E-09	6,09E-09
N2	4,1788E-08	2,3433E-08		
N3				
			LS	5,72E-08

Li:	0,0002422	0,0003851	0,00036	0,000145708	0,00047936
	0,0002485	0,0002137	0,0001901	0,000352985	0,00012186
LB=	0,000275		SL=	7,97106E-05	
SLJ:	1,091E-05	4,005E-05	2,834E-05	4,30782E-05	6,814E-05
	8,825E-06	2,042E-05	2,829E-05	2,60138E-05	5,1028E-05

	XB	YB	ZB
	6,92997	1,90341	1,700252

	Ap_x	Ap_y	Ap_z
	0,00016	-0,0002	-0,00011

AP
0,000276153
RP
0,000514075

Exactitatea de pozitionare
 Repetabilitatea de pozitionare

Nr Crt.	X	Y	Z
5.01	6,97628	1,90002	1,68258
5.02	6,93012	1,90351	1,70009
5.03	6,94735	1,90229	1,74733
5.04	6,93281	1,95347	1,70135
5.11	6,97691	1,90015	1,68272
5.12	6,92979	1,90324	1,70023
5.13	6,94711	1,90201	1,74765
5.14	6,93277	1,95347	1,70118
5.21	6,97594	1,90022	1,68295
5.22	6,92975	1,903659	1,70039
5.23	6,94725	1,90244	1,74741
5.24	6,93278	1,95356	1,70111
5.31	6,97664	1,90005	1,68264
5.32	6,93001	1,90355	1,70025
5.33	6,94728	1,90191	1,74723
5.34	6,93264	1,95344	1,70121
5.41	6,97701	1,90035	1,68285
5.42	6,93025	1,90342	1,70037
5.43	6,94702	1,90211	1,74751
5.44	6,93266	1,95358	1,70115

N4
 N1
 N2
 N3
 N4
 N1
 N2
 N3
 N4
 N1
 N2
 N3
 N4
 N1
 N2
 N3
 N4
 N1
 N2
 N3

Nr Crt.	X	Y	Z
5.51	6,97691	1,90051	1,68311
5.52	6,93032	1,90358	1,70032
5.53	6,94725	1,90215	1,74745
5.54	6,93655	1,95347	1,70092
5.61	6,97678	1,90026	1,68313
5.62	6,93004	1,90321	1,70028
5.63	6,94721	1,90182	1,74758
5.64	6,95366	1,95367	1,70089
5.71	6,97651	1,89979	1,68258
5.72	6,92991	1,90333	1,70009
5.73	6,94735	1,90262	1,74762
5.74	6,93282	1,95364	1,70089
5.81	6,97674	1,89994	1,68287
5.82	6,92958	1,90325	1,70048
5.83	6,94703	1,90235	1,74768
5.84	6,93252	1,95301	1,70109
5.91	6,97688	1,90042	1,68293
5.92	6,92993	1,90335	1,70035
5.93	6,94741	1,90239	1,74763
5.94	6,93303	1,95378	1,70092

EXACTITATEA DE ORIENTARE

P5

a	6,935224
b	6,92997
c	1,953509
d	1,9034099
e	1,701071
f	1,7002517
g	6,947226
h	1,902209
i	1,747509
k	6,97676
L	1,900171
m	1,662656

Mxn	-0,0024	APnx=	-4,5E-05
Nxn	-0,00016		
MyN	-0,00014	APny=	-6,8E-06
Nyn	0,0002		
Mzn	3,9E-05	APnz=	-1,4E-06
Nzn	0,000108		

APn=	4,54E-05
APa C=	1,570751 rad
APa ISO=	0,002602 grd

Mxa	-9,6E-05	APax=	1,28E-06
Nxa	-0,00016		
Mya	-0,00032	APay=	-1E-05
Nya	0,0002		
Mza	-5,9E-05	APaz=	-2,7E-07
Nza	-4,5E-05		

APa=	1,05E-05
APc C=	1,570786 rad
APc ISO=	0,0006 grd

Mxo	0,00011	APox=	5,4E-06
Nxo	-0,00016		
Myo	-0,00015	APoy=	-7E-06
Nyo	0,0002		
Mzo	-6E-06	APoz=	8,93E-08
Nzo	-1E-05		

APo=	8,86E-06
APb C=	1,570787 rad
APb ISO=	0,000508 grd

REPETABILITATEA DE ORIENTARE

P5

Nr Crt.	X	Y	Z
5.01	6.97628	1.90002	1.68258
5.02	6.93012	1.90351	1.70009
5.03	6.94735	1.90229	1.74733
5.04	6.93281	1.95347	1.70135
5.11	6.97691	1.90015	1.68272
5.12	6.92979	1.90324	1.70023
5.13	6.94711	1.90201	1.74765
5.14	6.93277	1.95347	1.70118
5.21	6.97694	1.90022	1.68295
5.22	6.92975	1.903659	1.70039
5.23	6.94725	1.90244	1.74741
5.24	6.93278	1.95356	1.70111
5.31	6.97664	1.90005	1.68264
5.32	6.93001	1.90355	1.70025
5.33	6.94728	1.90191	1.74723
5.34	6.93264	1.95344	1.70121
5.41	6.97701	1.90035	1.68285
5.42	6.93025	1.90342	1.700037
5.43	6.94702	1.90211	1.74751
5.44	6.93266	1.95358	1.70115

← N4 →
 N1
 N2
 N3
 N4
 N1
 N2
 N3
 N4
 N1
 N2
 N3
 N4
 N1
 N2
 N3
 N4
 N1
 N2
 N3

Nr Crt.	X	Y	Z
5.51	6.97691	1.90051	1.68311
5.52	6.93032	1.90358	1.70032
5.53	6.94725	1.90215	1.74745
5.54	6.93655	1.95347	1.70092
5.61	6.97678	1.90026	1.68313
5.62	6.93004	1.90321	1.70028
5.63	6.94721	1.90182	1.74758
5.64	6.95366	1.95367	1.70089
5.71	6.97651	1.89979	1.68258
5.72	6.92991	1.90333	1.70009
5.73	6.94735	1.90262	1.74762
5.74	6.93282	1.95364	1.70089
5.81	6.97674	1.89994	1.68287
5.82	6.92958	1.90325	1.70048
5.83	6.94703	1.90235	1.74768
5.84	6.93252	1.95301	1.70109
5.91	6.97688	1.90042	1.68293
5.92	6.92993	1.90335	1.70035
5.93	6.94741	1.90239	1.74763
5.94	6.93303	1.95378	1.70092

	XN	YN	ZN
4	6.97676	1.900171	1.682856
1	6.92997	1.90341	1.700252
2	6.947226	1.902209	1.747509
3	6.935224	1.953509	1.701071

a	6.935224
b	6.92997
c	1.953509
d	1.90341
e	1.701071
f	1.700252
g	6.947226
h	1.902209
i	1.747509
k	6.97676
L	1.900171
m	1.682856

S1=	0.000385
S2=	5.27E-07
S3=	5.25E-07
S4=	9.33E-07
S5=	5.25E-07
S6=	2.26E-07
S7=	5.36E-07
S8=	6.84E-07
S9=	0.002156

A	B	C	D	E	F
-0,0024	0,00015	-3,9E-05	0,0001	0,000279	-0,0001617
-0,0025	-0,00018	-3,9E-05	-0,00017	0,000109	-2,17E-05
-0,0024	-0,00022	5,1E-05	0,000249	3,9E-05	0,0001383
-0,0026	4E-05	-6,9E-05	0,00014	0,000139	-1,7E-06
-0,0026	0,00028	7,1E-05	1,01E-05	7,9E-05	-0,0002147
0,0013	0,00035	0,0001	0,00017	-0,000151	6,83E-05
0,0184	7E-05	0,000161	-0,0002	-0,000181	2,83E-05
-0,0024	-6E-05	0,000131	-6E-05	-0,000181	-0,0001617
-0,0027	-0,00039	-0,0005	-0,00016	1,9E-05	0,0002283
-0,0022	-4E-05	0,000271	-6E-05	-0,000151	9,83E-05

G	I	K	L	P	R
-0,0005	-0,00015	-0,00028	0,000124	8,1E-05	-0,000179
0,0001	-2,1E-05	-0,00014	-0,00012	-0,000199	0,000141
0,0002	4,9E-05	9,4E-05	2,4E-05	0,000231	-9,9E-05
-0,0001	-0,00012	-1,6E-05	5,4E-05	-0,000299	-0,000279
0,0002	0,000179	-6E-06	-0,00021	-9,9E-05	1E-06
0,0001	0,000339	0,000254	2,4E-05	-5,9E-05	-5,9E-05
2E-05	8,9E-05	0,000274	-1,6E-05	-0,000389	7,1E-05
-0,0003	-0,00038	-0,00028	0,000124	0,000411	-0,046589
-2E-05	-0,00023	1,4E-05	-0,0002	0,000141	0,000171
0,0001	0,000249	7,4E-05	0,000184	0,000181	0,000121

RPnx= 0,002776	RPn= 0,00278018	
RPny= 0,000103	RPa C = 1,56801615	rad
RPnz= 0,000103	RPa ISO = 0,15929256	grd
RPox= 0,000137	RPa= 0,00018356	
RPoy= 0,000102	RPb C = 1,57061276	rad
RPoz= 6,73E-05	RPb ISO= 0,0105174	grd
RPax= 0,000104	RPa= 0,00656802	
RPay= 0,000117	RPc C = 1,56422826	rad
RPaz= 0,006566	RPc ISO= 0,37632238	grd

Exactitatea de pozitionare a distantei - robot

POZITIA COMANDATA			
Nr Crt.	Xc	Yc	Zc
0.12	7.05593	1.89223	1.84735
0.32	6.82302	1.91249	1.57931

P1

P3

P1

Nr Crt.	X	Y	Z
1.52	7.05614	1.89255	1.84715
1.62	7.05611	1.89237	1.84713
1.72	7.05622	1.89267	1.84725
1.82	7.05653	1.89303	1.84727
1.92	7.05631	1.89277	1.84728
1.02	7.05591	1.89223	1.84735
1.12	7.05632	1.89255	1.84727
1.22	7.05613	1.89236	1.84735
1.32	7.05636	1.89264	1.84745
1.42	7.05604	1.89233	1.84725

N1

N1

N1

N1

N1

N1

N1

N1

N1

N1

P3

Nr Crt.	X	Y	Z
3.02	6.82309	1.91249	1.57903
3.12	6.82301	1.91251	1.57915
3.22	6.82271	1.91248	1.57928
3.32	6.82333	1.91271	1.57928
3.42	6.82304	1.91279	1.57912
3.52	6.82268	1.91249	1.57913
3.62	6.82293	1.91239	1.57913
3.72	6.82313	1.91273	1.57917
3.82	6.82333	1.91278	1.57915
3.92	6.82331	1.91279	1.57931

N1

Dcx	Dcy	Dcz
0.23291	0.02026	0.26804

$$Dc = 0.355673$$

DBx	DBy	DBz
0.233178	0.020048	0.268066

$$DB = 0.355858$$

$$AD = -0.00018$$

Variația exactității de poziționare multidirecțională - robot

POZITIA COMANDATA			
Nr Crt.	XN1c	YN1c	ZN1c
1	7.0494	1.8284	2.11058

Nr Crt.	Poz 1			Poz 2			Poz3		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	7.04939	1.82838	2.11029	7.04915	1.82821	2.11111	7.04968	1.82915	2.11055
2	7.04945	1.82859	2.11002	7.04961	1.82832	2.11048	7.04965	1.82872	2.11038
3	7.04942	1.82847	2.11021	7.04925	1.82805	2.11032	7.04928	1.82835	2.11025
4	7.04931	1.82853	2.11015	7.04915	1.82779	2.11048	7.04939	1.82842	2.11062
5	7.04928	1.82831	2.11049	7.04912	1.82835	2.11055	7.04958	1.82841	2.11041
6	7.04935	1.82825	2.11019	7.04925	1.82868	2.11024	7.04991	1.82905	2.11059
7	7.04926	1.82857	2.11035	7.04931	1.82848	2.11079	7.04948	1.82858	2.11078
8	7.04948	1.82865	2.11048	7.04935	1.82865	2.11071	7.04915	1.82855	2.11045
9	7.04924	1.82844	2.11045	7.04952	1.82871	2.11052	7.04955	1.82872	2.11062
10	7.04943	1.82829	2.11015	7.04935	1.82849	2.11055	7.04958	1.82861	2.11075

	1	2	3
Xb	7.04936	7.04931	7.0495
Yb	1.82845	1.82837	1.8287
Zb	2.11028	2.11058	2.1105

D1	D2	D3
0.0003	0.00037	0.00036

$$v_{AP} = 0.0004$$

ANEXA 4

POZITIONARE CELULA

POZITIA INITIALA			
Nr Crt.	Xc	Yc	Zc
0.1	5,49868	1,76731	1,08866
0.2	5,45242	1,76302	1,10803
0.3	5,44861	1,81309	1,11031
0.4	5,44069	1,76362	1,06187

← N4
N1
N2
N3

2,3124E-07 2,4409E-08 3,143E-07 4,644E-07
3,5761E-06 4,1131E-09 1,34E-10 4,97E-07
1,9835E-10 3,1856E-09

LS 5,11E-06

Lj: 0,0014429 0,0008058 0,0004014 0,000280532 0,0009479
0,002853 0,0008979 0,0009504 0,000256528 0,0007835

LB= 0,000962 SL= 0,000753673

SLj: 0,0001603 5,208E-05 0,0001868 0,000227151 4,684E-06
0,0006304 2,138E-05 3,859E-06 0,000235119 5,9484E-05

XB YB ZB
5,452395 1,762138 1,107807

Apx Apy Apz
-2,5E-05 -0,00088 -0,00022

AP

0,000910098

RP

0,003223004

Exactitatea de pozitionare

Repetabilitatea de pozitionare

Nr Crt.	X	Y	Z
1.1	5,49878	1,76519	1,08785
1.2	5,45255	1,76072	1,10759
1.3	5,44861	1,81082	1,10968
1.4	5,43312	1,76149	1,06173
2.1	5,49941	1,76377	1,08811
2.2	5,45289	1,75934	1,10755
2.3	5,44903	1,80884	1,10963
2.4	5,43361	1,75972	1,06172
3.1	5,50428	1,76791	1,08795
3.2	5,45256	1,76179	1,10792
3.3	5,44863	1,81222	1,10985
3.4	5,43285	1,76256	1,06183
4.1	5,49871	1,76653	1,08875
4.2	5,45235	1,76231	1,10759
4.3	5,44863	1,81152	1,11011
4.4	5,44072	1,76545	1,06123
5.1	5,49892	1,76678	1,08866
5.2	5,45231	1,76235	1,10769
5.3	5,44863	1,81211	1,11009
5.4	5,43286	1,76303	1,06185

← N4 →
N1
N2
N3
N4
N1
N2
N3
N4
N1
N2
N3
N4
N1
N2
N3
N4
N1
N2
N3

Nr Crt.	X	Y	Z
6.1	5,49878	1,76718	1,08858
6.2	5,45224	1,76292	1,10769
6.3	5,44855	1,81235	1,10983
6.4	5,43302	1,76322	1,06211
7.1	5,49861	1,76731	1,08844
7.2	5,45222	1,76301	1,10793
7.3	5,44849	1,81315	1,11011
7.4	5,43284	1,76362	1,0624
8.1	5,49851	1,76745	1,08878
8.2	5,45212	1,76302	1,10803
8.3	5,44853	1,81286	1,11019
8.4	5,43276	1,76384	1,06213
9.1	5,49871	1,76727	1,08868
9.2	5,45222	1,76304	1,10804
9.3	5,44865	1,81258	1,11032
9.4	5,43295	1,76384	1,06188
10.1	5,49871	1,76767	1,08874
10.2	5,45249	1,76288	1,10804
10.3	5,44857	1,81289	1,11015
10.4	5,43311	1,76375	1,06203

EXACTITATEA DE ORIENTARE

Celula

a	5.433784
b	5.452395
c	1.763052
d	1.762138
e	1.061891
f	1.107807
g	5.448632
h	1.811934
i	1.109996
k	5.499342
L	1.766706
m	1.088454

Mxn	0,006906	APnx=	0,000138
Nxn	2.5E-05		
MyN	0,000568	APny=	-6.3E-06
Nyn	0,000882		
Mzn	-2,1E-05	APnz=	-4.9E-06
Nzn	0,000223		

APn=	0,000138
APa C=	1,570658 rad
APa ISO=	0,007898 grd

Mxa	-2,2E-05	APax=	-9,4E-07
Nxa	2.5E-05		
Mya	0,001156	APay=	5,48E-06
Nya	0,000882		
Mza	0,000314	APaz=	9,04E-06
Nza	-0,00014		

APa=	1,06E-05
APc C=	1,570786 rad
APc ISO=	0,000608 grd

Mxo	-0,00066	APox=	-1,4E-05
Nxo	2,5E-05		
Myo	0,000604	APoy=	-5,6E-06
Nyo	0,000882		
Mzo	0,000206	APoz=	4,33E-06
Nzo	-1,1E-05		

APo=	1,54E-05
APb C=	1,570781 rad
APb ISO=	0,000885 grd

REPETABILITATEA DE ORIENTARE

Celula

Nr Crt.	X	Y	Z		Nr Crt.	X	Y	Z
1.1	5.49878	1.76519	1.08785	← N4 →	6.1	5.49878	1.76718	1.08858
1.2	5.45255	1.76072	1.10759		6.2	5.45224	1.76292	1.10769
1.3	5.44861	1.81082	1.10968		6.3	5.44855	1.81235	1.10983
1.4	5.43312	1.76149	1.06173		6.4	5.43302	1.76322	1.06211
2.1	5.49941	1.76377	1.08811		7.1	5.49861	1.76731	1.08844
2.2	5.45289	1.75934	1.10755		7.2	5.45222	1.76301	1.10793
2.3	5.44903	1.80884	1.10963		7.3	5.44849	1.81315	1.11011
2.4	5.43361	1.75972	1.06172		7.4	5.43284	1.76362	1.0624
3.1	5.50428	1.76791	1.08795		8.1	5.49851	1.76745	1.08878
3.2	5.45256	1.76179	1.10792		8.2	5.45212	1.76302	1.10803
3.3	5.44863	1.81222	1.10985		8.3	5.44853	1.81286	1.11019
3.4	5.43285	1.76256	1.06183		8.4	5.43276	1.76384	1.06213
4.1	5.49871	1.76653	1.08875		9.1	5.49871	1.76727	1.08868
4.2	5.45235	1.76231	1.10759		9.2	5.45222	1.76304	1.10804
4.3	5.44863	1.81152	1.11011		9.3	5.44865	1.81258	1.11032
4.4	5.44072	1.76545	1.06123		9.4	5.43295	1.76384	1.06188
5.1	5.49892	1.76678	1.08866		10.1	5.49871	1.76767	1.08874
5.2	5.45231	1.76235	1.10769		10.2	5.45249	1.76288	1.10804
5.3	5.44863	1.81211	1.11009		10.3	5.44857	1.81289	1.11015
5.4	5.43286	1.76303	1.06185		10.4	5.43311	1.76375	1.06203

	XN	YN	ZN
4	5.499342	1.766706	1.088454
1	5.452395	1.762138	1.107807
2	5.448632	1.811934	1.109996
3	5.433784	1.763052	1.061891

a	5.433784
b	5.452395
c	1.763052
d	1.762138
e	1.061891
f	1.107807
g	5.448632
h	1.811934
i	1.109996
k	5.499342
L	1.766706
m	1.088454

S1=	5.43E-05
S2=	1.03E-05
S3=	5.74E-07
S4=	2.55E-05
S5=	2.93E-06
S6=	9.97E-07
S7=	1.76E-07
S8=	1.29E-06
S9=	0.002322

A	B	C	D	E	F
-0.0007	0,000155	-0,00156	-0,00142	-0,000161	-0,0002
-0,0002	0,000495	-0,00333	-0,0028	-0,000171	-0,0003
-0,0009	0,000165	-0,00049	-0,00035	-6,1E-05	0,00011
0,0069	-4,5E-05	0,002398	0,000172	-0,000661	-0,0002
-0,0009	-8,5E-05	-2,2E-05	0,000212	-4,1E-05	-0,0001
-0,0008	-0,00015	-0,00142	0,000782	0,000219	-0,0001
-0,0009	-0,00017	0,000568	0,000872	0,000509	0,00012
-0,001	-0,00027	0,000788	0,000882	0,000239	0,00022
-0,0008	-0,00017	0,000788	0,000902	-1,1E-05	0,00023
-0,0007	9,5E-05	0,000698	0,000742	0,000139	0,00023

G	I	K	L	P	R
-0,0006	-0,00152	-0,0008	-2,2E-05	-0,001114	-0,0003
7E-05	-0,00294	-0,00034	0,000398	-0,003094	-0,0004
0,0049	0,001204	-0,0005	-2E-06	0,000286	-0,0001
-0,0006	-0,00018	0,000296	-2E-06	-0,000414	0,00011
-0,0004	7,4E-05	0,000206	-2E-06	0,000176	9,4E-05
-0,0006	0,000474	0,000126	-8,2E-05	0,000416	-0,0002
-0,0007	0,000604	-1,4E-05	-0,00014	0,001216	0,00011
-0,0008	0,000744	0,000326	-0,0001	0,000926	-0,048
-0,0006	0,000564	0,000226	1,8E-05	0,000646	0,00032
-0,0006	0,000964	0,000286	-6,2E-05	0,000956	0,00015

RPnx= 0,001042	RPn= 0,001141755	
RPny= 0,000454	RPa C= 1,569654572	rad
RPnz= 0,000107	RPa ISO= 0,065417732	grd
RPox= 0,000714	RPo= 0,000766592	
RPoy= 0,000242	RPb C= 1,570029735	rad
RPoz= 0,000141	RPb ISO= 0,043922502	grd
RPax= 5,93E-05	RPa= 0,006817488	
RPay= 0,000161	RPc C= 1,563978786	rad
RPaz= 0,006815	RPc ISO= 0,390616339	grd

ROBOT - CELULA INCERCARI SIMULTANE

POZITIA COMANDATA			
Nr Crt.	XN1c	YN1c	ZN1c
1	5.45255	1.76072	1.10759

Nr Crt	Robot			Masa pozitionare		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	5.45255	1.76072	1.10759	5.45255	1.76072	1.10759
2	5.45245	1.76065	1.10755	5.45289	1.75934	1.10755
3	5.45256	1.76071	1.10765	5.45256	1.76179	1.10792
4	5.45291	1.76079	1.10757	5.45235	1.76231	1.10759
5	5.45256	1.7608	1.10761	5.45231	1.76235	1.10769
6	5.45253	1.76075	1.10759	5.45224	1.76292	1.10769
7	5.45248	1.76066	1.10762	5.45222	1.76301	1.10793
8	5.45254	1.76071	1.10757	5.45212	1.76302	1.10803
9	5.45258	1.76075	1.10764	5.45222	1.76304	1.10804
10	5.45262	1.76067	1.10762	5.45249	1.76288	1.10804

	XB	YB	ZB
ROBOT	5.452578	1.76072	1.107601
MASA	5.452395	1.76214	1.107807

AP=	3E-05	ROBOT
	0.0014	MASA

Apx	Apy	Apz	
2.8E-05	1E-06	1.1E-05	ROBOT
-0.0002	0.001418	0.00022	MASA

Li: 3E-05 0.000155 5.3E-05 0.000341 6.2E-05 **ROBOT**
5.7E-05 0.000117 5E-05 4.86E-05 6.9E-05

LB=	0.0001	R
	0.001	M

Li: 0.00144 0.002853 0.0004 0.000281 0.00026 **MASA**
0.00081 0.000806 0.0009 0.00095 0.00095

4.9E-09 3E-09 2.2E-09 5.77E-08 3.5E-10 **ROBOT**

1.9E-09 2.81E-10 2.5E-09 2.66E-09 9.9E-10

7.6E-08

SL=	9E-05	R
	0.0008	M

2.3E-07 3.57E-06 3.2E-07 4.67E-07 5E-07 **MASA**

2.5E-08 2.51E-08 4.4E-09 1.9E-10 2.7E-10

5.1E-06

RP=	0.0004	ROBOT
	0.0032	MASA