

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA

Ing. AUREL DIACONU

TEZĂ DE DOCTORAT

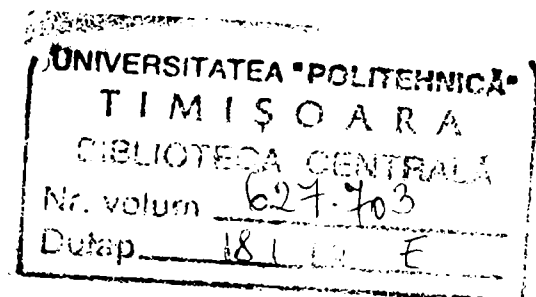
Contribuții la analiza și sinteza
sistemelor de teleoperare controlate
bilateral în poziție și forță

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC

Prof. dr. ing. MIRCEA CIUGUDEAN

TIMIȘOARA
-2000-



CUPRINS

Premizele, obiectivele și structura tezei.....	5
1. Câteva motivații preliminare.....	5
2. Obiectivele tezei.....	6
3. Structura tezei.....	7
Capitolul 1 Introducere în teleoperare.....	10
1.1 Semnificația noțiunii de teleoperare.....	10
1.2 Scurt istoric.....	12
1.2.1 Teleoperatoare mecanice.....	12
1.2.2 Servomanipulatoare electrice.....	14
1.2.3 Servomanipulatoare hidraulice.....	16
1.3 Structura generală a unui sistem de teleoperare.....	17
1.3.1 Unitatea locală master.....	18
1.3.2 Unitatea îndepărtată, slave.....	21
1.3.3 Canalul de comunicație.....	22
1.4 Teleoperare sau robotică ?.....	23
1.5 Categoriile importante de teleoperatoare.....	28
1.6 Stadiul actual al cercetării în domeniul teleoperării.....	30
1.6.1 Teleoperare în spațiul cosmic.....	31
1.6.2 Teleoperare în mediul submarin.....	38
1.6.2 Teleoperare în medicină.....	45
Capitolul 2 Sisteme de teleoperare controlate bilateral în poziție și forță.....	52
2.1 Performanțele unui teleoperator și interfața om-mașină.....	53
2.2 Reacția de forță și controlul bilateral în teleoperare.....	60
2.3 Controlul bilateral în teleoperarea clasică.....	62
2.3.1 Reacția de forță fără senzori de forță.....	62
2.3.2 Controlul bilateral bazat pe senzori la nivel de articulație.....	72
2.3.3 Controlul bilateral bazat pe senzori la nivel de efector final.....	74
2.4 Controlul bilateral în teleoperarea informatizată.....	75
2.4.1 Relația calculator operator în teleoperarea informatizată.....	76
2.4.2 Monitorizarea reacției de forță.....	81

Capitolul 3 Contribuții la modelarea analitică a sistemelor master-slave bilaterale	84
3.1 Considerații preliminare privind dinamica și controlul teleoperatorilor bilaterale.....	85
3.2 Modele analitice pentru teleoperatorii bilaterale.....	89
3.2.1 Modelul mecanic și principiile controlului bilateral	90
3.2.2 Analiza bazată pe modelul mecanic	98
3.2.3 Soluții pentru îmbunătățirea performanțelor controlului bilateral.....	107
3.3 Analiza teleoperatorilor bilaterale pe baza analogiei electro-mecanice.....	112
3.3.1 Modelarea teleoperatorilor prin rețele de circuite pasive.....	114
3.3.2 Analiza teleoperatorilor bilaterale folosind matricea de impedanță... ..	116
3.3.3 Evaluarea manevrabilității unui sistem de teleoperare.....	124
Capitolul 4 Verificarea experimentală a conceptelor legate de teleoperatorii bilaterale	129
4.1 Scopul și organizarea cercetării experimentale.....	129
4.2 Structura sistemului master –slave experimental.....	130
4.3 Monitorizarea forței de reacție.....	138
4.3.1 Program de monitorizare a forțelor de încărcare.....	142
4.3.2 Monitorizarea forței de reacție și conducerea paralelă.....	144
4.4 Simularea în timp real controlului bilateral.....	148
4.4.1 Modelul de simulare pentru sistemul master-slave experimental.....	149
4.4.2 Verificarea performanțelor sistemului master-slave.....	153
4.5 Rezultate experimentale și concluzii privind controlul bilateral.....	164
4.5.1 Mișcarea brațului slave într-un spațiu liber.....	164
4.5.2 Mișcarea brațului slave în spațiul cu constrângeri.....	169
Capitolul 5 Contribuții personale și concluzii finale	175
T. Contribuții teoretice.....	175
P. Contribuții practice.....	178
C. Concluzii finale.....	180
Anexa A	A1-A9
Anexa B.....	B1-B8
Anexa C.....	C1-C4

Premizele, obiectivele și structura tezei

1. Câteva motivații preliminare

Cercetarea în domeniul sistemelor robotice s-a orientat în ultima vreme spre sectoare aplicative mult mai avansate tehnologic decât cele care au lansat-o, adică cel al transferului de obiecte sau cel al sudării în puncte sau cu arc electric. Etapa în care un sistem robotic era considerat un simplu dispozitiv destinat efectuării în mod automat și repetitiv a unor operațiuni cu o complexitate redusă, individualizate și definite într-o fază inițială, a fost depășită încă din anii '80, când gama de aplicații a acestor sisteme s-a extins spre sectoare structurate cum este, spre exemplu, cel al asamblării industriale, sau spre sectoare (medii) mai puțin structurate. Sarcinile unui sistem robotic care operează în medii nestructurate nu pot fi prestabilite și programate în totalitate într-o fază inițială pentru că: țintele nu au o poziție bine determinată; în mediul respectiv există, de obicei, obstacole a căror natură și poziție este imprevizibilă; obiectele cu care interacționează sistemul robotic au, în general, un comportament dinamic diversificat, etc. În asemenea condiții sistemul robotic se complică inevitabil, din punctul de vedere al controlului, al planificării mișcării, al proiectării structurii cinematice și mecanice precum și al sistemului senzorial.

În această optică în câteva dintre centrele de cercetare și în universități consacrate în domeniul cercetării sistemelor robotice, mai precis în cele legate (prin activitatea de cercetare) de agențiile spațiale, au fost investite resurse importante pentru a se imagina, a se concepe și a se realiza o categorie specială de sisteme robotice și anume **sistemele de teleoperare**. În general, aceste sisteme, au fost gândite și proiectate pentru efectuarea unor operațiuni complexe în medii ostile sau îndepărtate, dând posibilitatea omului de a interveni în condiții mai convenabile din punct de vedere economic, și mai puțin riscante din punct de vedere al sănătății sau

vieții. Câteva dintre mediile vizate în acest sens sunt: sectoarele calde din industrie (turnătorii, forje, și altele), mediile infestate radioactiv, chimic sau biologic, spațiul cosmic și mediul submarin. Alte oferte posibile pentru aplicațiile teleoperatorilor vin din domeniul tratamentului cu substanțe chimice nocive pentru om, din domeniul chirurgiei în general și din sectorul chirurgiei microinvazive în mod special și din altele.

În România problematica instalațiilor de teleopere a fost abordată pentru prima oară în 1988 de "**Colectivul interdisciplinar de Roboți Industriali**" din Universitatea "POLITEHNICA" din Timișoara. În baza unor contracte de cercetare – proiectare cu diverși beneficiari din țară (I.M.M.U.M.- Baia Mare, U.N.I.O.-Satu Mare, C.I.U.M.M.R.-Timișoara) s-au proiectat și realizat o serie de manipuloare sincrone, de tip **master-slave**, cu sarcini cuprinse între 200 și 1000 Kg (MS.200, MS.500, MS.1000). Manipulatorul MS.500, din această serie, a fost medaliat cu aur la TIB '88. Acest succes s-a datorat în primul rând strategiei abordate în cercetarea și proiectarea sistemelor de teleoperare, în general, și al manipuloarelor sincrone în particular. Este vorba de o cercetare multidisciplinară care a reunit, într-o echipă, specialiști din următoarele domenii : mecanică și cinematică, acționări electrice și hidraulice, electronică și automatizări etc. În cadrul acestei echipe autorul s-a implicat direct în cercetarea, concepția și realizarea fiecăruia din sistemele de control ale manipuloarelor din seria amintită mai înainte. Succesul acestei implicări s-a datorat în special colaborării cu *Colectivul de cercetare* de la Fac. de Electronică. Împreună am reușit să depășim, prin profesionalism, probleme complexe care au apărut în fazele de : proiectare, realizare și exploatare a manipuloarelor amintite mai înainte.

Problematica sistemelor de teleoperare de tip master-slave nu a fost epuizată prin cercetările și realizările menționate mai sus, din contră, pe măsură ce s-a avansat în cunoașterea ei, a devenit mai complexă dar în același timp mai fascinantă, pentru autor. Această realitate a constituit motivația preliminară, principală, pentru continuarea cercetărilor în domeniu și materializarea rezultatelor acestora în cadrul unei teze de doctorat.

O altă motivație pentru această teză se leagă de faptul că autorul anticipează, pentru viitorul apropiat, o dezvoltare spectaculoasă a acestui sector al tehnicii, teleoperarea. Realizările recente în domeniul teleoperării în spațiul cosmic, în mediul submarin și în chirurgia de la distanță constituie argumentul principal al acestei

anticipații.

2. Obiectivele tezei

Lucrarea are ca scop major deschiderea mai largă a unor porți într-un domeniu interdisciplinar, teleoperarea. Pentru atingerea acestui scop autorul și-a propus direcționarea cercetărilor sale pe câteva obiective importante, legate de problematica sistemelor de teleoperare de tip master-slave cu reacție de forță / moment, fără timp de întârziere pe canalul de comunicație. La stabilirea acestor obiective s-a avut în vedere, în primul rând, stadiul actual al realizărilor în domeniul sistemelor de teleoperare, și în al doilea rând, direcțiile principale spre care sunt orientate cercetările actuale în domeniul respectiv. În acest context sunt consemnate în continuare, sub formă sintetică, problemele pe care autorul și le propune a le rezolva în această lucrare:

1. Analiza stadiului actual al realizărilor în domeniul teleoperării precum și a direcțiilor principale de cercetare în domeniu, la ora actuală și în viitorul apropiat. Prin aceasta s-a urmărit orientarea corectă a preocupărilor autorului, și direcționarea obiectivelor cercetării pe probleme actuale și de perspectivă.
2. Cercetarea relațiilor dintre operator și sistemul de teleoperare, pe baza unor modele descriptive care să evidențieze mai clar rolul și importanța interfeței om-mașină în rezolvarea unor sarcini complexe de teleoperare, în care calitatea comenzii operatorului depinde de rațiune dar și de simț.
3. Cercetarea posibilităților concrete, practice, de realizare a reacției de forță la sistemele de tip master - slave.
4. Cercetarea unor metode eficiente, bazate pe modele analitice, de analiză și evaluare a performanțelor unui teleoperator controlat bilateral.
5. Sinteza optimală a unor scheme de comandă și control pentru sistemele master-slave cu reacție de forță și verificarea lor prin simularea în timp real.
6. Conceperea și realizarea unei baze experimentale care să permită verificarea în practică a tuturor supozițiilor și conceptelor teoretice originale, introduse de autor pe parcursul tezei.
7. Organizarea și efectuarea unor teste experimentale clare și relevante pentru problematica analizată.

Finalizarea cercetării ale cărei obiective au fost enumerate mai sus a pretins

cunoștințe din domenii diferite: mecanică, acționări, teoria sistemelor automate, electronică, senzorică, achiziția și prelucrarea semnalelor, informatică și nu în ultimul rând matematică. Deși s-a întins pe mai mulți ani și a presupus o muncă intensă, această cercetare nu și-a propus să fie și nu este exhaustivă. Rezultatele obținute de autor se datorează mult experienței și efortului personal. Nu poate fi omis, însă, aportul unor studenți care, în cadrul lucrărilor de diplomă conduse de autor, au sprijinit materializarea unora din ideile acestuia legate, în special, de partea experimentală.

1. Structura tezei

Lucrarea este structurată pe 5 capitole în care s-a urmărit concretizarea obiectivelor tezei așa cum au fost ele enunțate în paragraful anterior.

În **capitolul 1** se face o introducere graduală în domeniul teleoperării marcând începuturile, stadiul actual și perspectivele acestui domeniu. Cu această ocazie se încearcă, într-o viziune proprie, actualizarea unor concepte depășite și introducerea unora noi legate de: domeniile de aplicație ale teleoperatorilor, structura acestora și clasificarea lor. În finalul capitolului sunt trecute în revistă principalele realizări și direcțiile de cercetare din trei domenii de aplicații ale teleoperării: în spațiul cosmic, în mediul submarin și în medicină.

În **capitolul 2** este expusă problematica specifică teleoperatorilor cu reacție de forță și filozofia controlului bilateral în teleoperare. Se prezintă un model descriptiv, original, care evidențiază căile pe care se poate acționa pentru îmbunătățirea performanțelor acestor sisteme, în care operatorul este parte integrantă. Sunt evidențiate de asemenea posibilitățile concrete de materializare a controlului bilateral în teleoperarea clasică. În finalul capitolului este prezentat într-o viziune proprie un concept nou privind teleoperarea și anume *teleoperarea informatizată*.

În **capitolul 3** sunt prezentate contribuțiile autorului privind analiza sistemelor de teleoperare controlate bilateral în poziție și forță. Sunt introduse o serie de concepte originale privind principiile de bază ale sistemelor de teleoperare controlate bilateral, principii rezultate în urma analizei bazate pe trei categorii de modele analitice: modelul mecanic, modelul bazat pe rețele de circuite pasive și modelul cuadripolar. Problema principală urmărită în acest capitol a fost cea a dependenței dintre legea de control bilateral, performanțele de urmărire a poziției, calitatea reacției de forță și

stabilitatea sistemului. În finalul capitolului se prezintă o metodă de sinteză a schemei de control care asigură optimizarea concomitentă a performanțelor dinamice și a senzației de încărcare la mâna operatorului (reacția kinesthetică) în condițiile menținerii unei rezerve de stabilitate prestabilite.

În **capitolul 4** este expusă cercetarea experimentală realizată de autor pe model de simulare și pe model real. La începutul capitolului este prezentată în mod sintetic baza materială care a constituit suportul pentru testele experimentale. Este vorba de un sistem master-slave experimental constituit în principal din două *brațe robot PUMA 600*. Sunt prezentate apoi modelele de simulare (în mediul SIMULINK) ale acestui sistem, testele experimentale realizate (prin simulare) cu aceste modele și rezultatele experimentale semnificative. Urmează testele experimentale realizate pe modelul real și analiza comparativă a rezultatelor acestora cu cele similare, obținute prin simulare.

Tot în acest capitol sunt prezentate în sinteză experimente legate de conceptul de monitorizare a reacției de forță și de conceptul de conducere paralelă în teleoperarea informatizată.

În **capitolul 5** sunt prezentate: contribuțiile teoretice, contribuțiile practice și experimentale și concluziile finale referitoare la sistemele de teleoperare clasice controlate bilateral în poziție și forță și la teleoperarea informatizată. Sunt expuse de asemenea modalitățile în care s-au valorificat rezultatele cercetării din această teză și preocupările de viitor ale autorului legate de cercetarea în domeniul teleoperării.

Capitolul 1

Introducere în teleoperare

S-a considerat oportun un capitol de introducere în domeniul tehnic al teleoperării pentru a clarifica de la început sensul noțiunii de teleoperare și a conceptelor legate de aceasta, mai ales că în literatura tehnică românească noțiunea în cauză este mai rar uzitată, iar cercetarea autohtonă a abordat foarte timid acest domeniu al tehnicii. În scopul clarificării amintite sunt prezentate într-un scurt istoric ideile și realizările de pionierat care au stat la baza acestui domeniu tehnic relativ nou. Printr-o paralelă între teleoperare și robotică sunt scoase în evidență caracteristicile esențiale ale unui teleoperator în comparație cu cele ale unui robot, acesta din urmă fiind considerat mai cunoscut. Pentru că există o diversitate mare în ceea ce privește arhitectura teleoperatorilor se încearcă o sistematizare a informațiilor pe această temă și prezentarea unei structuri generale în care pot fi încadrate toate arhitecturile amintite. Sunt prezentate apoi, spre exemplificare, câteva imagini ale unor componente mai semnificative din cadrul structurii unor sisteme de teleoperare reale. În final, pentru o localizare mai precisă a preocupărilor din această teză este prezentat stadiul actual al cercetărilor în domeniul teleoperării și direcțiile spre care se focalizează aceste cercetări în viitorul apropiat. Sunt trecute în revistă realizări și tendințe în trei domenii de aplicații relevante: teleoperare în spațiul cosmic, teleoperarea în mediul submarin și teleoperarea în medicină.

1.1 Semnificația noțiunii de teleoperare

Etimologic noțiunea de teleoperare semnifică o operațiune manuală care se execută departe de operatorul uman. Deoarece sunt și alte noțiuni cu sens apropiat ca: telecomanda, teleghidarea, teledirijarea etc. s-a considerat necesar să se introducă

două precizări care să clarifice mai bine sensul tehnic al acestei noțiuni și să-l diferențieze de sensul noțiunilor amintite mai înainte. [Diaconu 92]

1. Operațiunea manuală care se execută de parte de operator este una de manipulare de materiale (obiecte sau scule).
2. Depărtarea este o noțiune relativă și se referă la spațiul aflat în afara celui tangibil de brațul și mâna operatorului uman. Această depărtare poate fi de câțiva centimetri, sau dimpotrivă de câteva mii de kilometri.

Un *teleoperator* sau *telemanipulator* este o instalație pentru manipulare de materiale, comandată de la distanță de un operator uman. Din acest motiv în literatura tehnică este consacrată și noțiunea de *instalație de teleoperare* [Kovacs 82]. În interpretarea lui Jean Vertut, unul dintre cei mai recunoscuți cercetători în domeniu, un teleoperator este; ”o *unealtă, prelungire a omului, asemenea vătraiului folosit la ațâțarea focului* “ [Vertut 73]. Această interpretare sintetică sugerează într-un fel și scopul inițial pentru care au fost concepute instalațiile de teleopeare și anume acela de a-i permite omului să acționeze în medii ostile. *Un mediu ostil este acela în care un om cu o constituție fizică normală nu poate acționa fără a i se periclita sănătatea sau chiar viața.* [Goertz 66]. Este vorba de: mediile supraîncălzite sau subrăcite, mediile cu presiuni ridicate sau prea rarefiate, mediile infestate radioactiv, chimic sau biologic, mediile cu pericol de explozie etc.

Cercetând evoluția în timp a acestui domeniu tehnic se constată că noțiunea de teleoperare și-a extins semnificația spre operațiuni noi, iar categoriile de mediu în care se poate acționa prin teleoperare s-au înmulțit. Astfel, unele operațiuni care depășesc posibilitățile fizice ale omului cum sunt, spre exemplu, operațiunile de manipulare a unor sarcini de sute sau mii de kilograme sau cele de manevrare abilă a unor sarcini microscopice, sunt incluse în domeniul teleoperării. Teleoperatoarele care rezolvă aceste operațiuni au și denumiri specifice. Cele care sunt destinate sarcinilor mari sunt denumite *manipulatoare amplificatoare de putere*, iar cele destinate manevrărilor de sarcini ușoare sunt denumite *macro-micro manipulatoare*. [Tokashiki 96]. În privința mediilor în care se poate acționa prin teleoperare se constată că pe lângă mediile ostile mai apar alte trei categorii; *mediile inaccesibile, mediile cu hazard și mediile neorganizate*. O caracterizare succintă, în viziune proprie, a categoriilor de medii precizate mai înainte se prezintă în continuare.

- Un mediu inaccesibil este acela în care datorită îngustimilor, labirinturilor, etc. operatorul nu poate pătrunde. Este cazul, spre exemplu, interiorului unor piese și subansamble turnate sau asamblate nedemontabil. În această categorie poate fi inclus și mediul din interiorul corpului unei ființe vii (deci și al omului) unde se operează prin endoscopie și laparoscopie. Tot inaccesibil este denumit și un mediu cu anumite proprietăți fizico-chimice în care omul poate pătrunde, dar prezența sa duce la deteriorarea calității mediului în cauză. Pentru această categorie de medii inaccesibile se pot exemplifica mediile camerelor sterile din medicină și mediile camerelor curate din tehnologia microelectronicii unde nu este permis să existe mai mult de 10 particule de maxim un micron într-un metru cub [Diaconu 90].
- Mediile cu hazard sunt considerate acelea în care apar situații imprevizibile privind operațiunea care trebuie desfășurată. Este vorba în primul rând de mediile mai puțin cunoscute aprioric.
- Mediile neorganizate sunt considerate mediile (cunoscute aprioric), dar în care nu se poate face, sau nu se merită făcută o ordine astfel încât operațiunile de manipulare și transfer de obiecte să se desfășoare în mod automat.

1.2. Scurt istoric

Din cercetare bibliografică efectuată în legătură cu tematica din această teză s-a constatat că, spre deosebire de alte domenii (de cercetare), majoritatea referințelor importante în teleoperare și chiar foarte recente privind cercetarea unor probleme specifice, nu neapărat generale, fac trimitere în mod constant spre câteva realizări care țin de faza de pionierat a teleoperării. Această constatare a constituit motivația cercetării mai îndeaproape a acestei faze dintr-un unghi de vedere direcționat mai mult pe problematica teleoperatorilor cu reacție de forță. Această cercetare a contribuit în mod esențial la formarea unei viziuni proprii privind problematica amintită mai înainte, iar următoarea prezentare succintă, pe trei secțiuni a fazei de pionierat, este făcută în conformitate cu această viziune.

1.2.1 Teleoperatoare mecanice

Istoria teleoperării începe în anii '40 și este strâns legată de sectorul energiei atomice care după al doilea război mondial cunoaște o dezvoltare spectaculoasă (începea era descurajării atomice). Ray Geertz de la Aragonne National Laboratory

(ANL), laborator patronat de Comisia de Energie Atomică din SUA, inventează prima instalație mecanică de teleoperare pe care a denumit-o " *Master- Slave Manipulator*" (*manipulator stăpân-sclav*) sau prescurtat MSM. Terminologia *master-slave*, care era deja folosită în domeniul electric, semnifică prin *slave* un dispozitiv care execută și care răspunde altui dispozitiv, denumit *master* adică dispozitivul de comandă. Primul MSM denumit *Model 1* (M1) a fost prezentat public de însăși inventatorul în anul 1949. Prin acest prim model se defineau caracteristicile esențiale pe care trebuie să le aibă un dispozitiv de manipulare de tip MSM. Dintre aceste caracteristici se punctează următoarele:

- Brațul slave trebuie să posede șase grade de libertate pentru a poziționa și orienta în spațiu efectorul final reprezentat aici printr-un dispozitiv de prehensiune destinat fixării sau eliberării unui obiect.
- Mișcările brațului slave trebuie cuplate cu cele ale brațului master astfel ca poziția și direcția de mișcare a celor două brațe să corespundă.
- Cuplarea celor două brațe trebuie să fie *bilaterală*. Acest concept important presupune ca forța de la slave să se transmită la master, iar deplasarea brațului master să producă o deplasare similară la brațul slave.

Manipulatorul M1 a fost destinat să opereze într-o incintă cu pereți blindati în care se aflau materiale radioactive. Cu toate că s-au ivit probleme serioase la instalare (legate în special de penetrarea pereților și asigurarea unei protecții corespunzătoare în afara incintei), calitățile deosebite ale unui astfel de telemanipulator au trezit interesul pieții și bineînțeles al cercetării în domeniu. În anul 1950 Central Research Laboratory (CLR) din SUA începe colaborarea cu Ray Geortz și grupul său de cercetare de la ANL, dobândind și dreptul de a fabrica și comercializa primul model MSM și deasemenea pe celelalte care vor fi proiectate ulterior de grupul amintit. Prin această colaborare sunt realizate încă opt modele de MSM (ultimul, Model 8 în 1954) și sunt comercializate (în perioada 1951-1954) 74 de unități MSM. Printre principalii beneficiari s-au numărat [WWW 1]:

- Oak Ridge National Laboratory
- Carrbide & Carbon Chemical Co.
- General Electric Co.
- Nissho Co. Ltd., Japonia

În 1954 CRL întrerupe colaborarea cu ANL și continuă pe cont propriu cercetarea și producția în domeniul MSM. Se trece și la o altă denumire a modelelor executate folosind litere în locul cifrelor, așa cum se procedase până la modelul M8. Se realizează în decursul anilor o serie, destul de importantă, de manipuloare de tip MSM mecanice. Din această serie se amintesc în ordine cronologică doar câteva modele: Model A (1960), Model E(1961), Model F(1962), Model G(1964), Model J(1966), Sistem 50(1978), Model G-HD(1980), Model G-HDE(1990). Trebuie adăugat faptul că unele dintre modelele înșiruite mai sus realizează o izolare perfectă a atmosferei din incinta unde acționează brațul slave (de obicei o atmosferă de gaz toxic) și atmosfera exterioară unde se află brațul master.

Statisticile arată că până în 1970 s-au instalat în jur de 10.000 de unități MSM mecanice, cu sarcini cuprinse între 5Kg și 23Kg. CRL a realizat peste 8.000 dintre acestea.

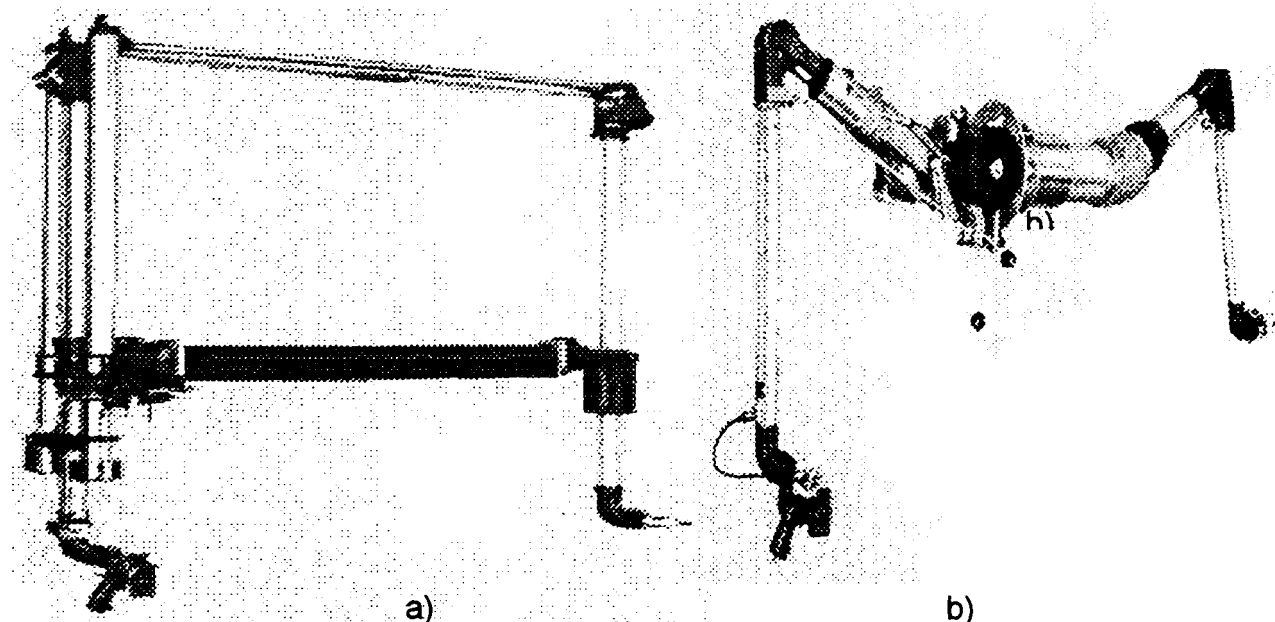


Figura 1.1

În fig.1.1 se prezintă imaginile a două dintre manipuloarele mecanice de tip MSM, fabricate de CRL : a)Model H, b) Sistem 50 [WWW 1].

1.2.2 Servo-manipuloare electrice

În anul 1955 același Ray Goertz și grupul său de cercetare de la ANL realizează primul servo-manipulator la care cuplarea între master și slave s-a făcut prin cablu electric. S-a creat astfel posibilitatea ca distanța dintre cele două unități, master și slave, să poată fi considerabil mărită. Această invenție deschidea o nouă etapă de evoluție a teleoperării denumită în mod simbolic: *Eliberarea sclavului de stăpân*

[Geortz 66]. Până în 1966 la ANL se produc patru modele de servo-manipulatoare electrice, ultimul fiind denumit *Mark E-4*.

În anul 1971, CRL începe să producă servo-manipulatoare electrice, realizând Model M, o versiune modificată a lui Mark E-4. Până în 1983 mai sunt produse două varia...e ale acestui model, una... destinată Laboratoarelor Fermi, iar cealaltă pentru Oak Ridge National Laboratory, unde s-a realizat și electronica de comandă a acestui tip de servo-manipulator. În 1985 același centru de cercetare demarează proiectul de dezvoltare a unui nou sistem de teleoperare denumit generic **SAMSIN (Servo Actuated Manipulator System with Intelligent Networks)**. Acest sistem utilizează partea mecanică (brațele master și slave) de la Model L (MSM mecanic) și un sistem de comandă digitală bazat pe o structură multiprocesor ierarhizată. Datorită reacției de forță, bine pusă la punct, sistemul s-a dovedit a fi foarte eficient, mai ales pentru operațiuni de mentenanță și reparații în medii îndepărtate. În fig.1.2 se prezintă cele două unități utilizate în uză; a) unitatea master, b) unitatea slave. [WWW 2]

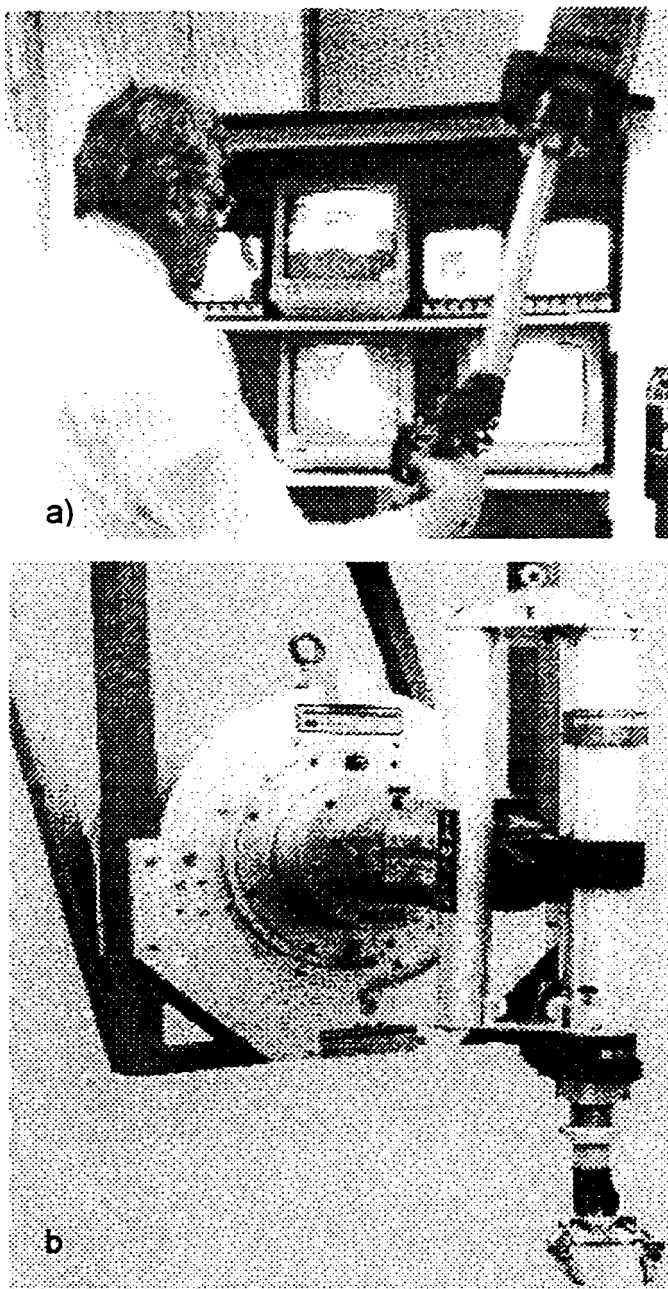


Figura 1.2

Cercetări avansate în domeniul servo-manipulatoarelor se înregistrează și în alte țări, cum este de exemplu Franța, unde s-a dezvoltat seria de servomanipulatoare MA, (din care MA23 este cel mai performant), precum și instalația ERIC II, bine cunoscută datorită *comenzii telesimbiotice* (asupra acestei comenzi se va reveni pe parcursul tezei). [Vertut 76]

Numărul servo-manipuloarelor electrice este mult mai mic decât al manipuloarelor master-slave mecanice. Explicația ar putea fi dată de următoarele două argumente:

- Servo-manipuloarele electrice sunt mult mai scumpe decât manipuloarele mecanice.
- Sunt mai pretențioase în ceea ce privește condițiile de mediu (temperatură, radiații, umiditate, etc.)

1.2.3 Servo-manipuloare hidraulice

În anul 1954 americanii lansează proiectul unui avion cu propulsie nucleară (care nu s-a finalizat). În cadrul acestui proiect General Electric avea sarcina de a realiza un sistem de telemanipulare de putere. Pentru aceasta se înființează o echipă de cercetare condusă de *Ralph Moscher*, care realizează prototipul primului servo-manipulator electro-hidraulic, denumit *Handyman*. În fig.1.3 se prezintă acest manipulator condus chiar de inventatorul lui. În concepția acestuia și a următorului

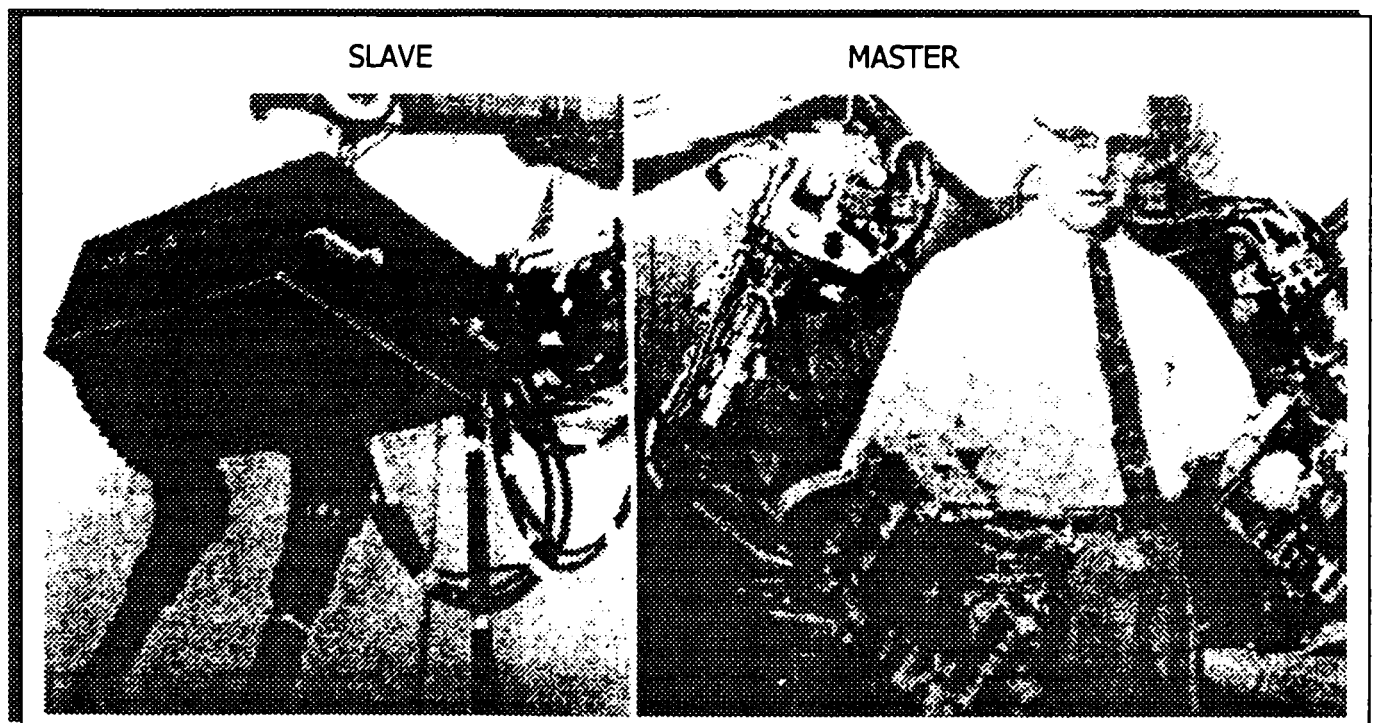


Figura 1.3

prototip denumit *Yesman* apar o serie de idei novatoare :

- Se introduce pentru prima oară conceptul de *reacție inversă de forță*.
- Degetele dispozitivului de prehensiune posedă două grade de mobilitate ceea ce conferă un plus de dexteritate manipulatorului.

- Partea de master se bazează parțial pe principiul *exoscheletului*, adică un sistem care înconjoară antebrațul, sesizând rotațiile și translațiile acestuia pentru a fi transmise către brațul slave.
- Brațul slave avea zece grade de mobilitate din care patru la cele două degete independente ale dispozitivului de prehensare.

Ideea reacției de forță introdusă de Ralph Moscher a fost preluată de constructorii de autovehicole grele și utilizată la realizarea servodirecției. Aceasta permitea piloților să conducă asemenea vehicule cu simț și în siguranță, chiar pe terenuri foarte accidentate.

1.3 Structura generală a unui sistem de teleoperare

În decursul celor cinci decenii de la inventarea primei instalații de teleoperare și

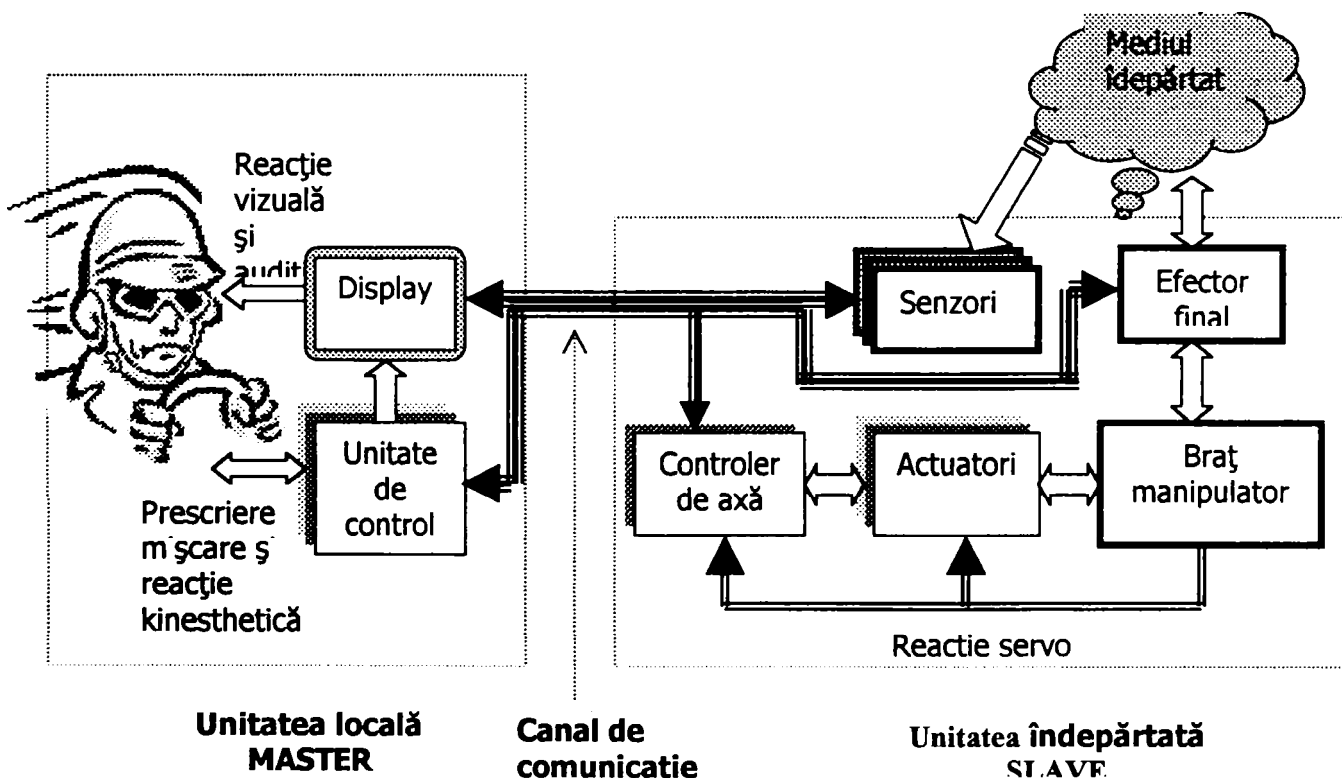


Figura 1.4

până în prezent s-a înregistrat o mare diversitate în tipologia arhitecturală a acestei categorii de sisteme, începând cu copiatoarele mecanice MSM și culminând cu sistemele complexe pentru teleoperare în spațiul cosmic. Chiar în condițiile acestei diversități J. Wayne prezenta o configurație generală în care se încadrează toate structurile de teleoperare [Wayne 86]. În timp însă au apărut concepte noi care apropie tot mai mult structura unui teleoperator de cea a unui robot, ba mai mult, însăși denumirea de teleoperator este înlocuită cu cea de *robot teleoperat*. Pe baza

627.703/181E

acestor considerente și în concordanță cu viziunea proprie, în care un teleoperator este un robot fără generator de traiectorie în sistemul de comandă, dar cu o interfață operator-sistem mult mai dezvoltată, se prezintă în fig.1.4 o schemă generală pentru un sistem de teleoperare, care nu diferă în mod esențial de cea a lui Wayne . Cu această ocazie se introduce și o parte din terminologia actualizată privind teleoperarea.

În schemă sunt evidențiate cele trei entități de bază ale unui sistem de teleoperare:

1. *Unitatea de comandă*, denumită și unitate locală, sau *master*,
2. *Unitatea de execuție*, denumită și unitate îndepărtată, sau *slave*,
3. *Canalul de comunicație*, care leagă cele două unități.

1.3.1 Unitatea locală, master.

Această unitate conține căile și mijloacele care asigură pe de-o parte transmiterea comenzilor operatorului spre unitatea îndepărtată, iar pe de altă parte transmiterea informațiilor de la unitatea îndepărtată spre operator.



Figura.1.5

Fizic, unitatea de comandă conține o diversitate de dispozitive, mai mult sau mai puțin sofisticate, unele specifice acestui domeniu, altele având o destinație mai generală. Acestea sunt parte a *interfeței om-mașină*, care în cazul teleoperării are o importanță covârșitoare. Pentru o imagine mai completă asupra acestei interfețe în fig.1.5 se prezintă două unități de comandă mai semnificative: a). Unitatea de

comandă a sistemului de teleoperare **MA23** (realizat în Franța). b). Unitatea locală, master a sistemului de teleoperare de la Jet Propulsion Laboratory (**JPL**), unul dintre cele mai reprezentative centre de cercetare patronate de NASA [WWW 3].

În teorie, dar mai ales în practică se poate consemna o mare diversitate în privința componenței unei unități de comandă. S-a considerat prin urmare necesară o sistematizare pe grupe funcționale a componentelor acestei unități. S-au delimitat în baza acestui criteriu trei grupe de dispozitive.

i. Dispozitive de prescriere a comenzilor de mișcare.

Există o mare varietate de dispozitive destinate prescrierii de la distanță a comenzilor de mișcare. Aceste dispozitive pot fi incluse în una dintre următoarele categorii:

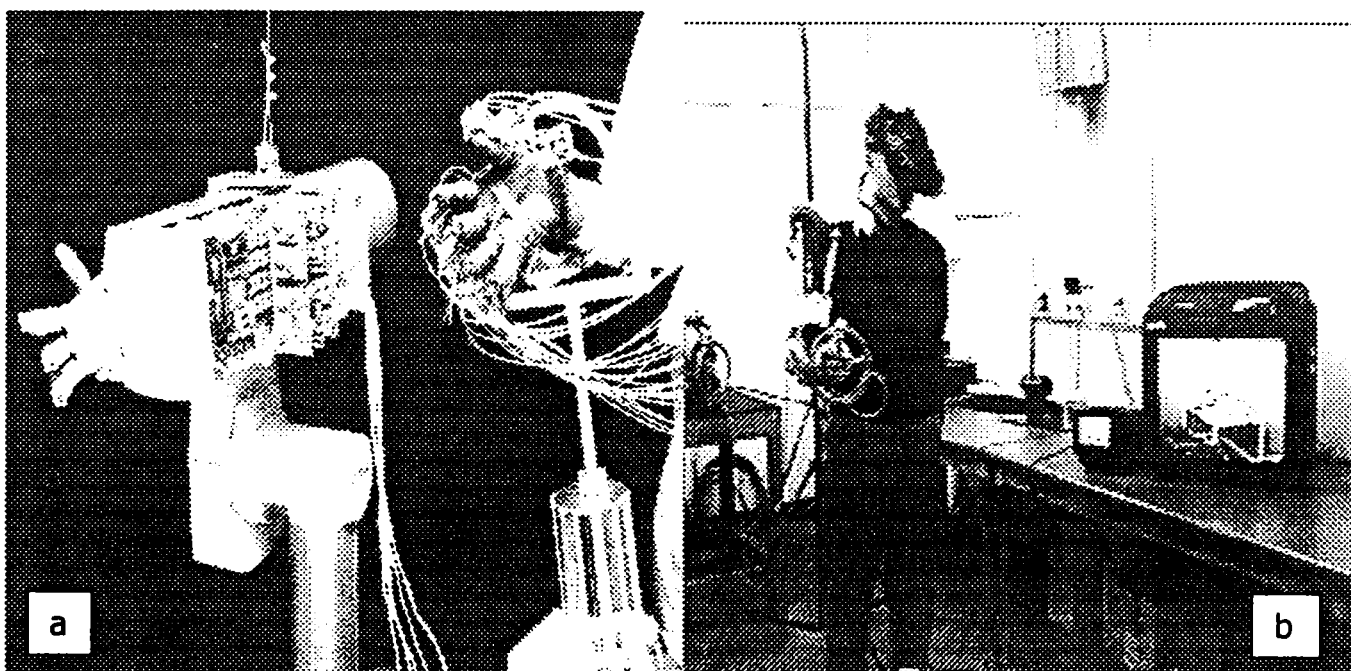


Figura 1.6

- a) Panouri de comandă fixe sau mobile care pot fi dotate cu: butoane, comutatoare, joystikuri și, mai nou, cu bilă senzorială. Această bilă senzorială denumită și mouse spațial (3D), este construită pe principiul senzorului de forță/moment pe șase direcții. A fost utilizată pentru prima oară în cadrul experimentului ROTEX (primul experiment european în domeniul teleoperării în spațiul cosmic) [Hirzinger 93].
- b) Mecanisme spațiale cu mai multe grade de mobilitate denumite braț master sau dispozitiv de control manual (*hand controller*). În fig. 1.5 pot fi remarcate ușor două tipuri de asemenea dispozitive, dintr-o gamă extrem de diversificată.

c) Exoschelete, fig.1.6. Aceste dispozitive se atașează, de obicei, palmei (fig.1.6a), brațului (fig.1.6b) sau chiar celor patru membre ale operatorului de la care preiau mișcările pentru a fi transmise spre manipulatorul slave [WWW 4, WWW5].

Tendința actuală în domeniul dispozitivelor de prescriere manuală este aceea de a se crea dispozitive universale eliberate de constrângerile impuse de morfologia sistemului slave. Deasemenea se tinde spre dispozitive cât mai ergonomice care să permită operatorului comenzi cât mai naturale și eficiente. Aprecierea performanțelor unui dispozitiv sau a unei categorii de dispozitive de prescriere nu se poate face decât la nivel global luând în considerare caracteristicile brațului slave, operatorului și nu în ultimul rând sarcina aleasă pentru testarea performanțelor.

ii. Dispozitive de achiziție și prelucrare a comenzilor.

De la dispozitivele de prescriere pot fi achiziționate următoarele tipuri de semnale: de poziție (deplasare), de viteză, de accelerație și de forță. Pentru achiziția unor astfel de semnale este nevoie de o dotare corespunzătoare cu senzori a dispozitivelor de prescriere. Preluarea informațiilor de la senzori și transformarea lor în comenzi compatibile, care să poată fi transmise prin canalul de comunicație, recepționate și înțelese de unitatea îndepărtată, se face prin interfețe specializate. La sistemele de teleoperare complexe aceste interfețe sunt cuplate cu unul sau mai multe calculatoare

iii. Dispozitive de reflectare a informațiilor.

Informațiile pentru operator provin fie din mediul îndepărtat unde acționează manipulatorul slave, fie de la un mediu virtual simulat pe calculator. Aceste informații ajung la operator prin: dispozitive de vizualizare, dispozitivele de prescriere active (moto-rizate) care reflectă forța, dispozitive de excitare a analizorului cutanat care reflectă semnalele tactile și dispozitive acustice (difuzoare).

În această grupă intră și dispozitivele de prelucrare a informațiilor, înainte de reflectare spre operator. Acestea realizează o filtrarea informațiilor recepționate și o adaptare a acestora pentru a le reflecta cât mai sugestiv spre operator. În ultimul timp se încearcă o predicție a informațiilor de control, folosindu-se modelul de referință al unității îndepărtate și al mediului corespunzător. Prin aceasta se caută să se elimine cât mai mult din efectul negativ pe care îl are asupra conducerii manuale întârzierea ce apare pe canalul de comunicație în cazul distanțelor mari dintre postul de comandă și mediul îndepărtat [Hirzinger 93], [Sheridan 93].

1.3.2 Unitatea îndepărtată, slave

În cazul general, această unitate constă dintr-un *braț manipulator* care are un *efector final* reprezentat de un dispozitiv de prehensare a obiectelor, sau o sculă specială. Brațul manipulator este un mecanism spațial format dintr-o configurație de corpuri rigide (elemente) legate între ele prin articulații. Fiecare articulație (*joint*) a brațului determină mișcarea efectorului final și reprezintă de obicei un *grad de libertate* al manipulatorului. Este necesar un minim de șase grade de libertate pentru ca efectorul să ocupe poziții și orientări arbitrare în spațiul de lucru. Pentru manipuloarele care au la bază un lanț cinematic deschis există câte un *actuator* pentru fiecare articulație (*joint actuator*). Cel mai des sunt utilizați actuatorii electromagnetici și cei hidraulici. Controlul mișcării se realizează în majoritatea cazurilor în buclă închisă (*servocontrol*

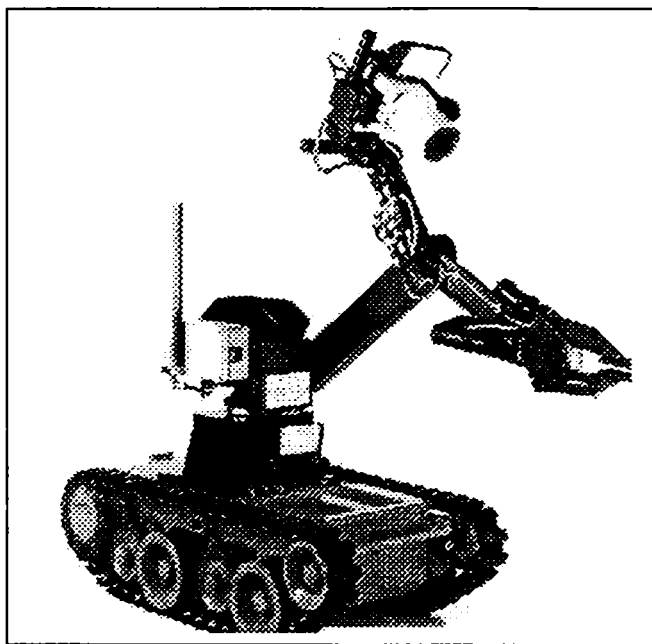


Figura 1.7

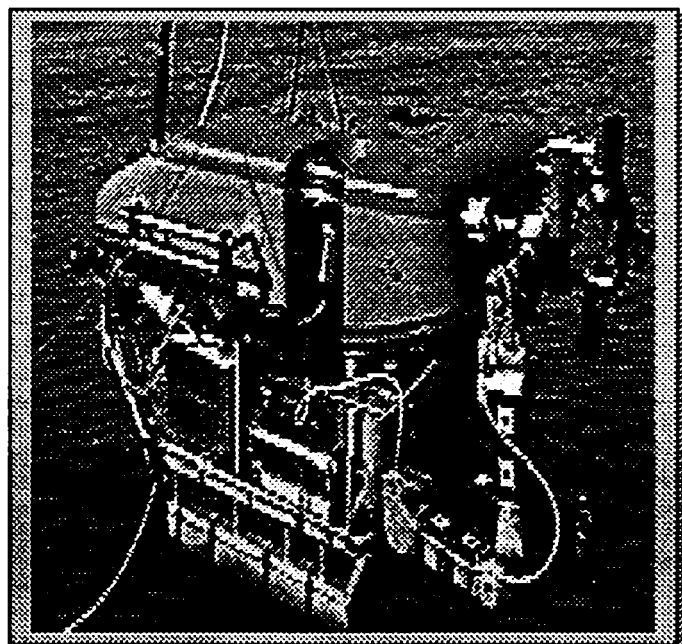


Figura 1.8

). Reacția inversă este asigurată de *traductoare*: de poziție, viteză, de accelerație și de forță/moment. Controlul mișcării brațului slave este realizat la nivel de axă printr-un controler de axă (*Joint controller*). Tot în cadrul unității îndepărtate sunt incluși și *senzorii*. Aceștia pot fi montați pe brațul manipulator (cazul senzorilor de forță/moment și senzorilor tactili) sau în mediul de acțiune (cazul senzorilor vizuali).

În foarte multe aplicații, pentru a se mări raza acțiune (spațiul de lucru) a brațului slave, acesta se atașează de un sistem mobil care se deplasează în spațiu. Acest sistem mobil poate fi spre exemplu: un vehicol terestru pe roți sau șenile (fig.1.7), un aparat submersibil pilotat (batiscaf) sau unul teleghidat (fig.1.8), o navetă spațială etc.

1.3.3 Canalul de comunicație

Acesta asigură vehicularea informațiilor și comenzilor între cele două unități.

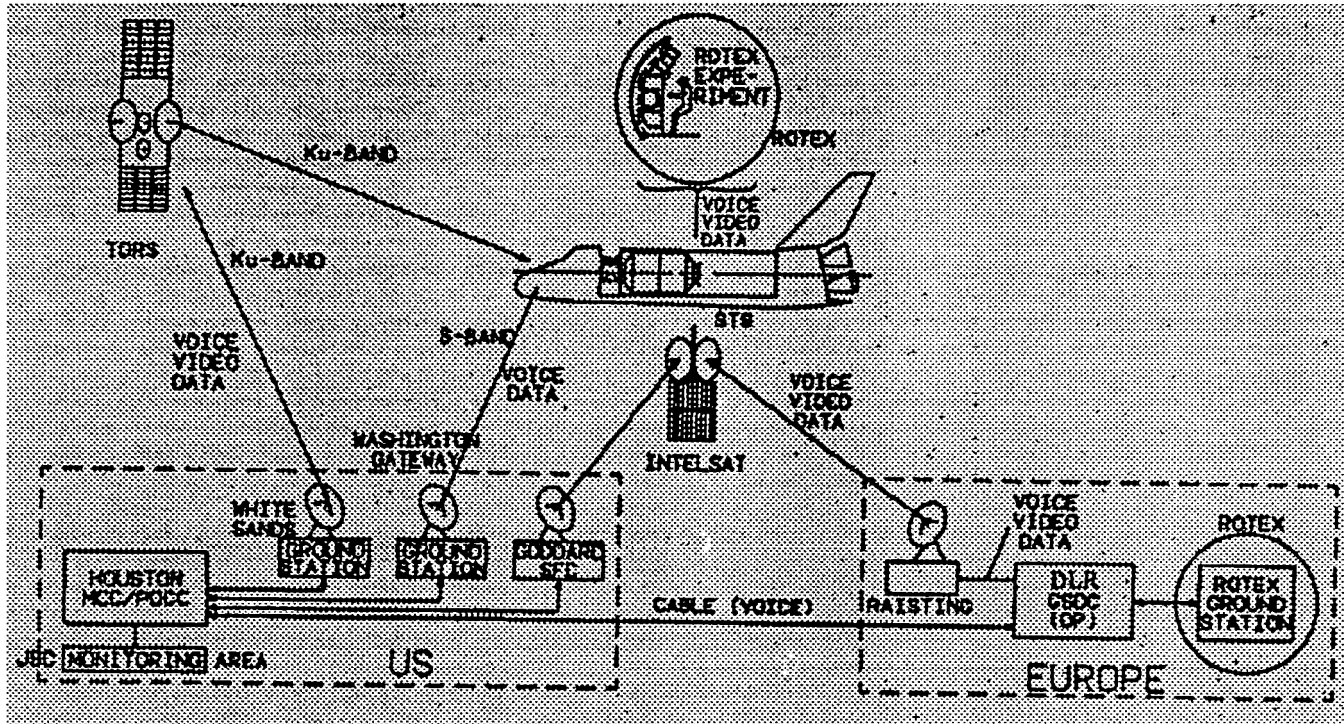


Figura 1.9

Conectarea fiecărei unități la acest canal se realizează prin interfețe specializate. Fizic, canalul de comunicație poate fi realizat prin transmisii mecanice, prin cablu electric (multifilar sau coaxial), prin cablu cu fibră optică, sau fără cablu (prin legătură radio, legătură ultrasonică sau în infraroșu). Alegerea canalului de comunicație depinde de distanța dintre cele două unități și de mediul prin care se realizează transmisia. Una dintre problemele transmisiilor semnalelor în cazul teleoperării la mare distanță este legată de lărgimea benzii de transmisie care este mare [Sheridan 91]. Transmisia serială multiplexată a comenzilor de mișcare dintre master și slave nu pune probleme deosebite datorită frecvenței de răspuns a brațului slave care este mică de 20 Hz. În aceste condiții, frecvența de eșantionare a semnalului transmis trebuie să fie mai mare de 30 Hz. Pentru canalul de reacție inversă de poziție și forță frecvența de eșantionare trebuie să fie mai mare de 100 Hz. La aceste frecvențe de eșantionare viteza de transfer pe linia serială de 9.800 bps. satisface pe deplin cerințele majorității sistemelor de teleoperare. Problema principală apare la transmiterea semnalelor video unde viteza de transmisie trebuie să fie de ordinul sutelor de MHz pentru a se asigura o frecvență de 30 de cadre pe secundă [Drascic 91].

O imagine mai completă asupra complexității canalului de comunicație în teleoperarea la mare distanță este oferită de schema din fig.1.9 în care se prezintă arhitectura sistemului de comunicație folosit în primul experiment european privind teleoperarea în spațiul cosmic, ROTEX. [Hirtzinger 93].

În ultima vreme sunt tot mai dese încercările de a utiliza rețeaua Internet ca suport fizic pentru canalul de comunicație în teleoperare. S-au obținut unele rezultate pozitive în domeniul teleoperării roboților mobili [Maslovski 1997]. Sunt însă o serie de probleme care țin de rata de transfer a datelor prin rețeaua Internet, care este variabilă (în limite destul de mici) precum și din întârzierile mari care apar în transmiterea unor pachete mari de date cum sunt cele utilizate pentru transmiterea de imagini în timp real [Kruger 96].

1.4. Teleoperare sau robotică ?

Întrebarea retorică din titlul acestui subcapitol a fost subiect de polemică, timp de aproape două decenii (anii '60 și '70), între partizanii teleoperării și cei ai roboticii. Se pare că această polemică a fost generată de faptul că cele două sectoare s-au lansat de pe suporturi de finanțare diferite. Teleoperarea a fost lansată prin sprijinul comisiilor de energie atomică, iar robotica se lansează odată cu industria automobilelor și se extinde în celelalte sectoare ale construcției de mașini. Extinderea rapidă a roboților industriali în comparație cu instalațiile de teleoperare a condus la ideea că teleoperatoarele reprezintă o preistorie a roboților, iar teleoperarea un sector bine limitat în cadrul roboticii. Această idee a fost combătută de partizanii teleoperării, folosind pentru aceasta, ca argumente, o parte din conceptele inițiale care au stat la baza celor două domenii și conform cărora teleoperatoarele au fost concepute pentru *prelungirea* omului, iar roboții pentru *substituirea* omului. Conform acestor concepte există unele caracteristici specifice care delimitează roboții de teleoperatoarele. Acestea sunt succint prezentate în continuare:

☞ *Teleoperatoarele sunt caracterizate de:*

- Realizarea unor funcții complexe, mai puțin previzibile, în medii nestructurate, sau în medii cu hazard,

- Existența unei anumite distanțe între punctul de comandă și locul desfășurării acțiunii comandate,
 - Prezența operatorului uman este indispensabilă pe tot parcursul desfășurării sarcinii de teleoperare.
- + *Roboții sunt caracterizați de următoarele:*
- Realizarea unor sarcini relativ simple, previzibile, în medii structurate (organizate).
 - Acțiunile necesare executării unei sarcini se desfășoară în mod automat.
 - Prezența operatorului uman este necesară doar în faza de programare sau în cea de lansare sau de oprire a activității robotului.

Caracteristicile enumerate mai sus nu sunt însă suficiente pentru a delimita clar sectorul roboticii de cel al teleoperării pentru că există o serie de alte însușiri care conduc spre ideea convergenței celor două sectoare. Astfel, din punctul de vedere constructiv între un teleoperator și un robot nu există diferențieri principiale. Mecanica, actuatoarele, calculatorul de comandă ale unității slave sunt similare cu ale unui robot. Apar mici diferențieri la nivelul interfeței om-mașină, care în cazul teleoperatorilor este mai dezvoltată, fapt pentru care în ultima vreme teleoperatorii sunt considerate *sisteme robotice care combină omul cu mașina în mod sinergetic*. [WWW 6] Relația care încheie convergența dintre teleoperator și robot este demonstrată prin faptul că roboții pot fi modificați pentru a deveni teleoperatori, iar teleoperatorii pot fi modificate pentru a realiza acțiuni autonome. Mai mult un robot în faza de programare prin învățare este un teleoperator iar un teleoperator care funcționează în regim autonom este un robot.

În ideea găsirii și a altor argumente care să stabilească o delimitare sau o convergență mai clară între roboți și teleoperatori s-a făcut apel la datele statistice referitoare la populația roboților și a teleoperatorilor. Deși foarte diversificate și actualizate statisticile în cauză vizează în special aspectul cantitativ. În acest context populația teleoperatorilor este nesemnificativă, în comparație cu cea a roboților, fapt pentru care sunt consemnate numai cele 10.000 de unități MSM mecanice existente în anii 70 [WWW 9]. Pe de altă parte consultând rapoartele unor centre de cercetare consacrate pe cele două domenii, cum ar fi JPL, CRL, MIT, IPA Stuttgart, etc. sau chiar informațiile din mass-media, se constată că sunt consemnate mult mai multe

evenimente în care sarcini complexe specifice celor două domenii au fost rezolvate folosind instalații de teleoperare. Misiunile navei spațiale *Discovery* dotate cu brațul robot RMS (misiuni care sunt detaliate în finele acestui capitol) pot fi un bun exemplu în contextul discutat. Aceste constatări au stat la baza realizării unei diagrame sintetice (fig.1.10) în care se raportează la nivelul automatizării, complexitatea sarcinilor realizate cu roboți și cu teleoperatori. Nivelul maxim al automatizării și al complexității sarcinilor este 1 [Diaconu 97]. În această diagramă, intenționat simplificată, sunt marcate trei zone care reprezintă etape în evoluția sistemelor robotice.

Zona I (plasată în timp în perioada 1950-1975) este marcată de un nivel scăzut al automatizării. Curba de evoluție a teleoperării are o pantă puternic ascendentă spre nivelul maxim. Manipulatoarele de tip MSM, mecanice inventate de Goertz rezolvă cu succes sarcini de manipulare, de complexitate mare, datorită faptului că abilitatea operatorului este folosită din plin. Curba roboticii are o pantă mult mai scăzută. Sarcinile rezolvate de roboți sunt exclusiv de transfer de obiecte sau a cleștilor de la instalațiile pentru sudare în puncte. Comanda mișcării era secvențială sau punct cu punct.

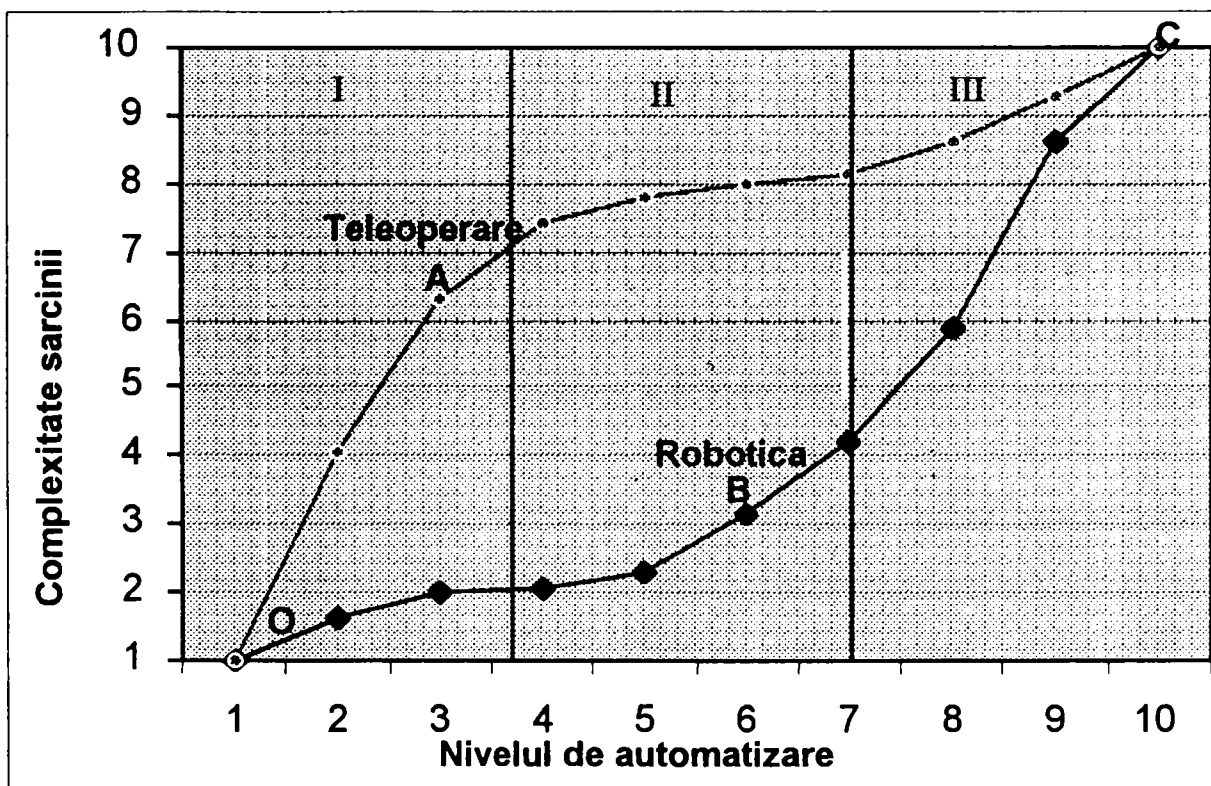


Figura 1.10

Zona II este marcată de un nivel mediu al automatizării. Complexitatea sarcinilor rezolvate cu roboți crește semnificativ datorită progreselor înregistrate în special la nivelul sistemelor de comandă (structuri multiprocesor ierarhizate) și la nivelul sen-

zoricistici. Curba teleoperării are o pantă mai redusă de creștere, această zonă fiind consacrată pe de o parte conservării calităților manipuletoarelor MSM mecanice la celelalte categorii de teleoperatoare iar pe cealaltă parte creșterii distanței dintre postul de comandă și unitatea de execuție îndepărtată.

Zona III marchează viitorul celor două sectoare. Acest viitor depinde în special de de succesul cercetărilor în domeniul inteligenței artificiale. Este de așteptat o creștere pronunțată a complexității sarcinilor pentru roboți care vor fi capabili să se autoinstruiască să își stabilească strategia, planificarea și controlul pe traiectorie. Creșterea nivelului de automatizare poate conduce la o eficientizare a aportului factorului uman în cadrul unui sistem de teleoperare în special prin realizarea unor interfețe om-mașină care să adapteze mai eficient performanțele umane.

Televiziunea, calculatoarele și liniile de comunicație vor cupla operatorul la dispozitive cu performanțe de servomanipulare superioare. Teleoperatorul ideal este acela care asigură transparența totală pentru operator dar poate avea și o autonomie totală. Robotul ideal și teleoperatorul ideal se confundă (punctul **C** din grafic) iar noțiunea de telerobot ideal poate îngloba sensul celor două.

Diagrama prezentată mai sus poate fi utilă în luarea unor decizii. Astfel dacă există imperativul realizării unor sarcini complexe la un nivel de automatizare scăzut (punctul **A**) este recomandat să se evolueze pe curba teleoperării (**OAC**). Din contră, dacă nivelul de automatizare este evoluat ,iar complexitatea sarcinilor este relativ redusă (punctul **B**) se recomandă evoluția pe curba roboticii (**OBC**). În contextul diagramei în discuție pot fi explicate unele succese și insuccese legate de implementarea unor sisteme robotice în industria românească. Perioada anilor '80, când s-a consemnat o încercare de robotizare la scară mai mare, este caracterizată, în România, de un nivel scăzut al automatizării. Încercările de a robotiza unele operațiuni complexe, cum este, spre exemplu, cazul robotizării operațiunilor de sudare a unor repere complexe din structura metalică a vagoanelor de marfă (încercată la MEVA-Drobeta Turnu Severin) fără a folosi senzori de rost adecvați, nu s-au materializat cu succes. [**Di-aconu 86**] În schimb manipuletoarele sincrone **MS 500** și **MS 200** proiectate de Colectivul multidisciplinar de roboți industriali din Timișoara în 1988 au fost bine apreciate deoarece rezolvau o serie de sarcini de manipulare complexe în sectoare grele, cum erau cele de forjă și turnătorie, fără a apela un nivel de automatizare ridicat..

Ultimele standarde privind teleoperarea și robotica introduc concepte noi ca : sisteme robotice, roboți teleoperați, teleroboți etc. [WWW 7]. Prin aceste concepte se lansează și o nouă viziune privind prezentul, dar mai ales viitorul celor două domenii. În această viziune conceptul de teloperator sau telemanipulator este înlocuit cu cel de *robot teleoperat (Teleoperated Robot)*. Această înlocuire este puțin forțată pentru momentul de față și chiar pentru viitorul apropiat pentru că acest concept minimizează aportul operatorului uman și elimină teleoperatoarele clasice.

În fig.1.11 se introduce într-o prezentare sintetică o nouă clasificare în domeniul roboticii, care este conformă noilor concepte amintite mai înainte. Dispare, prin urmare, noțiunea de robotică și cea de teleoperare, ele fiind înlocuite prin conceptul de *sisteme robotice*. În cadrul acestor sisteme robotice se delimitează două

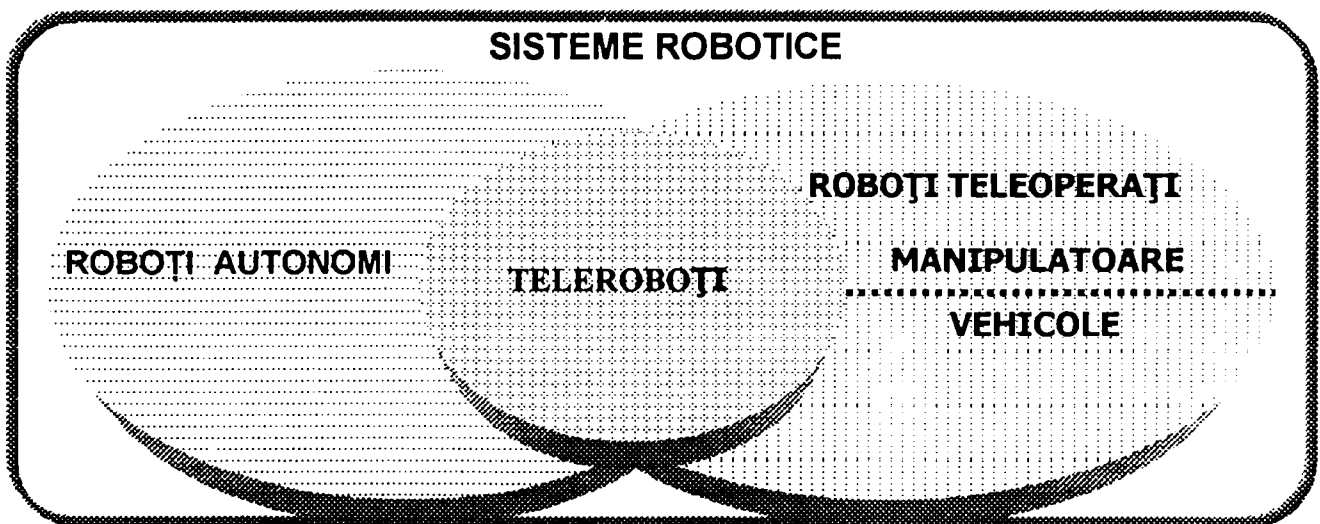


Figura 1.11

categorii de roboți: roboții teleoperați și roboții autonomi. Această delimitare ține cont de aportul și responsabilitatea operatorului uman în actul de conducere. La roboții autonomi responsabilitatea operatorului este anulată. În cadrul roboților teleoperați intră manipuloarele și vehiculele care se subînțelege că sunt teleoperate. Pe intersecția domeniului roboților teleoperați cu a domeniului roboților autonomi se plasează teleroboții. Aceștia pot acționa ca roboți autonomi dar pot fi și teleoperați. De asemenea un telerobot poate avea funcția unui manipulator teleoperat, a unui vehicol teleoperat sau poate să le asocieze pe amândouă așa cum s-a încercat să se sugereze în figură.

Un teleoperator sau un robot teleoperat este un sistem robotic care combină omul cu mașina în mod sinergetic [WWW 8].

1.5. Categoriile importante de teleoperatoare

Numărul instalațiilor de teleoperare este relativ mic în raport cu cel al roboților, însă diversitatea acestora este foarte mare. Cu toate acestea există puține referințe în literatura de specialitate privind încercări de clasificare a acestor instalații. În una dintre aceste referințe, Whitney introduce ca și criteriu de clasificare existența sau nu a unei surse proprii de energie [Whitney 86]. Conform acestui criteriu există două categorii de teleoperatoare:

- 1) Teleoperatoare fără sursă proprie de energie, care folosesc energia operatorului uman. În această categorie intră manipulatoarele MSM mecanice.
- 2) Teleoperatoare cu sursă proprie de energie la care operatorul are doar rolul de a modula această energie prin comenzi.

Pornind de la ideea modulării energiei teleoperatorului prin comenzi se introduce un nou criteriu de clasificare care se bazează pe interfața operator-sistem, mai precis pe tipul comenzii prin care operatorul contolează mișcările brațului slave. Conform acestui criteriu se pot individualiza 9 categorii de comenzi manuale, care sunt prezentate succint în continuare (în ordinea complexității) [Sheridan 92], [Diaconu 90].

- a) **Comanda pornit-oprit (on-off control)**. Este cea mai simplă la implementare, dar și cea mai imprecisă. Pupitrele de comandă fixe sau mobile, conținând butoane sau comutatoare sunt dispozitivele de prescriere specifice acestei comenzi.
- b) **Comanda în viteză la nivel de articulație (joint rate control)**. Este mai precisă decât prima. Este nevoie în plus de câte un potențiomtru de prescriere a vitezei pentru fiecare axă comandată;
- c) **Comanda master-slave în viteză (master-slave rate control)**. Are avantajul că pot fi comandate (în viteză) simultan toate articulațiile, dar presupune existența unui dispozitiv de prescriere (*hand controler*) care să aibă o cinematică asemănătoare cu a brațului slave;
- d) **Comanda master-slave în viteză cu reflectarea forței (master – slave rate control with force reflection)**. Este o comandă evoluată care asigură senzația de încărcare la brațul operatorului. Pentru aceasta este necesar ca dispozitivul de

prescriere să aibă cinematică asemănătoare cu a brațului slave și în plus să aibă câte un motor (în cazul reacției active) sau un cuplaj electromagnetic (în cazul reacției pasive) în articulațiile alese pentru reflectarea încărcării.

- e) **Comanda master-slave în poziție** (*master slave position control*). Are avantajul comenzii simultane și implică o concentrare mai mică din partea operatorului decât la comanda de același tip, dar în viteză (categoria c). Este mai precisă dacă dispozitivul de prescriere are pe lângă cinematica asemănătoare și dimensiuni apropiate de ale brațului slave.
- f) **Comanda master-slave în poziție cu reflectarea forței** (*master-slave position control with force reflection*). Aceast tip de comandă are avantajele precedentei și, în plus, prin reacția inversă de forță, asigură operatorului senzația cea naturală în conducere.
- g) **Comanda în viteză cu descompunerea mișcării** (*resolved motion rate control*). În această situație operatorul comandă viteza efectorului final (al brațului slave) într-un spațiu cartezian. Bila senzorială sau mouse-ul 3D este dispozitivul de prescriere cel mai adecvat pentru acest tip de comandă. Implementarea unei asemenea comenzi poate fi făcută doar în condițiile în care partea de slave dispune de un calculator care să rezolve transformarea inversă de coordonate din spațiul de lucru (*World*) în spațiul articulațiilor (*Joint*).
- h) **Comanda în forță cu descompunerea mișcării** (*resolved motion force control*). Este o comandă care seamănă cu precedenta, deosebirea constând în faptul că mărimea prescrisă este vectorul de forță în spațiul de lucru.
- i) **Comanda prin supervizare** (*supervisors control*). Acest tip de comandă împarte sarcinile de conducere între operator și sistemul de comandă al unității îndepărtate. Cu alte cuvinte o parte din sarcinile de teleoperare sunt rezolvate prin comenzi automate date de sistemul de comandă din partea slave, iar o altă parte este rezolvată prin comenzi manuale date de operator. Structura sistemului de teleoperare condus prin supervizare este prezentată în fig. 1.12 [Sheridan 86]. Se disting trei circuite închise de comandă
1. *Circuitul de comandă îndepărtat* care se închide prin calculatorul de execuție, manipulatorul slave și senzori. Prin acest circuit se rezolvă sarcinile automate (autonome).

2. *Circuitul de comandă locală* care se închide prin calculatorul de comandă și operator și este independent de unitatea îndepărtată. Prin acest circuit sunt preluate comenzile de la operator care este informat dacă aceste comenzi sunt corecte.
3. *Circuitul de supervizare* se închide obligatoriu prin operator și permite acestuia să comande manipulatorul slave. În cele mai multe cazuri comenzile operatorului și informațiile de la senzori trec prin calculatorul local și prin cel de execuție.

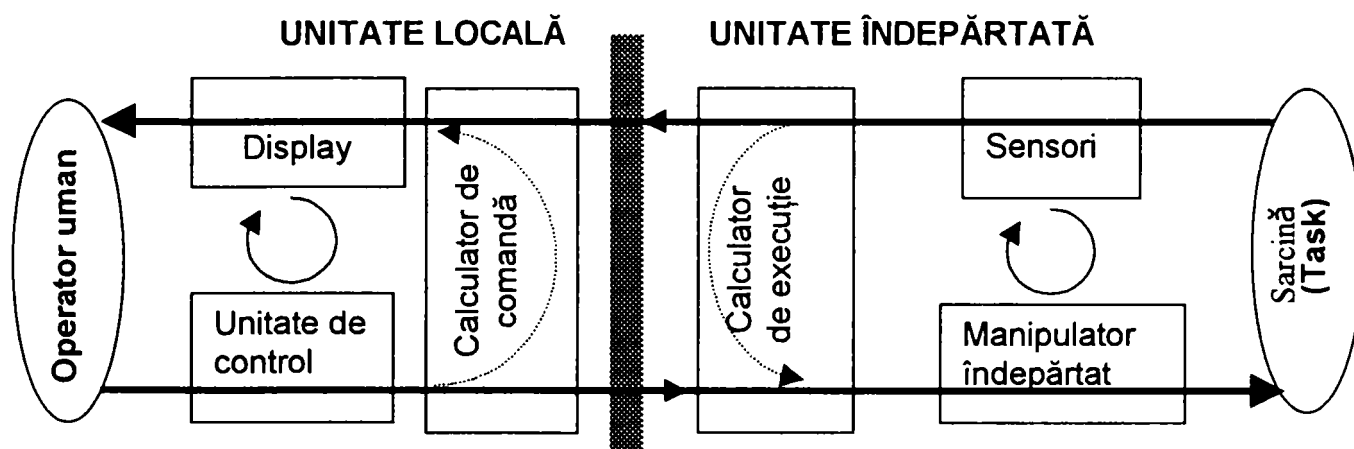


Figura 1.12

F. Coiffet categorisește teleoperatoarele tot pe baza interfeței om-mașină, numai că reduce numărul de categorii de teleoperatoare ținând cont și de evoluția în timp a acestor sisteme. [Coiffet 89] Conform acestei clasificări sistemele de teleoperare se încadrează în una din următoarele grupe:

- i. Teleoperatoare clasice,*
- ii. Teleoperatoare asistate de calculator,*
- iii. Teleoperatoare care asigură teleprezența,*
- iv. Teleoperatoare în medii virtuale.*

1.6. Stadiul actual al cercetării în domeniul teleoperării

Pentru a încadra mai bine preocupările din cadrul tezei s-au analizat principalele realizări tehnice din domeniu și s-a făcut o evaluare a perspectivelor teleoperării pentru viitorul apropiat. Aceste realizări tehnice precum și problematicile spre care sunt focalizate cercetările importante actuale sunt destul de vaste, fapt pentru care s-a procedat la o selectare și grupare a lor pe domeniile specifice aplicațiilor de

teleoperare. Sunt trecute în revistă trei dintre aceste domenii: teleoperarea în spațiul cosmic, teleoperarea în mediul submarin și teleoperarea în domeniul medicinei.

1.6.1 Teleoperare în spațiul cosmic

1C. *Problematika cercetării*

Visul omului de a cerceta și exploata resursele spațiului cosmic a devansat cu mult posibilitățile sale. De abia după anii '60 acest vis a început să se materializeze. Teleoperatoarele și roboții reprezintă o parte din mijloacele tehnice care pot ajuta omul să pătrundă tot mai adânc în tainele acestui infinit. Fără a se insista pe resursele (calculate sau imaginate) oferite de stațiul cosmic trebuie subliniate totuși două dintre ele. Prima se referă la domeniul telecomunicațiilor, serviciile aduse de sateliți în acest domeniu fiind bine cunoscute. A doua se referă la transferul unor tehnologii de procesare a unor materiale în spațiul cosmic (în condiții de microgravitație).

Omul sau robotul, care este cea mai convenabilă soluție pentru exploatarea spațiului cosmic? Această întrebare a suscitat multe discuții în cercurile științifice interesate de această activitate. Partizanii teleoperării folosesc ca argument, în această dispută, capacitatea de adaptabilitate a omului incontestabil superioară față de cea a robotului. În replică partizanii roboticii folosesc un argument economic susținut de faptul ca nu este stringent necesar să se ia în calcul reântoarcerea pe Pamânt a roboților. Majoritatea programelor serioase de cercetare a spațiului cosmic reprezintă un amalgam a celor două posibilități (om și robot) și nu pun în discuție limitele uneia sau alteia dintre aceste posibilități.

In numărul din noembrie 1981 al revistei *Mechanical Engineering* J. Ewald șeful Programului de sisteme autonome și mecanisme spațiale de la **JPL** prezenta patru categorii de aplicații pentru viitorii roboți și teleoperatoare spațiale:

1. Explorării spațiale,
2. Utilizări generale
3. Industrializare spațiului,
4. Intervenții și transport.

El mai susținea că cercetarea spațială va avea un impact deosebit asupra teleoperării și roboticii, fapt deja confirmat în prezent.

Este unanim recunoscut că NASA a reprezentat și reprezintă în continuare cel mai important centru al cercetărilor spațiale și un pol de lansare a progresului

tehnologic. Totuși într-un raport întocmit în 1981 de Grupul de studiu asupra mașinilor inteligente și roboticii, condus de *Karl Sagan* (recunoscut ca cel mai mare specialist în cercetarea spațiului cosmic, decedat în 1997) se semnală printre altele "NASA are o întârziere de la 5 la 15 ani în tehnica cea mai avansată, știința și tehnologia

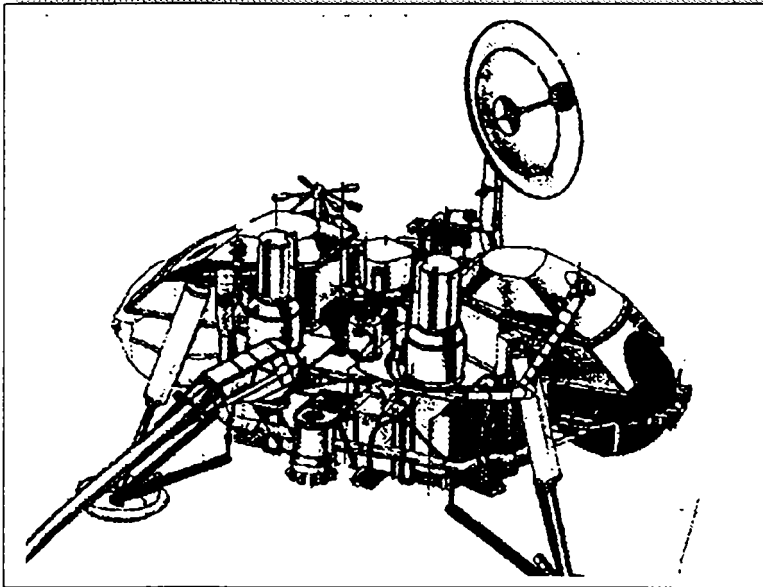


Figura 1.13

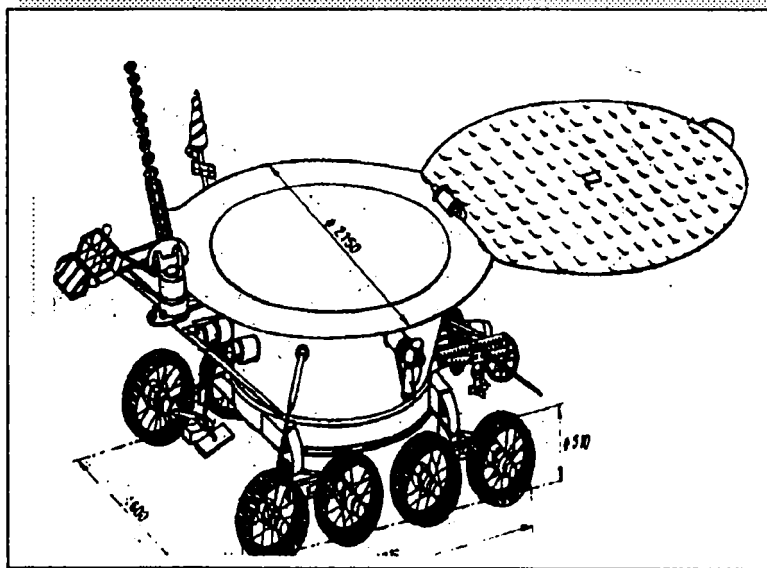


Figura 1.14

ca cu a oare or..... Dacă Viking a fost o strălucită exploatare tehnologică, ținând cont de tehnica pusă în aplicare în misiunea de pe Marte, privind robotica și informatica se poate afirma că totuși această tehnică a fost rudimentară. Misiunile viitoare vor trebui să facă apel la tehnologii decurgând din ultimele descoperiri, căci cele care sunt prevăzute astăzi se bazează pe o simplă colectare a informațiilor și fac un apel redus la automatizare. Comparată cu munca de pionierat depusă de NASA în alte ramuri ale științei și tehnologiei, cea din domeniul folosirii mașinilor inteligente a fost foarte prudentă și marturisește lipsă de imaginație..".

Grupul de studiu propunea adoptarea unei politici mai îndrăznețe în domeniile menționate

și o restructurare organizatorică. Prudența celor de la NASA în utilizarea în spațiu a tehnologiilor moderne din domeniul electronicii și al informaticii se menține și astăzi. Exemplul cel mai edificator în acest sens îl reprezintă brațul robot atașat navei spațiale *Discovery*. Acesta a fost realizat în anii '70 și se continuă utilizarea lui și astăzi fără a i se aduce modificările esențiale impuse de tehnologiile actuale. Această prudență poate fi justificată prin faptul că un aparat sau dispozitiv testat pe Pământ poate să aibă o altă comportare în spațiul cosmic. Această prudență nu umbrește cu

nimic realizările de excepție în domeniul roboticii și teleoperării spațiale înregistrate la centrele de cercetare patronate de NASA și mai ales a programelor de cercetare lansate de această agenție [WWW 9].

Primele teleoperatoare spațiale au fost considerate sondele americane din seria *Surveyor*, (fig.1.13) realizate la sfârșitul anilor '60 și destinate explorării solului lunar. O asemenea sondă era echipată cu un braț de tip pantograf, înzestrat cu o lopetică pentru săparea unor mici șanțulețe la o distanță de maxim 90 de centimetrii de sonda purtătoare. Deși au fost trimise șapte sonde de acest tip pe Lună, rezultatele nu au fost pe măsura așteptărilor.

Aflați într-o puternică competiție cu americanii, în cucerirea spațiului cosmic, sovieticii au lansat la începutul anilor '70 primul vehicol lunar telecomandat de pe Pământ. În fig. 1.14 se prezintă schița lui *LUNOHOD 2* care în 1973 a făcut primele incursiuni pe suprafața selenară. Acesta era un vehicol pe opt roți, prevăzut cu două camere de luat vederi, un dispozitiv de foraj și un transportor melcat care conducea eșantioanele dislocate într-un buncăr folosit ca laborator de analize. Dificultățile cele mai mari în conducerea acestui vehicol s-au datorat decalajului mare de timp între emisia și recepția comenzilor și informațiilor (aproape 5 sec.).

Primele teleoperatoare complexe au fost sondele spațiale *VIKING* destinate explorării suprafeței planetei Martie. Prima sondă a amerizat și a început să transmită date în anul 1976. În înzestrarea acestui tip de sondă era un braț manipulator telescopic mult mai performant decât cel de pe *Surveyor*. Așa cum s-a afirmat mai înainte, aceste sonde au fost unanim recunoscute ca experimente tehnologice deosebite pentru stadiul general de dezvoltare al tehnicii la vremea respectivă. Ultimul experiment realizat de americani în acest domeniu a fost vehicolul robot care a amerizat în septembrie 1997 și care a făcut primele deplasări pe suprafața lui Martie, transmițând pe Pământ imagini care au trezit uimirea și speranța multor oameni. Din nefericire după două zile s-a pierdut definitiv legătura cu acest vehicol, realizat de **JPL**.

2C. Direcții de cercetare:

Programele actuale de cercetare privind teleoperarea în spațiul cosmic sunt concentrate pe trei direcții :

1. Sisteme de teleoperare atașate navetelor spațiale,
2. Sisteme de teleoperare cu deplasare (zbor) autonomă (liberă) în spațiul cosmic.

3. Vehicule planetare.

1. Teleoperatoare atașate de nave spațiale

Încă de la prima lansare a unei nave spațiale s-a constatat că majoritatea dintre acțiunile unei misiuni cosmice se desfășoară în afara incintei acestei nave. Aceste acțiuni vizează în special lansarea sau recuperarea din spațiu a unor sateliți sau observatoare astronomice. Operațiunile de recuperare presupun o deplasare relativ precisă (de multe ori mai mică de 20 cm.), care nu poate fi realizată cu nici un vehicul spațial cu zbor liber. Acestea au fost motivele care au stat la baza lansării proiectului pentru un braț manipulator care să fie purtat de navetă și care să aibă anvergura și portanța care să-i permită efectuarea de manipulări atât în cala navei cât și în afara acesteia. Acest braț manipulator a fost denumit prescurtat *RMS (Remote Manipulator System)*.

Specificația, din caietul de sarcini, privind performanțele și sarcinile RMS-ului a fost foarte exigentă. Manipulatorul trebuia să poată manevra o sarcină de 29.500 Kg., având 4,6m lățime și 18m lungime. Portanța brațului a fost impusă la 15,2m. RMS-ul trebuia să poată fixa obiecte aflate într-o mișcare relativă față de navetă, cu viteza de minim 30cm/s.

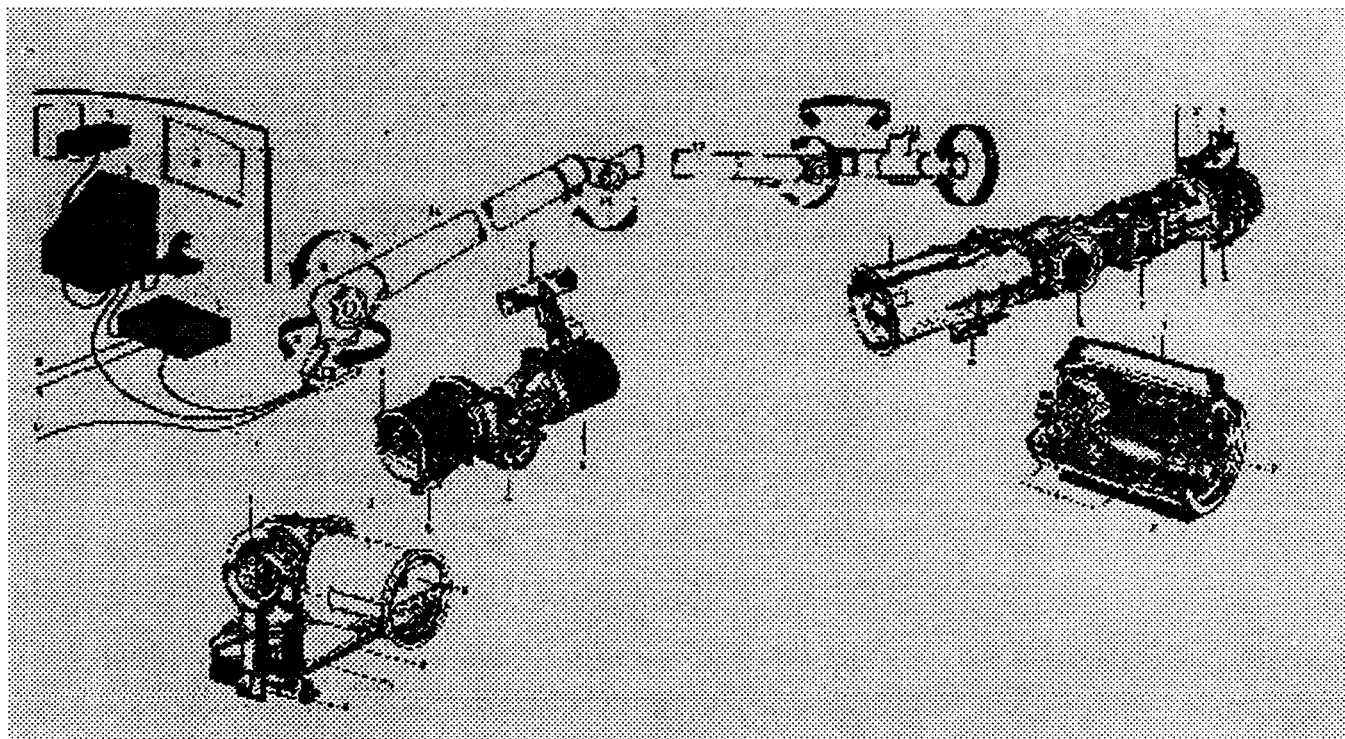


Figura 1.15

Consiliul Național de Cercetare din Canada a luat hotărârea în anii '70 să proiecteze și să experimenteze un RMS pe cheltuieli proprii. În contrapartidă SUA se

angajau să nu finanțeze un alt program concurent și să atașeze câte un RMS la fiecare navetă spațială construită, în condițiile în care primul exemplar va da satisfacție. Pentru construcția brațului manipulator a fost aleasă firma canadiană SPAR Aerospace, specializată în motoare și transmisii pentru avioane. Societatea Rokwell International, specializată în nave spațiale, a realizat dispozitivul de fixare al manipulatorului în cala navetei, iar IBM a preluat sarcina realizării sistemului numeric de comandă. Brațul robot, proiectat și realizat în condițiile menționate mai înainte, are șase grade de libertate și un efector final specializat pentru fixarea sateliților, care la rândul lor poartă un piton care facilitează cuplarea cu dispozitivul amintit. Manipulatorul are o structură articulată asemănătoare cu cea a brațului uman (fig.1.15). Antebrațul are lungimea de 6,37m, brațul de 7,06m, iar efectorul final 1,88m. Fiecare articulație are câte un motor de curent continuu, o frână și un reductor mecanic.

În contextul tematicii acestei teze și a celor prezentate în subcapitolul precedent este interesantă concepția sistemului de conducere pentru acest braț robot. Potrivit acesteia brațul respectiv poate fi condus în cinci moduri:

1. *Automat*, caz în care calculatorul de la bordul navetei conduce întreaga misiune a RMS-ului în baza unui program introdus în memoria sa înainte de lansarea navetei.
2. *Manual-asistat*, caz în care operatorul comandă poziția și orientarea efectorului final, iar calculatorul de bord conduce fiecare articulație.
3. *Manual la nivel de articulație*, caz în care operatorul comandă prin intermediul calculatorului fiecare articulație,
4. *Direct*, caz în care operatorul poate comanda în viteză fiecare motor fără intervenția calculatorului,
5. *Automat de siguranță*, caz în care comanda este preluată de calculator care execută un program de aducerea brațului într-o poziție de siguranță. Dacă siguranța navetei este periclitată prin acest program se poate comanda abandonarea manipulatorului. Pentru aceasta în flanșa de fixare a brațului, în cala navetei, sunt inserate un număr de opt cartușe pirotehnice.

Unitatea de control a RMS-ului se află în cabina de comandă a navetei. Operatorul are la dispoziție, pentru comenzi un pupitru cu butoane și două manșe a câte trei grade de libertate fiecare (o manșă are trei translații, iar cealaltă trei rotații). Reacția vizuală este realizată prin intermediul a două monitoare care prezintă imagini de la două camere de luat vederi montate pe efectorul final. Operatorul poate de

asemenea să urmărească evoluția manipulatorului prin două ferestre amplasate în partea din spate a cabinei de comandă (cu vedere spre cala navei).

Una dintre cele mai dificile probleme legate de realizarea prototipului RMS a apărut în momentul testărilor deoarece în condițiile gravitației de pe Pământ brațul era prea slab ca să-și suporte propria greutate. Deși s-au încercat diverse soluții, printre care și susținerea acestuia cu ajutorul unor perne gomflabile de mari dimensiuni, nu au putut fi încercate decât două grade de mobilitate. Restul testelor propuse pentru brațul manipulator s-au desfășurat în spațiul cosmic, în cadrul a șase misiuni spațiale speciale (STS 2.....STS8) efectuate de naveta Discovery în perioada 1981-1984. Testele au fost diversificate, de la simple manevre în cala navei până la lansarea pe orbită a laboratorului de experiențe LDEF, în cadrul zborului STS-41C, din 6-13 aprilie 1984. Acesta cântărea 10 tone și avea lățimea de 4,3m respectiv lungimea de 9,2m.

Ultima misiune importantă a unui RMS se înregistrează în martie 1997, când brațul robot al navei spațiale Discovery a fost manevrat de experimentatul astronaut Steve Hawley, care a reușit să captureze de pe orbită observatorul Hubble, cu o greutate de 12 tone. După ce a fost depus în cala navei și reparat, observatorul a fost relansat în bune condiții pe orbita sa.

Cercetările actuale privind acest tip de teleoperator sunt canalizate spre lărgirea domeniului de aplicație în special spre operațiunile de montaj în spațiul cosmic. Pentru aceasta o atenție deosebită este acordată efectorului final. În acest sens **JPL** a realizat prototipul unei mâini cu trei degete. Unul dintre ele, degetul mare este opozabil celorlalte două. Degetele sunt manevrate prin intermediul unor fire de motoare plasate la baza mâinii. O astfel de mână este capabilă să deșurubeze-înșurubeze piulițe fără a face apel la scule specializate.

Grumman Aerospace Corp. și NASA colaborează pentru realizarea unei platforme de lucru complete, care să fie montată în locul efectorului final și pe care să stea operatorul. De acolo el poate să comande orice manevră a brațului robot și în plus poate acosta cu ajutorul unei tije speciale obiectul care trebuie capturat de pe orbita sa. Etapa următoare a cercetării prevede realizarea unei cabine speciale, presurizată și dotată cu brațe manipolatoare care să permită operatorului să stea fără combinezonul special de astronaut care îi incomodează mișcărilor. Brațele robot și camerele de luat vederi din afara cabinei vor permite operatorului să realizeze operații legate de service-ul orbital.

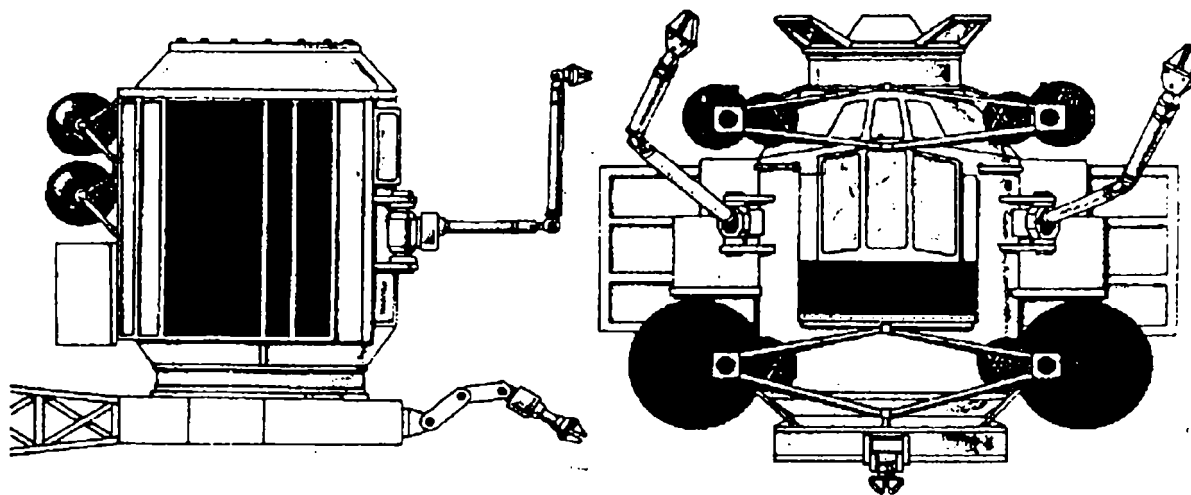


Figura 1.16

În fig.1.16 se prezintă schița unui astfel de teleoperator. Dacă o astfel de cabină este dotată cu mijloce de propulsie proprii, operațiunile de service pot fi extinse spre obiective mai depărtate de naveta spațială.

2. Teleoperare în zbor liber

Era stațiilor spațiale se apropie. În luna decembrie a anului 1998 a început montajul stației orbitale internaționale ALFA. Pentru o astfel de stație este nevoie de un sistem de teleoperare complex care să poată fi utilizat atât în faza de construcție în spațiu a stației cât și în faza ei operațională. Pentru un asemenea sistem NASA a lansat un caiet de sarcini în care printre altele se menționează că sistemul de

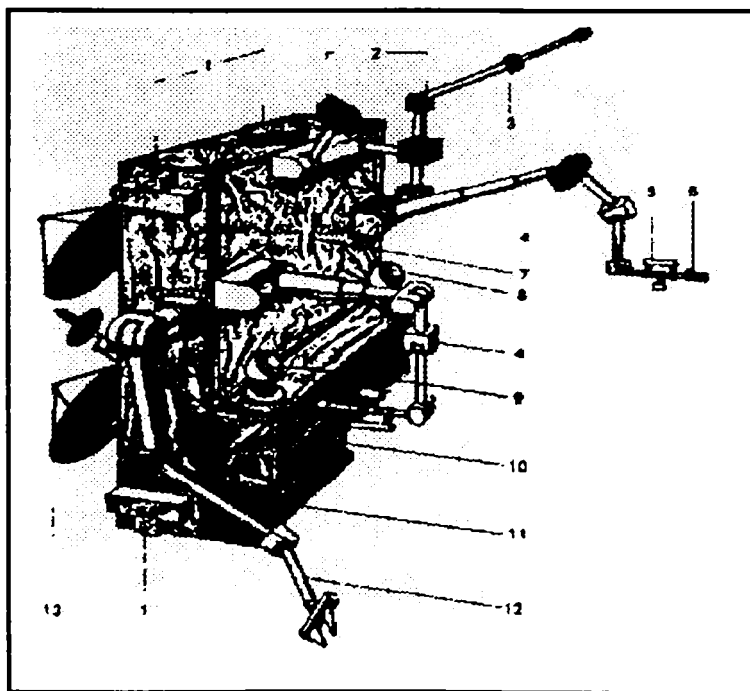


Figura 1.17

manipulare al stației trebuie să aibă suplețea și portanța comparabilă cu cea a unui RMS. În plus acest sistem trebuie să aibă mobilitatea care să-i permită atingerea oricărui punct critic de pe stația spațială și să aibă o autonomie energetică de cel puțin 6 ore. Pentru prima fază (de construcție) două soluții au fost oferite, prima se referă la un braț robot montat pe o platformă mobilă (că ucior) care rulează de-a lungul structurii principale a stației, iar a

doua se referea la un RMS dotat cu mijloacele necesare montajului.

OMV (*Orbital maneuvering vehicle* sau vehicol orbital de manevră) este un alt tip de teleoperator care poate deservi stațiile spațiale în faza operațională [Akin93]. Acest vehicol spațial cu baza de lansare pe stația spațială poate servi în primă fază la lansarea unor sateliți pe orbite mai înalte decât cele atinse de navetele spațiale, sau la recuperare unor sateliți aflați în derivă. În a doua fază asemenea vehicule pot fi utilizate pentru operațiuni de service spațial. Centrul de cercetare Langley de la NASA și societatea Martin Marietta Aerospace studiază posibilitățile realizării unui sistem complet pentru realizarea servicelui în spațiul cosmic. O concluzie a studiului preliminar pe această temă a fost aceea că cel puțin cu tehnica actuală sau cu cea previzibilă în viitorul apropiat nu este posibil de a imagina un robot complet autonom care să rezolve toate operațiile de reparație, mai ales în cazul unor defecțiuni imprevizibile. În schimb dacă operatorul uman este integrat în bucla de comandă a unui astfel de sistem, fezabilitatea lui este realizabilă. S-a introdus cu această ocazie conceptul de IOSS (*Integrated Orbiting Servicing System* sau Sistem integrat de service pe orbită). Un asemenea sistem conține logica (subsistem de manipulare și subsistem de vizualizare) care permit operatorului, aflat la distanță, să conducă o operațiune de service în spațiul cosmic. Pentru asigurarea mobilității IOSS-ului s-a imaginat un modul OMV/IOSS a cărui schiță este prezentată în fig. 1.17.

Aparent experiența europeană în explorarea spațiului cosmic este redusă față de cea americană. Cu toate acestea trebuie amintit în mod special experimentul ROTEX (Robot Technology Experiment). Acest experiment a fost lansat de Agenția Spațială Europeană (ESA) în anul 1986 și s-a finalizat cu succes în cadrul misiunii spațiale STS 55 din aprilie 1993. Prin acest experiment s-au introdus o serie de concepte teoretice importante ca *programarea telesenzorică și controlul predictiv, controlul distribuit și interfața om-mașină*. De asemenea au fost realizate și testate o serie de dispozitive dintre care se remarcă gripperul multisenzor, bila senzorială sau mouse-ul 3D, braț robot cu greutate redusă destinat testelor în condițiile de microgravitație etc. [Hirzinger 93].

1.6.2 Teleoperarea în mediul submarin

1S. Prezentarea problematicei teleoperării submarine

Mediul submarin este imens. Suprafața mărilor și oceanelor depășește cu mult pe cea terestră, fapt pentru care Pământul este văzut din Cosmos ca o planetă albastră. Fundul oceanelor se află la adâncimi mari, care adesea depășesc 6000 de metri. Această imensitate găzduiește bogății naturale inestimabile și curiozități științifice nebănuite motiv pentru care a atras în permanență omul. În încercările sale de a cunoaște și exploata resursele mediului marin omul a fost respins de ostilitatea acestuia datorată: lipsei oxigenului în stare gazoasă, presiunilor ridicate, temperaturilor scăzute, salinității ridicate și altele.

Pentru a pătrunde în mediul discutat, omul a încercat mai multe căi și mijloace care să-l protejeze împotriva agresivității acestuia. Una din aceste căi a fost să-și confecționeze o costumație adecvată, înzestrată cu o sursă de oxigen indispensabilă. S-a realizat astfel echipamentul autonom pentru scafandru. Cu toate perfecționările aduse ulterior acestui echipament, un scufundător nu a putut să depășească limita de 400 metri adâncime. A doua cale s-a materializat abia în ultimele decenii și a fost aceea a realizării unor instalații speciale, care să-i permită efectuarea unor operații asemănătoare cu cele executate de om (*operații humanoide*), la mari adâncimi, instalații care să fie conduse de la suprafață sau din incinte care îl izolau de agresiunea mediului respectiv. S-au creat astfel teleoperatoarele submarine. La început cu performanțe modeste, ulterior tot mai sofisticate, aceste instalații reprezintă o tentație tot mai atrăgătoare pentru om în încercarea sa de pătrundere în "*tainele adâncurilor*"

În anul 1982, la o Conferință Internațională, Scott Harman, inginer la Centrul de studii al Sistemelor oceanice al U.S. Navy din San Diego, California, prezenta o comunicare prin care erau trecute în revistă principalele resurse oferite de mediul submarin, precum și mijloacele tehnice de exploatare a acestora în prezent. El afirma printre altele că dacă statele lumii și-ar mobiliza resursele tehnologice pentru a strânge minereurile de pe fundul oceanelor, omenirea ar depozita o rezervă de materiale suficientă pentru a-i acoperi nevoile timp de secole. În plus instalațiile utilizate în scopul menționat vor putea fi utilizate și la exploatarea altor bogății, cum ar fi gazul și petrolul.

În aceeași comunicare se afirmă că "*Metodele actuale de foraj și extracție submarine reasează utilizarea unei importante cantități de mână de lucru. Nu numai că mediul ostil al fundului mărilor supune muncitorii la riscuri, dar face necesară și existența unei logistici considerabile la suprafață. Acestea combinate cu riscul ridicat,*

explică costul mare al operațiilor actuale de foraj marin. În anumite cazuri este posibil ca omul să fie retras din acest mediu ostil și să fie înlocuit de o instalație de teleoperare sau de un mecanism telecomandat. Din păcate astfel de sisteme depind în întregime de transmisii în bandă largă între master și slave...."

Domeniile activității submarine pentru care teleoperarea reprezintă o alternativă tentantă sunt:

- activitatea de producție și comercială
- activitatea de cercetare științifică
- activitate în scopuri militare

2S. Direcții de cercetare

Dirjecțiile pe care a evoluat teleoperarea în mediul submarin sunt două:

- i. realizarea unor aparate submersibile cu oameni la bord (batiscafuri) și înzestrate cu posibilitatea de teleoperare în afara incintei
- ii. realizarea unor platforme sau vehicule subacvatice fără oameni, care să fie telecomandate de la suprafață.

i. Teleoperare cu submersibile pilotate.

Primul aparat submersibil cu oameni la bord, denumit și *batiscaf* a fost realizat în 1958 și a intrat în exploatare la U.S. Navy [Wood 71]. Acest prim batiscaf a fost denumit *TRIESTE-1*. După trei ani de exploatare acestuia i s-a atașat manipulatorul denumit *General Mills*. Acesta era un manipulator acționat electric, cu 6 grade de mobilitate, cu sarcina utilă 20 kg și raza de acțiune de 75 cm. Manipulatorul respectiv a fost destinat inițial pentru medii supraîncălzite. Misiunea acestui ansamblu nu a fost îndeplinită pentru că au apărut o serie de probleme tehnice legate de funcționarea manipulatorului. Aceste probleme au fost generate de: presiunea ridicată, coroziunea mare, saturarea mediului cu sare și agenți biologici și vizibilitatea redusă din partea operatorului. Deși misiunea nu a reușit specialiștii au tras multe concluzii care le-au permis să găsească soluții pentru o parte din problemele legate de teleoperarea submarină. S-au inventat spre exemplu noi oțeluri rezistente la coroziunea marină, s-au inventat de asemenea noi tehnici de etanșare și ermetizare pentru presiuni ridicate, s-a sporit puterea motoarelor de acționare pentru a se învinge și forțele suplimentare determinate de presiunea apei și altele.

Următoarele aparate submersibile înzestrate cu manipuloare subacvatice au fost RUM și UNIMO. Acestea au fost înzestrate cu manipuloare tot cu acționare

electrică însă de putere mai mare. Astfel manipulatorul de pe RUM, avea sarcina utilă de 200 kg la deschiderea de maxim 2,1 m și 20 kg la deschiderea de 4,5 m.

Numărul aparatelor submersibile dotate cu manipuloare comandate din cabina batiscafului depășește cifra de 100. Făcând o analiză din punct de vedere al construcției manipuloarelor subacvatice se constată că majoritatea dintre ele au acționare hidraulică. Aceasta se justifică datorită puterilor mari pe care trebuie să la dezvolte motoarele de acționare în condițiile presiunii ridicate a apei. Motoarele hidraulice sunt mai robuste iar la același gabarit au puteri de două trei ori mai mari decât cele electrice. Structura cinematică a manipuloarelor este cea antropomorfă (imită brațul uman) iar numărul gradelor de libertate este în medie de 6; existând variante cu 4 dar și cu 7 sau 8 grade de mobilitate. Tot din statistici se constată că la majoritatea manipuloarelor comanda se execută în viteză folosindu-se un panou mobil cu butoane și eventual potențiometre. Cam la o treime se folosește comanda prin elemente de prescriere speciale (măchetă la scară redusă a manipulatorului, joystickuri specializate etc.). Aceste tipuri au fost realizate mai recent, când s-a ajuns la o miniaturizare a componentelor electrice care intră în componența organelor de prescriere [Filatov 76].

ii. Teleoperare submarină cu vehicule teleghidate

Batiscaful înzestrat cu unul sau două manipuloare comandate de la bordul acestuia de către un operator, reprezintă un mijloc eficient pentru anumite activități submarine, dar posibilitățile lui sunt destul de limitate. Prezența oamenilor la bord reprezintă un risc mai ales când este vorba de a explora la adâncimi mari sau în zone periculoase cum sunt cele stâncoase sau cele în care abundă agenți biologici care pot bloca batiscaful. Acestea au constituit o parte din motivele dezvoltării în paralel a unei noi direcții de cercetare în teleoperarea submarină. Această direcție vizează realizarea unor platforme sau vehicule submarine, purtătoare de mijloace de teleoperare (senzori și manipuloare) și care să fie telecomandate prin cablu de la suprafață. Aceste vehicule poartă denumirea generică de ROV (*Remotely Operated Vehicle*). Ele se pot deplasa pe fundul mării sau pot naviga în imersie având propulsoare cu alimentare proprie sau din exterior prin "*cordorul ombical*". Acestea mai sunt denumite vehicule submarine "*ținute în lesă*", de la suprafață.

Primul ROV înzestrat cu mijloace de teleoperare s-a realizat în 1966 prin colaborarea dintre: U. S. Navy, Marine Physical Laboratory, University of California și Of-

lice of Naval Research din San Diego, California. Acest aparat era comandat prin cablu de la suprafață sau de pe un submarin, lungimea maximă a cablului fiind de 500 m. În dotarea acestui aparat submersibil intrau următoarele mijloace de teleoperare: un braț manipulator cu 4 grade de libertate, două camere TV, un proiector și un sonar de mare fidelitate. Această instalație de teleoperare submarină, denumită CURV-1, a fost utilizată cu succes la recuperarea unor bombe cu încărcătură nucleară pierdute în 1965 lângă țărmurile Spaniei [Filatov 76]. Acest eveniment împreună cu catastrofa din 1963 când submarinul atomic TRESER având echipaj de 160 de oameni a pierit în adâncuri, fără să poată fi salvat, au grăbit cercetările în domeniul salvării subacvatic. S-au conceput aparate submersibile, un fel de minisubmarine atomice, înzestrate cu mijloace de observare și executare a unor operații fizice cum ar fi: îndepărtarea obstacolelor create de agenți biologici sau de altă natură, tăierea de cabluri și chiar executarea unor operații de reparație. Primul aparat din această serie a fost denumit DSRV-1, care a fost purtat de vaporul I-141 din flota americană.

În prezent numărul aparatelor ROV este de ordinul sutelor. Ele operează aproape în toate mările și oceanele lumii. Sunt utilizate în cinci domenii principale ale activității submarine: inspecție; ghidarea uneltelor; navigație; cercetare; transmisiuni.

Din punct de vedere constructiv aparatele ROV au una din următoarele configurații:

1. *structura de crab*, care permite târârea pe fundul mării pentru a îngropa cabluri, a extrage sau aduna minereuri și alte obiecte.
2. *structura de caracatiță*, care conține mai multe manipuloare și este destinată inspecției, întreținerii și reparației unor dispozitive complexe cum ar fi cele din instalațiile de foraj și chiar navele scufundate.
3. *structura de rechin*, care se deplasează rapid între fund și suprafață și servește în general pentru relevări de hărți și observări în mediul submarin.

Adâncimea maximă până unde poate evolua un ROV depinde în exclusivitate de scopul pentru care a fost creat și deci de înzestrarea tehnică pe care o are . Până la ora actuală recordul de adâncime îl deține teleoperatorul *VICTOR* testat de francezi la adâncimea de 5000 m (în iulie 1999).

Așa cum s-a mai amintit cercetările în domeniul aparatelor ROV au început în S.U.A., unde au ajuns la un stadiu avansat. Și alte țări ca Japonia, Franța, Canada și Norvegia au realizări importante în acest domeniu.

În Japonia cercetătorii de la JAMSTEC din Yokosuka au lucrat în colaborare cu diverse firme japoneze la construcția unor vehicule submarine, "ținute în lesă" de la suprafață. Unul dintre primele prototipuri a acestor aparate a fost JTV-1 care a fost testat la începutul anilor 80. Acesta putea atinge o adâncime de 200 m, se deplasează cu 4 km/h, avea 43 de kg și nu depășea dimensiunile unui televizor mare. Cu ajutorul acestui vehicul telecomandat prin cablu s-au studiat zonele piscicole din apropierea coastelor arhipelagului japonez și s-a inspectat o conductă de petrol submarină

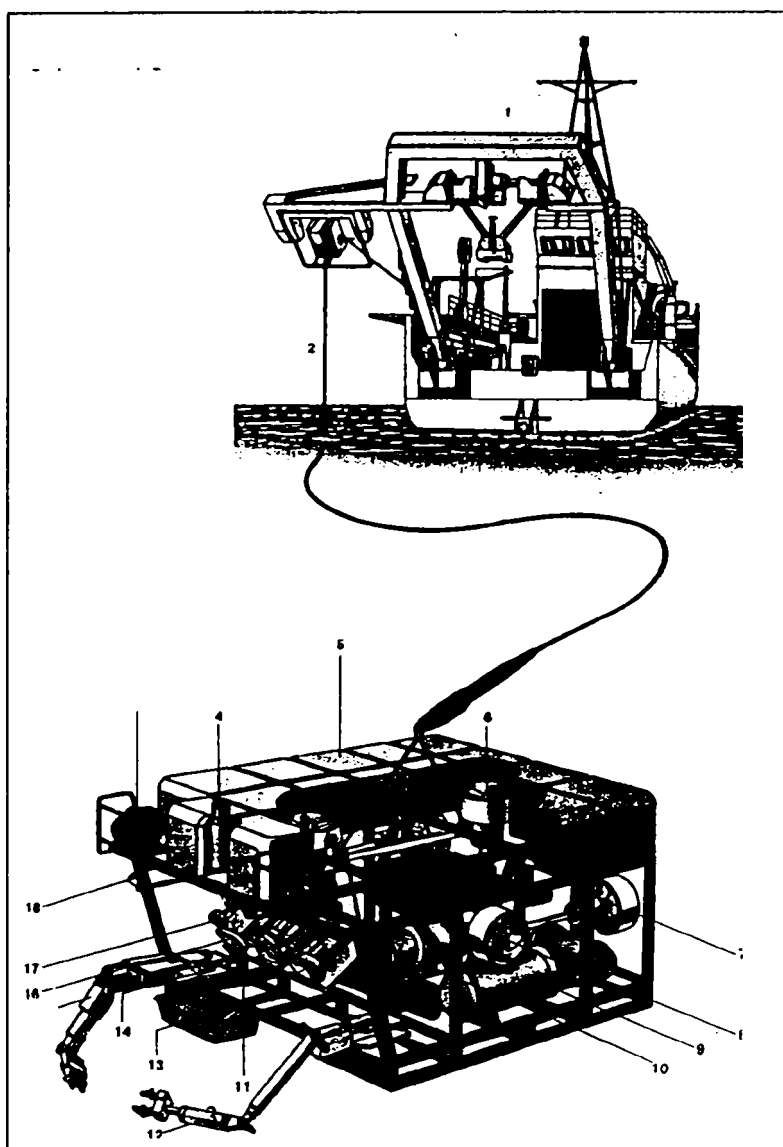


Figura 1.18

Un alt aparat denumit JTV-2, versiunea comercială a lui JTV-1, a fost realizat de firma QI în anul 1982; în colaborare cu JAMSTEC. Vehiculele din această serie au servit pentru montajul cablurilor telefonice (submarine) și deasemenea au fost folosite în Antarctica pentru studiul vietăților marine care trăiesc în adâncuri sub calota glacială. Actualmente la JAMSTEC se lucrează asupra vehiculelor FRELON-versiune mai mare a lui JTV-1, destinat pentru adâncimi de până la 800 m și DAUFIN-3K, care este proiectat pentru adâncimi de până la 3300 m. Acest ultim aparat destinat inspecției submarine, culegerii de eșantioane și efectuării de hărți geografice, este prezentat împreună cu vaporul purtător în fig. 1.18

Platformele petroliere submarine și în special cele din Marea Nordului, au început să folosească instalații de teleoperare submarine telecomandate de la suprafață încă din anii '80. Asemenea instalații sapă tranșee la 500 m adâncime în care îngroapă conducte de transport a produselor lichide sau gazoase obținute din foraj. Aceste instalații s-au realizat la firma norvegiană Koverner Brug, care la începutul anilor '80 a fuzionat cu două firme din SUA, Brown și Volker Stevin formând noua firmă KVB (inițialele de la cele trei firme) care este cea mai cunoscută în domeniul teleoperatorilor pentru platformele de foraj submarin.

Societatea canadiană ISE din Vancouver construiește instalații ROV asistate de calculator de bord. Aceste instalații recunosc obstacolele și se reîntorc singure la bază fără ca nici un cablu de legătură cu suprafață să fie în pericol de a fi agățate. Aceste instalații cu calculator de bord dar cu "cordon ombical" premerg roboții submarini autonomi, spre care se orientează firma sus numită. Prețul unei instalații de teleoperare submarină dotate cu calculator de bord este cuprins între unu și două milioane de dolari. Calculatorul de bord detectează obstacolele (în colaborare cu senzori adecvați) dar oferă și informațiile necesare operațiunilor de ghidare realizate de la suprafață.

În Franța cercetările în domeniul teleoperării submarine au atins unul dintre cele mai avansate stadii. Între realizările deosebite se numără instalația de teleoperare ERIC II, realizată de Centrul European de cercetare submarina CERTMS din Toulon. Prin realizarea acestei instalații s-a introdus un nou concept de la distanță și anume conceptul comandă "telesimbiotică". Manipulatorul lucrează pe fundul mării. El este "observat" de un "cap" cu 6 grade de mobilitate prevăzut cu două camere de luat vederi și două microfoane. Operatorul poartă o cască susținută de un lanț cinematic cu 6 grade de libertate, în care în dreptul ochilor se amplasează două mini- ecrane video, iar în dreptul urechilor două difuzoare audio. Mișcările corpului operatorului cu cască se transmit sincron (prin selsyne) la corpul de observare submarin. Dispozitivul creează operatorului iluzia că se află el însuși pe "scena" submarină, iluzie completată de "legătura inversă" de forță (montată proporțional la manetele de comandă acționate de mâinile operatorului. Această instalație a constituit o premiză de la care s-a dezvoltat realitatea virtuală.

Încă de la început cercetările în domeniul teleoperării submarine în Franța au fost coordonate de Comisia energiei atomice. Programele de cercetare cele mai importante se desfășoară cu participarea celui mai mare institut de cercetări

submarine din lume, IFREMER. În prezent la acest institut se află în probe deja roboții submarini autonomi. Este vorba despre ELIT, robot autonom cu sarcini de inspecție și de CYANA, SM 97 și GIP GEMOND care sunt roboți autonomi pentru relevare și intervenții destinați pentru adâncimi care depășesc 3000 m. Ultima realizare (anul 1999) o constituie telerobotul submarin VICTOR care a funcționat timp de 10 ore la adâncimea de 5000 m stabilind astfel un nou record în materie [FrancePres].

La șantierele navale Normed de la Dunquerque s-a experimentat un sistem de teleoperare denumit RMS și care este destinat inspecției și vopsirii pereților exteriori navelor. Sistemul este dotat cu un manipulator care ține o perie de curățire, dar și alte dispozitive cum ar fi o camera video pentru inspecție sau un pistol de vopsire. Operatorul transmite comenzi și primește informații de la manipulator și platforma purtătoare prin intermediul unei legături cu fibre optice. Sistemul este format de fapt din două unități funcționale: structura principală cu trei picioare și structura mobilă care susține brațul manipulator. Ambele structuri sunt prevăzute cu ventuze. La deplasarea pe suprafața pereților vasului (aflată în imersiune) la suprafața apei se folosește un algoritm de deplasare care menține sistemul mereu în contact cu pereții vasului (algoritm preluat de la mașinile pășitoare). Viteza maximă de deplasare este de 50 m/h iar sistemul poate curăți 5000 metri pătrați pe zi. O versiune a sistemului este studiată pentru operațiuni terestre, mai precis pentru curățarea tancurilor petroliere sau a altor incinte închise cu mari dimensiuni.

1.6.3 Teleoperarea în medicină

1M. *Problematika cercetării*

În studiul "*International Advanced Robotics Program*" realizat în anul 1990 se concluzionează printre altele că în medicină, spre deosebire de industrie, tehnica avansată cum este cea a roboților și teleoperatorilor a penetrat mai încet. Sunt totuși unele sectoare, ca cel al aparaturii de investigație și diagnosticare unde nivelul tehnic este destul de avansat, comparabil cu cel din domeniul teleoperării sau roboticii. Există de asemenea o serie de realizări privind utilizarea teleoperatorilor și roboților în unele sectoare ale medicinei care vestesc, pentru viitorul apropiat, perspective interesante privind această utilizare.[Schraft 94]. În fig.1.19 se prezintă acele

sectoare din medicină unde teleoperarea și robotica pot contribui în mod esențial la îmbunătățirea performanțelor.

Teleoperatoare și roboți în medicină			
Diagnoză	Terapie	Reabilitare	Activități din spitale
Manipulatoare purtătoare de aparate de investigare și diagnoză	Manipulatoare pentru conducerea instrumentelor și sculelor	Proteze, orteze, teleteze. Scaune pe roți dotate cu manipulatoare și inteligență.	Instalații pentru deservire la pat a bolnavilor. Roboți curier pentru transport hrană, medicamente, etc.

Figura 1.19

2M. Diagnoză și terapie

Tehnicile moderne de diagnoză bazate pe tomografie computerizată și pe imagini obținute pe baza rezonanței magnetice permit medicului să determine precis locul afecțiunii, mărimea leziunilor, situația țesuturilor etc. Combinarea acestor tehnici de investigare cu mijloacele oferite de teleoperare sporește eficiența diagnozei. În [IPA 94] se prezintă o asemenea combinație în cadrul unui sistem de robotizat de investigare cu ultrasunete. Un braț manipulator cu 6 grade de libertate poartă un cap de investigare cu ultrasunete. Acest braț mobil este comandat de la distanță de către medic prin intermediul unui sistem de pedale. Comanda se face pe baza imaginilor preluate și prelucrate de sistemul Siemens Sanoline SL-2

Manipulatoarele comandate de la distanță pot servi ghidarea instrumentelor și sculelor în chirurgie. Această posibilitate este demonstrată la ora actuală doar la nivel experimental existând câteva prototipuri care au stâmit interesul celor care înțeleg noile dimensiuni ale chirurgiei moderne, în care priceperea și îndemânarea medicului sunt dublate de o tehnică avansată. Această combinație duce în mod sigur la sporirea eficienței acestui sector al medicinei.

Primele aplicații realizate cu manipulatoarele în domeniul chirurgiei se referă la *cinematicile pasive*, care sunt lanțuri cinematice cu mai multe grade de libertate (5 sau 6). Acestea permit poziționarea și orientarea unor scule sau instrumente față de

locul intervenției, care se află pe părți ale corpului (cap, membre, etc) care trebuie să fie fixe. Manipulatorul se fixează pe poziția dorită după care axele sale se blochează. Sculele sau instrumentele care pot fi purtate de asemenea cinematici pasive sunt: endoscoapele, sondele chirurgicale, pensetele pentru biopsie, etc.

Firma Carl Zeiss, Germania a realizat prototipul unui sistem destinat operațiilor neurochirurgicale și microchirurgicale. Acesta este compus dintr-un manipulator cu mai multe grade de libertate, un microscop pentru operații și o stație grafică. Comanda mișcării manipulatorului asigură o poziționare foarte precisă fapt pentru care sistemul poate fi utilizat pentru intervenții pe ochi și pentru chirurgia minimal invazivă (laparoscopică).

Primul sistem robotizat pentru intervenții chirurgicale s-a realizat în Elveția și este denumit **MINERVA**. Acest sistem este destinat neurochirurgiei și conține printre altele un manipulator cu 7 grade de mobilitate care poate manipula următoarele tipuri de scule; cuțit, burghiu, pensetă pentru biopsii.

ROBODOC reprezintă primul sistem robotizat (realizat în SUA) destinat intervențiilor chirurgicale în ortopedie. Mai precis, sarcinile acestui sistem robotizat se rezumă la a pregăti suprafețele oaselor din articulații în vederea realizării unui implant care să permită mișcarea articulațiilor respective. După ce medicul a fixat trei repere din titan în zona se va depune implantul de lubrefiere, brațul robot dotat cu o sculă adecvată va efectua șlefuirea. Efectorul final este prevăzut cu un senzor de forță/moment care dă în formații asupra stării de deteriorare a osului. Partea de os deteriorată, poroasă sau cu unele asperități opune o forță de rezistență, la șlefuire, mai mică decât una sănătoasă. Trebuie subliniat în continuare că robotul utilizat în cadrul acestui sistem este unul de tip industrial la care s-au adus unele modificări privind reacția inversă de forță/moment.

De la cinematica pasivă la teleoperare, în domeniul terapiei, distanța tehnologică pare să fie mare. Totuși există unele proiecte de cercetare cu o finanțare consecventă de aproape trei decenii, cum este spre exemplu proiectul condus Peter Cauchain, finanțat anual cu 400.000\$ de British Telecom, prin care se încearcă să se demonstreze că o intervenție chirurgicală poate fi asistată sau chiar condusă de la mii de kilometri distanță. Aceste proiecte sunt direcționate spre persoane izolate din diverse motive și care au nevoie de o diagnoză sau o intervenție chirurgicală urgentă. Tipul de intervenție vizat în aceste proiecte este cel al *chirurgiei minimal invazive* care în vii-

torul apropiat poate oferi teleoperării un domeniu de aplicație deosebit de interesant și eficient [Funda 96].

LAPAROBOT (Amstrong Projects PLC) este primul sistem de teleoperare funcțional, destinat intervențiilor microinvazive. Acesta permite conducerea unui laparoscop pe baza mișcărilor capului chirurgului, care privește imaginile de la locul inter-



Figura 1.20

ve.ț.e. pe un monitor obișnuit sau de la un display montat pe cap (Head Mounted Display-HMD) care oferă imagini stereo (fig.1.20)

ZEUS este denumirea celui mai recent sistem de teleoperare pentru chirurgie coronariană pus la punct în 1999 de către cercetătorii canadieni. Acest sistem are în componență un braț

robot care efectuează operația pe cord (operație de by-pass). Acesta este comandat de la mare distanță de un operator chirurg care manevrează un braț master asemănător cu robotul chirurg [WWW 10].

3M. Teleoperarea în reabilitare medicală

În studiul "*Teleoperatoarele și creșterea umanismului*", realizat încă din anul 1968 la NASA Office of Technology Utilization, de către E. Corliss și G. Johnsen, se arată că 10 % din populația SUA este invalidă. Circa trei milioane de invalizi au nevoie de ajutorul permanent al unor persoane valide. Restul (circa șaisprezece milioane) pot fi recuperați și transformați în persoane utile societății. În această situație câștigul societății, pe ansamblu este amplificat de faptul că se eliberează un număr important de persoane, în majoritate cu o calificare medicală sau de asistență socială, care se ocupau cu îngrijirea invalizilor recuperați [Miller 91] , [McGee 89].

Mijloacele oferite de tehnica teleoperării și roboticii, pot fi utilizate în special pentru reabilitarea handicapului de tip locomotoriu. Pentru acest tip de handicap ex-

istă mijloacele clasice cunoscute încă din antichitate. Este vorba despre *proteze* și *orteze*. Acestea sunt niște mecanisme spațiale cu până la șase grade de libertate, menite să înlocuiască un organ (mână sau picior) în cazul protezelor, sau să amplifice forța mușchilor pentru organele care nu mai sunt controlate normal din punct de vedere biologic, în cazul ortezelor.

Există situații când handicapul locomotor se referă la cele patru membre. Persoanele cu o asemenea invaliditate se numesc *tetraplegice*. Pentru reabilitarea acestui handicap teleoperarea oferă singura soluție și anume cea a *teletezelor*. Acestea sunt manipuloare adaptate pentru deservirea bolnavului care se află într-un post fix sau care se deplasează într-un cărucior cu roțile.

Primul program special pentru ajutorarea tetraplegicilor s-a lansat în anul 1972 la Universitatea din Heidelberg (Germania). Prima experiență în cadrul acestui program a fost făcută de Roester și Paeslack, care au încercat adaptarea unui manipulator industrial pentru a îngriji un tetraplegic. Încercarea a fost nesatisfăcătoare pentru că manipulatorul industrial este destinat pentru un număr de funcții relativ redus care se desfășoară într-un mediu bine organizat. În replică un manipulator medical trebuie să fie capabil să rezolve o mare varietate de funcții care se repetă destul de rar și se desfășoară într-un mediu puțin previzibil. Cei doi cercetători au realizat un studiu pe 75 de tetraplegici privind utilizarea unui sistem de manipulare și au desprins două categorii de probleme:

1. Handicapatul trebuie să mențină stăpânirea în fiecare moment asupra aparatului și nu trebuie să existe nici o funcție care să se realizeze în mod automat.
2. Manipulatorul nu trebuie să atingă în nici un caz corpul operatorului.

La aceste două probleme s-au găsit două răspunsuri. Primul inspira un sistem de comandă bazat pe senzori biologici. Al doilea inspira dispozitive de comandă acționate de handicapat, dispozitiv amplasat între operator și aparat, acesta din urmă neputând practic să atingă subiectul. Acest al doilea răspuns și-a găsit materializare în practică, el consacându-se ca un sistem de teleoperare în care comanda o are însăși handicapatul.

Prima teleteză a fost realizată în 1973 de Roester (amintit mai înainte). Aceasta constă dintr-un manipulator cu șase grade de libertate, (structură antropomorfă) comandat de un levier bucal cu trei grade de mobilitate. Printr-un microîntrerupător aflat pe acest levier handicapatul putea comuta comanda pe grupa de axe care real-

izează poziționarea sau pe cea care realizează orientarea obiectelor manipulate. Această teleteză a fost încercată de numeroși tetraplegici. Sarcinile cele mai apreciate au fost cele legate de munca de birou .

Spațiul de acțiune al teletezelor s-a mărit prin atașarea acestora la căruciorul cu roțile cu care se deplasează tetraplegicul. Prototipul unei asemenea teleteze s-a realizat în 1974 la JPL (Jet Propulsion Laboratory). Brațul manipulator fixat de fotoliu era telescopic în ideea ocupării unui spațiu cât mai restrâns. Numărul gradelor de libertate era de 6. Comanda acestei teleteze se realizează printr-un sistem de senzori care sesizează mișcările bărbiei. Forța exercitată de bărbie asupra senzorilor se transformă în viteză. Alegerea comenzii se face cu ajutorul unui ecran de vizualizare pe care sunt înscrise imaginile simbolice a tuturor comenzilor posibile. În [Schraft 94] sunt prezentate preocupările și realizările actuale în domeniul teletezelor. Câteva dintre realizări sunt punctate pe scurt în continuare.

"INVENTAID"- Este un manipulator pentru cărucior realizat în Anglia. Acest telemanipulator este de fapt un "braț gonflabil" realizat în concepție modulară, putându-se adăuga sau elimina cu ușurință un grad de libertate. Dirijarea acestui manipulator se poate realiza cu un joystick acționat cu limba sau prin suflu handicapatului.

"HANDY 1"- Este un braț robot pentru post fix. El poate servi handicapatul cu mâncare, băutură, cărți și altele. Comanda se realizează pe baza unor senzori optici activați de bolnav, prin mișcarea capului. Este de fapt un sistem telecomandă optoelectronic, cunoscut sub denumirea de Cybor 310. Brațul robot are greutatea de 15 kg, 5 axe și sarcina maximă de 0,5 kg.

"MANUS"- Este un braț robot destinat scaunelor pe roțile conceput și realizat în Olanda. Are greutatea de 20 kg, raza de acțiune 85 cm și sarcina maximă 2 kg. Comanda se poate realiza prin mișcarea capului, bărbiei sau a labei piciorului. Este un produs comercial.

"VOICE-COMAND I"- Este un sistem mobil de deservire comandat prin voce. El aduce mâncare, băutură, cărți etc. Este un produs în SUA și poate fi utilizat și în alte scopuri în afara de cel al deservirii handicapatilor. Are un calculator de bord care-i permite integrarea într-un sistem de deservire centralizat, putând fi urmărit și dirijat de la distanță.

Contribuții personale

Pe parcursul acestui capitol de introducere în domeniul teleoprării se regăsesc și o parte dintre contribuțiile autorului legate de teoria conducerii manuale de la distanță. În continuare sunt punctate sintetic câteva dintre acestea.

- Se introduc două precizări necesare clarificării sensului tehnic al noțiunii de teleoperare și a conceptelor legate de aceasta. În acest context se prezintă, în viziune proprie, extinderea semnificației acestei noțiuni, precum și a domeniului de aplicație al teleoperatorilor. Sunt definite în același context trei dintre mediile în care s-a extins domeniul amintit: mediul inaccesibil, mediul cu hazard și mediul neorganizat.
- Pe baza analizei comparative între robotică și teleoperare se realizează o diagramă originală, care scoate în evidență delimitările și convergența celor două domenii precum și evoluția în timp a acestora. Diagrama respectivă este ușor de interpretat și poate fi folosită în luarea unei decizii privind folosirea roboților sau a teleoperatorilor pentru rezolvarea unor sarcini concrete de manipulare.
- S-a actualizat schema structurală a unui sistem de teleoperare, consacrată deja în literatură. Această actualizare exprimă viziunea autorului, care ține cont de ultimele evoluții în domeniul teleoprării precum și în terminologia legată de aceasta.
- Se propune un criteriu propriu de clasificare a sistemelor de teleoperare bazat pe interfața dintre operator și sistemul de teleoperare.
- S-a prezentat sintetic, în baza unei cercetări bibliografice aprofundate, principalele realizări, direcțiile cercetării și perspectivele acesteia în trei domenii de aplicație ale teleoperatorilor: spațiul cosmic, mediul submarin și medicină.

Capitolul 2

Sisteme de teleoperare controlate bilateral în poziție și forță

Acest capitol prezintă o imagine conformă cu viziunea autorului asupra unei categorii speciale de sisteme de teleoperare și anume teleoperatoarele cu reacție de forță sau teleoperatoarele controlate bilateral în poziție și forță.

Trei factori sunt importanți în calitatea execuției unei sarcini de teleoperare: reacția vizuală, reacția de contact (de forță și tactilă) și antrenamentul operatorului. Pentru susținerea acestei idei, în primul paragraf, se prezintă un experiment semnificativ preluat din literatură. Rezultatele acestuia sunt analizate și comentate prin prisma comparației cu rezultatele obținute de autor în experimente asemănătoare. În contextul aceleiași idei se expune un model descriptiv, original, al comportamentului uman într-un sistem interactiv om-mașină, model care evidențiază mai clar rolul celor trei factori în formarea comenzilor de conducere.

Al doilea paragraf evidențiază filozofia controlului bilateral în teleoperarea clasică care se rezumă la faptul că partea de master reprezintă unitatea de comandă pentru partea de slave și viceversa, partea de slave exercită prerogative de control pentru partea de master. Reacția de forță este de fapt cheia acestui mod de control.

În paragraful al treilea sunt prezentate mai multe considerente privind posibilitățile de realizare practică a controlului bilateral în teleoperarea clasică. Se insistă pe structurile de control bilateral care nu folosesc senzori specializați de forță/moment, pentru că acestea sunt reliefate mai puțin în literatura tehnică și nu în ultimul rând pentru faptul că autorul a căpătat o experiență bogată în urma cercetării și implementării unor astfel de structuri. Se prezintă sintetic și considerațiile personale asupra controlului bilateral bazat pe senzori de forță montați la nivel de articulație și asupra controlului în forță bazat pe senzori montați la nivelul efectorului final.

În finalul capitolului este prezentat într-o viziune proprie conceptul de teleoperare informatizată. Introducerea unui calculator pe postul de asistent al operatorului în execuția unor sarcini de teleoperare conduce la obținerea unor rezultate spectaculoase. În acest context sunt subliniate modalitățile concrete în care calculatorul poate conlucra cu operatorul, introducându-se conceptele de : conducere paralelă, conducere alternantă și conducere serială. Pentru susținerea acestor concepte sunt prezentate succint câteva exemple, unele din cercetarea proprie iar altele preluate din literatura de specialitate.

2.1 Performanțele unui teleoperator și interfața om - mașină

Un teleoperator este un sistem robotic care îmbină în mod sinergetic omul cu mașina. Această definiție extrem de sintetică conduce la ideea că una dintre cele mai importante componente ale oricărui sistem de teleoperare este interfața operator-sistem. Această interfață trebuie în așa fel proiectată încât :

- *operatorul să poată "simți" mediul îndepărtat ,*
- *operatorul să poată controla consecvent manipulatorul care acționează în mediul îndepărtat.*

Simțul asupra mediului se creează pe baza informațiilor venite pe canalele de reacție spre operator. Reacția vizuală este vitală pentru teleoperare [Sheridan 92], dar și celelalte modalități de reacție ca cea de forță, cea tactilă și cea auditivă au eficiența lor și contribuie în final la creșterea performanțelor teleoperării [Das 92]. În concordanță cu această idee Massimino și Sheridan afirmă că dacă alături de reacția vizuală există și reacția de forță, diminuarea performanțelor teleoperării datorită înrăutățirii, din diverse motive, a condițiilor de vizibilitate în partea îndepărtată, este mai puțin semnificativă decât în cazul în care există doar reacția vizuală. [Massimino 94]. Viziunea autorului asupra importanței reacțiilor în calitatea actului de conducere de la distanță nu diferă esențial de cele prezentate mai sus, însă se consideră că:

Nu toate canale de reacție au aceeași pondere în formarea comenzii de conducere. Reacția vizuală și *reacția de contact* (tactilă și de forță) contribuie în mod direct la formarea comenzii, deci pot fi considerate *reacții active*, în timp ce reacția auditivă și olfactivă au un rolul doar în luarea unei decizii. Un zgomot sau umiros suspect din zona în care acționează manipulatorul condus pot constitui informații de avertizare pentru operator, cu alte cuvinte cele două tipuri de informații

pot fi utilizate numai pentru securitatea sistemului. Ele au deci un rol *pasiv* în formarea comenzii. Prin aceste precizări este mai clar asupra căror canale de reacție se poate acționa pentru îmbunătățirea performanțelor actului de conducere de la distanță.

❗ Nu este însă suficientă doar o interfață om-mașină performantă pentru a crește calitatea actului de conducere. Este necesar ca operatorul să se acomodeze în primul rând cu dinamica sistemului adică cu modul în care manipulatorul îndepărtat răspunde la impulsurile de control date de operator prin intermediul interfeței amintite mai sus. Acomodarea se realizează numai prin antrenament. Acest antrenament presupune nu numai o bună cunoaștere a sistemului și a sarcinii de teleoperare care trebuie îndeplinită. Calitatea conducerii scade atunci când sarcina de teleoperare a apărut cu o frecvență mai mică în misiunile operatorului, sau când o sarcină conține funcții noi, pentru care operatorul nu are experiență. Cele prezentate mai înainte reprezintă un punct de vedere propriu asupra sistemelor de teleoperare cu reacție de forță și pot fi sintetizate în următoarea propoziție:

❗ Propoziție: Calitatea execuției unei sarcini de teleoperare depinde de trei factori: *reacția vizuală, reacția de contact și antrenamentul operatorului uman.*

Cum pot fi evaluate performanțele unui sistem de teleoperare în care este inclus și operatorul uman ? Această întrebare este aproape retorică pentru că nu a primit încă un răspuns acceptat de specialiștii în domeniu, pentru a fi standardizat. Din cercetarea bibliografică efectuată pe această direcție s-a constatat că prima încercare de răspuns se înregistrează în 1975, când J. Vertut propune un criteriu de evaluare denumit *dexteritate* [Vertut 75]. Acesta caracteriza dexteritatea sistemului prin diferența dintre pozițiile relative ale elementelor cuplelor cinematice omoloage, ale lanțurilor master și slave, lungimea segmentului delimitat de poziția teoretică și reală a punctului caracteristic al lanțului cinematic slave la încărcare maximă și la forțe-prag, care se pot aplica la extremitățile lanțului cinematic slave, respectiv master, fără ca extremitatea omoloagă a celuilalt lanț să se deplaseze. S-a încercat și o exprimare analitică a acestui criteriu complex al dexterității în care intrau cu pondere variabilă o funcție care exprima timpul de execuție a unei sarcini și alta care exprima eroarea cu care se execută sarcina în cauză [Kovacs 82]. În timp au mai apărut și alte idei privind evaluarea performanțelor teleoperatorilor, ultima aparținând lui G. Raju și Y. Yokokohji, care introduc un indicator de calitate nou, denumit *indice de*

manevrabilitate . Acest indicator poate fi determinat pe cale experimentală [Raju 89], dar poate fi evaluat și analitic în faza de concepție a sistemului de teleoperare.[Yokokohji 89]. Asupra acestui indicator se revine în capitolul 3 al tezei , unde autorul propune o nouă formulare a indicelui de manevrabilitate, în contextul unei analize bazate pe matricea de impedanță a sistemului.

J. Vertut (părintele teleoperării) a realizat un experiment de referință privind aprecierea calității unui sistem de teleoperare. Acest experiment scoate în evidență importanța interfeței om-mașină. Pentru realizarea a trei categorii de sarcini, specifice teleoperării, s-a utilizat un singur manipulator (**MA23**) și șase tipuri de interfețe om-mașină (metode de conducere), adaptate la manipulatorul în cauză. Timpul de execuție al unei sarcini este raportat la timpul în care operatorul execută nemijlocit sarcina în cauză, care este considerat unitar [Vertut 75]. S-au utilizat următoarele metode de conducere :

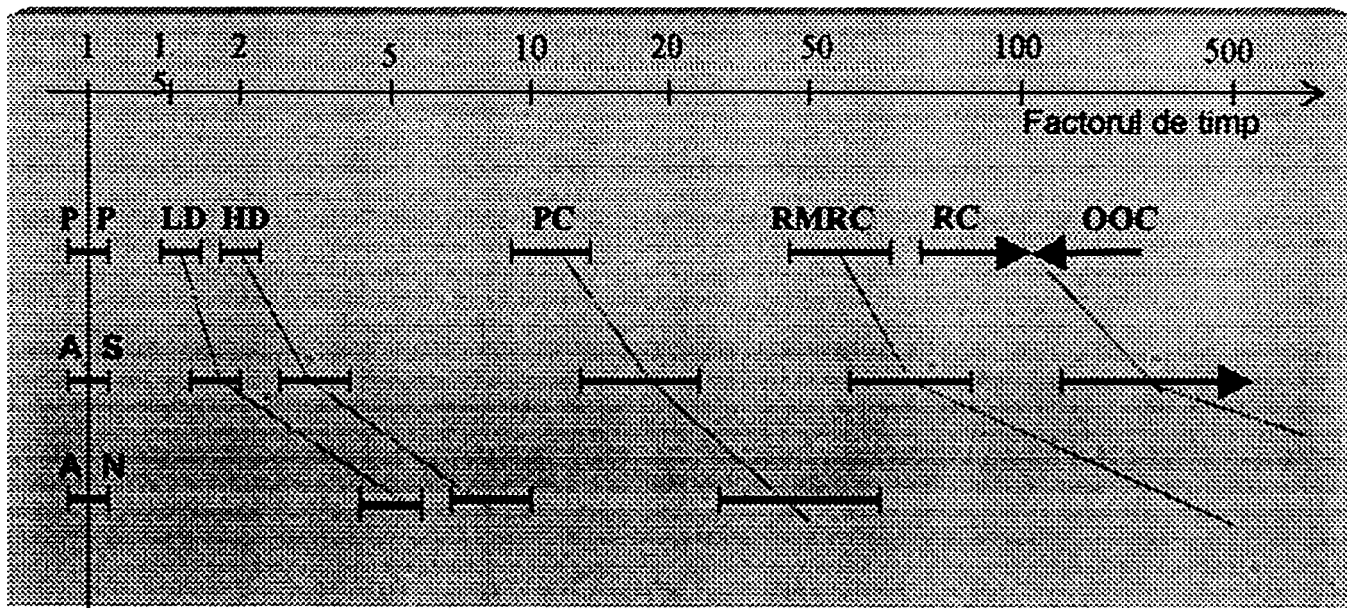


Figura 2.1

1. Control master-slave cu reacție de forță ușoară (LD)
2. Control master-slave cu reacție de forță puternică (HD)
3. Control master-slave unilateral în poziție (PC)
4. Controlul în viteză prin descompunerea mișcării (RMRC)
5. Controlul în viteză la nivel de articulație (RC)
6. Controlul în modul pornit-oprit (OOC)

S-au executat următoarele trei tipuri de sarcini specifice teleoperării:

- A. Fixarea, transferul și depunerea unui obiect (*Pick and Place*- PP), Ansamblare simplă (AS),
- B. Ansamblare normală (AN).

Rezultatele experimentului realizat de Vertut sunt ilustrate în fig.2.1. Se evidențiază rolul determinant al interfeței dintre operator și sistem în rezolvarea sarcinilor de teleoperare cu grad mare de dificultate. Pentru anumite categorii de interfețe, rezolvare acestor sarcini necesită o perioadă de timp de sute de ori mai mare decât cea de referință, iar pentru altele este imposibilă realizarea (cazul **AN** cu **RC** și **OOC**).

Rezultatele prezentate de Vertut, deși aparent foarte concludente au suscitată și unele comentarii din partea specialiștilor, care consideră că pe un alt tip de manipulator aceleași experimente pot conduce la rezultate complet diferite [McGovern78]. Pornind de la aceste considerente, pentru formarea unei imagini proprii asupra unor astfel de rezultate și asupra criteriului complex de dexteritate s-au realizat teste asemănătoare cu cele din experimentul lui Vertut, dar s-au utilizat patru tipuri de manipuloare (PUMA 600, ROMAT 76 , REMT 2, KUKA 50). Prin corelarea rezultatelor obținute, cu cele prezentate de Vertut s-au desprins câteva observații și concluzii din care se punctează următoarele:

- Comanda manuală la nivel de articulație este mult mai dificilă decât cea la nivel de efector final (comanda într-un spațiu cartezian), mai ales pentru manipuloarele cu structură articulată (numai cu axe de rotație).
- Orice operație de manipulare comandată de la distanță are două faze: una de apropiere de țintă a efectorului final, care reprezintă faza de mișcare *grosieră* , iar cealaltă de mișcare în apropierea țintei, care este faza de mișcare *fină*. Aceste faze, care nu sunt luate în considerare de experimentul lui Vertut, solicită timpi diferiți de execuție. Timpul pentru faza grosieră a mișcării este de cele mai multe ori mai mic decât cel unitar (al operatorului), iar diferențele de la un manipulator la altul sunt ne semnificative (depind doar de viteza maximă a fiecărui teleoperator). Timpul pentru faza de mișcare fină este însă mult mai mare decât cel unitar, ajungând la un raport de 10, chiar la cele mai bune teleoperatoare.
- Vizibilitate mai bună în zona din apropierea țintei (zona mișcării fine) contribuie în mod esențial la îmbunătățirea performanței legate de timpul de execuție (permite o reducere la jumătate a raportului menționat mai sus).
- Pentru operațiunile de montaj (simplu sau normal) controlul master-slave cu reacție de forță este cel mai performant..

- Dispersia raportului de timp funcție de antrenament este importantă, mai ales în faza de mișcare fină, unde factorul de timp poate varia într-o plajă foarte largă, cuprinsă între 10 și 100.

S. Lee și H. Lee propun un model analitic pentru comportamentul dinamic al brațului uman în teleoperarea cu reacție de forță și reacție vizuală.[Lee 93]. Prin acest model neliniar se arată că la generarea forței intenționale (forța cu care brațul uman acționează asupra brațului master) concură cu ponderi diferite (α și $1-\alpha$) calea vizuală și calea de forță. Pe aceste căi sunt transmise, cu întârzieri diferite, eroarea de poziție și eroarea de forță, pe baza cărora se formează comanda neuromusculară. Transformarea acestei comenzi în forță efectivă depinde de dinamica brațului uman care este aproximat cu un element de întârziere de ordinul doi.

Viziunea autorului în legătură cu comportamentul operatorului în cadrul unui sistem de teleoperare diferă de cea prezentată de Lee și Lee. În această viziune următoarele două idei sunt clar conturate:

1. Omul reprezintă: regulatorul original, ierarhizat, adaptiv, optimal și decizional.
2. Descrierea cantitativă a controlerului uman este imposibilă, datorită enormei versatilități a procedeeilor de prelucrare a informațiilor.

Motivat de aceste idei, în loc de model analitic, autorul propune un *model descriptiv* al comportamentului uman în cadrul unui sistem interactiv om-mașină general. În cadrul acestui model elementele constitutive de percepție, de prelucrare a datelor, de control și cele de execuție sunt conectate la căi de prelucrare a semnalului intern, a căror configurație se modifică pe măsura apariției unor noi situații. Operațiile funcționale efectuate asupra unei căi de date pot fi de asemenea modificate. Deci avem de a face cu o adaptare atât a căilor cât și a funcțiilor realizate la nivel de cale. În fig. 2.2 se prezintă schematic căile generale la care sunt conectate elementele de percepție, prelucrare și execuție și care descriu comportarea umană într-un sistem interactiv om-mașină. În acest sistem omul operează asupra intrărilor percepute vizual și comunică cu mașina printr-o ieșire de manipulare. Elementul din extremitatea dreaptă al acestei reprezentări este elementul condus (mașina). În stânga sa este reprezentată interfața de execuție dintre om și mașină, reprezentată prin sistemul de execuție neuromuscular care este mecanismul de ieșire al operatorului. Acesta este el însăși un sistem de conducere cu reacție proprie complicată, capabil să opereze în buclă deschisă sau combinat, în buclă închisă-buclă deschisă. Sistemul neuromuscular de execuție cuprinde mușchii membrului (braț sau picior) și ai

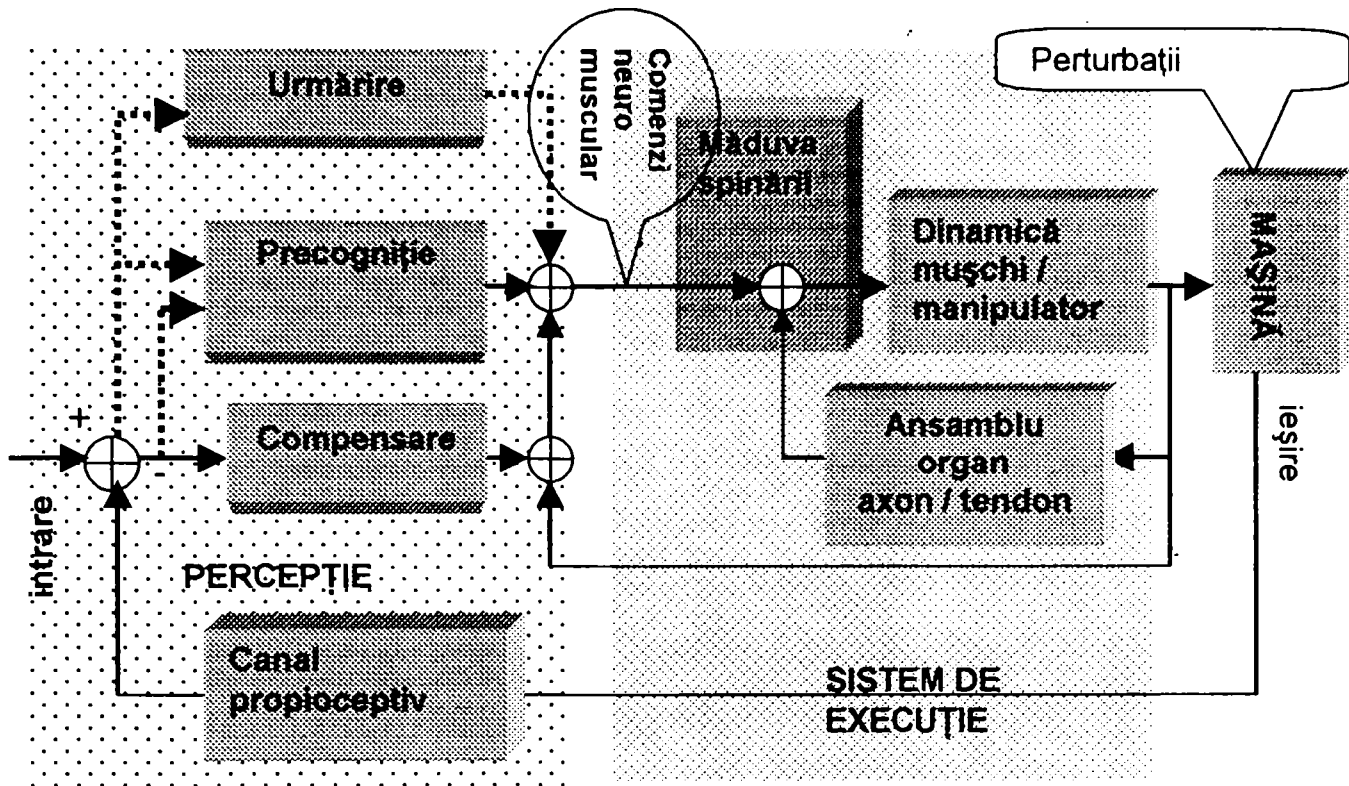


Figura 2.2

manipulatorului (mână sau laba piciorului) pe legătura directă și un ansamblu de organe (axon, mușchi și tendon) pe calea de reacție. Toate aceste elemente operează pe calea care leagă măduva spinării de periferice. Această cale este cea mai scurtă, deci viteza de reacție este cea mai mare. Există și alte surse senzoriale ca: receptorii din articulații și percepția vizuală periferică care dau informații asupra mecanismului de ieșire al operatorului (de exemplu poziția mâinii). Acestea sunt conținute în bucla de reacție propriocceptivă care se închide la nivelul percepției, reprezentată în partea stângă a figurii. Când blocul de compensare este alocat la nivelul perceptual, controlerul uman acționează numai ca răspuns la erori sau la mărimi de ieșire ale sistemului condus. Componenta compensatorie este prezentă când informația afișată controlerului reprezintă o eroare de execuție sau o ieșire a mașinii conduse.

Când intrările de comandă pot fi distinse de ieșirile sistemului prin afișare, la calea compensatorie se adaugă calea de urmărire. Această nouă cale, care furnizează o conducere în buclă deschisă, asociată cu calea compensatorie de conectare în buclă închisă a erorilor poate conferi, în principiu, o calitate superioară conducerii globale.

În cazul familiarizării complete cu dinamica elementului condus și când întreg domeniul perceptual este realizat, operatorul poate genera comenzi neuromusculareabile, discrete, programate în timp, scalate, etc., astfel încât ieșirile mașinii să fie cele dorite. Aceste comenzi neuromusculare sunt selectate dintr-un repertoriu de mișcări

de conducere învățate anterior. Această comportare, asemenea unei conduceri programate în buclă deschisă este denumită precognitivă și se realizează prin antrenament. Si această cale se poate asocia adesea cu acțiunile de compensare ca un mod dual de conducere, o formă în care comanda exercitată este inițial realizată printr-o acțiune precognitivă și care apoi este completată cu acțiuni compensatorii de reducere a erorilor. Descrier succintă a căilor disponibile pentru acțiunile de conducere umană se referă la un sistem om-mașină în general. Un exemplu particular care implică toate căile fundamentale în diferite moduri de manevrare îl reprezintă conducerea unui vehicol. [McRuer77] Teleoperarea reprezintă deasemenea un caz specific și elocvent de interacțiune om-mașină. Aici operatorul aplică forța sa intențională brațului master pentru a genera o serie de comenzi pentru brațul slave. La generarea forței intenționale este utilizată informația senzorială (oferită în cele mai dese cazuri de un display și de dispozitivul de reflectare a forței al brațului master), pentru a evalua abaterea dintre intenția sa și starea controlată. Semnalul neuromuscular care comandă acțiunile mâinii are două componente, una reflexivă și una cerebrală [Lee 93]. În cazul în care operatorul manipulează direct un obiect (cazul de referință în experimentele menționate mai sus) ponderea componentei reflexive este de aproximativ 80%. [Davidovici 86]. Aceasta se datorează faptului că reflexul apare chiar la nivelul sistemului de execuție neuromuscular (calea cea mai scurtă din fig.2.2) și se bazează pe reacția de poziție, viteză și forță, care apar la nivelul brațului. Prin combinarea celor trei reacții provenite de la senzori propioceptivi ai brațului se obține o reacție complexă de mișcare, denumită **reacție kinesthetică**. [Hanaford 89] Componenta cerebrală se formează la nivelul percepției și se bazează în special pe procesarea informațiilor vizuale.

În cazul în care operatorul manipulează obiectul folosind un manipulator pasiv (spre exemplu un manipulator comandat în modul pornit–oprit printr-un panou cu butoane) ponderea componentei reflexive în formarea comenzii este nulă.

În cazul în care se utilizează un manipulator activ cu posibilitate de reflectare a forței de încărcare (spre exemplu manipulator master-slave) apare reacția kinesthetică, de calitatea căreia depinde ponderea componentei reflexive în formarea comenzii. Reacția kinestehtică ideală se realizează atunci când operatorul are senzația că manipulează direct obiectul. Sistemul care asigură o asemenea reacție mai este denumit de unii autori ca *sistem cu transparentă completă* [Sheridan 93], sau sisteme care asigură *telesimbioza* operatorului cu mediul îndepărtat, în care

acționează brațul slave [Coifett 89]. Conceptul de *teleprezență* introdus de Hanaford (s-a amintit și în cap.1) se referă la acel mod de teleoperare care asigură suficiente informații operatorului astfel încât acesta să se simtă complet transpus în mediul îndepărtat. Aceasta presupune nu numai o reacție kinesthetică ideală ci și o reacție de aceeași calitate pe calea vizuală, tactilă și auditivă. Cercetătorul japonez Tachi a introdus conceptul de *tele-existență* (tele-existence) care are același sens cu teleprezența numai că operatorul este transpus într-un mediu virtual (creat pe calculator) [Tachi 98].

2.2 Reacția de forță și controlul bilateral în teleoperare.

Copiatoarele mecanice de tip MSM, inventate de Geortz aveau două avantaje esențiale:

1. Permiteau operatorului să controleze simultan toate gradele de mobilitate ale manipulatorului slave.
2. Reflectau la mâna operatorului forțele de încărcare care acționau asupra brațului slave.

Această caracteristică era implicită datorită legăturii cinematice (realizată printr-o transmisie mecanică reversibilă) dintre unitatea master și unitatea slave. Prin înlocuirea transmisiei mecanice dintre cele două unități cu transmisie prin cablu electric sau unde electromagnetice caracterul implicit al reacției de forță a fost eliminat. Conservarea avantajului oferit de reacția de forță la teleoperatoarele fără transmisie mecanică între cele două unități a constituit și constituie un obiectiv major pentru cercetarea în domeniul teleoperării [Dudragne89],[Hanaford89], [Anderson89].

Prin schema bloc din fig.2.3 și, prin comentariile legate de aceasta, autorul încearcă să prezinte, într-o viziune proprie, principiile de bază ale unui sistem de teleoperare cu reacție inversă de forță. Schema bloc se referă la un sistem de teleoperare clasic, ea fiind valabilă atât pentru manipolatoarele MSM mecanice cât și pentru servomanipolatoarele electrice sau electrohidraulice. Operatorul uman conduce cu mâna elementul terminal al lanțului cinematic master. El prescrie acestui element o poziție (X_m, Y_m, Z_m) și o orientare într-un sistem de coordonate cartezian. Mișcarea impusă de operator se descompune la nivel de articulație, $(q_{1m}, q_{2m}, \dots, q_{nm})$ reprezentând vectorul poziției relative a elementelor corespunzătoare celor n articulații. Poziția elementelor unei articulații din lanțul cinematic master este urmărită de poziția elementelor articulației corespondente în lanțul cinematic slave $(q_{1s},$

q_{2s}, \dots, q_{ns}). În final poziția (X_s, Y_s, Z_s) și orientarea $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ efectorului final a brațului slave va urmări poziția și orientarea elementului terminal a brațului master. Brațul slave acționează asupra mediului îndepărtat, care la rândul lui reacționează prin tursorul de forță $[F_{xs}, F_{ys}, F_{zs}, M_{xs}, M_{ys}, M_{zs}]$ care are trei componente de forță și trei componente de moment. Această forță se descompune la nivelul articulațiilor lanțului cinematic slave. Momentele de încărcare se transmit la nivel de articulație brațului master $(M_{1m}, M_{2m}, \dots, M_{nm})$ și în final la nivelul elementului terminal al acestui braț, respectiv la mâna operatorului, prin tursorul forței $[F_{xm}, F_{ym}, F_{zm}, M_{xm}, M_{ym}, M_{zm}]$.

În schema din fig.2.3 se evidențiază legătura reciprocă sau bilaterală între cele două unități, legătură realizată de un sistem bidirecțional de transmitere a poziției și respectiv a forței la nivelul articulației. În cazul copiatoarelor mecanice sistemul respectiv este reprezentat de transmisii mecanice reversibile. În cazul

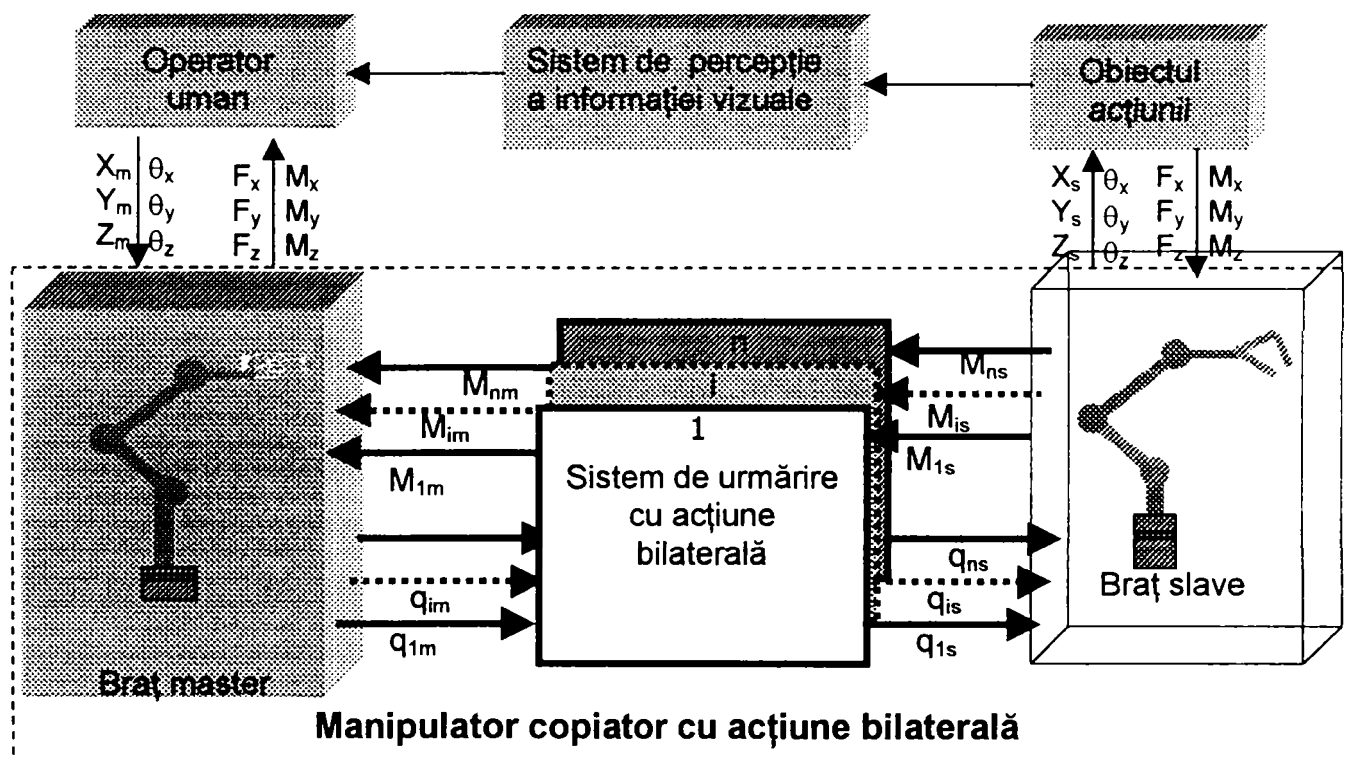


Figura 2.3

teleoperatorilor fără legătură cinematică între cele două unități legătura bilaterală este asigurată de un sistem automat denumit *sistem de urmărire cu acțiune reciprocă* sau *sistem de control bilateral* [Egorov 80], [Sharidan 86]. În general, prin unitatea master se prescrie: poziție, viteză, sau forță, pentru unitatea slave, care la rândul ei transmite în sens invers un semnal proporțional cu forța (momentul) de încărcare, care reprezintă mărime de comandă pentru unitatea master. Sistemele de teleoperare

care permit un asemenea control sunt denumite *sisteme de teleoperare bilaterale* sau pe scurt *teleoperatoare bilaterale*.

Sistemul de urmărire a poziției sau a vitezei cu acțiune bilaterală operează cu patru coordonate funcționale de bază: coordonatele de poziție sau de viteză ale părții master, respectiv părții slave (q_{mi} , sau \dot{q}_{mi} respectiv q_{si} sau \dot{q}_{si}) și coordonatele de moment sau forță M_{mi} sau F_{mi} , respectiv M_{si} sau F_{si} .

Viziunea autorului asupra reacției de forță și a controlului bilateral în teleoperare este sintetizată în următoarea propoziție.

Propoziție: Filozofia controlului bilateral în teleoperarea clasică poate fi rezumată la faptul că partea master reprezintă unitatea de comandă pentru partea slave și viceversa, unitatea slave exercită prerogative de control asupra unității master.

2.3 Controlul bilateral în teleoperarea clasică

Clasa sistemelor de teleoperare bilaterale este foarte diversificată, în ceea ce privește soluțiile tehnice de realizare. Există o serie de criterii după care se poate realiza o anumită sistematizare în această clasă de teleoperatoare. Un criteriu de sistematizare vizează modalitatea de creere la mâna operatorului a senzației de încărcare. [Egorov 80] Conform acestui criteriu există sistemele de control bilateral active la care încărcarea se realizează pe bază de motoare (electrice, hidraulice sau pneumatice) și sistemele pasive în care senzația de încărcare este creată de cuplaje electromagnetice sau cu pulberi comandate în tensiune sau curent.

Autorul propune introducerea un nou criteriu, mai practic, de a clasifica structurile de control bilateral [Diaconu 92]. Acesta ține cont de modalitatea de obținere a reacției de forță. Conform acestui criteriu se delimitează trei categorii de sisteme de control bilateral:

- Sisteme de control bilateral fără senzori specializați de forță sau moment.
- Sisteme de control bilateral cu senzori de forță sau moment la nivel de articulație
- Sisteme de control bilateral cu senzor de forță/moment la nivelul efectorului final.

Principiile de bază ale acestor sisteme sunt prezentate în cele ce urmează.

2.3.1 Reacția de forță fără senzori de forță.

Primul sistem de urmărire cu acțiune bilaterală fără senzori de forță s-a realizat în anii '60. El consta dintr-o pereche de selsine, emițător-receptor, care lucrau în regimul

indicator [Aronov 69]. Performanțele unui asemenea sistem au fost modeste fapt pentru care s-a renunțat la ideea folosirii selsinelor în astfel de sisteme. Ideea reacției fără senzori a rămas.

- *Condiția necesară pentru implementarea reacției de forță (fără senzori de forță) este ca partea mecanică, atât a brațului slave cât și cea a brațului master, să aibă o bună reversibilitate.*

Această reversibilitate este determinată de tipul acționării, mai precis de tipul transmisiei mecanice dintre motor și elementul mobil al cuplei cinematice. Este cunoscut, spre exemplu, că o transmisie mecanică melc-roată melcată este ireversibilă. Dacă condiția amintită este îndeplinită atunci o abatere de poziție între elementele a două articulații corespondente generează două momente de forță antagoniste în fiecare din părți: un moment de acțiune la partea de slave și un moment de reacțiune inversă la partea de master și viceversa. Un sistem de control bazat pe acest principiu mai este cunoscut sub denumirea de *sistem de urmărire cu acțiune bilaterală de tip simetric* [Vorosilov 73], sau *control bilateral în modul poziție-poziție*. [Vertut 73]. Principiul în discuție poate fi extrapolat și pentru controlul master slave în viteză. [Hanaford 89].

- *Din cercetarea posibilităților practice de implementare a controlului bilateral în teleoperarea clasică s-a desprins ideea că principial, două variante structurale sunt de bază:*

Varianta A: Structurile de control bilateral realizate în această variantă folosesc un singur servoamplificator pentru partea de master și pentru partea de slave. Cuplarea care dă reacția de forță se realizează pe circuitul de putere în sensul că pe acest circuit se cuplează în paralel motorul slave cu motorul master. În fig.2.4 se prezintă schema de principiu a unei astfel de structuri.

Semnalul de eroare de poziție dintre master și slave (determinat prin însumarea semnalelor de la traductoarele de poziție) este amplificat de un amplificator de tensiune. Peste semnalul de ieșire din acest amplificator se suprapune semnalul de eroare de viteză (determinat prin însumarea semnalelor de la traductoarele de viteză) și împreună comandă amplificatorul final (printr-un circuit de comandă specific acestui amplificator). Selectorul de scală de forță conectează pe circuitul de putere cele două motoare (master și slave) . Acest selector dozează energia prin cele două motoare în funcție de reacția de forță care se dorește realizată.

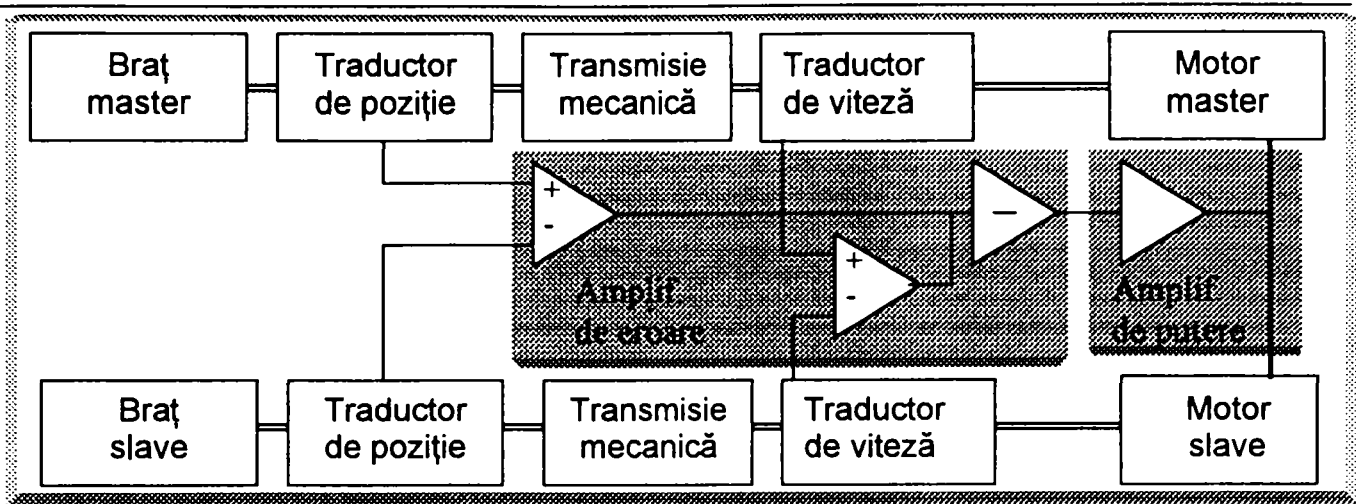


Figura 2.4

Schema prezentată are avantajul că este mai simplă și mai ieftină. Are în schimb dezavantajul că necesită multe legături între master și slave. Mai mult, unele legături se fac pe circuitul de putere. Aceasta face imposibilă transmisia digitală multiplexată, prin urmare distanța dintre cele două unități nu poate fi prea mare. Această schemă este valabilă atât pentru sistemele master-slave acționate electric cât și pentru cele cu acționare hidraulică (unde circuitul de putere este realizat prin conducte sau furtune hidraulice prin care circulă ulei sub presiune).

Variatna B: Structurile de control realizate în această variantă folosesc câte un servoamplificator pentru fiecare din părți. Schema unei astfel de structuri este prezentată în fig.2.5. Tensiunile de comandă pentru cele două servoamplificatoare

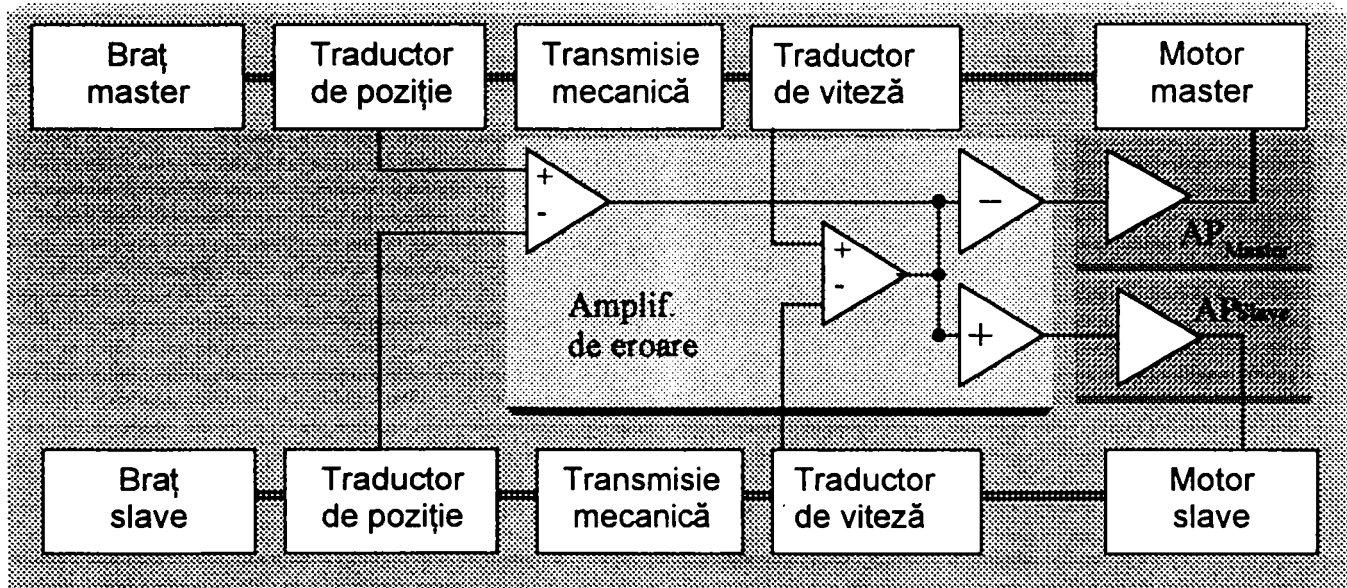


Figura 2.5

sunt egale dar de semn opus. Aceste tensiuni sunt proporționale cu eroarea de poziție dintre cele două unități. Prezența traductoarelor de viteză nu este obligatorie, numai că, introducerea unui semnal de comandă suplimentar, după eroarea de viteză,

contribuie în mod semnificativ la îmbunătățirea controlului bilateral în modul poziție-poziție.

Avantajul principal al acestei variante structurale este dat de faptul că nu se mai face cuplarea pe circuitul de putere, ceea ce creează posibilitatea de a crește distanța dintre cele două unități. De modul de plasare și distribuire a celor două servoamplificatoare depinde numărul legăturilor necesare între unitatea master și unitatea îndepărtată, slave. Această afirmație va fi demonstrată în prezentarea care urmează.

- În practică, variantele structurale prezentate mai înainte se regăsesc în arhitectura teleoperatorilor bilaterale, cu acționare electrică și a celor cu acționare hidraulică.

În continuare se prezintă sintetic două exemple semnificative: unul se referă la sistemul de control realizat de C. Flatau pentru manipulatorul electric MA23 (care a mai fost amintit), iar al doilea se referă la manipulatorul hidraulic MS200, al cărui sistem de control a fost conceput prin contribuția majoră a autorului tezei.

I. Manipulatoare electrice controlate bilateral în modul poziție-poziție.

R. Geertz de la ANL a realizat primele manipulatoare electrice (model E1 și model E2) de tip master- slave. Pentru controlul bilateral a acestora a realizat un servoamplificator (denumit de el, *Servoamplificator complex A1*) care poate fi încadrat în varianta A (prezentată mai înainte).

Carl Flatau, de la Brookhaven National Laboratory (BNL), SUA, (cel care în 1969 realiza prototipul primului servomanipulator acționat de motoare de curent continuu) împreună cu grupul de cercetători condus de J. Vertut, din Franța, realizează în 1972 un sistem de comandă mult îmbunătățit. Acesta a fost implementat pe două dintre cele mai performante teleoperatoare realizate în Franța. Este vorba de servomanipulatoarele MA22 și MA23. În fig.2.6 este schițată structura acestui sistem de comandă, schiță inspirată din referința [Vertut 78]. Motoarele de c.c (1) antrenează direct brațele master și slave. Pe axele acestora sunt montate potențiometrele (2) ca traductoare de poziție unghiulară. Amplificatoarele de putere (3) sunt plasate în apropierea motoarelor și pot fi alimentate și de la baterii de acumulatori. Semnalul eroare de poziție este amplificat de două servoamplificatoare distincte, unul pentru master (4), celălalt (5) pentru slave. Prin diferențierea semnalelor de la potențiometre se obține informația de viteză, fără a se utiliza tahogeneratorul. Blocurile (6) și (7) compensează frecările vâscoase și o parte din inerție în fiecare buclă. Reacția de

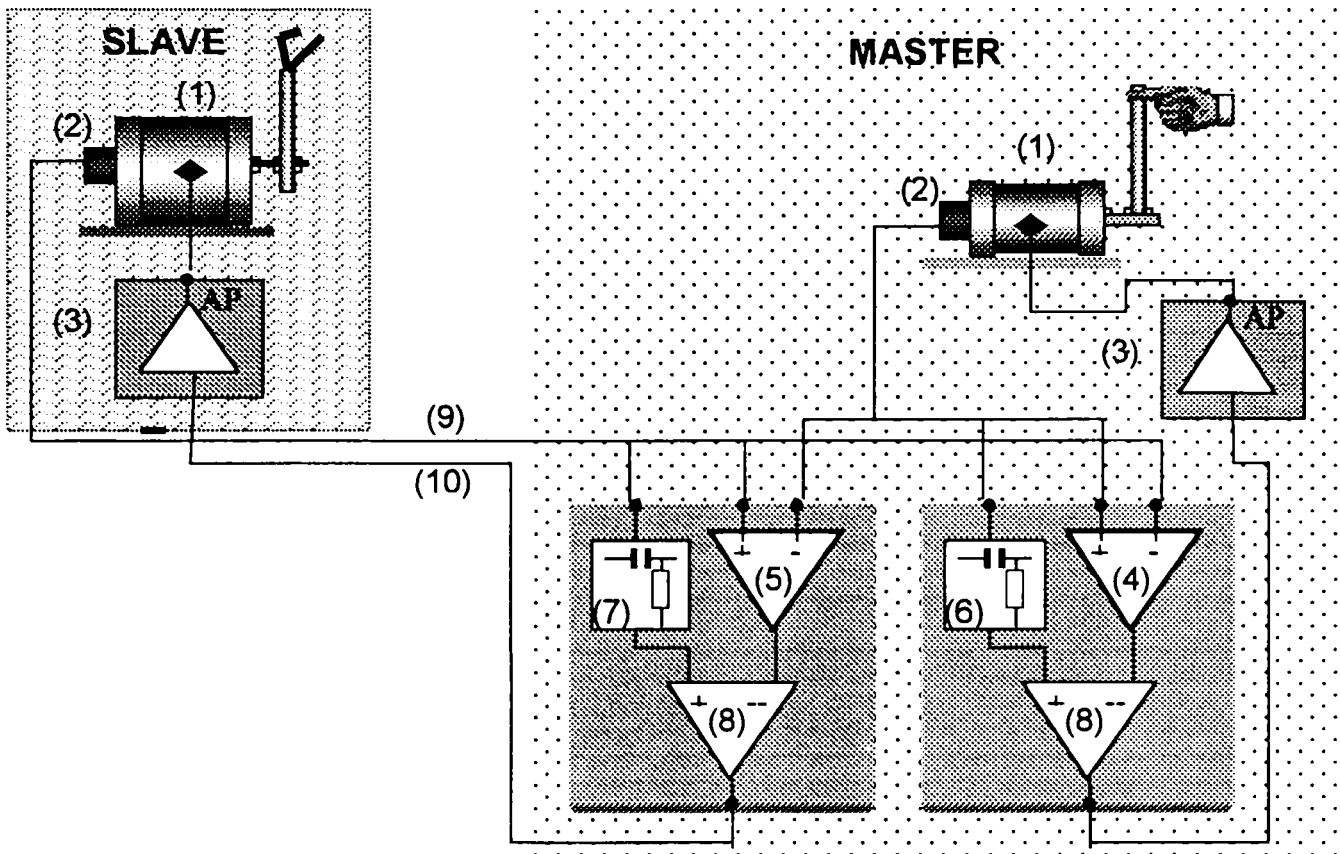


Figura 2.6

forță poate fi diminuată până la 80% prin blocul de amplificare (8). Legătura dintre master și slave se realizează doar prin doua canale (9) și (10) (se confirmă o afirmație făcută mai sus).

Principial această schemă originală rezolvă o serie de probleme (asupra cărora se va insista în cap.4) legate de controlul bilateral în modul poziție-poziție. Prin analiza acestei scheme autorul emite două observații (sub rezerva că sursa de informare a omis amănuntele la care voi face referire). Aceste observații sunt :

1. Antrenarea directă (*direct drive*) cu un motor de curent continuu a brațului master și a brațului slave presupune, ori o sarcină manipulată foarte mică, ori existența unor motoare de cuplu care, după informațiile proprii, nici la ora actuală nu sunt puse la punct.
2. Obținerea semnalului de viteză prin derivarea semnalului de la potențiometrul folosit ca traductor de poziție unghiulară este o problemă delicată deoarece implică o anticipare care este echivalentă cu punerea efectului înaintea cauzei. Această problemă poate fi soluționată, cu unele compromisuri, în sensul că elementul de anticipare (diferențiere) trebuie combinat cu un element de întârziere de ordinul unu. [Călin 85]. Chiar și cu aceste compromisuri utilizarea reacției (pozitive) de viteză în scopul compensării influenței frecărilor vâscoase, datorate în special tensiunii electromotoare, asupra dinamicii mișcării sistemului și asupra senzației de încărcare

(a operatorului) conduce sistemul spre limita de instabilitate. Această afirmație se bazează pe rezultatele analizei bazate pe model analitic și a simulărilor prezentate în cap.5. Soluția propusă (și verificată) pentru îmbunătățirea performanțelor acestei scheme (interesante) este de a folosi *reacția încrucișată de viteză* în sensul că reacția de viteză din blocul master compensează frecările vâscoase din partea slave și viceversa, reacția de viteză din partea slave compensează frecările vâscoase din partea master. Această modificare implică două legături în plus între master și slave, dar cum cele două servoamplificatoare se află în același loc cele două legături suplimentare nu creează probleme. Efecte și mai bune se pot obține dacă s-ar utiliza câte un tahogenerator pentru a determina direct vitezele în partea de master și în partea de slave, numai că și aceasta presupune introducerea unei legături în plus spre partea de slave (pentru a aduce semnalul de la tahogenerator) . Pentru distanțe mari între master și slave această legătură suplimentară crează complicații tehnice care trebuie puse în balanță cu avantajele oferite de această reacție suplimentară.

II.Sisteme electro-hidraulice de urmărire de tip simetric

Primul servomanipulator hidraulic cu reacție de forță a fost *Handyman* realizat de Ralph Mocer de la General Electric în 1958. După acest succes sistemele de urmărire hidraulice, mecano-hidraulice și electro-hidraulice au cunoscut răspândire largă în diverse sectoare din tehnică cum ar fi spre exemplu; energetica, aviația, tehnica militară, vapoare și mașini pentru construcții. În domeniul teleoperării, după încercările nereușite de a se adapta un servomanipulator electric (utilizat pentru medii cu temperaturi ridicate 1960) pentru operațiuni de

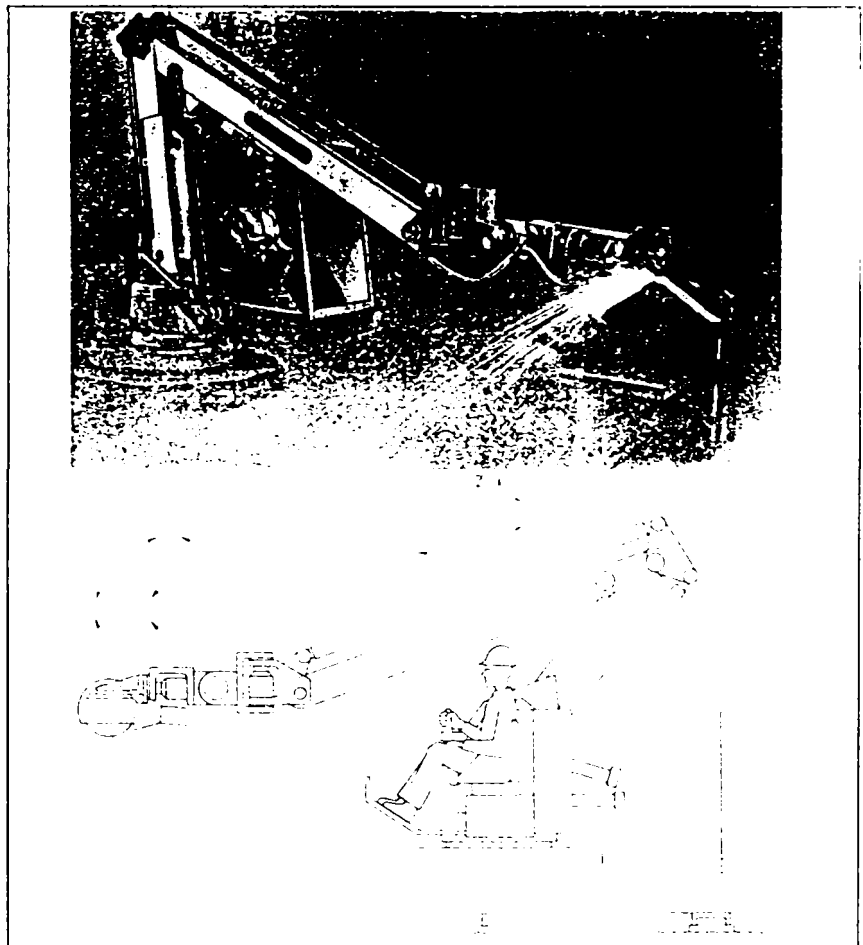


Figura 2.7

teleoperare în mediu submarin s-a ajuns la concluzia că cel puțin pentru teleoperatoarele subacvatice și pentru cele amplificatoare de putere (din sectorul industrial) acționarea hidraulică este mult mai avantajoasă. Dintre avantajele acestui tip de acționare se subliniază; raport foarte bun *putere / greutate proprie* (la aceeași putere un motor electric este de trei ori mai greu decât unul hidraulic), comportare bună la viteze mici și reversări cu frecvență mare, posibilitatea de a se cupla direct (direct drive) la elementele cuplei cinematice, eliminând transmisiile mecanice intermediare și problemele legate de aceste, coeficient mare de supraîncărcare, robustețe, etc.

Cele două variante structurale (A și B) ale controlului bilateral de tip simetric, prezentate mai înainte, se regăsesc și în cazul controlului unui manipulator hidraulic cu reacție de forță.

Pentru început se prezintă modul de implementare a variantei **A** pentru un manipulator master-slave amplificator de putere. Acest tip de manipulator mai este cunoscut sub denumirea de *manipulator sincron*.

Manipulatoarele sincrone sunt utilizate pentru manipularea unor piese grele în, așa zise, sectoare industriale calde ca ; turnătorii, forje, etc și pentru manevrarea unor scule pentru polizare ,demaselotare ,debavurare , etc. În fig.2.7a) se prezintă un manipulator sincron dotat cu un cap de forță pentru polizare, iar în fig.2.7b) pot fi distinse mai clar elementele componente ale acestui manipulator sincron.

Arhitectura, cinetostatica, dinamica, acționarea și comanda manipulatoarelor sincrone sunt prezentate într-o serie de lucrări științifice având ca autori membrii ai *Colectivului multidisciplinar de R.I din U.P. Timișoara*, care au participat la proiectarea și realizarea seriei de manipulatoare sincrone; MS 500, MS 200, MS 1000 [Kovacs 87, 89], [**Diaconu 88a,b,c,d 89a, 91b, 92**] [Maniu 91,95], [Mesaroș88, 89], [Perju 88], [Varga 87, 88]. În fig.3.8 se prezintă schema structurală a sistemului de control bilateral proiectat (*cu aportul major al autorului*) pentru manipulatoarele sincrone cu sarcina de 200 Kg, din seria MS 200. [**Diaconu 88d, 92**] [Maniu 91, 95]. În cadrul acestei scheme se evidențiază o serie de circuite, fiecare din ele cu funcții bine precizate. *Circuitul de urmărire a poziției* se compune din potențiometrul Pm (antrenat prin intermediul brațului master) prin care operatorul prescrie poziția brațului slave, servoamplificatorul electronic SE, servovalva SV, motorul de acționare a brațului slave Ms și potențiometrul Ps care închide bucla de urmărire a poziției. Reacția de încărcare la mâna operatorului se realizează prin motorul hidraulic Mm care este

cuplat pe același circuit hidraulic, dar în opoziție, cu motorul M_s de acționare a brațului slave. Neglijând pierderile de presiune pe conductele de legătură dintre cele două

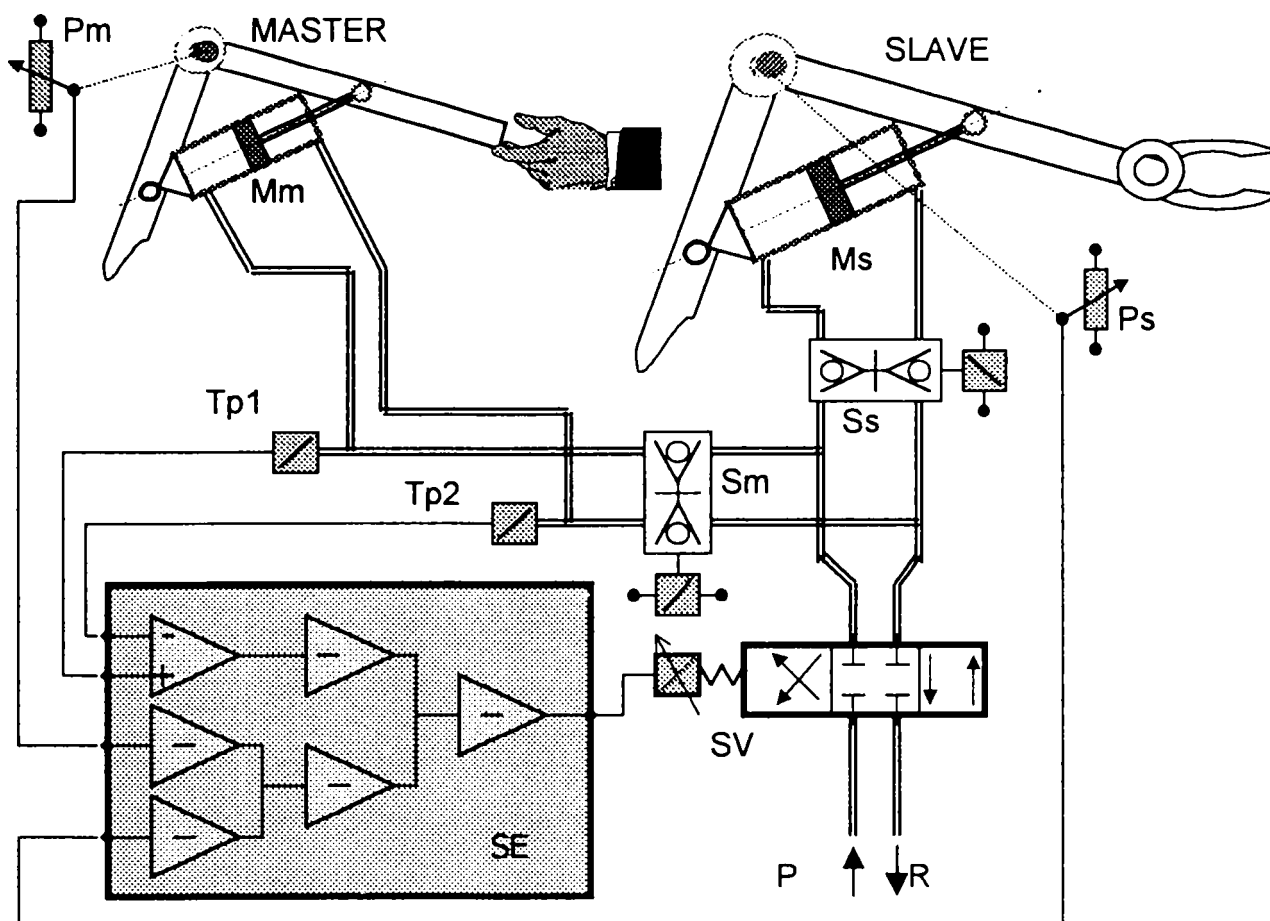


Figura 2.8

motoare se poate considera că diferența de presiune dintre cele două camere ale cilindrului M_s este aceeași cu cea din cilindrul M_m , prin urmare forța reflectată la mâna operatorului va fi proporțională cu cea care acționează la tija cilindrului M_s , raportul de proporționalitate (scala de forță) fiind dată de raportul ariilor secțiunilor celor doi cilindri.

Performanțele dinamice ale sistemului de urmărire în poziție depin în mare măsură de factorul de amplificare global al sistemului în buclă deschisă. Acesta depinde la rândul lui de amplificarea servoamplificatorului electronic și de secțiunea cilindrului M_s . Creșterea factorului de amplificare este limitată de pulsația naturală a sistemului, care este relativ mică pentru sistemele amplificatoare de putere hidraulice [Oprean 90]. Efectul acestei limitări se resimte la abateri mici între poziția brațului master față de cea a brațului slave, care nu pot fi compensate datorită inerției și frecărilor din lanțul cinematic slave (sistemul rămâne insensibil), sau la abateri mari când se ajunge la saturarea amplificatorului electronic și prin urmare operatorul trebuie să aștepte ca brațul slave să realizeze poziția prescrisă de el. Aceste considerente au stat la baza ideii de introducere a unor reacții suplimentare care să permită mărirea

factorului de amplificare și în final îmbunătățirea performanțelor dinamice. S-a încercat reacția de viteză (prin diferențierea semnalului de la potențiomtru P_s). Performanțele dinamice nu au crescut prea mult, în schimb s-a înrăutățit stabilitatea sistemului. O îmbunătățire semnificativă a performanțelor dinamice, a stabilității sistemului, și a senzației operatorului asupra încărcării, s-a obținut prin utilizarea reacției de presiune (presiunea diferențială dintre camerele cilindrului M_s , măsurată cu traductoarele T_{p1} și T_{p2}).

- *Un circuit de siguranță* reprezentat de distribuitorile hidraulice comandate electric S_m și S_s care au rolul de bloca pe poziție brațul slave la o comandă a operatorului. Sistemul a fost astfel reglat încât brațul master și brațul slave să se afle în echilibru numai la funcționarea în gol. Dacă brațul slave este încărcat, iar operatorul nu susține cu un efort brațul master acesta se va deplasa în sensul forței de încărcare și va antrena mișcarea brațului slave. Mișcarea celor două se accelerează oprindu-se numai la finele de cursă a brațului slave. Acest fenomen se datorează reversibilității sistemului master-slave, iar circuitele de blocare amintite dau posibilitatea operatorului să elibereze brațul master chiar dacă brațul slave este încărcat.
- *Circuitul de servocomandă în viteză* (nu apare în figură). Două dintre cele șase

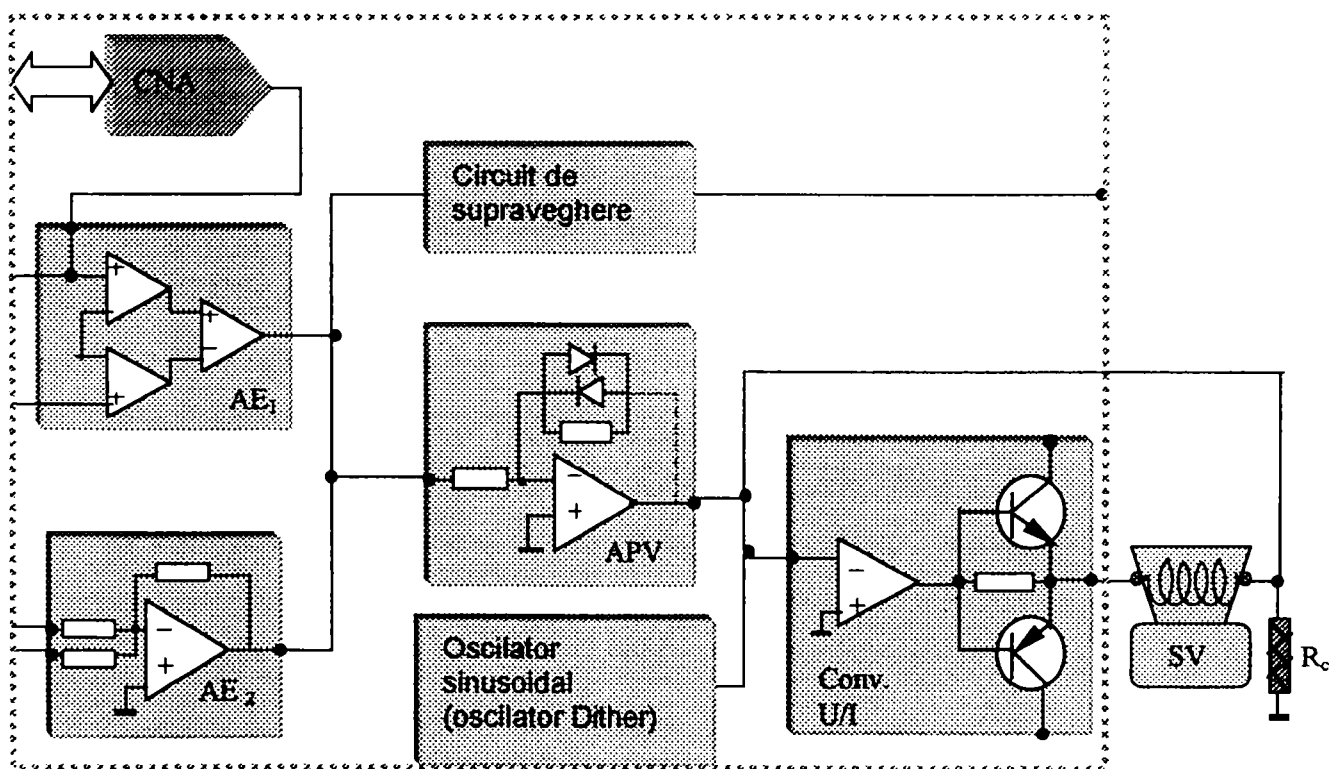


Figura 2.9

axe ale manipulatorului sincron (balansul în plan vertical al brațului și respectiv al antebrățului) sunt comandate în maniera prezentată mai sus. Pivotarea în jurul axei

verticale este servocomandată în viteză. Prescrierea vitezei se face de la un potențiomtru acționat printr-o pedală de piciorul operatorului. Problema principală care apare în conducerea unei asemenea axe este legată de momentele de inerție foarte mari și de gama largă în care variază acestea. Aceasta a impus introducerea unei reacții de accelerație pentru compensarea efectului variației momentelor de inerție. Efectul introducerii unei astfel de reacții într-un sistem de control bilateral este evidențiat mai pe larg în capitolul următor, cu ocazia introducerii conceptului de *control generalizat* al unui teleoperator bilateral. Revenind la servoamplificatorul electronic notat în schemă cu SE mai trebuie adăugat că acesta a fost proiectat, realizat și testat de un colectiv de cercetare de la Fac. de Electronică din Timișoara, colectiv în care un aport însemnat a avut și autorul. Acest servoamplificator complex introducea o serie de idei novatoare privind servocomanda hidraulică [Ciugudean 89], [Diaconu 92]. O parte din aceste idei sunt prezentate sintetic în continuare. Cu această ocazie sunt trecute în revistă și principalele blocuri funcționale din schema structurală a acestui servoamplificator (fig. 2.9) .

- Ideea măririi sensibilității circuitului de urmărire prin introducerea unui amplificator de tensiune cu pantă variabilă (APV). Acesta, prin amplificarea mai mare la tensiuni mici, crește sensibilitatea sistemului de urmărire, iar prin amplificarea mai mică la tensiuni mari previne intrarea în saturație.
- Ideea creșterii vitezei de răspuns a servovalvei prin introducerea unui oscilator de tensiune sinusoidal, care are rolul de a genera un semnal cu frecvența cuprinsă între 200Hz și 400Hz în funcție de tipul servovalvei. Acest semnal cu amplitudinea de aproximativ 1V se suprapune peste semnalul de comandă al servovalvei și are ca efect o vibrație a pistonășului acesteia. Această vibrație împiedică fenomenul de aderență dintre suprafața pistonășului și a cilindrului în care se deplasează, mișorând astfel frecările și împiedicând fenomenul de înțepenire. Oscilatorul, în discuție, este cunoscut în literatură sub denumirea de *oscilator Dither*.
- Ideea măririi siguranței în funcționare și a securității sistemului prin introducerea unor circuite de supraveghere a erorii de poziție și a traductoarelor de reacție.etc
- Ideea de a conduce (unilateral) manipulatorul prin intermediul unui microcalculator numeric, materializată prin introducerea convertorului numeric/ analogic (CAN) în schema servoamplificatorului.

În cazul în care operatorul trebuie să conducă de la o anumită distanță manipulatorul hidraulic cuplarea dintre master și slave pe același circuit hidraulic nu

mai este posibilă. În astfel de situații se propune ca reacția de încărcare la brațul master să fie realizată printr-un motor electric. În această situație poate fi utilizată numai varianta **B** a controlului bilateral de tip simetric. În acest sens Goldenberg propune o soluție în care cele două servoamplificatoare (prevăzute cu convertor N/A) să fie comandate de câte un microcontroler [Goldenberg 95]. Rolul microcontrolerelor este de a cupla cele două servoamplificatoare. Cuplarea se face serial, iar ca suport de transmitere a semnalelor se recomandă cablul cu fibră optică.

2.3.2 Controlul bilateral bazat pe senzori de forță la nivel de articulație

Teleoperatoarele cu reacție de forță care nu utilizează traductoare specializate de forță / moment sunt simple, ieftine dar au performanțe limitate. Această limitare a constituit motivul cercetării și a altor posibilități de realizare a controlului bilateral în teleoperare. Una dintre aceste posibilități este cea care utilizează traductoare de forță / moment la nivel de articulație atât în partea de master cât și în partea de slave.

În fig.2.10 se prezintă o schemă bloc simplificată a controlului bilateral bazat pe senzori de forță. Se poate observa ușor că brațul slave este comandat în poziție iar brațul master este comandat în forță. Din acest motiv acest tip de control mai este cunoscut sub denumirile de: *control în poziție cu reflectarea încărcării* sau *control bilateral asimetric*. O parte din principiile acestui control au fost stabilite încă din perioada anilor 70, de același C. Flatau de la BNL. Acesta semnala că pe lângă

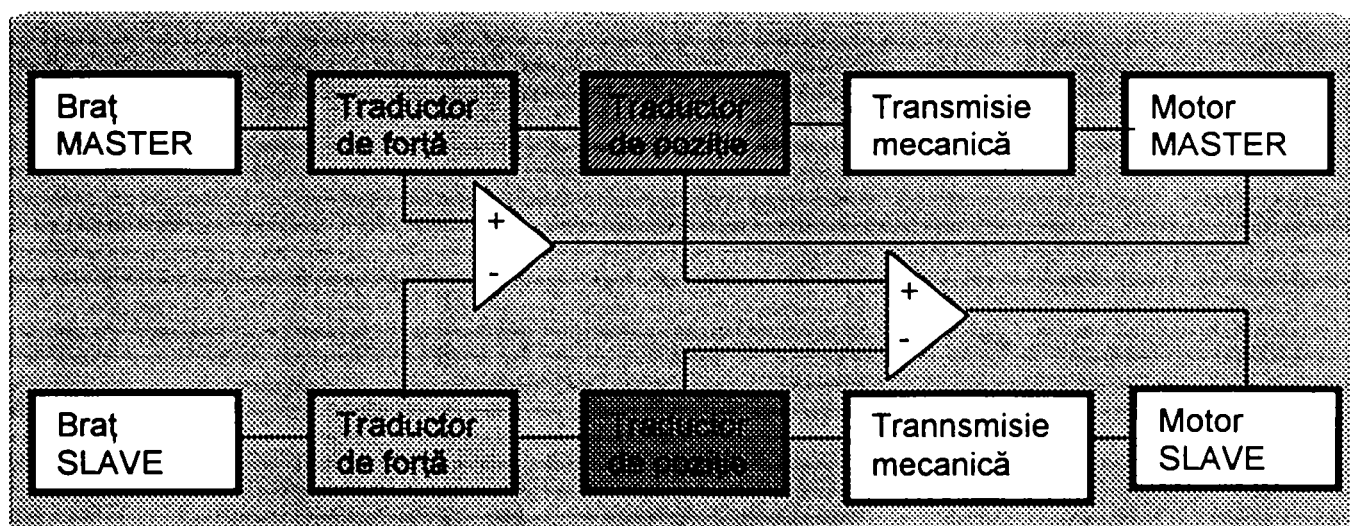


Figura 2.10

avantaje certe există două probleme în realizarea acestui tip de control. Prima se

referea la numărul mare de legături între cele două unități, iar a doua era legată de asigurarea stabilității sistemului.

– În baza cercetările teoretice și experimentale realizate de autor asupra acestui tip control s-au desprins câteva concluzii care pot fi considerate originale. În continuare sunt punctate câteva dintre ele:

- Din punctul de vedere al reacției de forță acest control este superior celui de tip simetric. Aceasta se datorează faptului că senzația operatorului nu mai este influențată de momentele rezistente interne (frecări vâscoase și momente de inerție) din lanțul cinematic slave. Afirmatia este demonstrată teoretic în cap.3 și practic în cap.4.
- Performanțele de mișcare (statice și dinamice) sunt mai slabe decât în cazul controlului simetric. Aceasta este cauzată de introducerea senzorilor de forță / moment care scad rigiditatea sistemului. Principiul de măsurare pe cale directă a acestor mărimi presupune intercalarea unui element deformabil elastic pe calea de transmitere a mișcării.
- Dezavantajul legat de scăderea rigidității sistemului poate fi eliminat dacă forțele sau momentele de încărcare sunt determinate pe cale indirectă (estimate), adică prin măsurarea directă a unor mărimi ca ; poziția unghiulară, viteza unghilară, curentul prin motor sau tensiunea la bornele acestuia și în baza unor relații analitice sau pe baza modelului motorului (neîncărcat) se estimează momentul de încărcare real [Diaconu 96, 98a].
- Un dezavantaj destul de important al sistemelor de tip master-slave reversibile (controlate bilateral) este generat de faptul că pe parcursul executării unei sarcini de teleoperare operatorul trebuie să mențină tot timpul controlul asupra brațului master. Se poate dovedi, prin ciclograma unei operațiuni de manipulare că, o mare parte din timp, brațul slave este încărcat dar se află în faze de așteptare. În aceste faze operatorul trebuie să depună un efort pentru a compensa acțiunea reacției de forță asupra masterului. În plus el ar putea să se ocupe de rezolvarea altor probleme legate de operațiunea pe care o desfășoară, dacă s-ar putea bloca manipulatorul în aceste faze. O soluție la problema în cauză este aceea de a utiliza dispozitive de blocare a mișcării pentru fiecare articulație a brațului master prin intermediul unor frâne (cuplaje electromagnetice) comandate de operator. Această soluție conduce la îngreunarea brațului master și de aici la alte probleme legate de senzația operatorului și de oboseala acestuia. Autorul propune în acest sens o soluție mult mai avantajoasă care

elimină cuplajele amintite. Aceasta prevede introducerea unei legi de control prin care sistemul poate fi reversibil dar și ireversibil.[Diaconu 97]. În cap.4 sunt prezentate detalii privind implementarea acestei legi.

2.3.3 Controlul bilateral bazat pe senzori de forță la nivelul efectorului final

Prin punerea la punct a senzorilor de forță-moment pe 6 axe (care măsoară trei forțe; F_x, F_y, F_z și trei momente de forțe M_x, M_y, M_z) s-a creat posibilitatea realizării unor sisteme de teleoperare (controlate bilateral) performante. Complexitatea unui astfel de sistem master-slave, care utilizează senzorii de forță / moment montați la nivelul

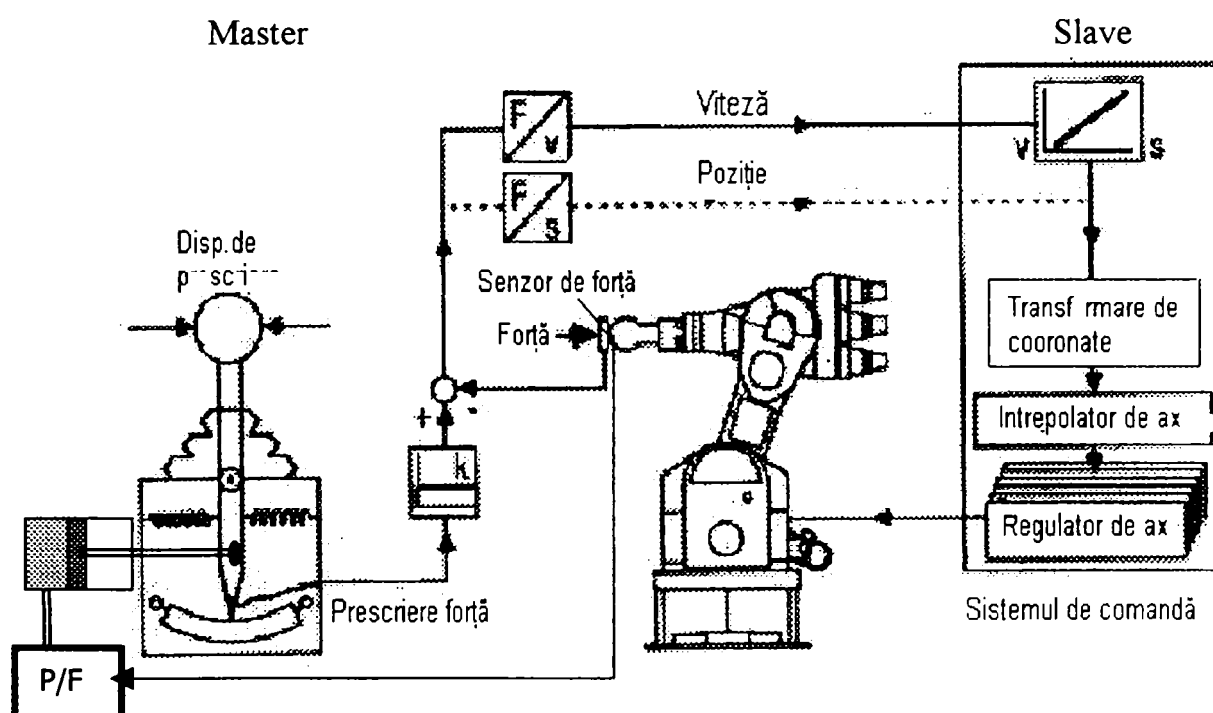


Figura 2.11

efectorului final este foarte mare. Deoarece controlul se execută la nivel de articulație sunt necesare trei transformări de coordonate: transformarea inversă a vectorului de forță/moment din spațiul cartezian în spațiul articulațiilor al brațului slave, transformarea la nivel de articulații între slave și master și transformarea directă de la nivelul articulațiilor brațului master la spațiul cartezian. Toate transformările menționate mai înainte trebuie realizate în timp real. Complexitatea sistemului este impusă însăși de senzor care, la rândul lui, este complex, necesitând în plus o interfață sofisticată de cuplare la sistemul de comandă pe care-l deservește.

În fig.2.11 se prezintă structura de principiu a unui sistem de teleoperare controlat în forță, cu reflectarea încărcării la mâna operatorului. Forța prescrisă de

operator este proporțională cu deplasarea cursorului potențiometrului din dispozitivul de prescriere, factorul de proporționalitate fiind constanta elastică k a acestui dispozitiv. Prin compararea acestei forțe cu forța măsurată de traductorul montat pe efectorul final al brațului robot (slave) rezultă un semnal de eroare de forță. În funcție de această eroare se creează semnalul de comandă în viteză sau în poziție la nivel de efector final. Aceasta presupune cunoașterea impedanței brațului robot. Transformarea de coordonate și interpolarea stabilesc (în funcție de viteza sau poziția efectorului final) prescrierile de poziție pentru regulatorul de poziție al fiecărei axe. Mișcarea efectorului final va fi dirijată în sensul anulării abaterii dintre forța prescrisă de operator și cea măsurată de senzorul de forță.

Senzația de încărcare la mâna operatorului este creată (în cazul de față) prin intermediul unui motor pneumatic liniar, comandat printr-un ventil proporțional. Acest ventil proporțional convertește semnalul electric provenit de la senzorul de forță în presiune. Prin modificarea factorului de amplificare al acestui convertor de forță / presiune are loc o modificare a scalei forței reflectate la mâna operatorului.

Controlul prezentat principial mai sus mai este denumit *control compliant*. Problemele legate de acest control nu sunt rezolvate în totalitate. Pentru că există o serie mare aplicații pentru teleoperatoarele controlate în acest mod, cercetarea serioasă este focalizată puternic pe această direcție [Kazerooni 94],[Asada 86].

2.4 Controlul bilateral în teleoperarea informatizată.

În teleoperarea clasică se poate spune că *omul face totul*. El cunoaște sarcina care trebuie îndeplinită și stările pe care trebuie să le parcurgă pentru finalizarea acesteia. Pentru aceasta el, operatorul, își elaborează pas cu pas strategia de acțiune asupra brațului master pentru a progresa în realizarea sarcini propuse. Această strategie presupune un consum nervos. În cazul teleoperatoarele mecanice la acest consum nervos se adaugă consumul de energie fizică, pentru că energia necesară brațului slave pentru efectuarea operațiunilor de manipulare, la care se adaugă energia pierdută în lanțul cinematic master și slave, provine de la operator. În cazul teleoperatoarelor servocomandate bilateral aportul de energie mecanică din partea operatorului este mult diminuat pentru că factorul de scală, în reacția de forță este mai mic decât unitatea și ajustat astfel încât să nu diminueze prea mult senzația operatorului asupra încărcării dar nici să-l solicite inutil și să conducă la o oboseală prematură.

Grație progreselor în domeniul automatizării și al inteligenței artificiale efortul operatorului în conducerea brațului slave pentru operațiuni de manipulare poate fi redus la zero. Aceasta presupune înlocuirea sa din postul de conducere cu un calculator. Există la ora actuală roboți veritabili, autonomi, formați doar din sistemul slave și calculator. Sarcinile de teleoperare sunt însă complexe și inprevizibile. La momentul actual și în viitorul apropiat rezolvarea acestor sarcini numai cu roboți autonomi nu este posibilă.

Teleoperarea cu ajutorul informaticii permite atingerea unor performanțe spectaculare. Aici, în teleoperare, spre deosebire de alte sectoare ale automatizării bazate pe calculator, acesta (calculatorul) nu are numai rolul de a ameliora performanțele sistemului. El constituie un veritabil ajutor, un asistent pentru operator [Coiffet 86].

În viziunea autorului rolul de asistent al calculatorului, în contextul teleoperării și roboticii, se materializează prin două funcții de bază:

1. funcția de substituie a operatorului în acțiuni precise
2. funcția de informare a operatorului.

2.4.1 Relația calculator – operator în teleoperarea informatizată

Colaborarea dintre operator și calculator pentru execuția completă a unei sarcini

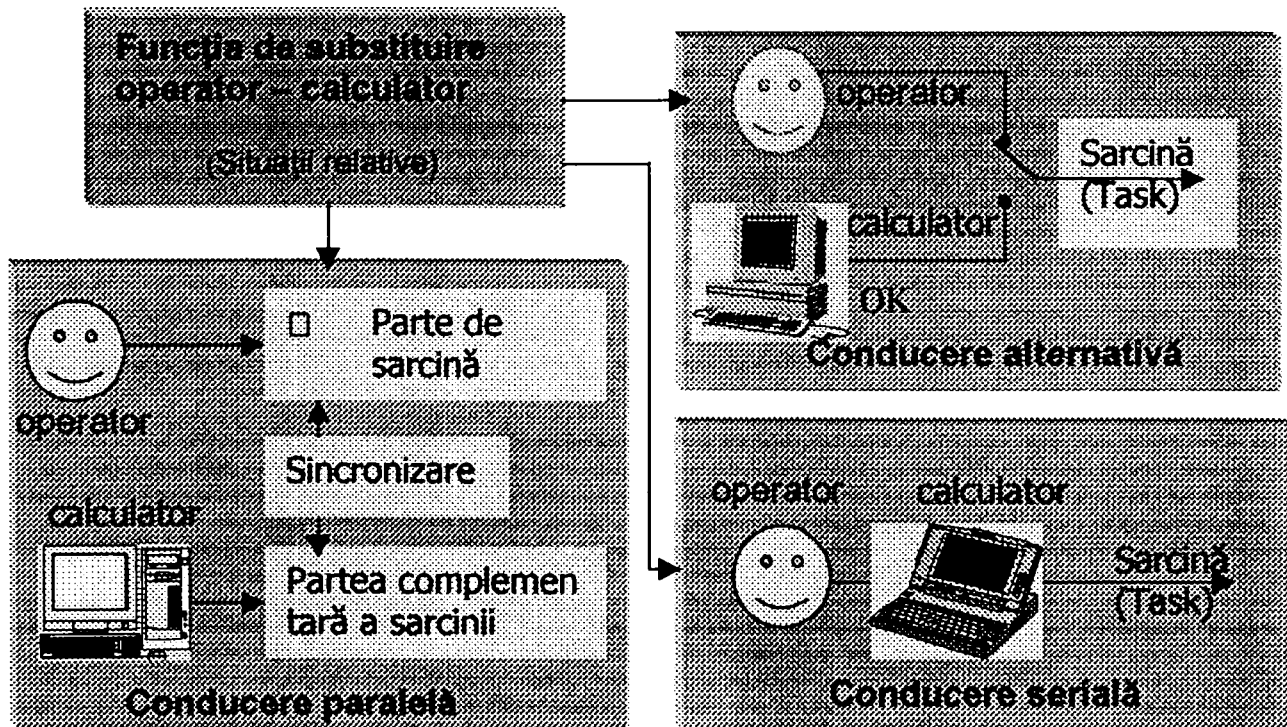


Figura 2.12

de teleoperare s-a analizat dintr-un punct de vedere dublu; al *simultaneității*

intervențiilor din fiecare parte și al *domeniului* de intervenție al fiecăreia din părți. În urma unei simplificări intenționate a modului de colaborare s-au dedus trei categorii de relații (schematizate în fig.2.12) între operator și calculator, în procesul de execuție a unei sarcini de teleoperare.

i. Conducerea alternativă

În această manieră de conducere, în una din fazele sarcinii de teleoperare operatorul asigură pilotarea sistemului, iar în altă fază calculatorul realizează singur controlul sistemului. În operațiunile de intervenție în medii necunoscute calculatorul nu poate să rezolve o sarcină de la A la Z în mod autonom. Sunt părți din sarcină (subsarcini care pot fi rezolvate automat de calculator pe baza informațiilor de la senzori. Acestea sunt denumite subsarcini de tip *reflex* sau *reactiv*. [Coiffett 89].

–Cercetările teoretice și experimentale realizate de autor au permis exprimarea unui punct de vedere propriu, privind acest mod de conducere :

- Conducerea alternativă a unui teleoperator, echivalentă cu conducerea mixtă a unui robot, reprezintă viitorul teleoperării și roboticii.

- Pentru realizarea acestei conduceri trebuie să îndeplinite mai multe cerințe, printre care se enumără:

1. Existența condițiilor inițiale de execuție automatizată a unei subsarcini, care se exprimă prin:

- Condițiile inițiale de plecare pentru subsarcină, verificabile de operator

- Ordinul de pornire a execuției, dat de operator

- Execuție adaptivă a subsarcinii făcând apel la informații permanente sau secvențiale venite de la senzori.

2. Existența unei strategii de conducere automată pentru subsarcina în cauză.

Această strategie se materializează printr-un program care conține o suită de comenzi de deplasare și de intercondiționări cu senzorii.

3. Existența unui model al mediului redus la expresia cea mai simplă și care nu conține decât mărimile măsurabile cu senzorii din dotare.

Pentru o mai bună clarificare a celor exprimate mai sus se prezintă sintetic un experiment (care este detaliat în cap.4), inspirat de cercetările lui A. K. Bejczy [Bejczy 76]. Un braț robot (PUMA 600)este dotat cu un dispozitiv de prehensiune clasic, cu două degete (fig.2.13) Pe acest dispozitiv sunt montați trei senzori : doi senzori de proximitate C1 și C2 care detectează distanța d_1 și respectiv d_2 ; un senzor de

prezență (microîntrerupător) C3 montat astfel încât să detecteze prezența obiectului între degete.

Subsarcina care se desfășoară automatizat a fost denumită pe scurt *sesizare și prindere*. Condițiile inițiale pentru declanșarea subsarcinii sunt: dispozitivul de prehensiune să fie în apropierea obiectului; acesta să fie deschis. Aducerea în

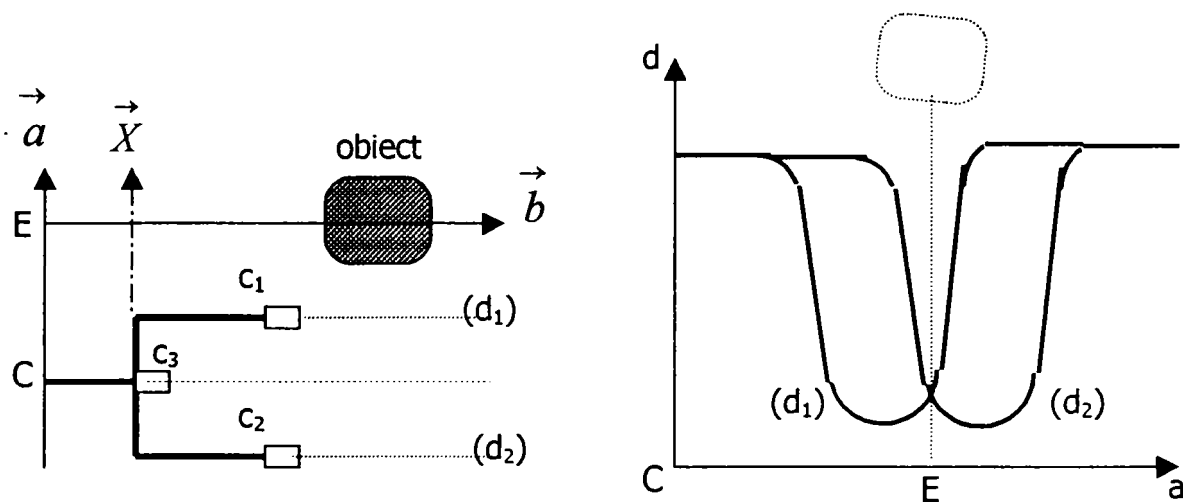


Figura 2.13

condițiile inițiale se face de către operator prin conducere manuală a brațului.

1. deplasarea punctului C pe direcția vectorului a până când : $d_1=d_2$ și $\Delta d_1/\Delta a \geq 0$ și $\Delta d_2/\Delta a < 0$ (fig. 2.13 b)
2. apoi se deplasează C (care era în E) pe direcția vectorului b până când $C_3=1$, (adică microîntrerupătorul de pe fundul dispozitivului de prehensiune este acționat de obiect),
3. apoi se închide dispozitivul,
4. Operare și preluare la mână a sistemului de operator.

ii. Conducerea paralelă. În acest mod de conducere operatorul și calculatorul operează simultan pe părți complementare dintr-o sarcină . Acțiunile celor două părți se cer a fi coordonate și bineînțeles că această conlucrare trebuie să aibă un sens. Analiza acestui mod de conducere pune în evidență nenumărate posibilități de conlucrare între operator și calculator în rezolvarea unor sarcini de teleoperare complexe .Un exemplu concludent în acest sens îl constituie sistemul de teleoperare schițat în figura 2.14. în care operatorul se ocupă cu conducerea brațului master iar calculatorul comandă orientarea (înălțarea și azimutul) și parametri (zoom, diafragmă, distanță) unei camere TV în funcție de poziția efectorului final al brațului slave. Detalii privind acest sistem se găsesc în [Coiffett 89.]

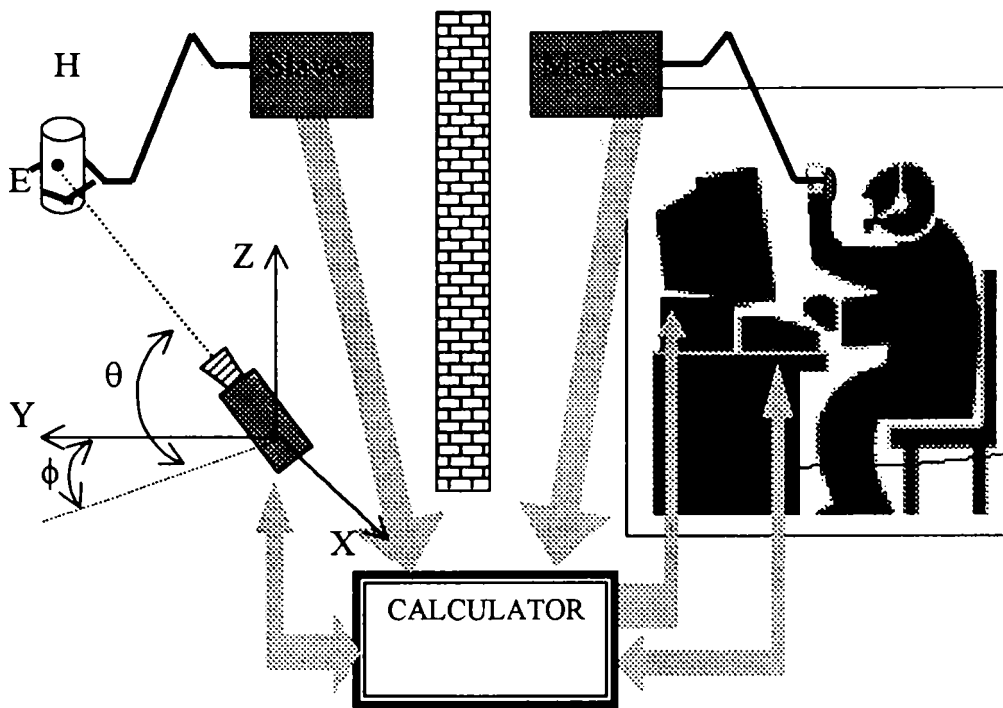


Figura 2.14

iii. Conducerea serială

Aportul calculatorului în substituirea operatorului, în cazul acestei maniere de conducere, rezidă din capacitatea acestuia de a modifica transmisia master-slave în funcție de obiectivele sarcinii sau de criterii calitative superioare ale unui obiectiv imediat, (obiective sau criterii care nu pot fi atinse de operatorul uman fără aportul calculatorului).

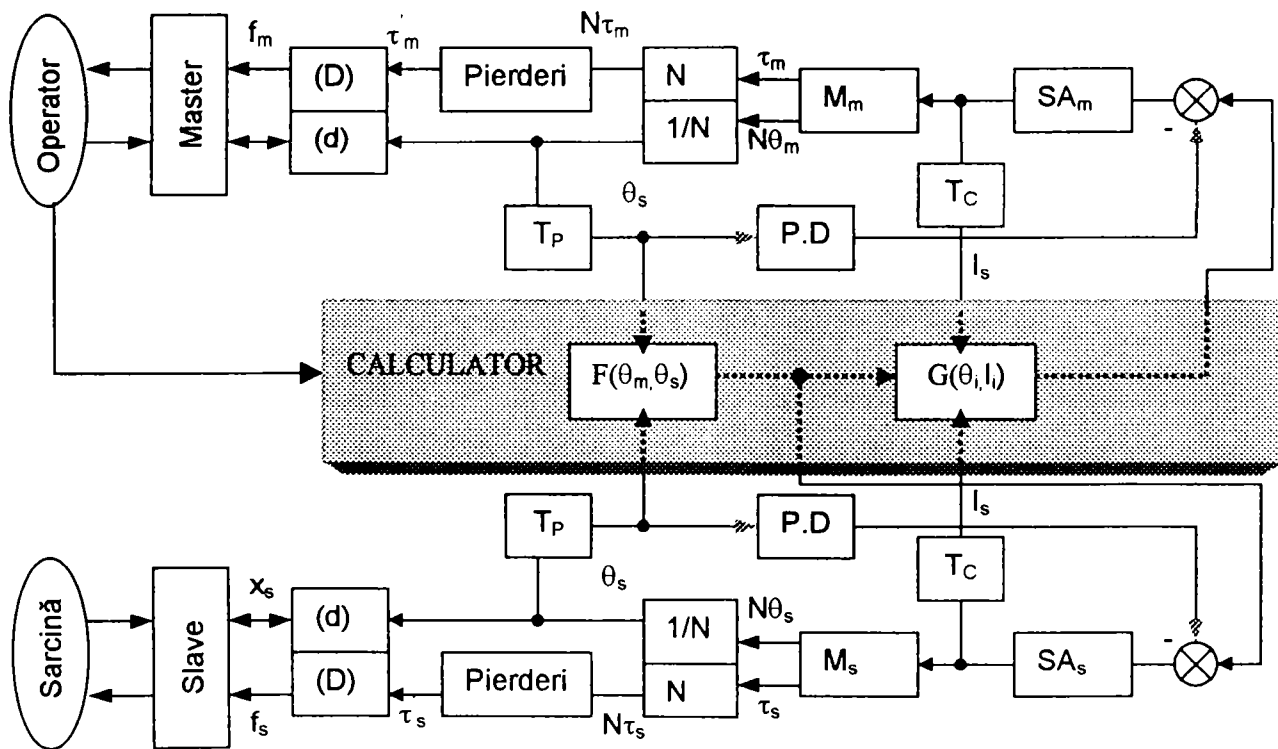


Figura 2.15

Din cercetările făcute în această direcție s-a constatat că există o paletă largă de posibilități teoretice și practice de manifestare a calculatorului într-o conducere serială. În practică cel mai mult este exploatată posibilitatea calculatorului de a modifica transmisia (de poziție și de viteză) dinspre master spre slave. Un exemplu în acest sens poate fi considerat cazul când cu un braț master cu trei grade de libertate se conduce un braț slave cu 6 grade de libertate. În privința posibilităților calculatorului asistent de a modifica transmisia inversă de la slave spre master și mai concret de a modifica reacția de forță într-un sistem de teleoperare bilateral, literatura tehnică este săracă în referințe.

Autorul propune conceptul de *reacție artificială de forță* introdusă de calculator. Această reacție se suprapune peste reacția normală (în cazul teleoperatorilor bilaterale) în două scopuri:

- a. pentru îmbunătățirea senzației operatorului,
- b. pentru atenționare operatorului la nivel de reflex.

Pentru a explica modul de atingere al primului scop se face referire la un teleoperator master-slave cu acționare electrică (cu motoare de curent continuu). În fig. 2.15 se prezintă schematizat structura acestui sistem. Structural sistemul este de tip simetric. Brațul master și brațul slave sunt acționate cu motoarele M_m și respectiv M_s . Pentru adaptarea momentelor de forță τ_s și τ_m dezvoltate de aceste motoare electrice se utilizează reductoare de turație (cu raportul de transmitere N). Momentul dezvoltat de un motor de curent continuu este proporțional cu curentul rotoric. Prin urmare pentru a determina încărcarea la nivel de articulație se folosesc în loc de traductoare de moment traductoare de curent (T_c), care nu influențează rigiditatea sistemului. Momentul dezvoltat la arborele motorului este amplificat de reductorul de turație. Pe traseul transmisiei mecanice de la arborele motor la elementul terminal al brațului master și respectiv al brațului slave apar o serie de pierderi energetice și de asemenea o serie de perturbații datorate, spre exemplu, momentelor forțelor de frecare, gravitaționale, etc. și influenței elementelor din celelalte articulații ale lanțului cinematic [Ivănescu 94]. Momentele reale transmise spre operator și spre sarcină de către brațul master și respectiv brațul slave au fost notate cu τ'_m și τ'_s . Acestea sunt transformate în forță de reacție și respectiv forță de acțiune prin transformarea (D), care de cele mai multe ori este un coeficient de multiplicare, constant, care depinde de dimensiunile elementelor cuplelor cinematice.

Transformarea (d) se referă la coordonatele de poziție, iar D la coordonatele de forță.

Canalele de reacție de poziție se pot închide în modul clasic, sau prin calculator, caz în care legea de reglare PD (proporțional-derivativ) este implementată prin algoritmi numerici [Bogdanov 89], [Dumitrache 88]. Informația de încărcare din cele două părți se prelucrează în calculator. În baza legilor de control implementate în calculator ($F(\theta_m, \theta_s)$, $G(\theta_i, l_i)$) se determină mărimile de comandă pentru servoamplificatoarele (SA_m și SA_s) din partea de master și de slave. Alegerea legii de control și a parametrilor de reglare sunt făcute de operator.

Îmbunătățirea senzației operatorului (scopul nr.1) asupra încărcării poate fi realizată prin alegerea legii de control adecvate, și adaptarea continuă a parametrilor de reglare în vederea atingerii performanțelor impuse. Rolul calculatorului în acest control adaptiv este de a estima momentele de încărcare externă ale brațului slave și genera semnalul de încărcare, adică semnalul care comandă curentul prin motorul master.

Scopul al doilea, de a atenționa operatorul la nivel de reflex, se poate atinge dacă calculatorul asistent suprapune (adaugă sau scade) peste semnalul (normal) care comandă curentul prin motorul din partea master un semnal suplimentar, creat pe baza unor informații și conform unei strategii. Pentru a explicita mai bine se menționează că *atenționarea la nivel de reflex* se referă, aici, la o atenționare venită la nivelul brațului uman, care conduce manipulatorul master, deci la calea cea mai scurtă de reacție a controlerului uman. Informația folosită de calculatorul asistent pentru generarea semnalului de încărcare artificială poate fi *apriorică*, calculatorul cunoscând, spre exemplu, poziția unui obstacol și în momentul în care brațul slave este în apropierea acestuia se crește momentul de încărcare la mâna operatorului. Aceeași informație poate veni în timp real de la anumiți senzori. Strategia amintită mai înainte este stabilită aprioric și decide asupra modului de intervenție a calculatorului. Spre exemplu, pentru cazul apropierii de un obstacol, calculatorul mai poate interveni în modificarea traiectoriei de deplasare impusă de operator brațului slave, în sensul devierii acestei traiectorii în afara spațiului de pericol de coliziune cu obstacolul în cauză.

2.4.2 Monitorizarea forței de reacție

Conceptul de monitorizare a reacției de forță introdus în titlul acestui paragraf trebuie privit în contextul funcției de informare a operatorului de către calculatorul asistent. **Ideea monitorizării forței de interacțiune dintre manipulatorul slave și**

mediu îndepărtat este originală. Două motive au stat la baza generării acestei idei: primul motiv este legat de viziunea autorului privind măsurarea pe cale indirectă a momentelor de încărcare la nivel de articulație și la nivel de efector final, iar al doilea motiv (conjunctural) este legat de imposibilitatea de a procura și utiliza un senzor de forță / moment performant .

Pentru că în literatura de specialitate mai apare termenul de *forță telemonitorizată* [Lee 93] care are , în contextul referinței precizate, un alt înțeles decât cel pe care autorul a vrut să-l sugereze prin termenul de *monitorizarea forței*, se introduce următoarea precizare: aici monitorizarea forței înseamnă măsurare (directă sau indirectă) a forței și prezentarea ei pe un dispozitiv de vizualizare (monitor).

Prin precizarea făcută mai sus s-au sugerat deja cele două aspecte principale legate de monitorizarea forței și anume: *determinarea forței și prezentarea ei*. În legătură cu primul aspect (determinare sau măsurare) se mai precizează că cercetările teoretice și experimentale întreprinse de autor au vizat metodele de estimare a forțelor (momentelor) pe cale indirectă. Metodologia utilizată și rezultatele obținute în această direcție sunt prezentate mai pe larg în cap.5 și mai detaliat în următoarele referințe bibliografice: [Diaconu 96, 97, 98a, 99] .

În privința prezentării s-a constatat că o grafică adecvată poate crea operatorului o senzație (asupra forțelor de încărcare) apropiată de cea oferită la mână de un dispozitiv de prescriere (master) cu reflectare activă a încărcării. Aici se impun câteva remarci proprii:

- prezentarea prin caractere alfanumerice, sau mai direct spus, prin cifre care se succed în funcție de modificarea forței monitorizate nu creează senzație de încărcare ci dimpotrivă, senzație de oboseală.
- În prezentare grafică alegerea culorilor este importantă. S-a constatat, spre exemplu, că prezentarea vectorului de forță cu o culoare deschisă pe un fundal de culoare închisă creează o senzație mai bună.
- În cazul controlului în forță (cu monitorizarea reacției de forță) marcarea clară (pe ecran) a limitelor maxime și minime în care poate varia forța comandată are un efect foarte bun asupra senzației operatorului.

Cele prezentate mai sus sunt constatări rezultate în urma unor experimente privind estimarea momentelor de încărcare și monitorizarea forței la nivel de efector final, realizate cu brațul robot PUMA 600 și prezentate în experimentul din cap.4. S-a ales acest braț robot pentru că este cel mai *popular* (în sensul că este cel mai des

citat în referințele bibliografice) . Această alegere a făcut posibilă corelarea rezultatelor obținute de autor prin estimarea forțelor (momentelor) de încărcare cu rezultatele altora care au utilizat același braț robot dar au folosit senzori adevărați pentru măsurarea forței.

Contribuții personale

Pe parcursul acestui capitol autorul aduce o serie de contribuții originale din care se prezintă în rezumat următoarele:

- S-a prezentat într-o viziune proprie un *model descriptiv* al comportamentului uman în cadrul unui sistem interactiv om-mașină general. Cu acest model original autorul evidențiază mai clar căile de formare a comenzi de conducere a unui sistem de teleoperare, în care operatorul este parte integrantă. Prin această evidențiere se explică de ce interfața om-mașină este foarte importantă în cadrul unui sistem de teleoperare. Se evidențiază de asemenea de ce reacția vizuală, reacția de contact și antrenamentul operatorului determină în mod esențial calitatea comenzilor de conducere și în final performanțele sistemului de teleoperare.
- Se prezintă un punct de vedere propriu privind corelația dintre conceptele de reacție kinesthetică, teleprezență și telexistență, întâlnite în literatura de specialitate.
- În baza cercetărilor proprii autorul sintetizează întreaga filozofie a controlului bilateral, în teleoperarea clasică, într-o singură frază (paragraful 2.2).
- Se prezintă un criteriu propriu de sistematizare în clasa sistemelor de teleoperare controlate bilateral. Conform acestuia autorul evidențiază trei categorii de sisteme de teleoperare: 1. teleoperatoare simetrice (fără senzori de forță); 2. teleoperatoare cu senzori de forță la nivelul articulațiilor; 3. teleoperatoare cu senzori de forță la nivelul efectorului final. Autorul insistă asupra primei categorii deoarece aceasta este foarte puțin tratată în literatura de specialitate. În acest context sunt prezentate și realizările practice ale autorului în domeniul teleoperării.
- Se exprimă un punct de vedere propriu asupra rolului calculatorului în cadrul interfeței operator-sistem de teleoperare. Se introduc cu această ocazie mai multe concepte originale legate de relația operator-calculator în teleoperarea informatizată. Este vorba de: conducerea alternativă, conducerea paralelă și conducerea serială. Se introduce de asemenea într-o viziune proprie conceptul de monitorizare a reacției de forță, concept care va fi dezvoltat mai pe larg în capitolul 4.

Capitolul 3

Contribuții la modelarea analitică a sistemelor master-slave bilaterale

Sistemele de teleoperare controlate bilateral fac parte din categoria sistemelor cu dinamică complexă pentru că în cadrul lor interacționează elemente de natură mecanică, electrică și fiziologică. Datorită acestei complexități nu există o metodologie clară sau tehnici de analiză puse la punct cum sunt, spre exemplu, în cazul sistemelor electrice sau mecanice.

Încă de la începutul capitolului se încearcă să se stabilească legătura dintre modelul dinamic al unui teleoperator bilateral și legea de control care poate conduce sistemul spre atingerea unor performanțe optime. Se semnalează cu această ocazie că nu toate legile de control, care demonstrează atingerea acestor performanțe, au un suport realist, unele fiind pur teoretice.

La alegerea (sinteza) unei legi de control pentru teleoperatoarele bilaterale trebuie îndeplinite simultan două obiective: primul se referă la obținerea unor performanțe dinamice (și statice) de mișcare superioare pentru manipulatorul condus, iar al doilea se referă la asigurarea unei reacții cât mai naturale la mâna operatorului. Întrucât primul obiectiv al legii de control este comun și altor instalații, cum ar fi spre exemplu roboții, pe parcursul acestui capitol analiza este focalizată mai mult spre al doilea scop, specific teleoperatoarelor bilaterale.

Pornind de la un model (analitic) mecanic aparent simplist (modelul transmisie mecanice cu două mase inerțiale) și folosind tehnici de analiză și sinteză din teoria sistemelor automate sunt puse în evidență principii de bază ale controlului bilateral care sunt reliefate mai puțin, sau chiar deloc, în literatura de specialitate. În baza acestor principii sunt prezentate câteva soluții originale de îmbunătățire a performanțelor teleoperatoarelor bilaterale.

Analiza bazată pe echivalența electro-mecanică, din a doua parte a capitolului se înscrie într-o tendință mai recentă care se manifestă în cercetarea acestui domeniu. Folosirea rețelelor de circuite electrice pasive pentru modelarea unui

sistem de teleoperare de tip master-slave controlat bilateral în viteză și forță nu mai este o noutate, ba mai mult, se impune ca tehnică atunci când este vorba de analiza stabilității unui astfel de sistem. Tot pe baza echivalenței electro-mecanice s-au lansat în ultimul timp tehnici și metode de analiză și sinteză a teleoperatorilor bilaterale, bazate pe teoria cuadripolilor. Pe parcursul acestui capitol sunt prezentate mai în detaliu principalele tendințe în cercetarea teoretică și experimentală bazată pe echivalența amintită, precum și o parte din contribuțiile autorului care se înscriu pe direcția acestor tendințe.

3.1 Considerații preliminare privind dinamica și controlul teleoperatorilor bilaterale

Modelul dinamic al unei structuri mecanice este o reprezentat analitic printr-un sistem de ecuații diferențiale ce definesc legăturile ce apar între: coordonatele de poziție, derivatele lor și forțele, atât disipative, cât și nedisipative, ce acționează asupra fiecărui element al configurației mecanice. Metodele și procedurile pentru determinarea ecuațiilor diferențiale asociate dinamicii unui braț mecanic sunt numeroase. Metodele Lagrange-Euler, Newton-Euler, principiul generalizat al lui d'Alambert sunt câteva din procedurile clasice de calcul ale modelului dinamic, la care se adaugă tehnici moderne, mai rapide obținute în ultima vreme de diverși autori [Vucobratovici 89]. Indiferent de modul de tratare se poate stabili un model matematic general ce caracterizează dinamica unui braț mecanic [Ivănescu 94]. Acest model matematic poate fi extins și pentru caracterizarea dinamicii unui sistem de teleoperare de tip master-slave controlat bilateral. Trebuie specificat, în prealabil, că în acest caz este vorba de două brațe mecanice, un braț slave care interacționează cu mediul îndepărtat și un braț master care interacționează cu operatorul uman. Ecuațiile care descriu dinamica unui manipulator master-slave sunt [Salcudean 94], [Kosuge 94] [Lee 93]:

$$\text{Master: } M_m \ddot{x}_m + G_m(x_m, \dot{x}_m) = u_m + f_h \quad (3.1)$$

$$\text{Slave: } M_s \ddot{x}_s + G_s(x_s, \dot{x}_s) = u_s - f_w \quad (3.2)$$

unde: x_m și x_s sunt vectori ($n \times 1$) reprezentând poziția și orientarea efectorului final al brațului master și respectiv al brațului slave într-un sistem de coordonate de lucru, așa cum este prezentat în fig.3.1. M_m și M_s sunt matricile de inerție ($n \times n$), G_m și G_s sunt vectori ($n \times 1$) ai forțelor neliniare care includ forțele de frecare vâscoasă, forțele Coriolis, forțele centrifugale, etc. u_m și u_s sunt vectori ($n \times 1$), de comandă (intrare), iar

f_h și f_w sunt vectori ($n \times 1$) care reprezintă forța operațională aplicată de operator și respectiv forța de interacțiune a brațului slave cu mediul îndepărtat.

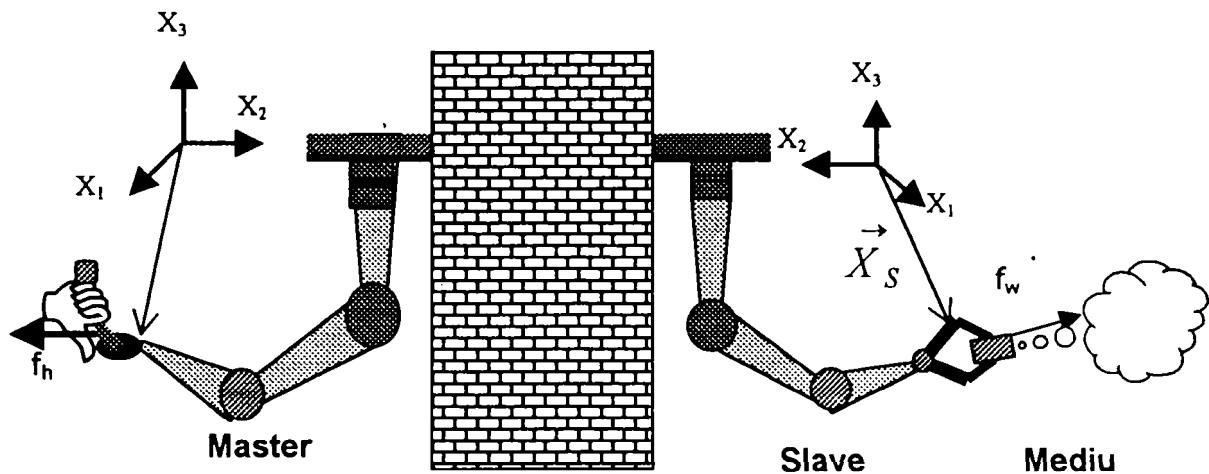


Figura 3.1

Manipulatorul master și manipulatorul slave au, în general, aceeași structură cinematică dar pot fi diferite ca dimensiune, păstrând totuși un raport de asemănare denumit *factor de scală*. Factorul de scală este reprezentat prin două constante pozitive s_m și s_f reprezentând *scala de mișcare* (viteză) și respectiv *scala de forță*. În aceste condiții se poate scrie:

$$\dot{x}_m = s_m \dot{x}_s; \quad f_h = s_f \cdot f_s \quad (3.3)$$

Scala de putere s_p se obține prin produsul dintre scala de viteză și scala de forță

$$s_p = s_m s_f \quad (3.4)$$

Dacă factorul de scalare a puterii este subunitar teleoperatorul este considerat *manipulator amplificator de putere*, iar dacă valoarea acestuia este supraunitară teleoperatorul intră în categoria denumită generic *Macro-micro manipuloare* sau *manipuloare scalate* [Kosuge 96].

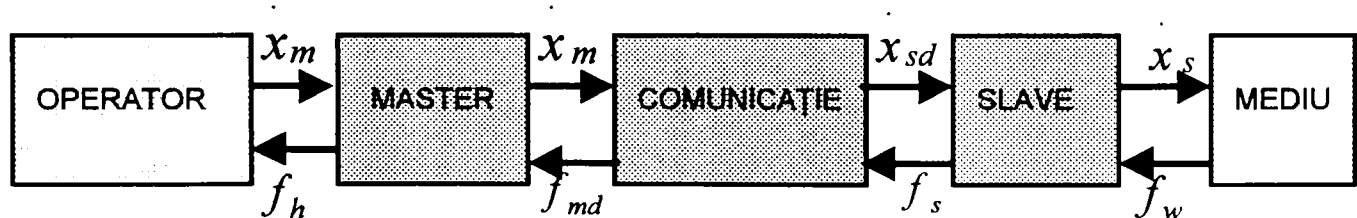


Figura 3.2

În fig.3.2 se prezintă o schemă bloc a unui sistem de teleoperare de tip master-slave comandat în viteză (cu reacție de forță) care evidențiază traseul comenzii între

operator și mediu și traseul reacției de forță de la mediu la operator. În figură cu \dot{x}_m s-a notat vectorul de viteză a masterului. Viteza masterului este transmisă prin canalul de comunicație și este recepționată de slave ca vector \dot{x}_{sd} . Vectorul de forță generalizată al brațului slave f_s se transmite ca informație inversă prin canalul de comunicație și este recepționat de master ca vector f_{md} . În cazul în care pe canalul de comunicație nu au loc întârzieri în transmiterea informațiilor se poate scrie:

$$\dot{x}_{sd}(t) = \dot{x}_m(t), \quad f_{md}(t) = f_s(t) \quad (3.5)$$

Dacă pe canalul de comunicație apare o întârziere T , atunci;

$$\dot{x}_{sd}(t) = \dot{x}_m(t-T), \quad f_{md}(t) = f_s(t-T) \quad (3.6)$$

Controlul manipulatorului master-slave descris prin ecuațiile (3.1) și (3.2) se realizează prin intrările vectoriale de comandă u_m și u_s . De modul cum sunt prestabilite aceste intrări depind performanțele sistemului de controlat. Teoretic acești vectori pot fi aleși fără restricții (fiind mărimi de intrare în sistem, deci independente). Practic, așa cum se va demonstra pe parcursul tezei există o serie de probleme la stabilirea celei mai bune legi de control, din cauza variației greu de anticipat a parametrilor care determină comportamentul dinamic al structurii mecanice comandate. În multe referințe bibliografice se propun soluții de control care conduc spre performanțe excelente, dar numai teoretic. În acest context s-a reținut legea de control propusă de K. Kosuge și alții, care va fi prezentată în continuare [Raju 89], [Hanaford 89], [Kosuge 96]. Pentru cazul în care nu există întârziere pe canalul de comunicație ei propun următoarele expresii pentru intrările vectoriale de comandă :

$$u_m = M_m M^{-1} (-B \dot{x}_m + f_h - f_{md}) + G_m(x_m, \dot{x}_m) - f_h \quad (3.7)$$

$$u_s = M_s M^{-1} \left(-B \dot{x}_s + \frac{f_s - s_f f_e}{s_m} \right) + G_s(x_s, \dot{x}_s) + f_e \quad (3.8)$$

$$f_s = K_s \int_0^t (\dot{x}_{sd} - s_m \dot{x}_s) dt + B_s (\dot{x}_{sd} - s_m \dot{x}_s) \quad (3.9)$$

unde: M și B sunt matrici ($n \times n$), pozitiv definite, corespunzând inerției aparente și respectiv amortizării aparente, K_s și B_s sunt matrici cu aceeași dimensiune ($n \times n$),

pozitiv definite și reprezintă amplificările pe calea de reacție inversă (de forță și de viteză).

Introducând relațiile (3.7) și (3.8) în (3.1) și respectiv în (3.2) se obțin următoarele ecuații ale dinamicii sistemului:

$$\text{Master: } M\ddot{x}_m + B\dot{x}_m = f_h - f_{md} \quad (3.10)$$

$$\text{Slave: } s_m M\ddot{x}_s + s_m B\dot{x}_s = f_s - s_f f_e \quad (3.11)$$

Adunând (3.10) cu (3.11) și utilizând relația (3.3) se obține:

$$M(\ddot{x}_m + s_m \ddot{x}_s) + B(\dot{x}_m + s_m \dot{x}_s) = f_h - s_f f_e \quad (3.12)$$

Scăzând (3.10) din (3.11) și utilizând relația (3.3) se obține:

$$M\Delta\ddot{x} + B\Delta\dot{x} = f_h + s_f f_e - 2f_s \quad (3.13)$$

unde: Δx reprezintă abaterea dintre poziția brațului master și poziția scalată a brațului slave;

$$\Delta x = x_m - s_m x_s \quad (3.14)$$

Substituind relația (3.9) în ecuația (3.13) se va obține:

$$M\Delta\ddot{x} + (B + 2B_s)\Delta\dot{x} + 2K_s\Delta x = f_h + s_f f_e \quad (3.15)$$

Prin selectarea corespunzătoare a parametrilor (factorilor de amplificare) B_s și K_s sistemul descris de ecuația (3.15) devine stabil (asimptotic), iar dacă valorile acestor parametri sunt mult mai mari în comparație cu valorile date de expresia $f_h + s_f f_e$ abaterea pozițională devine foarte mică și se poate afirma că:

$$\Delta x = x_m - s_m x_s \cong 0 \quad \text{sau} \quad x_m \cong s_m x_s \quad (3.16)$$

Relația (3.16) demonstrează că legea de control propusă conduce la realizarea mișcării scalate date de relația (3.3), sau cu alte cuvinte la urmărirea precisă a poziției brațului master de către brațul slave.

Substituind relația (3.16) în ecuația (3.12) se obține:

$$2(M\ddot{x} + B\dot{x}) = f_h - s_f f_e \quad (3.17)$$

Dacă manipulatorul slave este în contact cu un mediu de rigiditate infinită, deci deplasarea sa nu mai este posibilă ($\Delta x=0$), atunci avem:

$$f_h - s_f f_e \cong 0; \quad \text{deci} \quad f_h \cong s_f f_e \quad (3.18)$$

Relația (3.18) demonstrează că legea de control propusă asigură și scalarea forței dată de relația (3.5), cu alte cuvinte forța scalată a brațului slave se transmite complet spre brațul master.

Relațiile (3.16) și (3.18) arată că legea de control aleasă conduce spre cazul ideal în care poziția scalată a brațului slave este identică cu a brațului master și forța reflectată spre operator este egală cu forța scalată exercitată de mediu asupra brațului slave.

– **Contribuție personală**

Prin prezentarea preliminară de mai înainte autorul pune în evidență, într-o viziune proprie, legătura dintre parametrii modelului dinamic și legea de control pentru un sistem master-slave. Pentru acesta s-a ales (nu în mod întâmplător) o lege de control cunoscută în literatură și anume cea propusă de K. Kosuge și T. Fukuda. Această lege demonstrează că, teoretic, este posibil să se conducă un sistem master-slave astfel încât să se obțină un răspuns ideal, realizat aici prin coincidența de poziție și coincidența de forță între master și slave. Practic o astfel de lege de control nu poate fi realizată deoarece aceasta presupune anticiparea variației unor parametrii, ceea ce este echivalent cu punerea efectului înaintea cauzei. Această idee va fi dezvoltată mai pe larg pe parcursul acestui capitol.

3.2 Modele analitice pentru teleoperatoarele bilaterale

Sistemele de teleoperare fac parte din categoria sistemelor cu dinamica complexă. Deoarece operatorul uman este parte integrantă într-un astfel de sistem, la analiza acestuia trebuie luate în considerare interacțiunile complexe care se stabilesc între trelemente de natură mecanică, electrică și fiziologică. Pentru aceasta este nevoie de o colaborare strânsă între specialiștii din domeniul mecanicii, electronicii, automaticii etc. Complexitatea amintită precum și diversitatea sistemelor de teleoperare a făcut ca până la ora actuală să nu existe o teorie sau o metodologie clară privind analiza unor astfel de sisteme.

Pentru descrierea și analiza performanțelor unui sistem de teleoperare s-a mers în general pe ideea experimentului sau pe cea a modelării, adică pe o reprezentare abstractă folosind relațiile matematice care guvernează fenomenele fizice implicate în procesul studiat. Se realizează cu această ocazie un compromis între dorința de reprezentare cât mai fidelă și necesitatea de a păstra o complexitate rezonabilă a modelului. Procesul de modelare presupune pe parcursul său o suită de neglijări și aproximări care conduc în final la un anumit *grad de incertitudine* a

rezultatului obținut. În ciuda acestui fapt, modelarea rămâne o operație necesară, ea permițând cunoașterea legităților care determină comportarea sistemului, precum și influența parametrilor acestuia asupra performanțelor sale.

Modelul reprezintă un mod folositor și compact de a sintetiza cunoaștințe despre sistem. Forma modelului depinde de proprietățile luate în considerare, de judecata și experiența proiectantului, de caracteristicile sistemului studiat. Modelul poate fi descriptiv sau ilustrativ, dar mai presus de toate trebuie să fie util [Winstanley 91].

3.2.1 Modelul mecanic și principiile de bază ale controlului bilateral

Descrierea unui sistem de teleoperare bilateral clasic pe baza analogie cu un sistem mecanic, cu toate că este în aparență simplistă, pune în evidență principiile de bază privind funcționarea sistemelor reversibile cu acțiune bilaterală. Această evidențiere reprezintă etapa cea mai importantă în procesul de identificare a soluțiilor privind îmbunătățirea performanțelor sistemelor analizate. Descrierea în cauză face apel la tehnici din teoria sistemelor automate legate de sistemele de urmărire sau de reglare a poziției, tehnici deja puse la punct de mai mult timp. [Călin 72], [Egorov 80], [Ionescu 86].

Față de o altă descriere analitică, bazată pe analogia cu sistemele (rețelele de circuite) electrice, descrierea în cauză pune în evidență mai bine principiile reacției inverse de forță fără senzori specializați, precum și principiile celorlalte variante de control bilateral în care manipulatorul slave este condus în poziție. Aceasta se întâmplă pentru că în descrierea bazată pe modelul mecanic sunt utilizate coordonatele generalizate de poziție și de forță, iar în modelele electrice sunt utilizate coordonatele generalizate de viteză și forță. Cu alte cuvinte cele două modalități de descriere (prin model mecanic și prin model electric) nu se exclud, ba dimpotrivă pot fi complementare.

Cel mai simplu sistem reversibil cu acțiune bilaterală este reprezentat de o pereche de selsine (emițător- receptor) care funcționează în *regimul indicator* [Aronov 69]. Acest sistem (fig.3.3a), datorită legăturilor electrice interne, are proprietatea de a fi reversibil în transmiterea poziției și forței și prin urmare poate fi considerat un sistem de urmărire în poziție și forță. Sistemele în discuție, deși foarte simple, nu s-au răspândit pe scară largă în teleoperare datorită unor inconveniente de ordin tehnic asupra cărora nu se insistă.

Principiul de funcționare și dinamica sistemului format din cele două selsine este foarte asemănător cu cel al unei sistem mecanic reprezentat de o transmisie mecanică elastică cu două mase inerțiale (fig.3.3b). Această transmisie mecanică reprezintă modelul fizic (mecanic) al celui mai simplu sistem reversibil cu acțiune bilaterală [Egorov 80]. Se consideră că arborele din stânga al transmisiei este acționat de operator și-l denumim arbore master. Sarcina (încărcarea) este cuplată pe arborele din dreapta, care va fi denumit slave. Dinamica mișcării celor doi arbori este determinată de:

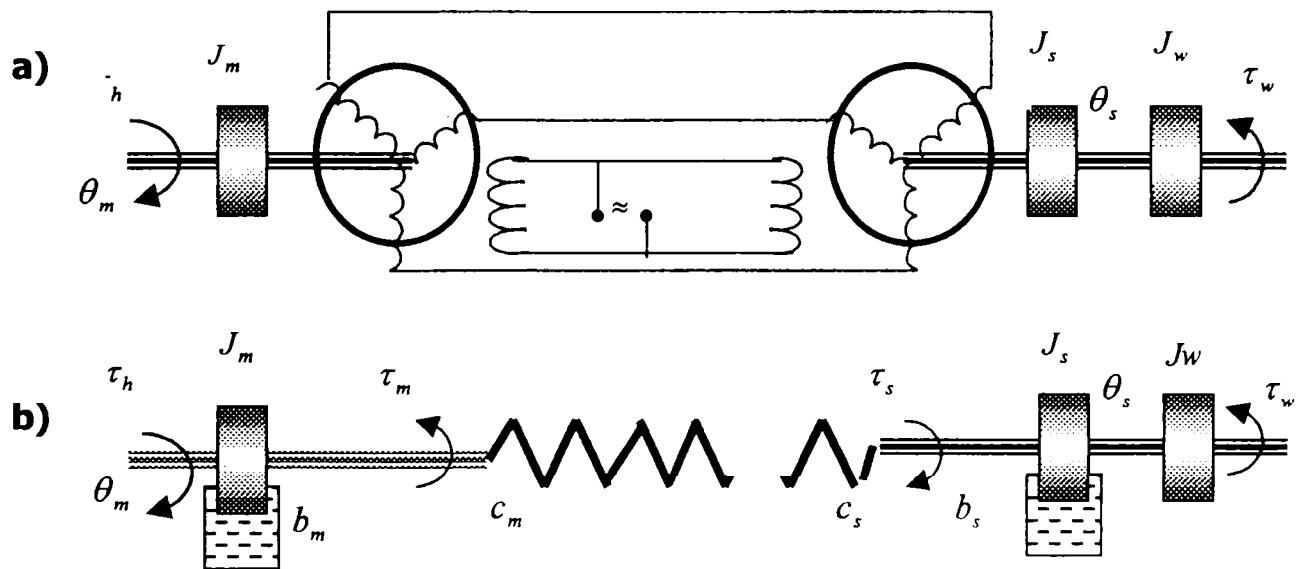


Figura 3.3

- Momentele externe din partea operatorului τ_h și din partea încărcării (sarcinii) τ_w
- Momentele dezvoltate de transmisia elastică în partea operatorului τ_m și în partea încărcării τ_s ,
- Momentele de inerție J_m , J_s și J_w datorate maselor de rotație din partea operatorului, din partea încărcării și din partea sarcinii.
- Momentele datorate frecărilor vâscoase cu coeficienții b_m și b_s .
- Momentele datorate frecărilor uscate, gravitației etc. care pentru simplificarea descrierii au fost neglijate.

Dependența dintre coordonatele de poziție unghiulară θ_m și θ_s și momentele de forță prezentate mai sus este descrisă de ecuațiile modelului dinamic al transmisiei mecanice discutate [Vertut 78], [Vibet 87], [Bejczy 81]:

$$\begin{cases} J_m p^2 \theta_m(t) + b_m p \theta_m(t) = \tau_h(t) - \tau_m(t) \\ (J_s + J_w) p^2 \theta_s(t) + b_s p \theta_s(t) = \tau_s(t) - \tau_w(t) \\ \tau_m = c_m (\theta_s - \theta_m) \\ \tau_s = c_s (\theta_m - \theta_s) \end{cases} \quad (3.19)$$

unde: c_m și c_s reprezintă coeficienții de rigiditate ai transmisiei elastice dinspre operator spre încărcare și viceversa (rigiditatea este inversul elasticității).

Sistemul de ecuații liniare (3.19) operează cu patru variabile principale; două coordonate de poziție θ_m și θ_s și respectiv două coordonate de moment τ_h și τ_w . Două din cele patru sunt considerate coordonate de intrare (independente), iar celelalte două variabile de ieșire (dependente). Din cele șase combinații posibile autorul consideră că patru reprezintă regimuri de funcționare întâlnite în practica teleoperării. Aceste combinații sunt [**Diaconu 88b**], [**Diaconu 92**]:

A. $\theta_m(t); \theta_s(t) = f[\tau_h(t); \tau_w(t)]$, sau *mișcarea arborelui master și a arborelui slave sub influența momentelor externe.*

Momentul dezvoltat de operator (τ_h) este mărime de comandă iar cel datorat încărcării (τ_w) este considerat perturbație în sistem.

B. $\theta_s(t); \tau_h(t) = f[\theta_m(t); \tau_w(t)]$ sau *impunerea unei legi de mișcare pentru partea master.* Poziția impusă de operator este mărime de comandă, iar momentul datorat încărcării mărime perturbatoare $\theta_s(t); \tau_h(t) = f[\tau_w(t)]$. Două cazuri particulare sunt interesante pentru această combinație și anume; pentru $\theta_m(t) = \text{const.}$ adică mișcarea părții slave când brațul master este fixat și $\theta_s(t); \tau_h(t) = f[\theta_m(t)]$ pentru $\tau_w(t) = 0$ adică mișcarea în gol (fără sarcină) a brațului slave.

C. $\theta_m(t); \tau_w(t) = f[\theta_s(t); \tau_h(t)]$ adică *mișcarea după traiectorie impusă a brațului slave.* Un caz particular interesant este $\theta_m(t); \tau_w(t) = f[\tau_h(t)]$ cu $\theta_s(t) = \text{const.}$, deci mișcarea brațului master pentru a menține brațul slave fix.

D. $\tau_h(t); \tau_w(t) = f[\theta_m(t); \theta_s(t)]$ adică *impunerea unei legi de mișcare atât pentru brațul slave cât și pentru master.* Acest regim caracterizează sistemele cu acțiune bilaterală în care se urmărește poziția și se reflectă activ încărcarea.

Cele patru regimuri s-au introdus pentru a evidenția câteva principii de bază ale controlului bilateral, principii care nu sunt suficient de bine relevate în literatura de specialitate.

Se aplică transformata Laplace în condiții inițiale nule ecuațiilor diferențiale din sistemul (3.19). Se va obține sistemul de ecuații care caracterizează combinația **A**.

$$\begin{cases} \tau_h(s) = (J_m \cdot s^2 + b_m \cdot s + c_m) \cdot \theta_m(s) + c_m \cdot \theta_s(s) \\ \tau_w(s) = c_s \cdot \theta_m(s) - [(J_s + J_w) \cdot s^2 + b_s \cdot s + c_s] \theta_s(s) \end{cases} \quad (3.20)$$

Schema structurală obținută pe baza sistemului de mai sus este prezentată în fig. 3.4. [Călin 72], [Diaconu 88a].

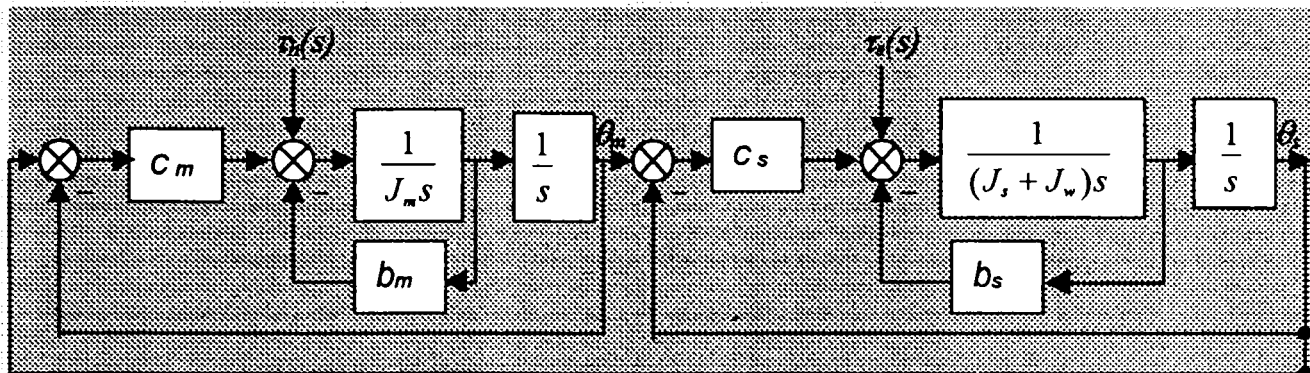


Figura 3.4

Din același sistem se deduc următoarele două relații:

$$\theta_m(s) = H_{0m}(s) \left[\theta_s(s) + \frac{\tau_h(s)}{c_m} \right] \quad (3.21)$$

$$\theta_s(s) = H_{0s}(s) \left[\theta_m(s) - \frac{\tau_w(s)}{c_s} \right] \quad (3.22)$$

unde:

$$H_{0m}(s) = \frac{c_m}{J_m \cdot s^2 + b_m \cdot s + c_m}; \quad H_{0s}(s) = \frac{c_s}{(J_s + J_w) \cdot s^2 + b_s \cdot s + c_s} \quad (3.23)$$

sunt funcțiile de transfer ale sistemelor închise de urmărire a poziției din partea de master și din partea de slave.

realizată în baza acestor funcții de transfer, este prezentată în fig.3.5. Cu această schemă se demonstrează un principiu fundamental pentru sistemele master-slave controlate bila-teral în poziție și forță .

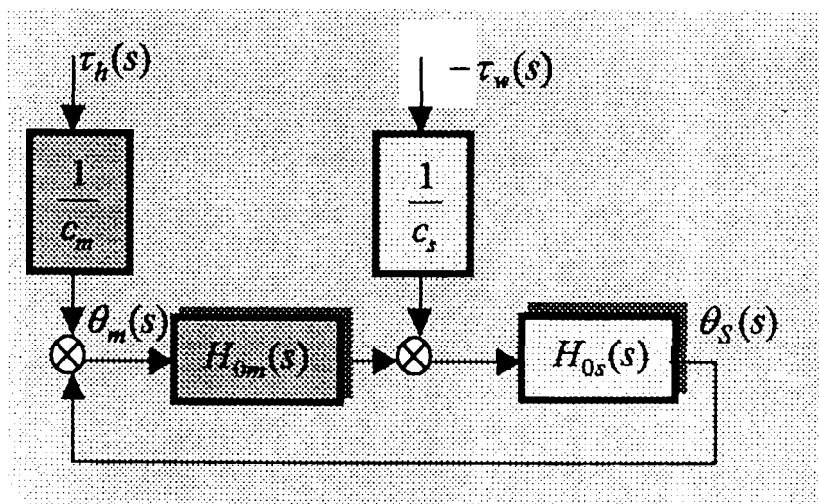


Figura 3.5

Acest principiu original este sintetizat în următoarea propoziție:

Propoziție: Un sistem reversibil cu acțiune bilaterală poate fi reprezentat prin înlănțuirea, în buclă închisă, a două sisteme de urmărire a poziției cu funcțiile de transfer $H_{0m}(s)$ și respectiv $H_{0s}(s)$.

Datorită cuplării celor două circuite (bucle) de urmărire a poziției, în sensul că ieșirea primeia reprezintă intrare pentru a doua, iar ieșirea celei de-a doua reprezintă intrare pentru prima, sistemul pe ansamblu transmite poziția și forța între cele două unități **fără a utiliza senzori de forță / moment specializați.**

Din sistemul de ecuații (3.20) sau din schema structurală (fig.3.5) se poate deduce combinația B, adică $\theta_s(s); \tau_h(s) = f[\theta_m(s); \tau_w(s)]$. În această combinație dacă se consideră cazul particular $\tau_w = 0$ se pune în evidență funcția de transfer în poziție dinspre master spre slave;

$$H_{0s}(s) = \frac{\theta_s(s)}{\theta_m(s)} = \frac{c_s}{(J_s + J_w) \cdot s^2 + b_s \cdot s + c_s} \quad (3.24)$$

Dacă $\theta_m(s) = \text{const.}$ se obține:

$$\begin{cases} \theta_s(s) = \theta_m - \frac{\tau_w(s)}{c_m H_{0s}(s)} \\ \frac{\tau_h(s)}{\tau_w(s)} = \frac{c_m}{c_s} H_{0s}(s) \end{cases} \quad (3.25)$$

Dacă $\theta_m(s) = \text{const.}$ și $\tau_w = \text{const.}$, iar sistemul nu se mișcă (este în echilibru) atunci sistemul de ecuații (3.25) devine:

$$\begin{cases} \theta_s - \theta_m = \frac{\tau_w}{c_w} = \varepsilon_p \\ \tau_h = \frac{c_m}{c_w} \tau_w = n \tau_w \end{cases} \quad (3.26)$$

unde ε_p reprezintă abaterea de poziție dintre master și slave în regim de repaus, iar $n = c_w / c_m$ este *coeficientul de scalare a forței*. El dă proporția dintre momentul datorat sarcinii și cel care trebuie să fie dezvoltat de operator pentru a menține sistemul în echilibru.

Din combinația C. se deduce funcția de transfer a poziție dinspre slave spre master când $\tau_h = 0$ (brațul master este liber);

$$H_{0m}(s) = \frac{\theta_m(s)}{\theta_s(s)} = \frac{c_m}{J_m \cdot s^2 + b_m \cdot s + c_m}; \quad (3.27)$$

Dacă poziția brațului slave este fixă ($\theta_s(s) = \text{const.}$) se obține:

$$\begin{cases} \theta_m(s) = \theta_s - \frac{\tau_w(s)}{c_m H_{0m}(s)} \\ \frac{\tau_{wm}(s)}{\tau_w(s)} = \frac{c_s}{c_m} F_{0m}(s) \end{cases} \quad (3.28)$$

În condițiile în care și partea de master este fixată, iar $\tau_h = \text{const.}$ se obține:

$$\begin{cases} \theta_s - \theta_m = \frac{\tau_h}{c_m} = \varepsilon_p \\ \tau_w = \frac{c_s}{c_m} \tau_h = \frac{1}{n} \tau_h \end{cases} \quad (3.29)$$

Al doilea principiu important pentru teleoperatoarele bilaterale, care este demonstrat prin relațiile anterioare, se poate formula prin următoarea propoziție :

Propoziție: *În cadrul unui sistem reversibil cu acțiune bilaterală scala de forță este determinată de raportul coeficienților de rigiditate din partea master și din partea slave.*

Revenind la dependența **A.** $\theta_m(t); \theta_s(t) = f[\tau_h(t); \tau_w(t)]$, pentru un caz particular în care $\tau_h = \text{const.}$ și $\tau_w = \text{const.}$, iar regimul de mișcare este stabilizat (viteză constantă în ambele părți), din sistemul de ecuații (3.20) se obține:

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_m = \dot{\theta}_s = \frac{\tau_h - \frac{c_m}{c_s} \tau_w}{b_m + \frac{c_m}{c_s} b_s} = \text{const.} \quad (3.30)$$

Dacă $\tau_h = c_m/c_s \tau_w = n\tau_w$ atunci viteza se anulează în ambele părți și sistemul se află în repaus.

Relația (3.30) pune în evidență, în viziunea autorului, un principiu de bază privind controlul bilateral. Acest principiu este legat de sensibilitatea unui sistem master-slave la o încărcare diferențială externă. Cu alte cuvinte este vorba de răspunsul în viteză al sistemului la o anumită diferență între momentul de la arborele operator (master) și momentul forței de la arborele sarcinii (slave). Se introduce, în baza acestei observații, un criteriu propriu de apreciere a calității unui teleoperator bilateral, care pentru a fi în conformitate cu alte referințe bibliografice [Egorov 80], [Sheridan 89], [Raju 96] unde se tratetază același subiect, dar în baza altor

metode de analiză , s-a denumit ; **indice de calitate al transiterii încărcării externe [Diaconu 92]**. Relațiile care definesc acest indice sunt:

$$D_1 = \frac{\dot{\theta}_m}{\tau_h - n \cdot \tau_w} = \frac{\dot{\theta}_s}{\tau_h - n \cdot \tau_w} = \frac{1}{b_m + n \cdot b_s} \quad (3.31)$$

$$D_2 = \frac{\dot{\theta}_m}{\frac{\tau_h}{n} - \tau_w} = \frac{\dot{\theta}_s}{\frac{\tau_h}{n} - \tau_w} = \frac{1}{\frac{b_m}{n} + b_s} = \frac{D_1}{n} \quad (3.32)$$

unde: D_1 reprezintă coeficientul de calitate al transiterii spre operator, iar D_2 reprezintă coeficientul de calitate a transiterii spre partea de slave. În condițiile în care $n=1$ se obține:

$$D = D_1 = D_2 = \frac{1}{b_m + b_s} \quad (3.33)$$

Așa cum reiese din relația (4.33) coeficientul de calitate al transiterii momentelor de încărcare externă este invers proporțional cu frecările vâscoase din sistem. Acest coeficient care este utilizat sub o altă denumire și în modelele electrice ale sistemelor cu acțiune bilaterală, poate fi interpretat ca o sensibilitate a sistemului la o încărcare externă. Cu alte cuvinte el exprimă o variație a vitezei în funcție de dezechilibrul de încărcare dintre master și slave.

Abaterea de poziție dintre master și slave în cazul particular menționat mai sus ($\tau_h = \text{const.}$ și $\tau_w = \text{const.}$, iar rgimul de mișcare este stabilizat) se deduce ușor din sistemul de ecuații (4.20) sau din schema structurală:

$$\varepsilon_\theta = \theta_m - \theta_s = \frac{\tau_h + \frac{b_m}{b_s} \tau_w}{c_m + \frac{b_m}{b_s} c_s} \quad (3.34)$$

Din relația (3.34) se poate desprinde concluzia formulată în următoarea propoziție:

Propoziție; *Abaterea de poziție dintre master și slave la viteză constantă este proporțională cu momentele de încărcare externă și invers proporțională cu rigiditatea sistemului master-slave.*

O însușire importantă a sistemelor de urmărire cu acțiune bilaterală este cea de a reflecta la arborele acționat de operator sarcina de încărcare a arborelui de execuție (slave). Această însușire poate fi preanalizată pornind tot de la ecuațiile dinamicii modelului mecanic (3.19). Prin combinarea acestor ecuații se obține:

$$\begin{aligned} \tau_h(t) = & \frac{c_m}{c_s} [\tau_w(t) + J_w \cdot p^2 \cdot \theta_s(t) + J_s \cdot s^2 \cdot \theta_s(t) + b_s \cdot p \cdot \theta_s(t)] + \\ & + J_m \cdot p^2 \cdot \theta_m(t) + b_m \cdot p \cdot \theta_m(t) \end{aligned} \quad (3.35)$$

Din relația (3.35) se deduce că în orice regim de funcționare operatorul simte încărcarea dinamică și statică datorată sarcinii reale $[J_w p^2 \theta_s(t) + \tau_w(t)]$, scalată cu coeficientul de scală $n = c_m/c_s$. Aceeași relație arată că operatorul mai simte și alte încărcări în afara celei reale. Acestea au fost denumite momente *rezistente interne* și se datorează momentelor de inerție și momentelor forțelor vâscoase din partea master și respectiv partea slave. Momentele rezistente interne creează o eroare în senzația operatorului asupra sarcinii reale. Prin urmare momentul la arborele operator poate fi scris în felul următor:

$$\tau_{op}(t) = n \cdot [\tau_w(t) + J_w \cdot p^2 \cdot \theta_s(t)] + \varepsilon_\tau(t) \quad (3.36)$$

$$\varepsilon_\tau(t) = \tau_{in1}(t) + \tau_{in2}(t) \quad (3.37)$$

$$\tau_{in1}(t) = J_m p^2 \theta_m(t) + b_m p \theta_m(t) \quad (3.38)$$

$$\tau_{in2}(t) = J_s p^2 \theta_s(t) + b_s p \theta_s(t) \quad (3.39)$$

unde: ε_τ este eroare în senzația de încărcare a operatorului; $\tau_{in1}(t)$ este momentul intern rezistent în partea master, iar $\tau_{in2}(t)$ este momentul rezistent intern în partea slave. Pentru cazul particular ; $\tau_h = \text{const.}$ și $\tau_w = \text{const.}$ și regim de mișcare stabilizat se obține:

$$\varepsilon_\tau = \tau_h - n \cdot \tau_w = (b_m + n \cdot b_s) \cdot \dot{\theta} = \frac{\dot{\theta}}{D_1} = \text{const.} \quad (3.40)$$

Relația de mai sus evidențiază faptul că eroarea în senzația de încărcare a operatorului poate fi micșorată prin creșterea coeficientului de transmitere al încărcării externe [Diaconu 98a].

Contribuție personală: Pornind de la modelul mecanic, introdus de I. Egorov, al celui mai simplu sistem reversibil cu acțiune bilaterală, reprezentat de o pereche de selsine, autorul stabilește o serie de principii de bază (originale) privind funcționarea sistemelor master-slave controlate bilateral în poziție și forță. Aceste au fost subliniate pe parcursul acestui paragraf, împreună cu raționamentul care a condus la stabilirea lor.

În continuare se punctează în rezumat acele principii care nu sunt reliefate în teoria sistemelor de teleoperare bilaterale:

- Un sistem de urmărire cu acțiune bilaterală este format prin cuplarea în buclă închisă a două sisteme de urmărire a poziției.
- Reacția de forță poate fi realizată și fără a folosi senzori specializați de forță –moment.
- Scala de forță este determinată de raportul coeficienților de rigiditate din partea de master și din partea de slave.
- Abaterea de poziție între master și slave depinde de rigiditatea sistemului și de valoarea sarcinii de încărcare.
- Eroarea în senzația operatorului asupra sarcinii este determinată de momentele de inerție și de forțele de frecare vâscoasă.

Pe lângă aceste principii de bază autorul introduce și un indicator original de apreciere a calității unui sistem master–slave bilateral. Este vorba de indicele de calitate al transiterii încărcării externe. Valabilitatea și importanța acestui indicator vor fi subliniate pe parcursul tezei.

3.2.2 Analiză bazată modelul mecanic.

În practica conducerii de la distanță a manipuletoarelor copiatoare, două categorii de sisteme cu acțiune bilaterală au o răspândire mai largă [Vertut 78], [Egorov 80]:

1. *Sistemele de urmărire de tip simetric*, sau sistemele bilaterale controlate în modul *poziție-poziție*.
2. *Sistemele de urmărire de tip asimetric* sau sistemele controlate în modul *poziție-forță*.

Cele două categorii de sisteme bilaterale sunt realizate prin cuplarea a două sisteme de urmărire simple. Sistemele de tip simetric cuplează două bucle de urmărire a poziției, iar sistemele de tip asimetric cuplează o buclă de urmărire a poziției cu una de urmărire a forței. În fig.3.6 se prezintă schema generală a unui sistem bilateral de tip simetric realizat cu motoare de curent continuu, iar în fig. 3.7 se prezintă schema unui sistem bilateral de tip asimetric realizat cu același tip de motoare. Motorul de curent continuu din prima buclă (master) realizează încărcarea activă la mâna operatorului, iar motorul din a doua buclă (slave) realizează antrenarea sarcinii de încărcare. Fiecare dintre motoare este comandat prin

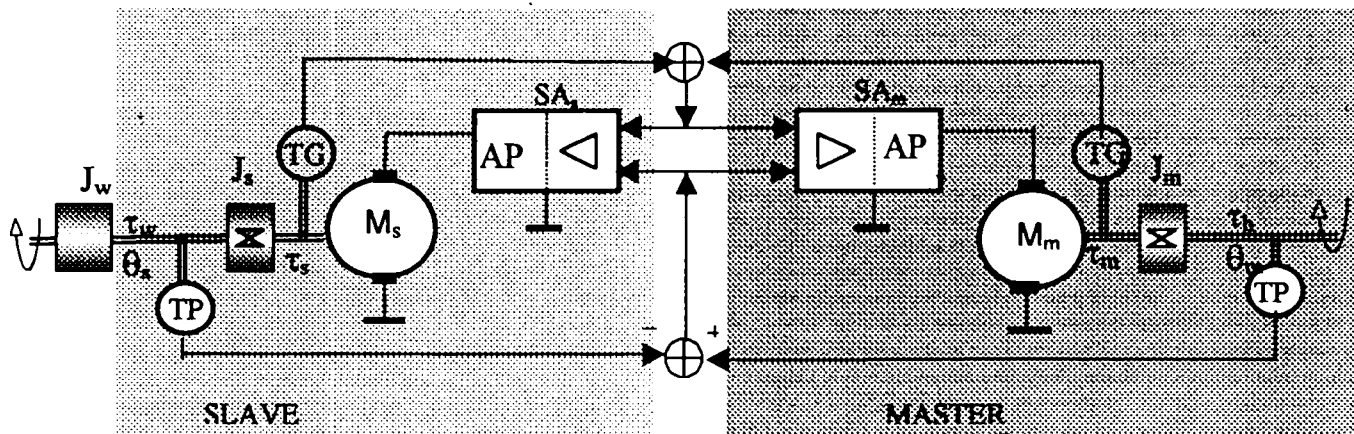


Figura 3.6

intermediul unui servoamplificator electronic format dintr-un amplificator de putere (AP) și un preamplificator (regulator) de comandă. Cel mai simplu sistem bilateral de tip simetric utilizează doar reacția de poziție care se obține prin intermediul celor două traductoare de poziție (TP), montate pe arborele din partea master și respectiv pe arborele din partea slave [Diaconu 88a]. Traductoarele de viteză (TG) nu sunt

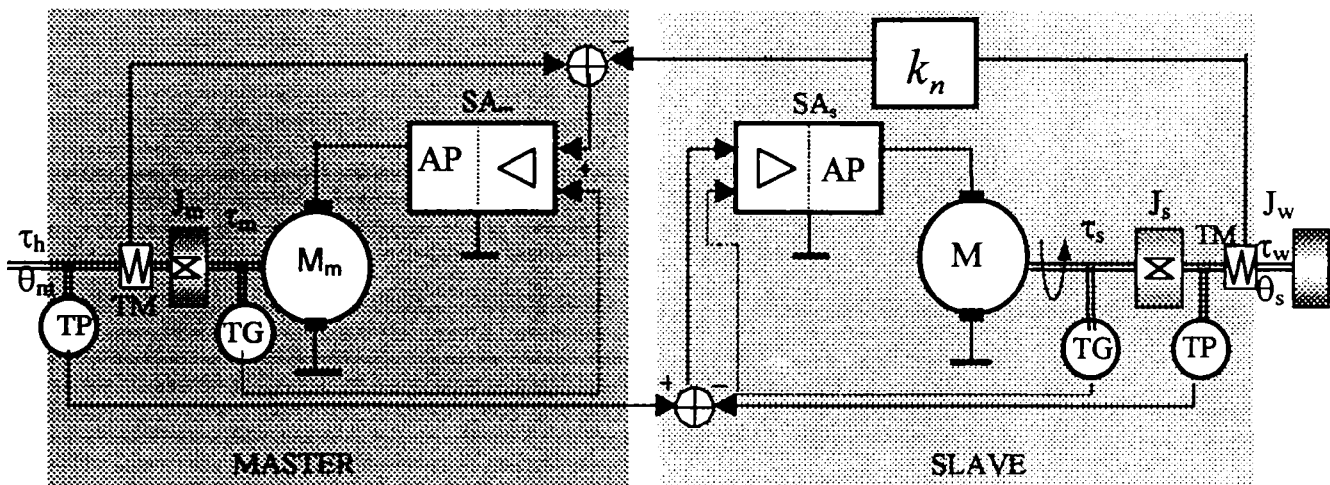


Figura 3.7

strict necesare, rolul reacției după viteză fiind acela de a îmbunătăți performanțele dinamice ale sistemului. Sistemele bilaterale de tip asimetric utilizează pe lângă reacția de poziție și o reacția de forță realizată în cazul de față prin traductoarele de forță / moment (TM) [Diaconu 92].

Dinamica mișcării în cazul celor două sisteme este descrisă de același sistem de ecuații diferențiale, specific sistemelor de tip master-slave. După aplicarea transformatei Laplace în condiții inițiale nule forma sistemului de ecuații este:

$$\begin{cases} U_{am}(s) = U_{cm}(s)Y_{cm}(s) = (R_m + L_ms)I_m(s) + k_{em}s\theta_m(s) \\ \tau_m(s) = k_{im}I_m(s) = J_ms^2\theta_m(s) - \tau_h(s) \\ U_{as}(s) = U_{cs}(s)Y_{cs}(s) = (R_s + L_s s)I_s(s) + k_{es}s\theta_s(s) \\ \tau_s(s) = k_{is}I_s(s) = (J_s + J_w)s^2\theta_s(s) + \tau_w(s) \end{cases} \quad (3.41)$$

unde (pentru $i = m, s$) s-a notat: U_{ai} - tensiunea rotorică a motorului M_m și respectiv M_s ; U_{ci} - tensiunea de comandă a servoamplificatorului; R_i - rezistența rotorică a motorului; L_i inductivitatea rotorică a motorului; I_i -curentul rotoric; k_{mi} -constanta de cuplu a motorului; k_{ei} -constanta de tensiune electromotoare a motorului; Y_{ci} -funcțiile de transfer a servoamplificatoarelor; J_i -momentele de inerție reduse la arborii celor două motoare; τ_i - momentele dezvoltate de motoare; τ_w -momentul de sarcină; θ_i - pozițiile unghiulare.

Deosebire între cele două sisteme se realizează prin funcțiile de control U_{ci} . Pentru sistemul de tip simetric funcțiile de control pentru master și slave au forma;

$$\text{- pentru master} \quad U_{cm}(s) = k_p[\theta_m(s) - \theta_s(s)] \quad (3.42)$$

$$\text{- pentru slave} \quad U_{cs}(s) = -k_p[\theta_m(s) - \theta_s(s)] \quad (3.43)$$

Pentru sistemul de tip asimetric funcțiile de control sunt;

$$\bullet \text{ pentru master,} \quad U_{cm}(s) = k_p[\theta_m(s) - \theta_s(s)] \quad (3.44)$$

$$\bullet \text{ pentru slave} \quad U_{cs}(s) = k_M[\tau_h(s) - J_ms^2\theta_m(s)] - k_n[\tau_w(s) + J_ws^2\theta_s(s)] \quad (3.45)$$

unde: k_p este factorul de amplificare al traductorului de poziție, k_M este factorul de amplificare al traductorului de moment, k_n este coeficientul de reflectare al momentelor datorate încărcării (sarcinii).

Funcția de transfer a servoamplificatorului din partea master și respectiv din partea slave are următoarea formă;

$$Y_{ci}(s) = \frac{k_{ci}}{T_{ci}s + 1} \quad (3.46)$$

unde k_{ci} ($i = m, n$) este factorul de amplificare, iar T_{ci} este constanta de timp de întârziere a servoamplificatorului. Schema structurală a sistemului de tip simetric realizată pe baza sistemul de ecuații (3.41) și a relațiilor (3.42), (3.43) este prezentată în fig. 3.8. În mod similar din (3.41) , (3.44) și (3.45) se realizează schema structurală a sistemului de tip asimetric (fig. 3.9).

Se introduc în continuare următoarele notații;

$$B_i(s) = \frac{k_{ii}k_{ei}}{R_i(T_{Ei}s + 1)} = \frac{b_i}{T_{Ei}s + 1}; \quad C_i(s) = \frac{k_p Y_{ci}(s)k_{ii}}{R_i(T_{Ei}s + 1)} = \frac{c_i}{(T_{ci}s + 1)(T_{Ei}s + 1)}, \quad (3.47)$$

$$\text{unde ; } b_i = \frac{k_{ii}k_{ei}}{R_i}; \quad T_{Ei} = \frac{L_i}{R_i}; \quad c_i = \frac{k_p k_{ci} k_{ii}}{R_i} \quad (3.48)$$

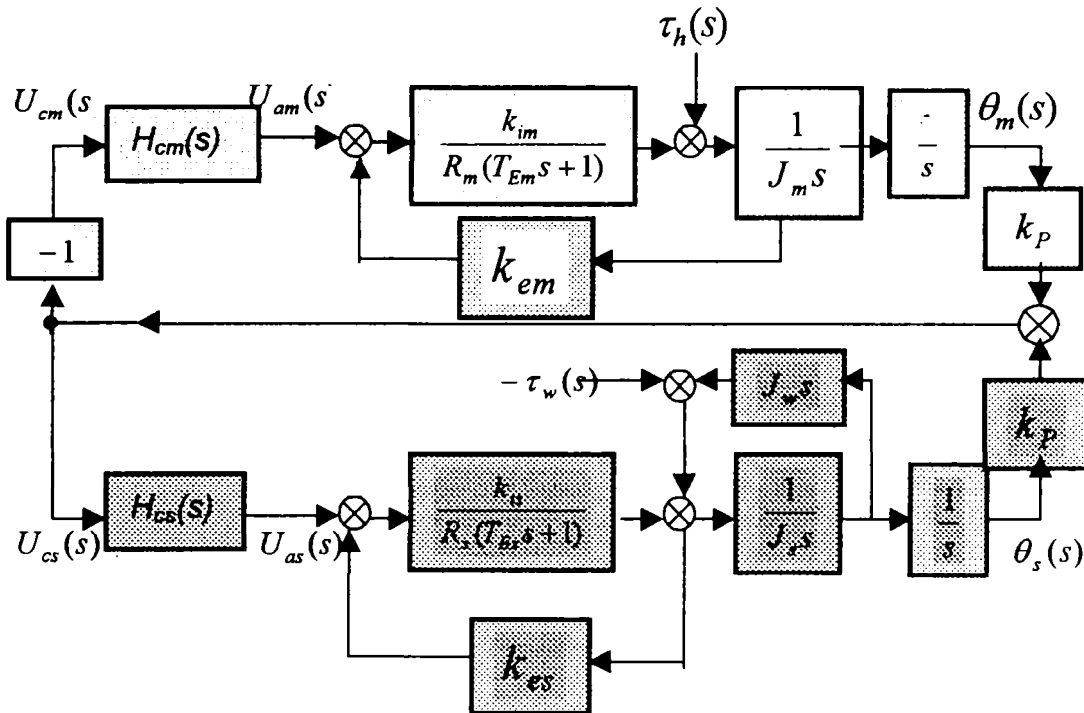


Figura 3.8

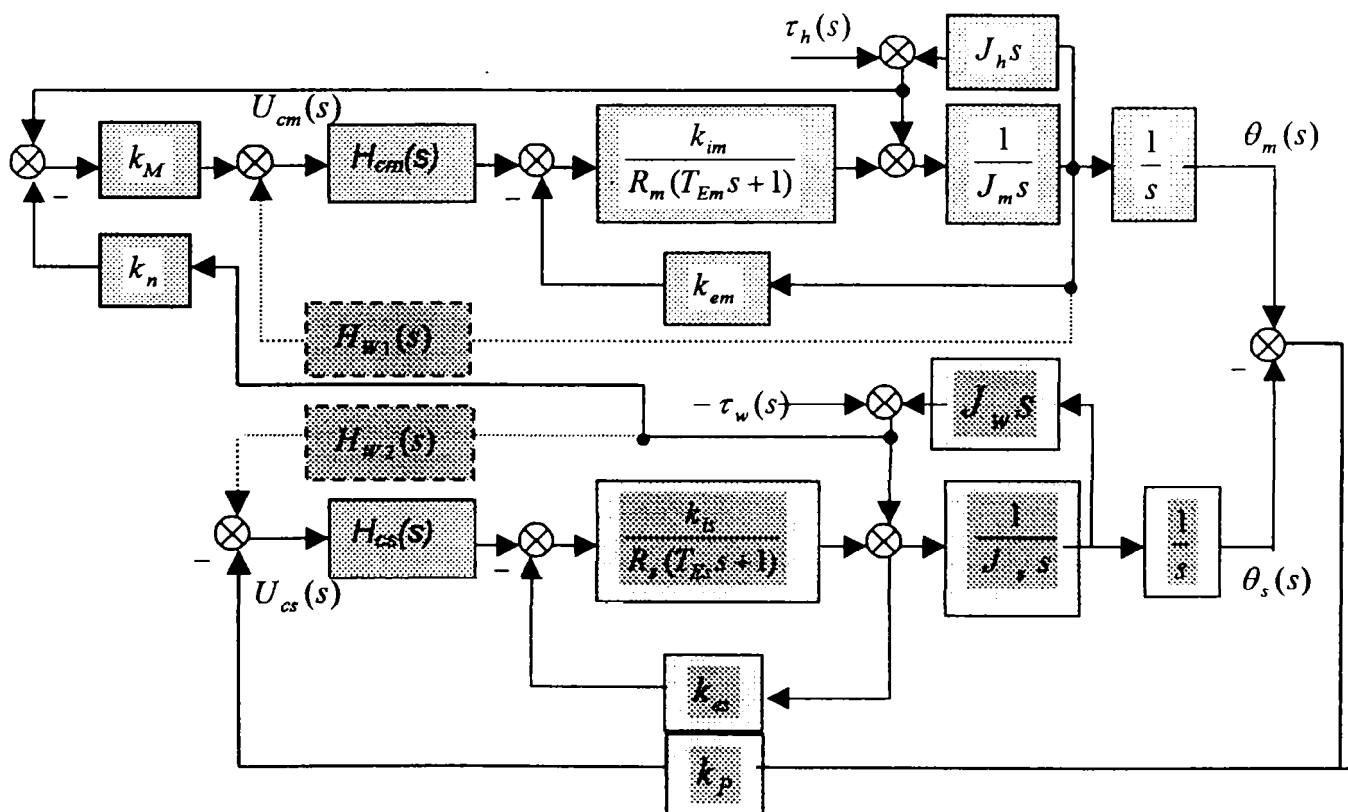


Figura 3.9

Ținând cont de notațiile de mai sus, din sistemul de ecuații (4.41) se deduce:

$$\begin{cases} \tau_h(s) = J_1 s^2 \theta_m(s) + B_m(s) s \theta_m(s) + C_1(s) \theta_m(s) - C_1(s) \theta_s(s), \\ \tau_w(s) = C_2(s) \theta_m(s) - (J_s + J_w) s^2 \theta_s(s) - B_2(s) s \theta_s(s) - C_s(s) \theta_s(s) \end{cases} \quad (3.49)$$

$$\begin{cases} \tau_h(s) = J_1 s^2 \theta_m(s) + B_m(s) s \theta_m(s) + C_1(s) \theta_m(s) - C_1(s) \theta_s(s), \\ \tau_w(s) = C_2(s) \theta_m(s) - (J_s + J_w) s^2 \theta_s(s) - B_2(s) s \theta_s(s) - C_s(s) \theta_s(s) \end{cases} \quad (3.50)$$

S-au obținut astfel două sisteme de ecuații asemănătoare cu cel care descrie dinamica modelului mecanic (3.21). Prin aceasta modelul în cauză poate fi validat, iar concluziile rezultate din analiza acestuia pot fi preluate și interpretate pentru analiza sistemelor fizice reale controlate bilateral în poziție și forță. Schema structurală a sistemului bilateral de tip simetric realizată în baza sistemului de

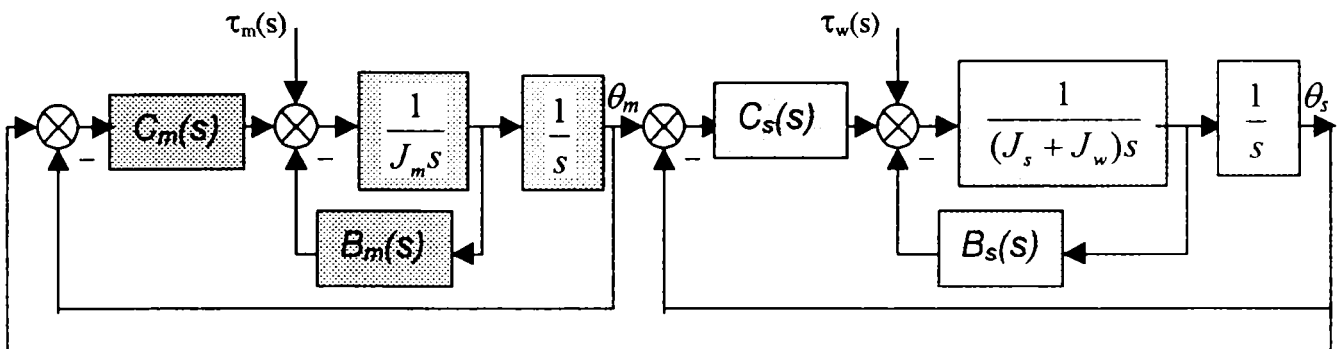


Figura 3.10

ecuații (3.49) este prezentată în fig.3.10. Schema simplificată a acestui sistem, prezentată în fig 3.11, este analoagă cu cea a modelului mecanic care a fost prezentată în fig.3.3. Această analogie structurală ne permite să utilizăm, în analiza sistemului în cauză, concluziile de la analiza modelului mecanic. Funcțiile de transfer

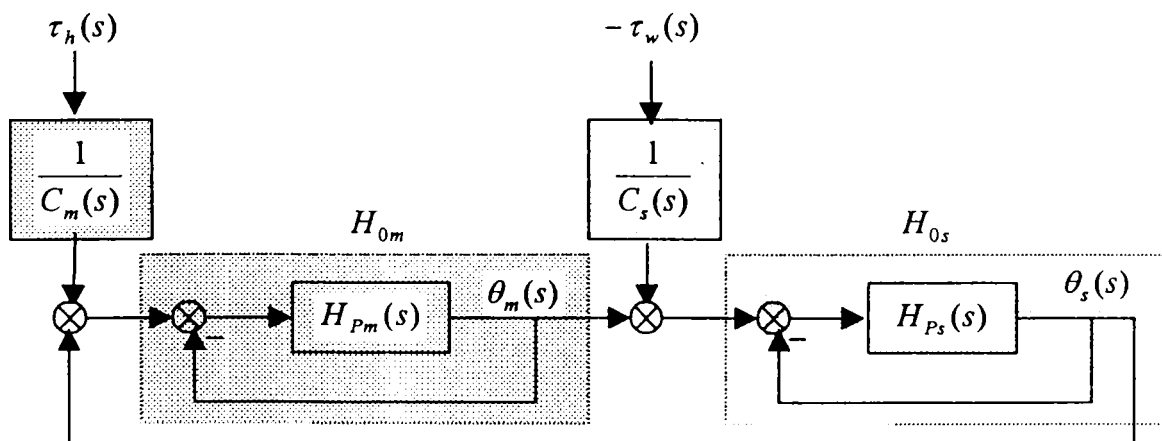


Figura 3.11

în circuit deschis a buclelor de reglare din partea master și respectiv din partea slave au aceeași formă atât pentru sistemele simetrice cât și pentru cele nesimetrice:

$$H_{P_m} = \frac{C_m(s)}{J_m s^2 + B_m(s)s}; \quad H_{P_s} = \frac{C_s(s)}{(J_s + J_w)s^2 + B_s(s)s}; \quad (3.51)$$

Funcțiile de transfer în circuit închis sunt aceleași pentru partea slave dar diferă pe partea master. Aceste funcții sunt:

- pentru sistemele simetrice;

$$H_{0m} = \frac{C_m(s)}{J_m s^2 + B_m(s)s + C_m(s)}; \quad H_{0s} = \frac{C_s(s)}{(J_s + J_w)s^2 + B_s(s)s + C_s(s)}; \quad (3.52)$$

• pentru sistemele asimetric;

$$H_{0m} = \frac{C_m(s)}{J_m s^2 + B_m(s)s + C_m(s)J_m s^2}; \quad H_{0s} = \frac{C_s(s)}{(J_s + J_w)s^2 + B_s(s)s + C_s(s)}; \quad (3.53)$$

Transpunerea și interpretarea rezultatelor analizei asupra modelului mecanic din paragraful precedent se va face luând considerare aceleași cazuri particulare de funcționare.

Pentru $\tau_h(s) = \text{const.}$ și $\tau_w = \text{const.}$ și regim de mișcare stabilizat (acelerație zero) se obține:

- Pentru sistemul simetric;

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_m = \dot{\theta}_s = \frac{\tau_h - \frac{c_m}{c_s} \tau_w}{b_m + \frac{c_m}{c_s} b_s} = \frac{\tau_h - n \tau_w}{b_m + n b_s} = \text{const.} \quad (3.54)$$

• Pentru sistemul asimetric;

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_m = \dot{\theta}_s = \frac{(1 + \frac{1}{c_m}) \tau_h - k_n \tau_w}{\frac{b_m}{c_m}} = \frac{\tau_h - n \tau_w}{\frac{b_m}{1 + c_m}} = \text{const.} \quad (3.55)$$

Condiția de echilibru (viteză zero în ambele părți) se obține dacă :

$$\tau_h = n \tau_w \quad (3.56)$$

unde: n este coeficient de scalare a forței.

În cazul sistemelor master-slave simetrice, acționate cu motoare de c.c., se deduce;

$$n = \frac{c_1}{c_2} = \frac{k_{cm} k_{im} R_m}{k_{cs} k_{is} R_s} \quad (3.57)$$

Pentru sistemele de tip asimetric coeficientul de scală are valoarea:

$$n = \frac{k_n}{1 + \frac{1}{c_m}} = \frac{k_n}{1 + \frac{R_m}{k_p k_{cm} k_{im}}} \quad (3.58)$$

Ultimele două relații pun în evidență faptul că pentru sistemele bilaterale de tip simetric coeficientul de scalare a forței depinde factorii de amplificare a celor două servoamplificatoare și de parametrii care țin de construcția sistemului. Dacă cele două motoare sunt identice ($R_m=R_s$; $k_{im} = k_{is}$), scala de forță este dată numai de raportul factorilor de amplificare ($n=k_{cm}/k_{cs}$) deci poate fi modificată relativ ușor. Se poate observa, de asemenea, că factorul de scalare a forței la sistemele asimetrice este aproximativ egal cu coeficientul de reflectare a momentelor datorate încărcării, în condițiile în care amplificarea servoamplificatorului master este suficient de mare. În literatură aceste însușiri specifice ale sistemelor master-slave controlate bilateral nu sunt suficient de reliefate.

Pentru sistemele simetrice coeficientul de calitate a transmisiei momentelor de încărcare externă definit prin relațiile (3.29) și (3.30) poate fi crescut numai prin micșorarea coeficienților forțelor de frecare vâscoasă b_i , care conform relației (3.48) depind numai de parametrii constructivi ai sistemului, deci nu pot fi modificați. În aceste condiții singura soluție pentru îmbunătățirea acestor coeficienți de calitate este de compensare efectului forțelor de frecare vâscoasă, care pentru cazul analizat, se datorează în bună măsură tensiunii electromotoare a motoarelor de c.c din partea master și partea slave .

Pentru sistemele de tip asimetric coeficientul de calitate al transmisiei momentelor de încărcare este dat de relația :

$$D = \frac{1 + c_m}{b_m}; \quad (3.59)$$

Se constată că în cazul sistemelor asimetrice coeficientul de calitate al transmisiei încărcării este mai bun decât în cazul sistemelor de tip simetric și poate fi îmbunătățit prin creșterea rigidității c_m , deci a amplificării servoamplificatorului master.

Un alt indicator de calitate important în practica teleoperatorilor bilaterale este *abaterea de poziție dintre master și slave*. Din schemele structurale sau din sistemul de ecuații (3.49) se poate deduce expresia abaterii de poziție. Pentru cazul particular menționat mai înainte (τ_h (s) = const. și τ_w = const. și regim de mișcare stabilizat) se obține:

- Pentru sistemele simetrice;

$$\varepsilon_{\theta} = \theta_m - \theta_s = \frac{\tau_h + \frac{b_m}{b_s} \tau_w}{c_m + \frac{b_m}{b_s} c_s} \quad (3.60)$$

• Pentru sistemele asimetrice ;

$$\varepsilon_{\theta} = \theta_m - \theta = \left[\left(1 + \frac{1}{c_m}\right) \tau_h - k_n \tau_w \right] \frac{c_m b_s}{b_m c_s} + \frac{1}{c_s} \tau_w = \frac{b_s}{c_s} \theta + \frac{1}{c_s} \tau_w \quad (3.61)$$

Relația (3.60) evidențiază faptul că pentru micșorarea abaterii de poziție trebuie mărite rigiditățile în partea de master (c_m) și în partea de slave (c_s). Această se realizează măbind factorii de amplificare (k_{cm} și k_{cs}) ai celor două servoamplificatoare. Creșterea amplificării trebuie corelată cu menținerea stabilității sistemului, o amplificare prea mare putând conduce la instabilitatea sistemului.

Relația (3.61) scoate în evidență faptul că pentru sistemele asimetrice abaterea de poziție depinde numai de parametri părți de slave. Deci pentru creșterea performanței de urmărire a poziției trebuie să se crească doar amplificarea servoamplificatorului slave, în condițiile de menținere a stabilității sistemului.

Pentru a aprecia calitatea transferului poziției și forței la sistemele bilaterale de tip simetric și la cele de tip asimetric se pot utiliza schemele structurale prezentate în fig.3.8 și fig. 3.9 De acolo se deduc funcțiile de transfer pentru poziție și respectiv pentru momentul de încărcare. Astfel pentru transferul poziției între master și slave se deduce pentru ambele categorii de sisteme sisteme aceeași relație:

$$\theta_s(s) = H_{0s}(s) \left[\theta_m(s) - \frac{\tau_w(s)}{C_s(s)} \right] \quad (3.62)$$

unde: H_{0s} este funcția de transfer a circuitului închis de urmărire a poziției în partea de slave. În condițiile în care partea de master este fixă ($\theta_m = \text{cts}$) se poate deduce funcția de transfer a momentelor de încărcare dinspre partea de slave spre partea de master:

$$\text{sistem simetric : } \frac{\tau_h(s)}{\tau_w(s)} = \frac{C_m(s)}{C_s(s)} H_{0s} \quad (3.63)$$

$$\text{sistem asimetric: } \frac{\tau_h(s)}{\tau_w(s)} = k_n \frac{1 + \frac{H_{0s}(s) J_w s^2}{C_s(s)}}{1 + \frac{1}{C_m(s)}} = n \left[1 + \frac{J_w s^2}{C_2(s) + B_2(s)s + (J_s + J_w)s^2} \right] \quad (3.64)$$

Comparând cele două relații de mai sus, se poate deduce ușor că sistemele de tip asimetric asigură un transfer mai bun al momentului de încărcare de la sarcină la operator.

Un alt indicator de calitate important la care s-a făcut referire și în analiza modelului mecanic este legat de *senzația operatorului asupra sarcinii de încărcare* [Lee 93], [Diaconu 92]. Din sistemul de ecuații (4.49) se obține expresia momentului dezvoltat de operator în cadrul unui sistem de tip simetric.

$$\begin{aligned} \tau_h(s) = & \frac{C_m(s)}{C_s(s)} [\tau_w(s) + J_w \cdot s^2 \cdot \theta_s(s) + J_s \cdot s^2 \cdot \theta_s(s) + B_s(s) \cdot s \cdot \dot{\theta}_s(s)] + \\ & + J_m \cdot s^2 \cdot \theta_m(s) + B_m \cdot s \cdot \dot{\theta}_m(s) \end{aligned} \quad (3.65)$$

Această relație este similară cu relația (3.35) de la modelul mecanic, și prin urmare se poate scrie prin analogie că eroarea în senzația operatorului asupra momentelor reale de încărcare este următoarea:

$$\varepsilon_\tau(s) = \tau_{in1}(s) + \tau_{in2}(s) \quad (3.66)$$

unde: τ_{in1} și τ_{in2} sunt momentele rezistente interne datorate inerției și frecărilor vâscoase,

$$\tau_{in1}(s) = J_m s^2 \theta_m(s) + B_m s \dot{\theta}_m(s) \quad (3.67)$$

$$\tau_{in2}(s) = J_s s^2 \theta_s(s) + B_s s \dot{\theta}_s(s)$$

Pentru sistemele asimetrice eroarea în senzația operatorului este dată de expresia:

$$\varepsilon_\tau(s) = J_m s^2 \theta_m(s) + \frac{B_1(s) + J_m s}{1 + C_m(s)} s \dot{\theta}_m(s) \quad (3.68)$$

Această relație evidențiază un o caracteristică foarte importantă a acestor sisteme și anume aceea că: *Eroarea în senzația de încărcare a operatorului în cadrul unui sistem bilateral asimetric depinde numai de parametri din partea de master.*

În cazul particular analizat ($\tau_h(s) = \text{const.}$ și $\tau_w = \text{const.}$ și regim de mișcare stabilizat) eroarea în senzația operatorului are expresia:

- Pentru sistemele simetrice;

$$\varepsilon_\tau = \tau_h - n \cdot \tau_w = (b_m + n \cdot b_s) \cdot \dot{\theta} = \frac{\dot{\theta}}{D_1} = \text{const.} \quad (3.69)$$

• Pentru sistemele asimetrice;

$$\varepsilon_\tau = \frac{b_m}{1 + c_m} \dot{\theta}_m \quad (3.70)$$

Comparând cele două relații se poate observa ușor că în cazul sistemelor de tip asimetric eroarea în senzația operatorului este redusă de $(1+c_m)$ ori față de aceeași eroare la sistemele de tip simetric.

3.2.3 Soluții pentru îmbunătățirea performanțelor controlului bilateral

În paragraful precedent s-a prezentat o analiză succintă a sistemelor reversibile cu acțiuni bilaterală de tip simetric și asimetric, cu structura cea mai simplă. Performanțele acestor sisteme sunt modeste dar pot fi îmbunătățite. Analiza bazată pe modelul mecanic permite identificarea unor soluții teoretice și practice pentru îmbunătățirea performanțelor sistemelor reversibile cu acțiuni bilaterală. Pentru sistemele în cauză performanțele se pot separa în două grupe. În prima grupă se încadrează performanțele care vizează dinamica mișcării sistemului, sau mai precis performanțele legate de calitatea urmăririi mișcării brațului master de către brațul slave. Aceste performanțe precum și soluțiile pentru îmbunătățirea lor sunt bine cunoscute, majoritatea dintre ele fiind specifice sistemelor de reglare a poziției care au o largă răspândire în tehnică [Călin 72], [Shimon 92]. În grupa a doua se încadrează performanțele legate de senzația operatorului în legătură cu sarcinile de încărcare ale brațului slave, sau cu alte cuvinte performanțe legate de calitatea reacției de forță [Vertut 85], [Lee 93]. Investigațiile din această teză sunt focalizate în special pe această grupă.

În relațiile (3.35) și (3.69) sunt prezentate expresiile analitice ale momentului de încărcare reflectate la mâna operatorului pentru cazul modelului mecanic (transmisie elastică cu două mase inerțiale) și respectiv a sistemului reversibil cu acțiuni bilaterală de tip simetric. Soluția pentru îmbunătățirea senzației operatorului este evidentă și presupune compensarea momentelor rezistente interne în partea master și în partea slave. Această compensare se poate realiza numai prin funcțiile de control, care pentru sistemul bilateral de tip simetric vor avea următoarea formă;

$$\text{- pentru master} \quad U_{cm}(s) = k_p[\theta_m(s) - \theta_s(s)] + W_1(s) \quad (3.71)$$

$$\bullet \text{ pentru slave} \quad U_{cs}(s) = -k_p[\theta_m(s) - \theta_s(s)] + W_2(s) \quad (3.72)$$

unde $W_1(s)$ și $W_2(s)$ sunt semnalele de comandă pentru compensarea momentelor rezistente interne în partea master și respectiv partea slave. În aceste condiții expresia momentului operatorului (3.69) capătă forma următoare;

$$\tau_h(s) = \frac{C_m(s)}{C_s(s)} [\tau_w(s) + J_w \cdot s^2 \cdot \theta_s(s) + \tau_{ins}(s)] + \tau_{inm}(s) - c_m [W_1(s) + W_2(s)] \quad (3.73)$$

unde ;

$$\tau_{in1}(s) = J_m s^2 \theta_m(s) + B_m s \theta_m(s) \quad (3.74)$$

$$\tau_{in2}(s) = J_s s^2 \theta_s(s) + B_s s \theta_s(s) \quad (3.75)$$

sunt *momentele rezistente interne* în partea master și respectiv în partea slave. Compensarea totală a acestor momente conduce la anularea erorii în senzația operatorului sau cu alte cuvinte la obținerea reacției de forță ideale. Două soluții principale sunt propuse pentru o astfel de comensare **[Diaconu 92]**, [Egorov 80]:

- **Prima soluție** propune un semnal de compensare proporțional cu momentele rezistente interne :

$$W_1(s) + W_2(s) = m \left[\frac{\tau_{in1}}{C_1(s)} + \frac{\tau_{in2}}{C_2(s)} \right] \quad (3.76)$$

unde: m este factorul de amplificare pentru semnalul de compensare.

Înlocuind relația (3.76) în relația (3.73) se obține;

$$\tau_h(s) = \frac{C_m(s)}{C_s(s)} [\tau_w(s) + J_w \cdot s^2 \cdot \theta_s(s) + \tau_{ins}(s)(1-m)] + \tau_{inm}(s)(1-m) \quad (3.77)$$

Dacă $m = 1$ operatorul nu simte decât momentele datorate încărcării realizându-se astfel reacția de forță ideală.

- **A doua soluție** presupune utilizarea unui semnal de compensare proporțional cu momentele de încărcare externă :

$$W_1(s) + W_2(s) = m \left[\frac{\tau_h(s)}{C_1(s)} - \frac{\tau_w(s) + J_w s^2 \theta_s(s)}{C_2(s)} \right] \quad (3.78)$$

Înlocuind (3.78) în (3.73) se obține:

$$\tau_h(s) = \frac{C_m(s)}{C_s(s)} [\tau_w(s) + J_w \cdot s^2 \cdot \theta_s(s)] + \frac{\tau_{in1} + \frac{C_1(s)}{C_2(s)} \tau_{in2}}{m+1} \quad (3.79)$$

Se observă ușor că această soluție micșorează de $(m+1)$ ori eroarea discutată.

Pentru compensarea momentelor rezistente interne s-au analizat patru variante de stabilire a semnalelor de compensare:

1. $W_1(s) = m \frac{\tau_{in1}(s)}{C_1(s)} ; W_2(s) = m \frac{\tau_{in2}(s)}{C_2(s)} ;$
2. $W_1(s) = m \left[\frac{\tau_{in1}(s)}{C_1(s)} + \frac{\tau_{in2}(s)}{C_2(s)} \right]; W_2(s) = 0$ (3.80)

$$3. W_1(s) = 0; W_2(s) = m \left[\frac{\tau_{in1}(s)}{C_1(s)} + \frac{\tau_{in2}(s)}{C_2(s)} \right];$$

$$4. W_1(s) = m \frac{\tau_{in2}(s)}{C_2(s)}; W_2(s) = m \frac{\tau_{in1}(s)}{C_1(s)}$$

În conformitate cu relațiile (3.78) semnalele de compensare ar trebui să aibă următoarele forme:

lele de compensare ar trebui să aibă următoarele forme:

$$m \frac{\tau_i(s)}{C_i(s)} = m \frac{J_i s^2 + B_i s}{c_i} = m \frac{b_i}{c_i} (T_{Mi} T_{Ei} s^2 + T_{Mi} s + 1) (T_{ci} s + 1) s \theta_i(s) \quad (3.81)$$

unde indicele $i = m, s$ (se referă la master și la slave), $T_{Mi} = \frac{J_i R_i}{k_u k_a}$ este constanta de timp mecanică, restul notațiilor sunt specificate în relațiile (3.47) și (3.48)

Obținerea unor semnale de tipul celor din relația (3.81) este imposibilă din punct de vedere tehnic pentru că este nevoie de elemente de anticipare de ordinul doi și trei. Realizarea unui element de anticipare este echivalentă cu punerea efectului înaintea cauzei.

Pentru sistemele bilaterale de tip simetric realizate cu motoare de c.c. poate fi compensat efectul momentelor forțelor de frecare vâscoasă care se datorează în primul rând tensiunii electromotoare generate de motoarele în cauză. Compensarea tensiunii electromotoare în partea master și în partea slave se poate realiza doar printr-o reacție pozitivă de viteză. Semnalele de compensare pentru varianta 1 au forma :

$$W_1(s) = H_{w1}(s) s \theta_m(s) = \frac{T_{cm} s + 1}{k_{cm}} k_{em} s \theta_m(s)$$

$$W_2(s) = H_{w2}(s) s \theta_s(s) = \frac{T_{cs} s + 1}{k_{cs}} k_{es} s \theta_s(s) \quad (3.82)$$

Reacția pozitivă are efecte negative asupra stabilității sistemului, motiv pentru care se impun precauții privind utilizarea ei. Prin compensarea amaortizării datorate efectului frecărilor vâscoase sistemul devine astatic de ordinul doi deci fără o corecție suplimentară el este la limita de stabilitate [Vischer 95], [Ohnishi 96]. Din cele patru variante de compensare posibile, prezentate prin relația (3.78) numai prima și ultima prezintă interes. Prima are avantajul că nu utilizează o legătură suplimentară între master și slave, în schimb are dezavantajul înrăutățirii stabilității din cauza reacției pozitive. Ultima variantă are dezavantajul că solicită legături suplimentare între master și slave, dar are avantajul unui comportament mai bun din

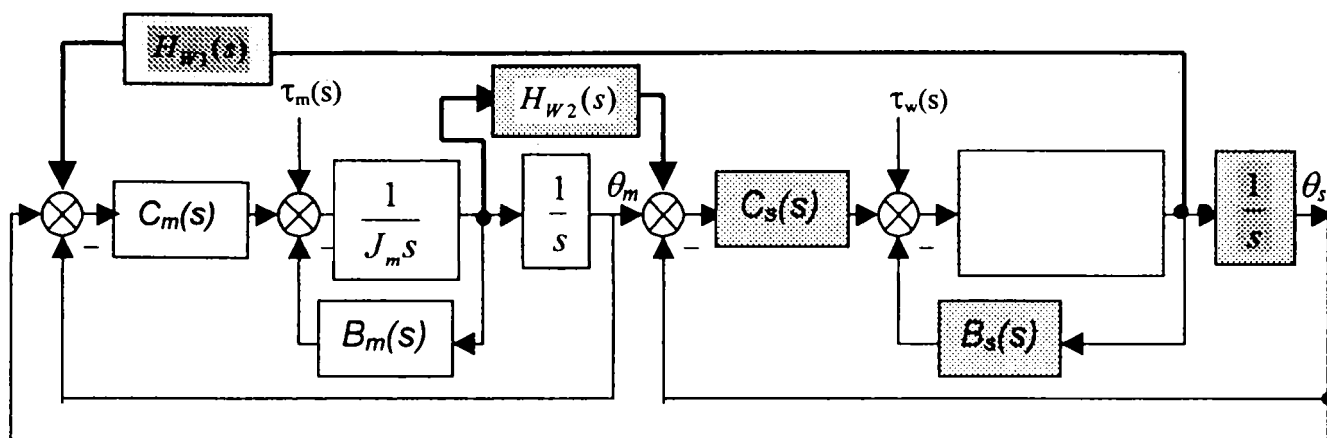


Figura 3.12

punctul de vedere al stabilității. Pentru distanțe mici între master și slave această variantă este recomandată. Celelalte două variante îmbină dezavantajele menționate mai înainte și prin urmare nu sunt fezabile. Schema structurală a sistemului bilateral de tip simetric în care s-a prevăzut compensarea după varianta a patra este prezentată în fig.3.12.

În fig.3.13 este prezentată schema structurală a unui sistem asimetric la care s-a aplicat **a doua soluție** de îmbunătățire a performanțelor.

Din dependența A. $\theta_m(t); \theta_s(t) = f[\tau_h(t); \tau_w(t)]$, sau *mișcarea arborelui master și a arborelui slave sub influența momentelor externe* se deduce pentru cazul particular deja cunoscut (momente de încărcare constante și accelerație zero):

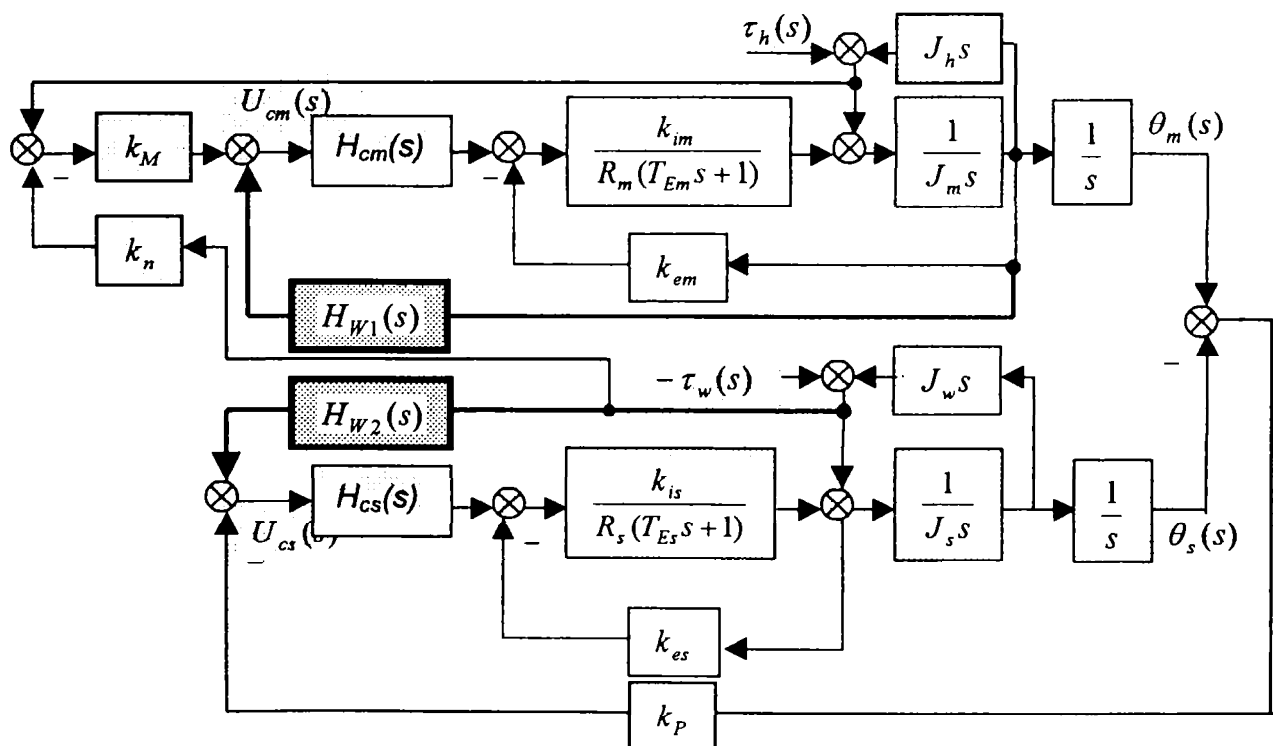


Figura 3.13

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_m = \dot{\theta}_s = \frac{\tau_h - n\tau_w}{b_m + nb_s} \cdot \frac{1}{1-m} = const. \quad (3.83)$$

Prin urmare coeficientul de calitate a transmiterii momentelor externe va fi:

$$D_1 = \frac{\dot{\theta}_m}{\tau_h - n \cdot \tau_w} = \frac{\dot{\theta}_s}{\tau_h - n \cdot \tau_w} = \frac{1}{1-m} \frac{1}{b_m + n \cdot b_s} \quad (3.84)$$

Eroarea în senzația operatorului va fi ;

$$\varepsilon_\tau = \tau_h - n \cdot \tau_w = (1-m)(b_m + n \cdot b_s) \dot{\theta}. \quad (3.85)$$

Prin urmare micșorarea coeficientului (1-m) duce la îmbunătățirea senzației operatorului asupra momentelor de încărcare. Funcțiile de transfer a poziției și momentelor de încărcare date prin relațiile (3.37) și (3.38) au în aceste condiții următoarea formă:

$$\frac{\theta_s(s)}{\theta_m(s)} = H_{0s} \left[\frac{sH_{w1}(s)}{k_p} + 1 \right] = \frac{\frac{mJ_m s^2 + mb_m s + 1}{c_m}}{\frac{J_s + J_w}{C_s(s)} s^2 + \frac{B_s(s)}{C_s(s)} s + 1} \quad (3.86)$$

$$\frac{\tau_h(s)}{\tau_w(s)} = \frac{C_m(s)}{C_s(s)} H_{0s} \left[\frac{sH_{w2}(s)}{k_p} + 1 \right] = \frac{C_m(s)}{C_s(s)} \frac{\frac{mJ_s s^2 + mb_s s + 1}{c_s}}{\frac{J_s + J_w}{C_2(s)} s^2 + \frac{B_s(s)}{C_s(s)} s + 1} \quad (3.87)$$

Relațiile (3.86) și (3.87) pun în evidență îmbunătățirea transferului în poziției și forței între cele două unități, deoarece în funcția de transfer apar două zerouri care măresc viteza de răspuns a sistemului, în condițiile în care și stabilitatea sistemului este asigurată.

– Analiza de mai sus și soluțiile propuse pentru creșterea performanțelor sistemelor de teleoperare controlate bilateral au utilizat un model analitic simplificat, care nu ține cont de faptul că operatorul face parte din sistem. Principiile subliniate în această analiză sunt valabile, iar rezultatele cercetărilor experimentale care vor fi prezentate în capitolul 4 confirmă aceasta. Aceleași rezultate scot în evidență și faptul că s-au neglijat (în cazul de față intenționat) unele mărimi care în anumite regimuri de funcționare ale sistemului au influență semnificativă.

3.3 Analiza teleopertoarelor bilaterale pe baza analogiei electro-mecanice

Este cunoscut că pentru circuitele și rețelele de circuite electrice există o metodologie de analiză bine pusă la punct. Extinderea acestei metodologii și la analiza unor sisteme mecanice sau electromecanice nu este o idee personală și nici chiar nouă. Punerea în practică a acestei idei întâmpină unele dificultăți mai ales în etapa de interpretare a rezultatelor analizei. Extinderea amintită este bazată pe faptul că din punct de vedere sistemic modelul intrare ieșire al unui sistem liniar, continuu și invariant în timp este definită pe baza raportului dintre două variabile; variabila de efort și variabila de flux energetic. În cazul unui sistem mecanic variabila de efort poate fi individualizată prin forță sau moment, iar variabila de flux prin viteză liniară sau unghiulară. În cazul sistemelor electrice variabila de efort se individualizează prin tensiune iar variabila de flux prin intensitatea curentului. Din aceste echivalări se obține *analogia electro-mecanică* în care forța sau momentul mecanic sunt puse în corespondență cu tensiunea electrică, iar viteza liniară sau unghiulară are corespondent intensitatea curentului electric. În baza acestei analogii un motor de antrenare (care dezvoltă cuplu mecanic) este echivalent cu o sursă de tensiune, iar o masă în mișcare este echivalentă cu un generator de curent.

Sistemele de teleoperare controlate bilateral pot fi descrise analitic ca o rețea de circuite electrice pasive înseriate [Anderson 95] sau ca un cuadripol [Raju 89], [Hanaford 89]. La analiza acestor modele pot fi utilizate metode specifice teoriei circuitelor și rețelelor de circuite electrice ca; metoda impedanței, metoda curenților prin ramuri, metoda buclei de curent , etc. Pentru aceasta este necesar să se stabilească corespondența dintre elementele de bază ale circuitelor electrice (rezistență, inductuctanță, capacitate, transformator, sursă de tensiune, sursă de curent, etc) și elementele de bază specifice structurilor sistemelor de teleoperare (inerție, amortizare, rigiditate, transformator de coordonate, sursă de forță, etc.).

Metodele de analiză enumerate mai sus fac apel la funcția de impedanță $Z(s)$. Pentru sistemele liniare, continue și invariante în timp această funcție este definită prin raportul dintre transformate Laplace a variabilei de efort și variabila de flux. Prin

urmare funcția de impedanța mecanică $[Z(s) = \frac{f(s)}{v(s)}]$ are corespondent în funcția de

impedanță electrică $[Z(s) = \frac{U(s)}{I(s)}]$.

Autorul a identificat 6 elemente de bază care sunt suficiente pentru a descrie analitic un sistem de teleoperare bilateral și a găsit echivalentul lor electric. Acestea sunt prezentate, în continuare, prin simboluri (în fig. 3.14) și prin funcțiile care stabilesc legătura intrare – ieșire .

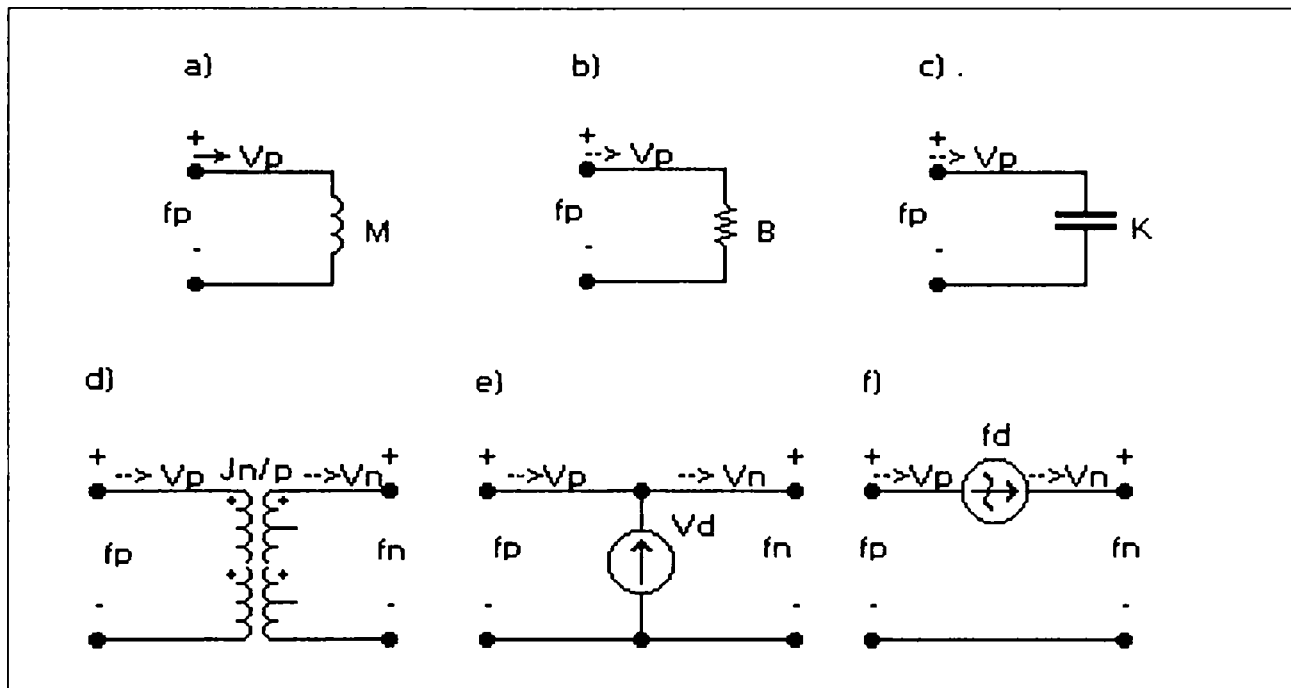


Figura 3.14

- Inductanță / Inerție (M), (fig.3.14a);

$$f_p = M \frac{d}{dt} v_p \quad (3.88)$$

- Rezistență / Amortizare (B) , (fig.3.14b)

$$f_p = B v_p, \quad (3.89)$$

- Capacitate / Rigiditate (K), (fig.3.14c);

$$f_p = K \int v_p dt; \quad (3.90)$$

- Transformator / Jacobian (J) , (fig.3.14d);

$$f_p = J^T(x_p) f_n,$$

$$v_n = J(x_p) v_p \quad (3.91)$$

- Generator de curent / Generator de viteză (v_d) (fig.3.14e)

$$f_p = f_n$$

$$v_n = v_p + v_d$$

(3.92)

- Generator de tensiune / Generator de forță (f_d), (fig.3.14f)

$$\begin{aligned} f_p &= f_n + f_p \\ v_p &= v_n \end{aligned} \quad (3.93)$$

3.3.1 Modelarea teleoperatorilor prin rețele de circuite pasive

Făcând referințe la analogia electro-mecanică, un sistem de teleoperare bilateral poate fi reprezentat printr-o rețea de circuite electrice în care sunt conectate în cascadă elemente bi-port și elemente uni-port. În fig.3.2 a fost prezentată schema generală a unui sistem de teleoperare bilateral printr-o cascadă de asemenea elemente, unde elementele terminale (uni-port) sunt operatorul uman și mediul îndepărtat, între care sunt înseriate elemente biport reprezentate de master, canalul de comunicație și slave. Variabila de trecere este viteza generalizată (cu diverse valori marcate în punctele de conexiune ale elementelor componente), iar variabila transversală este forța generalizată care se măsoară între două terminale ale fiecărui element și are de asemenea valori diferite pe parcursul rețelei.

Pentru exemplifica modul de echivalare a unui teleoperator cu o rețea de circuite electrice pasive se prezintă schemele pentru teleoperatorul master-slave general prezentat la începutul acestui. Relațiile matematice care au stat la baza echivalării sunt date de relațiile: (3.11), (3.12), (3.13). În fig.3.15 sunt prezentate a) teleoperator fără întârziere pe canalul de comunicație; b) teleoperator cu întârziere pe canalul de comunicație.

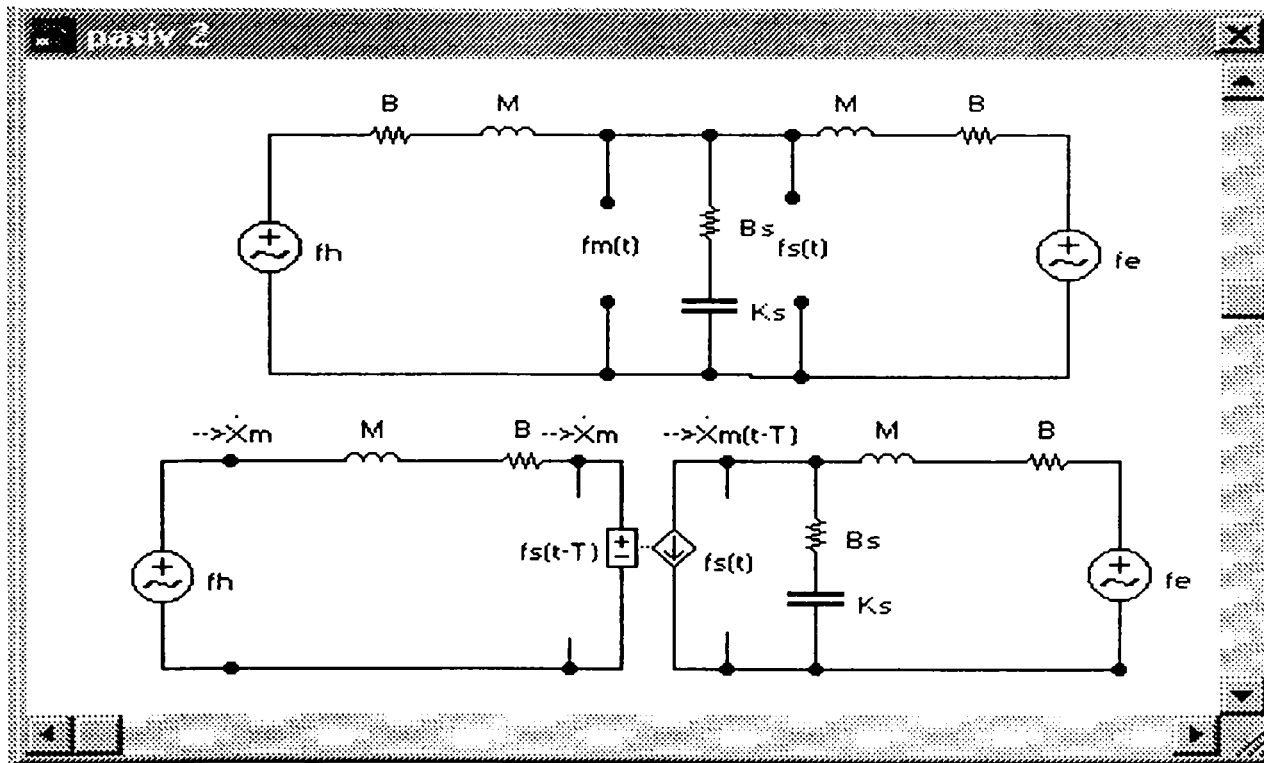


Figura 3.15

Utilizarea rețelelor de circuite pasive pentru descrierea sistemelor de teleoperare a depășit granița modelării teoretice și abstracte. **Jet Propulsion Laboratory (JPL)** în colaborare cu **Sandia National Laboratories (SNL)** a dezvoltat recent o arhitectură de control modulară pentru roboți și teleoperatoare denumită pe scurt **SMART (Sequential Modular Architecture for Robotics and Teleoperation)**. [Anderson 95] Aceasta este o arhitectură hard-soft bazată pe teoria rețelei de porturi (uni-port și bi-port). Pentru a construi, spre exemplu, un sistem complex de teleoperare se utilizează module hard (comerciabile); dispozitive de prescriere (master), elemente de execuție (slave), senzori etc. fiecare putând fi interfațate la o magistrală de calculator de tip VME (Virtual Module Europe). Fiecare modul hard este dublat printr-un modul soft care apelează o serie de subrutine aflate într-o bibliotecă specială, creată în limbajul C.

În fig.3.16 se prezintă un exemplu de simulare a unui sistem de teleoperare bilateral folosind SMART. S-au utilizat un număr de șapte module soft care sunt descrise succint în continuare:

- **KRAFT JOINTS**, simulează dispozitivul de prescriere și este un modul uni-port reprezentat printr-un generator de viteză. Se generează vectorul de viteză care are ca și componente vitezele de la nivelul articulațiilor brațului master;
- **KRAFT KIN** este un modul bi-port care realizează transformarea de coordonate din spațiul articulațiilor (J) în spațiul operațional (W). Sunt implementate următoarele ecuații neliniare:

$$f_p = J^T(x_p)f_n ; x_n = \Lambda^{-1}(x_p) ; v_n = J(x_p)v_p$$

unde $J(x_p)$ este Jacobianul transformării ; $\Lambda^{-1}(x_p)$ este transformarea de cinematică inversă de poziție din spațiul operațional (W) în spațiul articulațiilor (J).

- **INDEX** este un modul care încorporează restricțiile de mișcare pentru brațul slave, cum ar fi spre exemplu impunerea mișcării pe o linie dreaptă, un arc de cerc sau într-un plan. Acest modul mai include scala de forță și pe cea de poziție.
- **KB2** este un modul biport care simulează complianța sistemului, introducând rigiditatea K și amortizarea B.
- **PUMA KIN** este un modul care face transformarea de coordonate din spațiul operațional (W) în spațiul articulațiilor (J)

- **JR3 – JOINT** este un modul uni-port care transformă vectorul de forță (măsurat cu traductorul de forță/moment JR3) din spațiul sculei în spațiul articulațiilor folosind Jacobianul J_{TOOL} .
- **PUMA JOINTS** este un modul uni-port care menține legătura cu hardul robotului PUMA. El generează poziția pentru fiecare articulație a brațului robot care funcționează pe post de slave în cadrul sistemului de teleoperare.

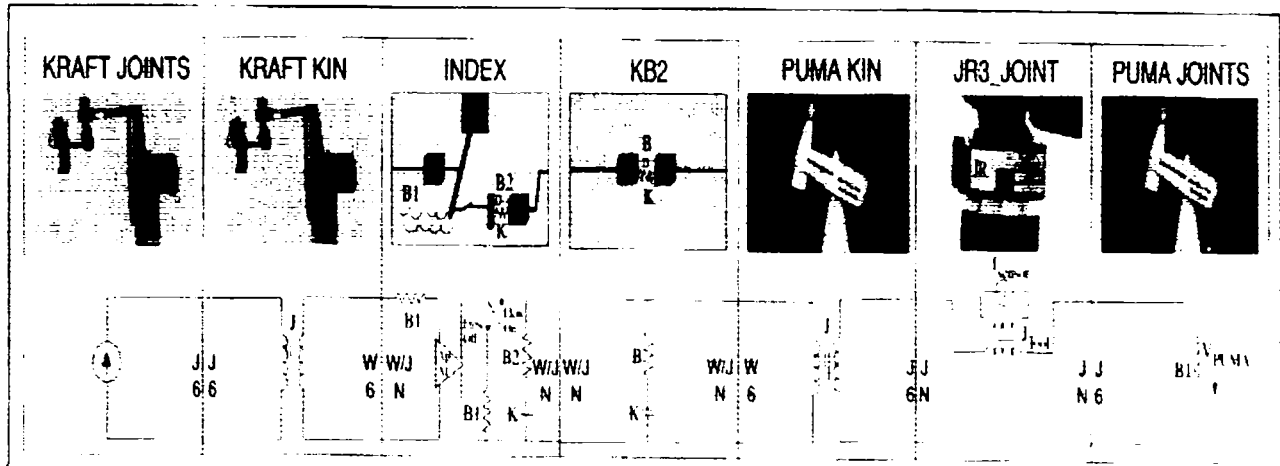


Figura 3.16

3.3.2 Analiza teleoperatorilor bilaterale folosind matricea de impedanță.

Sistemul de teleoperare bilaterală prezentat în paragraful precedent ca o rețea de elemente pasive uni-port și bi-port poate fi descris, în baza aceleiași analogii electro-mecanice, ca un singur cuadripol conectat la o sursă de tensiune sau de curent, pe intrare și la o sarcină pe ieșire. Față de modelul mecanic și cel al rețelei

de circuite asive care acordă importanță mișcării, modelul cuadripol permite o analiză mai profundă a forței de interacțiune cu mediul. Ideea de reprezentare a unui teleoperator master-slave printr-un cuadripol nu este chiar nouă. B. Hanaford reprezintă sistemul de

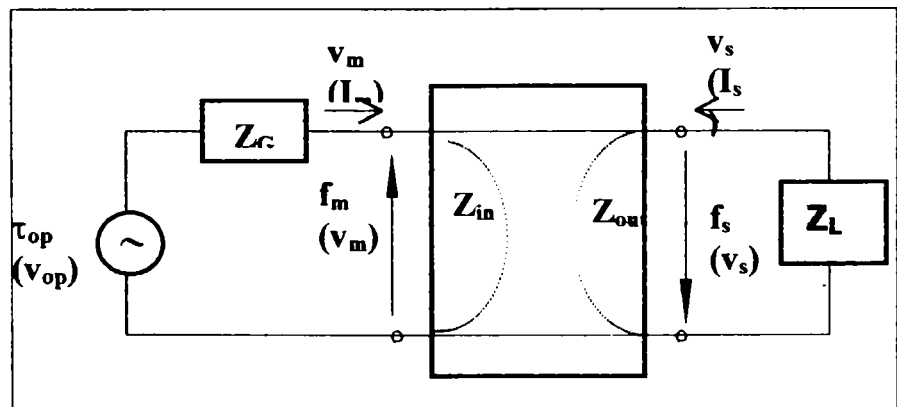


Figura 3.17

teleoperator master-slave printr-un cuadripol nu este chiar nouă. B. Hanaford reprezintă sistemul de

teleoperare bilateral printr-un cuadripol la intrarea căruia se cuplează o sursă de putere, care reprezintă operatorul, iar la ieșirea cuadripolului este conectată o altă sursă de putere care reprezintă obiectul manipulat și încărcarea datorată interacțiunii cu mediul îndepărtat [Hanaford 89]. Această reprezentare se adaptează mai bine dacă pentru analiză se utilizează matricea parametrilor hibridi (matricea H). Pentru analiza bazată pe matricea de impedanță (matricea Z) se va folosi o reprezentare mai compactă, propusă de Yoshikava și Y.Yokokohji [Yokokohji 94], însă fără a se schimba natura problemei. În acest model operatorul este reprezentat prin forța τ_h și impedanța Z_h care sunt conectate la intrarea cuadripolului, iar interacțiunea cu mediul îndepărtat este reprezentată prin impedanța Z_L (fig.3.18).

Pentru a ilustra posibilitățile metodei de analiza bazată pe matricea de impedanță se va considera pentru simplitate un teleoperator master-slave cu un singur grad de libertate. În fig.3.19 se prezintă schematic acest teleoperator scoțând în evidență parametrii care determină dinamica mișcării (masa inerțială, amortizarea și rigiditatea) și forțele de interacțiune din sistem.

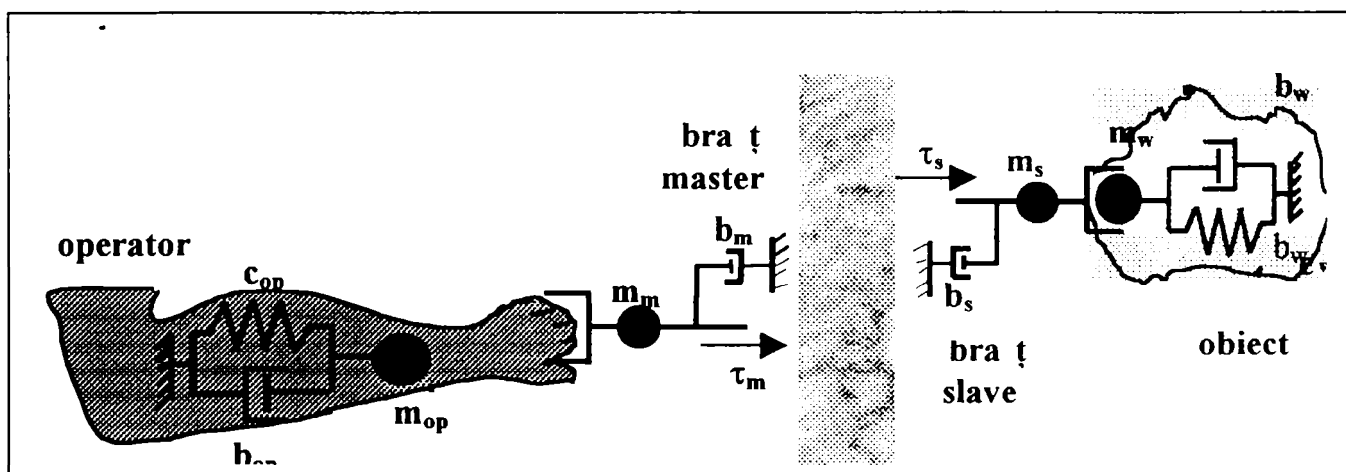


Figura 3.19

Dinamica brațului master și a brațului slave este descrisă de următoarele două ecuații:

$$\text{Master } m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m = \tau_m + f_h \quad (3.93)$$

$$\text{Slave: } m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s = \tau_s - f_s \quad (3.94)$$

unde: x_m și x_s reprezintă pozițiile părții de master și respectiv părții de slave, m_m și m_s sunt masele inerțiale, b_m și b_s sunt coeficienții forțelor de frecare vâscoasă, f_h este forța aplicată de operator brațului master, iar f_s forța aplicată de slave obiectului cu care vine în contact. Forța (momentul) dezvoltată de actuatorul brațului master s-a

notat cu τ_m , iar forța (momentul) dezvoltată de actuatorul brațului slave a fost notată cu τ_s .

Ecuțiile (3.93) și (3.94) sunt similare cu cele de la (3.1) și (3.32). Diferența constă în faptul că unele descriu teleoperatorul global, cu n grade de mobilitate, iar celelalte se referă la un singur grad de mobilitate.

Dinamica obiectului manipulat s-a aproximat cu cea a unui sistem liniar simplu de tipul arc-amortizor-masă;

$$f_s = m_w \ddot{x}_s + b_w \dot{x}_s + c_w x_s \quad (3.95)$$

unde: m_w , b_w și c_w reprezintă masa, coeficientul frecărilor vâscoase și respectiv rigiditatea obiectului.

Dinamica operatorului uman poate fi aproximată în același mod și se obține următoarea relație;

$$\tau_{op} - f_h = m_{op} \ddot{x}_m + b_{op} \dot{x}_m + c_{op} x_m \quad (3.96)$$

unde: m_{op} , b_{op} , c_{op} reprezintă masa, coeficientul frecărilor vâscoase și respectiv rigiditatea operatorului, iar τ_{op} este forța generată de mușchii operatorului. Dinamica operatorului are o importanță mare în atingerea unor performanțe în cadrul sistemului de teleoperare, fapt pentru care mulți dintre cercetători analizează mai detaliat acest aspect cum o fac [Lee 93], [Akazawa 95], [Kazerooni 94].

Pentru comanda sistemului de teleoperare în cauză, se propune o lege de control generalizat care utilizează toate posibilitățile de reacție inversă. Este de fapt o adaptare a controlului după variabilele de stare a unui sistem automat de reglare a poziției la un sistem de urmărire cu acțiune bilaterală și o extensie a legii de control experimentată de T. Fukuda și alții [Fukuda 86]. Respectivii nu utilizează însă reacția inversă de accelerație. Conform legii de control propuse mărimile de intrare în sistem sunt forțele (momentele) dezvoltate de actuatorii brațului master și cei ai brațului slave.

$$\tau_m = \begin{bmatrix} k_{mpm} + k'_{mpm} \frac{d}{dt} + k''_{mpm} \frac{d^2}{dt^2} & k_{mfm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_m \\ f_h \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{mps} + k'_{mps} \frac{d}{dt} + k''_{mps} \frac{d^2}{dt^2} & k_{mfs} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_s \\ f_s \end{bmatrix} \quad (3.97)$$

$$\tau_s = \begin{bmatrix} k_{spm} + k'_{spm} \frac{d}{dt} + k''_{spm} \frac{d^2}{dt^2} & k_{sfm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_m \\ f_h \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{sps} + k'_{sps} \frac{d}{dt} + k''_{sps} \frac{d^2}{dt^2} & k_{sfs} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_s \\ f_s \end{bmatrix} \quad (3.98)$$

unde: k_{mpm} , k'_{mpm} , k''_{mpm} și k_{mtm} sunt factorii de amplificare pe canalele de reacție (de poziție, de viteză, de accelerație și de forță) în partea master, k_{mps} , k'_{mps} , k''_{mps} și k_{mfs} sunt factorii de amplificare pe canalele de reacție (de poziție, viteză, accelerație și de forță) de la slave spre master. În mod similar se definesc k_{spm} , k'_{spm} , k''_{spm} , k_{stm} , k_{sps} , k'_{sps} , k''_{sps} și k_{sfs} din ecuația (3.98).

Legea de control propusă a fost denumită *lege de control generalizată* pentru că include toate variantele de control întâlnite în practica teleoperatorilor bilaterale. Se prezintă spre exemplu trei dintre legile de control cu răspândire mai mare în teleoperare și care se regăsesc în legea propusă.

1. **Controlul în modul poziție-poziție sau controlul de tip simetric.** Legea de control în acest caz se obține din controlul generalizat dacă; $k_{mpm} = k_{mps} \neq 0$, $k'_{mpm} = k_{sps} \neq 0$, $k_{spm} = k_{sps} \neq 0$, restul factorilor de amplificare fiind nuli.
2. **Controlul în poziție cu reflectarea încărcării sau controlul de tip asimetric.** Legea de control în acest caz se obține dacă; $k_{mfs} \neq 0$, $k_{spm} = k_{sps} \neq 0$, $k'_{sps} \neq 0$, restul factorilor de amplificare fiind nuli.
3. **Controlul în modul forță-forță sau servocontrolul în forță.** Legea de control în acest caz se obține dacă; $k_{mtm} \neq 0$; $k_{mfs} \neq 0$; $k_{sps} = k_{spm} \neq 0$; $k'_{sps} \neq 0$, restul factorilor de amplificare fiind nuli.

Primele două legi de control au fost analizate în detaliu în paragraful 3.2. Pentru calculul elementelor matricii de impedanță $Z(s)$ se folosesc echivalențele rezultate din analogia electro-mecanică și anume:

- Viteza brațului master x_m ___ intensitatea curentului I_m
- Viteza brațului slave x_s ___ intensitatea curentului I_s
- Forța operatorului τ_o ___ tensiunea U_{op}
- Forța din partea master f_m ___ tensiunea U_m
- Forța în partea slave f_s ___ tensiunea U_s

Rescriind ecuațiile (3.93), (3.94), (3.97) și (3.98) în baza echivalenței de mai sus și utilizând transformata Laplace în condiții inițiale nule se obține:

$$T_m + U_m = (m_m s + b_m) \cdot I_m = Z_m I_m \quad (3.99)$$

$$T_s - U_s = (m_s s + b_s) \cdot I_s = Z_s I_s \quad (3.100)$$

$$\begin{aligned} T_s &= \left[k_{spm} \frac{1}{s} + k'_{spm} + k''_{spm} s \quad k_{sfm} \right] \cdot \begin{bmatrix} I_m \\ U_m \end{bmatrix} - \left[k_{sps} \frac{1}{s} + k'_{sps} + k''_{sps} s \quad k_{sfs} \right] \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ U_s \end{bmatrix} = \\ &= [P_s \quad Q_s] \cdot \begin{bmatrix} I_m \\ U_m \end{bmatrix} - [R_s \quad S_s] \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ U_s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.101)$$

$$\begin{aligned} T_s &= \left[k_{spm} \frac{1}{s} + k'_{spm} + k''_{spm} s \quad k_{sfm} \right] \cdot \begin{bmatrix} I_m \\ U_m \end{bmatrix} - \left[k_{sps} \frac{1}{s} + k'_{sps} + k''_{sps} s \quad k_{sfs} \right] \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ U_s \end{bmatrix} = \\ &= [P_s \quad Q_s] \cdot \begin{bmatrix} I_m \\ U_m \end{bmatrix} - [R_s \quad S_s] \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ U_s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.102)$$

unde: T_m și T_s reprezintă tensiunile echivalente momentelor τ_m și τ_s dezvoltate de actuatorii master și respectiv slave. Eliminând aceste marimi din relațiile (3.99), (3.100), (3.101) și (3.102) se obține următoarea ecuație matricială:

$$\begin{bmatrix} Z_m - P_m & -R_m \\ -P_s & -(Z_s + R_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_m \\ -I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + Q_m & -S_m \\ Q_s & -(1 + S_s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_m \\ U_s \end{bmatrix} \quad (3.103)$$

Din această relație se determină elementele matricii de impedanță $Z(s)$.

$$Z_{ms} = \frac{-(1 + S_s)R_m + S_m(Z_s + R_s)}{(1 + S_s)(1 + \theta_m) - S_m\theta_s} = \frac{N_{12}}{D_z} \quad (3.104)$$

$$Z_{mn} = \frac{(1 + S_s)(Z_m - P_m) + S_m P_s}{(1 + S_s)(1 + \theta_m) - S_m\theta_s} = \frac{N_{11}}{D_z} \quad (3.105)$$

$$Z_{sm} = \frac{(1 + \theta_m)P_s + \theta_s(Z_m - P_m)}{(1 + S_s)(1 + \theta_m) - S_m\theta_s} = \frac{N_{21}}{D_z} \quad (3.106)$$

$$Z_{ss} = \frac{(1 + \theta_m)(Z_s + R_s) - \theta_s R_m}{(1 + S_s)(1 + \theta_m) - S_m\theta_s} = \frac{N_{22}}{D_z} \quad (3.107)$$

În aceste condiții determinantul matricii de impedanță $Z(s)$ are următoarea formă:

$$|Z| = \frac{(Z_m - P_m)(Z_s + R_s) + P_s R_m}{(1 + S_s)(1 + \theta_m) - S_m\theta_s} = \frac{D_y}{D_z} \quad (3.108)$$

Matricea de admitanță se obține prin inversarea matricii Z .

$$Y = Z^{-1} = \begin{bmatrix} Y_{mn} & Y_{ms} \\ Y_{sm} & Y_{ss} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{N_{22}}{D_y} & \frac{-N_{12}}{D_y} \\ -\frac{N_{21}}{D_y} & \frac{N_{11}}{D_y} \end{bmatrix} \quad (3.109)$$

Matricile de impedanță ale operatorului și ale mediului îndepărtat se exprimă, conform convențiilor prezentate mai înainte, astfel:

$$Z_L = m_w s + b_w + c_w \cdot \frac{1}{s} \quad (3.110)$$

$$Z_G = m_{op} s + b_{op} + c_{op} \cdot \frac{1}{s} \quad (3.111)$$

Înainte de a evalua performanțele teleoperatorului descris prin relațiile de mai sus trebuie stabilit un reper față de care să se raporteze rezultatele evaluării. În multe lucrări de specialitate reperul în discuție îl reprezintă teleoperatorul ideal, denumit de unii teleoperator cu *reacție kinesthetică* ideală [Hanaford 89], [Yokokohji 89], iar de alții teleoperator cu *transparentă* totală [Lee 93], [Tachi 96].

Deoarece în referințele enumerate mai sus (și în cele neenumerate) nu se specifică, suficient de clar, cum trebuie să răspundă teleoperatorul ideal comenzilor date de operatorul uman se propune o definiție a acestui răspuns, care pentru teleoperatorul master-slave analizat are trei componente [Diaconu 96b].

Definiție. Următoarele trei răspunsuri sunt definite ca răspunsuri ideale ale unui sistem master-slave bilateral:

- **Răspunsul ideal I.** Răspunsurile în poziție x_m și x_s la comanda τ_{op} sunt identice indiferent de dinamica obiectului manipulat.
- **Răspunsul ideal II.** Răspunsurile în forță f_m și f_s la comanda τ_{op} sunt identice oricare ar fi dinamica obiectului manipulat.
- **Răspunsul ideal III.** Atât răspunsurile în poziție cât și cele în forță sunt simultan identice la o comandă τ_{op} oricare ar fi dinamica obiectului manipulat.

Din definiția de mai sus se deduce ușor că răspunsul ideal III este realizat numai atunci când operatorul uman manipulează direct obiectul îndepărtat. Realizarea acestui răspuns reprezintă ținta finală spre care tinde un sistem master-slave și care, evident, nu poate fi atinsă.

Pentru a stabili condițiile de realizare a celor trei răspunsuri ideale se definesc în continuare doi parametri ai sistemului master-slave. Primul este *coeficientul de transmitere a vitezei* între unitatea master și unitatea slave. În conformitate cu echivalența rezultată din analogia electro-mecanică acest coeficient se definește ca raport între curentul din partea master și curentul din partea slave.

$$T_i = \frac{I_m}{I_s} \quad (3.112)$$

Al doilea parametru definit este *coeficientul de transmitere a forței* dintre master și slave, care este dat de raportul a două tensiuni.

$$T_u = \frac{U_m}{U_s} \quad (3.113)$$

Din relațiile (3.104), (3.105), (3.106) și (3.107) la care se adaugă relația $U_s = Z_L I_s$ se obține:

$$T_i = \frac{Z_{ss} + Z_L}{Z_{sm}} = \frac{N_{22} + D_z Z_L}{N_{21}} \quad (3.114)$$

În mod similar din relațiile enumerate mai sus și din relația $U_s = Z_L I_s$ se obține:

$$T_u = \frac{Y_{ss} + \frac{1}{Z_L}}{-Y_{sn}} = \frac{N_{11} Z_L + D_y}{N_{21} Z_L} \quad (3.115)$$

Condiția pentru **răspunsul ideal I** este realizată dacă $T_i = 1$ pentru orice Z_L .

Aceasta presupune ;

$$(A); D_z = 0 \quad (3.116)$$

$$(B); N_{22} = N_{21} \neq 0 \quad (3.117)$$

Condiția pentru realizarea **răspunsului ideal II** este dată de relația $T_u = 1$ pentru orice Z_L . Aceasta presupune:

$$(C); D_y = 0 \quad (3.118)$$

$$(D); N_{21} = N_{11} \neq 0 \quad (3.119)$$

Din (3.115) se observă că T_u nu poate fi definit dacă impedanța încărcării (Z_L) este nulă, adică brațul slave funcționează în gol.

Impedanța de intrare a cuadripolului prezentat în fig.3.17, ca model al teleoperatorului, este dată de relația următoare :

$$Z_{in} = Z_{mn} - \frac{Z_{ms} \cdot Z_{sm}}{Z_{ss} + Z_L} = \frac{D_y - N_{11} Z_L}{N_{22} + D_z Z_L} \quad (3.120)$$

Dacă sunt îndeplinite simultan condițiile (A), (B), (C) și (D) atunci din (3.120) se obține relația:

$$Z_{in} = Z_L \quad (3.121)$$

Această relație arată condiția ca un teleoperator să fie complet transparent, adică operatorul să simtă direct obiectul.

Propoziție : *Condiția ca un teleoperator să realizeze reacția kinesthetică ideală este ca impedanța sa de intrare să fie egală cu impedanța de sarcină.*

Condițiile (A) și (C) nu pot fi definite pe baza matricei de impedanță și nici a matricei de admitanță, (deoarece se anulează numitorul unor termeni diin aceste matrici) . Din acest motiv se va folosi matricea catenă K definită prin următoarele relații:

$$\begin{aligned} U_1 &= K_{11} \cdot U_2 + K_{12}(-I_2) \\ I_1 &= K_{21} \cdot U_2 + K_{22}(-I_2) \end{aligned} \quad (3.122)$$

Folosind elementele introduse prin relațiile (3.104) ÷ (3.107) matricea catenă are următoarea formă:

$$\begin{aligned} U_1 &= K_{11} \cdot U_2 + K_{12}(-I_2) \\ I_1 &= K_{21} \cdot U_2 + K_{22}(-I_2) \end{aligned} \quad (3.123)$$

Dacă sunt îndeplinite simultan condițiile (A), (B), (C) și (D) atunci se obține următoarea formă particulară a matricii în cauză:

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.124)$$

Satisfacerea condiției (C) este imposibilă dacă nu sunt utilizate reacțiile inverse de accelerație. Aceasta se poate observa ușor dacă în relațiile (3.101) și (3.102) se consideră nuli factorii de amplificare k''_{mpm} , k''_{mps} , k''_{sps} , și k''_{sps} . Aceasta conduce la o concluzie foarte importantă și anume aceea că pentru realizarea unui teleoperator bilateral care să tindă spre răspunsurile ideale, prezentate mai înainte, trebuie o anumită strategie pentru proiectarea schemei de comandă. Ea trebuie să ia în considerare, în mod obligatoriu canele de reacție după accelerație. Această idee, care va fi accentuată pe parcursul tezei și susținută cu alte argumente teoretice și practice este aproape ignorată în lucrările de specialitate privind cercetarea teoretică și experimentală din domeniu. Una dintre explicațiile acestei stări de fapt pote fi legată de dificultățile realizării reacției inverse de accelerației în comparație cu cea de viteză sau poziție.

CA Contribuție personală:

Una dintre contribuțiile personale cele mai importante în cercetarea teoretică a teleoperatorilor bilaterale este aceea că demonstrează rolul reacției de accelerație în obținerea unei reacții kinesthetice ideale. Aceasta a fost demonstrată prin analiza bazată pe model mecanic și este reconfirmată pe baza analizei cu matricea de impedanță prezentată mai sus.

3.3.3 Evaluarea manevrabilității unui sistem de teleoperare

Literatura de specialitate și standardele în vigoare conțin relativ puține referințe privind indicatorii de performanță specifici sistemelor de teleoperare. Referințele existente fac, în general, trimitere la performanțe care pot fi măsurate pe cale experimentală [Bejczy 77], [Kovacs 82]. Aceasta presupune existența teleoperatorului și a sarcinii de teleoperare (funcției) de îndeplinit. În majoritatea din cazuri, aprecierea unei performanțe se face prin înregistrarea timpului în care teleoperatorul rezolvă o sarcină prestabilită și eventual eroarea cu care este executată. Un indicator de calitate mai cunoscut, în contextul amintit mai înainte, este criteriul complex de *dexteritate* al sistemului.

În ceea ce privește indicatorii de calitate, specifici teleoperatorile bilaterale, care să poată fi evaluați pe cale analitică în faza de proiectare a sistemului și care alături de indicatorul de cost să poată fi utilizați pentru optimizarea sistemului, se poate afirma că nu există nimic standardizat ci doar indicatori acceptați sau criticați. În categoria celor acceptați poate fi inclus și *indexul de manevrabilitate* introdus de G. J. Raju, care oferă și o metodă de evaluare a acestui indicator pe cale experimentală [Raju 90]. Y. Yokokohji și alții au acceptat acest indicator și au dezvoltat o metodologie de evaluare a acestuia pe cale analitică [Yokokohji 94]. Indicatorul de manevrabilitate este specific teleoperatorilor bilaterale și face referiri la calitatea reacției kinesthetice permițând raportarea sistemului real la sistemul cu o cuplare kinesthetică ideală.

CA Contribuție personală:

Se poate considera contribuție personală metoda de evaluare a manevrabilității unui teleoperator bilateral prezentată în continuare. Această metodă este inspirată după cea propusă de cercetătorul japonez Y. Yokokohji, care folosește funcții de transfer în evaluare, și consideră o singură componentă pentru aprecierea manevrabilității. Autorul folosește matricea de impedanță pentru evaluare și stabilește două

componente (de poziție și de forță) pentru indicatorul de manevrabilitate (conform viziunii proprii prezentate în subcapitolul anterior)

Se introduc patru funcții de transfer care pun în corespondență forța τ_{OP} dezvoltată de operator cu poziția prațului master x_m , poziția brațului slave x_s , forța dezvoltată de master f_m și forța dezvoltată de slave f_s . Ținând cont de echivalența bazată pe analogia electro-mecanică și de ecuațiile (3.105), (3.106), (3.107) și (3.108) se obțin următoarele expresii ale funcțiilor de transfer amintite.

$$G_{mp}(s) = \frac{s \cdot U_{op}(s)}{I_m(s)} = \frac{s[N_{22} + D_z Z_L]}{s^2[D_y + N_{11}Z_L + N_{22}Z_G + D_z Z_L Z_G]} \quad (3.125)$$

$$G_{sp}(s) = \frac{s \cdot U_{op}(s)}{I_s(s)} = \frac{s[N_{21}]}{s^2[D_y + N_{11}Z_L + N_{22}Z_G + D_z Z_L Z_G]} \quad (3.126)$$

$$G_{mf}(s) = \frac{U_{op}(s)}{U_m(s)} = \frac{s^2[D_y + N_{11}Z_L]}{s^2[D_y + N_{11}Z_L + N_{22}Z_G + D_z Z_L Z_G]} \quad (3.127)$$

$$G_{sf}(s) = \frac{U_p(s)}{U_f(s)} = \frac{s^2[N_{21}Z_L]}{s^2[D_y + N_{11}Z_L + N_{22}Z_G + D_z Z_L Z_G]} \quad (3.128)$$

Indicatorul de manevrabilitate se stabilește pe baza a doi indici; indicele de poziție J_p și indicele de forță J_f care sunt dați de următoarele expresii:

$$J_p = \int_0^{\omega_{max}} |G_{mp}(j\omega) - G_{sp}(j\omega)| \left| \frac{1}{1 + j\omega T} \right| d\omega \quad (3.129)$$

$$J_f = \int_0^{\omega_{max}} |G_{mf}(j\omega) - G_{sf}(j\omega)| \left| \frac{1}{1 + j\omega T} \right| d\omega \quad (3.130)$$

unde: ω_{max} este maximul benzii de frecvență a teleoperatorului, iar T (cu $T \omega_{max} > 1$) este constanta de timp a unui element de întârziere de ordinul unu. Acest element s-a utilizat pentru accentuarea indicilor prezentați în domeniul frecvențelor joase. El joacă rolul unui factor de pondere. Pot fi folosiți și alți factori de pondere [Yokokohji 94].

Dacă sistemul realizează **răspunsul ideal I**, indicele J_p este egal cu zero, iar când sistemul realizează **răspunsul ideal II** indicele J_f devine zero. Dacă cei doi indici sunt simultan nuli atunci sistemul realizează **răspunsul ideal III**.

Dificultatea în evaluarea celor doi indici este dată de faptul că este greu de stabilit valorile impedanțelor Z_L și Z_G , care intră în expresiile acestor indici. Din acest motiv poate ar fi fost mai nimerit să se utilizeze alți indici care să nu apeleze la aceste impedanțe, numai că, pe de altă parte, manevrabilitatea este un indicator legat cu precădere de operator. El poate fi considerat ca o măsură a operatorului, mai precis a dinamicii acestuia, motiv pentru care nu se poate renunța la impedanța Z_G .

Luarea în considerare a două cazuri particulare de funcționare a teleoperatorilor bilaterale poate fi o primă etapă în stabilirea manevrabilității respectivului teleoperator. Aceste cazuri corespund funcționării în gol a teleoperatorului când $Z_L = 0$ și cazului când brațul master este în contact cu un mediu rigid definit prin $Z_L = \infty$. În aceste cazuri relațiile (3.125) ÷ (3.126) devin mai simple și au următoarele expresii:

Pentru $Z_G = 0$;

$$G_{mp}(s) - G_{sp}(s) = \frac{s[N_{22} - N_{21}]}{s[D_y + N_{22}Z_G]} \quad (3.131)$$

$$G_{mf}(s) - G_{sf}(s) = \frac{s^2 D_y}{s^2 [D_y + N_{22}Z_G]} \quad (3.132)$$

Pentru $Z_L = \infty$;

$$G_{mp}(s) - G_{sp}(s) = \frac{D_z}{s[N_{11} + D_z Z_G]} \quad (3.133)$$

$$G_{mf}(s) - G_{sf}(s) = \frac{s[N_{11} - N_{21}]}{s[N_{11} + D_z Z_G]} \quad (3.134)$$

Prin egalarea cu zero a expresiilor (3.131), (3.132), (3.133) și (3.134) se obțin condițiile (A), (B), (C) și respectiv (D).

Pentru a demonstra viabilitatea indicilor de performanță introduși pentru evaluarea manevrabilității unui sistem master-slave se va considera un exemplu numeric în care se vor calcula și se vor interpreta rezultatele obținute pentru acești indici. Se consideră pentru aceasta chiar *sistemul master slave experimental* realizat de autor și prezentat în capitolul următor. Sunt luate în considerare trei categorii de control:

1. Controlul în **modul poziție- poziție** (teleoperator de tip simetric).

2. Controlul în **poziție cu reflectarea forței de încărcare** (teleoperator de tip asimetric).
3. Controlul **modul forță–forță** (servocontrolul forței).

Cele trei moduri de comandă sunt incluse de legea de control prezentată prin relațiile (3.97), (3.98). Se consideră trei tipuri de obiecte care vin în contact cu brațul slave: obiectul 1 (*foarte ușor*), obiectul 2 (*mediu*) și obiectul 3 (*rigid*). La acestea se adaugă cele două cazuri particulare prezentate mai înainte : funcționarea în gol și funcționarea în *spațiul cu constrângeri* reprezentat de mediul cu impedanță infinită.

Parametrii luați în calcul pentru teleoperator, mediu și operatorul uman sunt prezentați în tabelul 3.1. Factorii de amplificare pe căile de reacție inversă, aleși pentru cele trei categorii de scheme de comandă sun prezentați în tabelul 3.2.

Tabelul 3.1

PARAMETRI LUAȚI ÎN CALCUL	MASA INERTIALĂ M_i [KG]	AMORTIZAREA B_i [NS/M]	RIGIDITATEA C_i [N/M]
Master (i=m)	6	0,19	•
Slave (i=s)	6	0,19	•
Operator (i=op)	2	2	10
Obiectul 1 (i=w1)	0,5	0,1	1
Obiectul 2 (i=w2)	3	1	50
Obiectul 3 (i=w3)	$1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$

Tabelul 3.2

FACTOR DE AMPLIFICARE	K_{MPM} [N/M]	K_{MPS} [N/M]	K_{SPM} [N/M]	K_{SPS} [N/M]	K_{MVM} [NS/M]	K_{SVS} [NS/M]	K_{MFM}	K_{MFS}
1. Control simetric	-120	-120	120	120	-50	50		
2. Control asimetric			120	120		50		1
3. Control în forță			-120	-120		50	2.5	3.5

Pentru evaluarea indicilor de manevrabilitate s-a conceput un program de calcul special în MATLAB. În fig.3.20 se prezintă indicii de manevrabilitate pentru cazurile specificate în tabelele de mai sus.

Din analiza rezultatelor obținute s-au desprins câteva concluzii, care sunt prezentate succint în continuare.

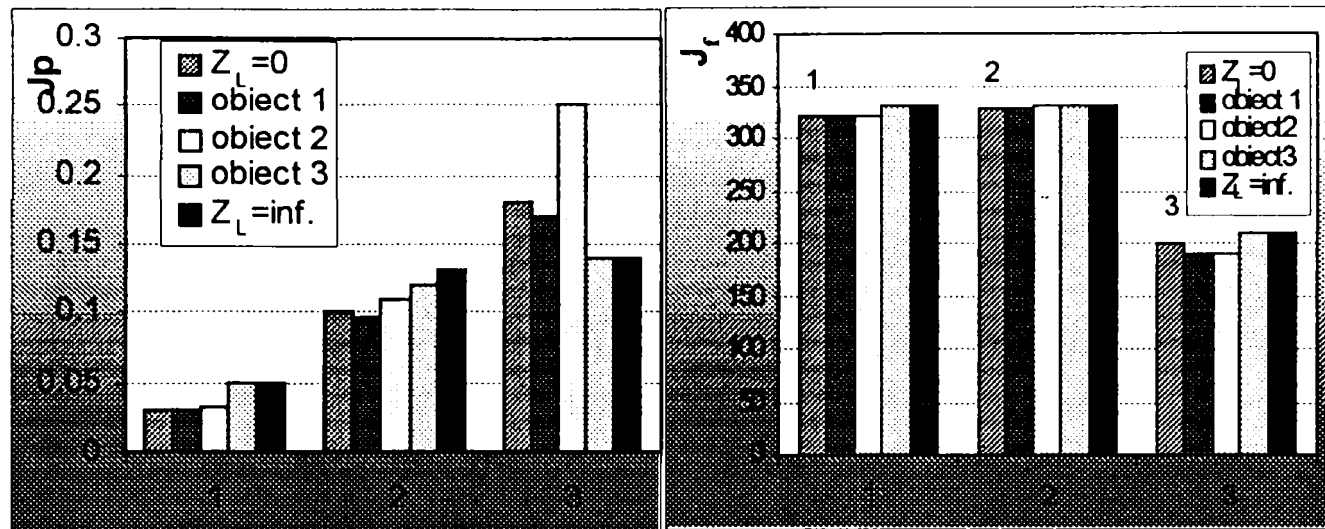


Figura 3.20

- Manevrabilitatea unui sistem este cu atât mai bună cu cât indicii J_p și J_f sunt mai apropiați de zero.
- Pentru teleoperatorul de tip simetric indicele J_p are valoarea cea mai mică, în schimb indicele J_f are valoare mare, comparativ cu celelalte două moduri de comandă.
- Pentru servocontrolul forței cei doi indici au valori medii, iar diferențierile determinate de impedanța mediului sunt mai mici decât în celelalte cazuri prezentate.
- Nu se poate stabili cu certitudine metoda de comandă cea mai avantajoasă din punctul de vedere al manevrabilității.
- Variația parametrilor dinamici ai operatorului uman influențează mai puternic indicatorul de manevrabilitate decât variația parametrilor dinamici ai mediului.

Capitolul 4

Verificarea experimentală a conceptelor legate de teleoperatoarele bilaterale

4.1 Scopul și organizarea cercetării experimentale

În capitolele precedente s-au emis o serie de ipoteze asupra legilor care guvernează comportarea sistemelor de teleoperare controlate bilateral în poziție și forță. O parte din aceste ipoteze au fost lansate în urma unor analize care s-au făcut pe modele analitice teoretice și generale. În acest capitol sunt prezentate câteva experimente destinate validării în practică a ipotezelor amintite. Această validare nu poate fi făcută decât pe un model real. Din aceasta cauză s-a realizat un sistem de teleoperare de tip master-slave denumit “experimental” pentru faptul că nu a fost conceput pentru o aplicație anume ci pentru realizarea testelor și verificărilor legate de conceptele teoretice introduse de autor pe parcursul acestei teze. Pornind de la această idee, s-a conceput o structură flexibilă pentru acest sistem, care să permită implementarea mai multor variante de control bilateral.

Deoarece majoritatea parametrilor tehnici ai componentelor din structura sistemului au fost cunoscuți, s-a procedat, în primă fază, la simularea funcționării sistemului master–slave pentru o apreciere preliminară a comportării acestuia, înțelegerea unor limitări în proiectare și pentru obținerea unor valori orientative pentru parametrii sistemului de control bilateral care conduc spre o funcționare corectă a sistemului. Simulările și experimentele pe modelul real au fost focalizate, în principal, pe determinarea performanțelor variantelor (schemelor) de control bilateral, analizate teoretic în capitolele precedente.

Concepția sistemului experimental, realizarea lui fizică, modelarea și simularea acestuia, organizarea testelor pe modelele de simulare și pe modelul real, prelucrarea și interpretarea rezultatelor experimentale sunt părțile acestui capitol în care autorul aduce o importantă contribuție personală, legată de cercetarea experimentală în general și de cercetarea teleoperatoarelor bilaterale, în particular.

4.2 Structura sistemului master-slave experimental

Imaginea din fig.4.1 se prezintă o vedere de ansamblu a sistemului master-slave experimental. Elementele principale din structura acestui sistem sunt cei doi roboți **Unimation-PUMA 600**. În legătură cu aceștia se fac următoarele două precizări:



Figura 4.1

1. Roboții, de fabricație americană, sunt cei mai “populari”, în sensul că sunt răspândiți în majoritatea centrelor de cercetare științifică profilate pe domeniul roboticii și al teleoperării. Prin urmare literatura de specialitate este bogată în referințe care oferă date legate de caracteristicile tehnice și performanțele acestor roboți.
2. Cei doi roboți (fabricați în 1982) au fost donați de institutul de cercetări I.P.A. Stuttgart din Germania în baza unor colaborări științifice. Nici unul nu era funcțional în momentul donației, unuia lipsindu-i chiar sistemul de comandă. Această conjunctură a stat la baza ideii originale de a realiza un sistem master-slave bilateral care să includă cele două brațe robot. Prin contribuția exclusivă a autorului unul dintre roboți funcționează la parametri normali, iar celălalt (căruia îi lipsește sistemul de comandă) funcționează ca manipulator. În aceste condiții ideea menționată mai înainte, apreciată chiar de specialiști de la institutul donator, a putut fi materializată, sistemul master-slave fiind funcțional în cadrul Laboratorului de Robotică din Universitatea “Politehnica” din Timișoara. În fig.4.2 sunt prezentate, schematizat, principalele componente din structura sistemului master-slave experimental, evidențiindu-se legăturile funcționale dintre acestea. Aceste componente sunt prezentate succint în cele ce urmează.

1. **Brațul master** este, în fapt, brațul robot Unimate-PUMA 600. Acest braț are o structură antropomorfă (asemănătoare cu cea a brațului uman) și posedă șase grade de libertate, trei pentru poziționarea efectorului final și trei pentru orientarea în spațiu a

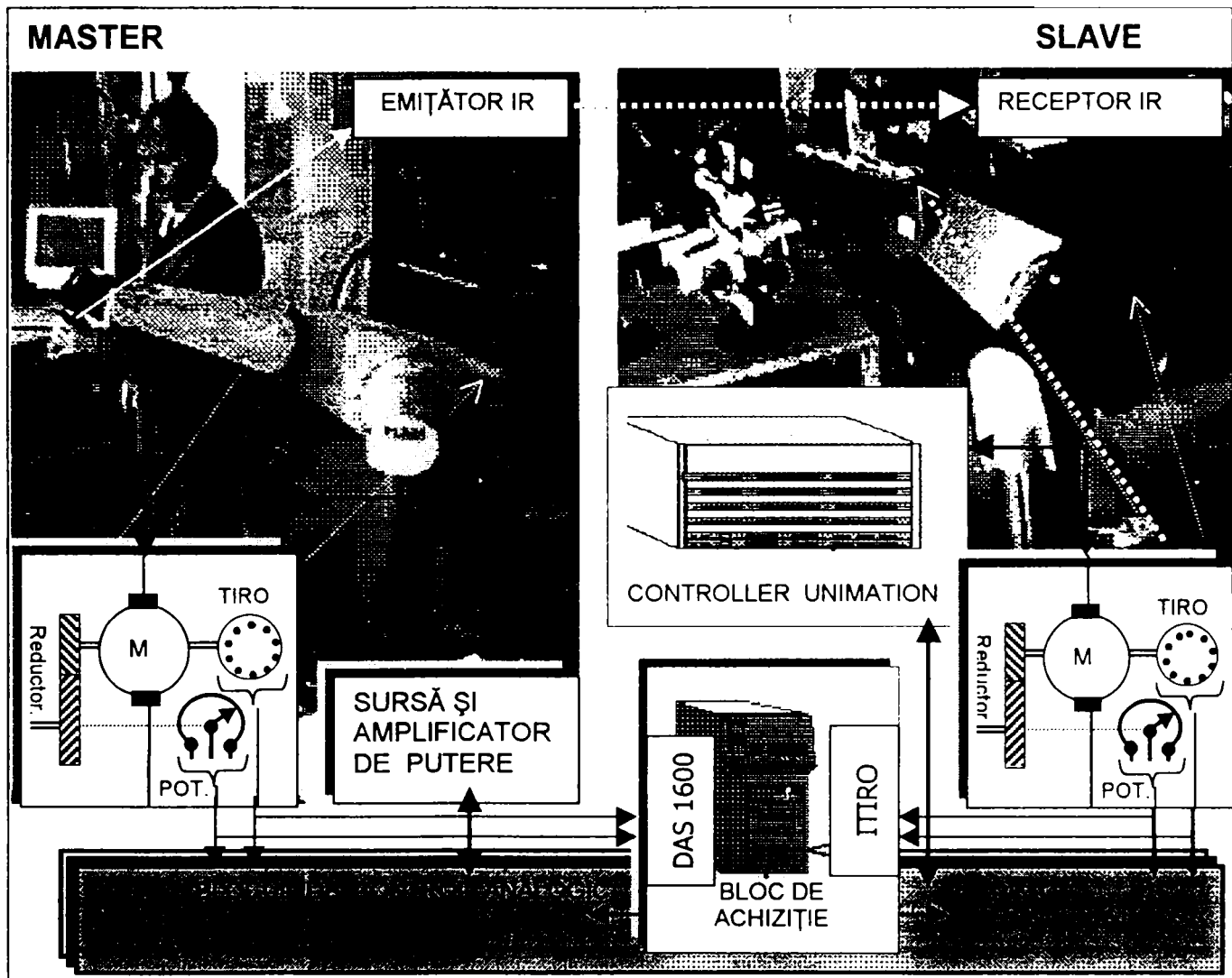


Figura 4.2

acestui. Fiecare articulație este acționată de câte un motor de curent continuu. Pentru măsurarea pozițiilor unghiulare brațul are două sisteme de măsurare (redundante). Primul este realizat cu traductoare potențiometrice montate după reductoarele de turație, iar al doilea este realizat cu traductoare incrementale de rotație optice (TIRO), cu 200 impulsuri pe tură, care sunt montate pe axul motorului. În fig.1A și în tabelulul 1A din Anexa A sunt specificați parametri tehnici ai brațului master (dimensiuni, curse, momente de inerție, parametri motoarelor, etc.). Sunt prezentați numai acei parametri care au fost luați în calcul în faza de simulare a sistemului și în faza de proiectare a shemelor de comandă pentru sistemul în discuție. Pe brațul master, în locul efectorului final, s-a montat un dispozitiv de comandă manuală. Acest dispozitiv este de fapt dispozitivul terminal de la *manșa* de comandă a elicopterului PUMA (coincidență de nume), care este prezentat în imaginea din fig. 4.3. Pe acest dispozitiv sunt

montate u măr d 5 b d comandă, fără reținere. Acelea sunt amplasate în așa fel încât pot fi acționate cu degetele mâinii care fixează acest dispozitiv, fără a fi nevoie de eliberarea dispozitivului în cauză, și nici măcar de slăbirea presiunii mâinii pe acest dispozitiv. Pentru aplicația în discuție s-au folosit 4 butoane, cărora li s-au atribuit funcții specifice după cum urmează. Primul buton, denumit buton de prezență, comandă ridicarea frânelor de pe motoarele axelor 1,2 și 3 și cuplarea sistemului de comandă. El este acționat de degetul arătător când palma este închisă și eliberat în momentul în care operatorul eliberează manșa sau pur și simplu când deschide palma. Două butoane sunt folosite pentru cuplarea și decuplarea efectorului final al brațului slave (dispozitiv de prehensiune sau sculă de lucru motorizată). Un buton selector cu patru poziții (sus-jos, stânga-dreapta) este acționat cu degetul mare și este folosit pentru comanda de la distanță a unui mecanism cu două axe de mișcare, destinat să orienteze (în azimut și înălțare) o cameră de luat vederi (CCD).

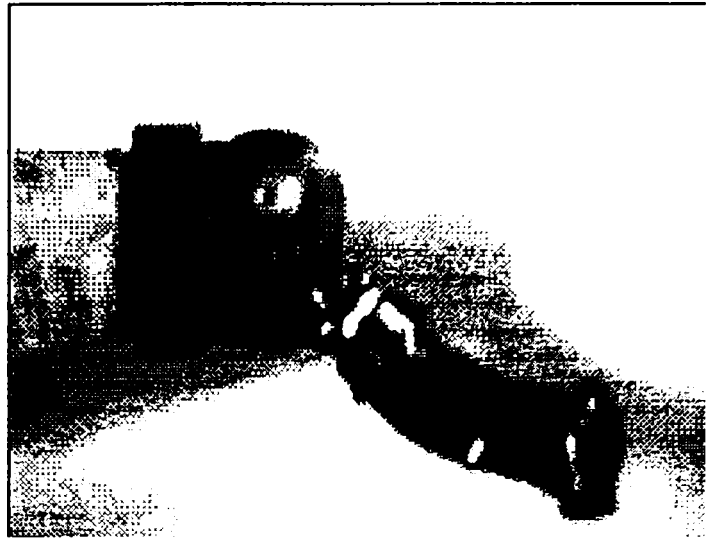


Figura 4.3

Brațul master are șase cuple cinematice, ale căror elemente sunt acționate de câte un motor de curent continuu, prin intermediul unui reductor de turație reversibil. Motoare sunt comandate prin 6 amplificatoare de putere, care vor fi descrise succint la prezentarea părții de slave.

2. Brațul slave este de același tip cu brațul master (**PUMA 600**). Conducerea acestui braț se realizează cu sistemul de comandă **Unimation - VAL II**. În fig. 4.4 se prezintă schema structurală a acestui sistem. Este o structură multiprocesor ierarhizată. În vârful ierarhiei se află microcalculatorul central (supervizor) realizat în jurul procesorului (pe 16 biți) DEC LSI-11/02. Pe ultimul nivel se află cele 6 microprocesoare de axă (realizate cu microprocesorul pe 8 biți, Rockwell 6503). Microcalculatorul supervizor îndeplinește două funcții principale :

1. Comunicarea on-line cu operatorul și interpretarea comenzilor sistemului de operare (**VAL**).

2. Coordonarea celor 6 microprocesoare de axă în vederea execuției comenzilor de mișcare. La fiecare 28 ms. sunt transmise coordonatele de poziție pentru fiecare

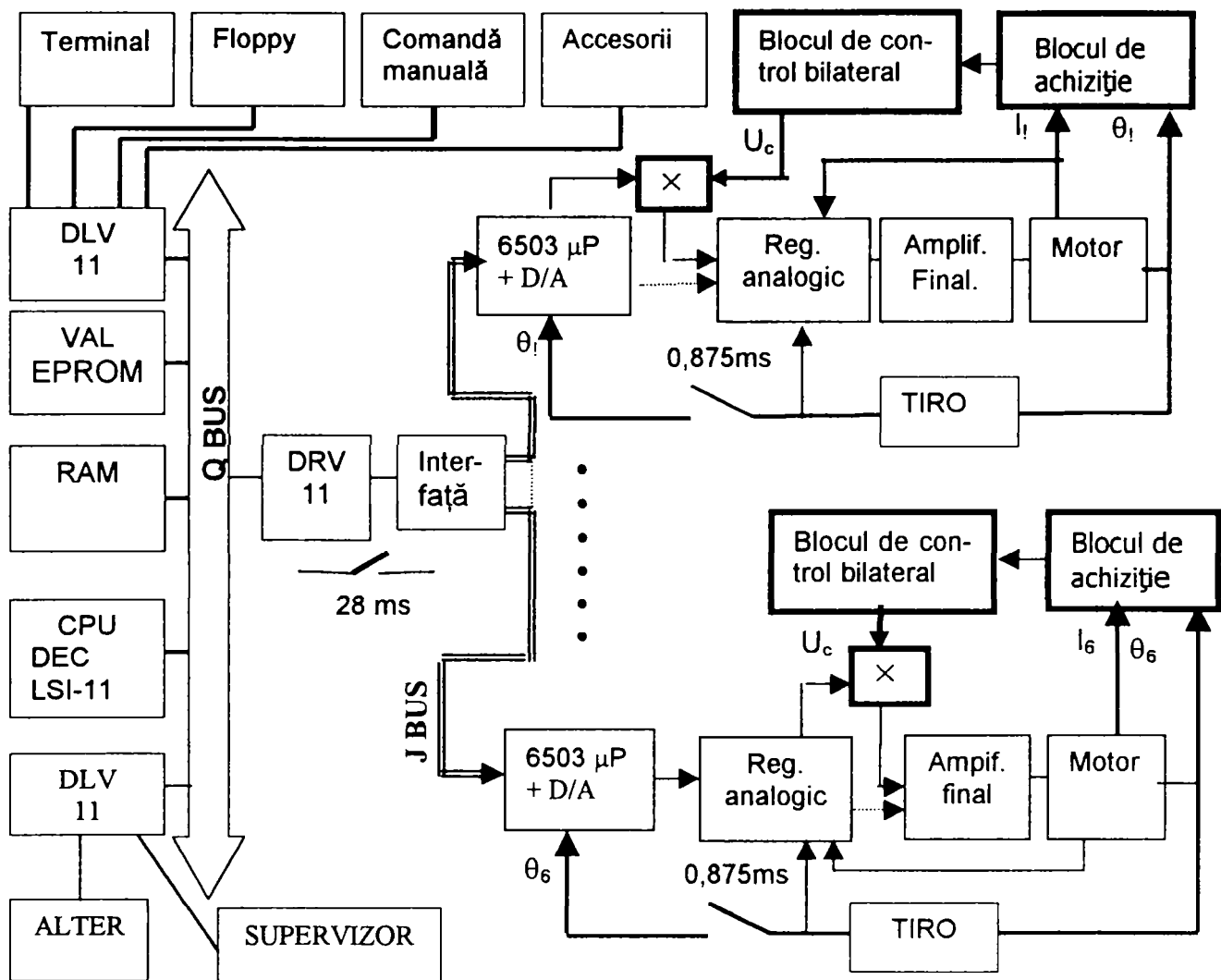


Figura 4.4

procesor de axă. Acest procesor citește la fiecare 0,875 ms. informația de la traductorul incremental de deplasare și determină eroarea dintre poziția prescrisă de microcalculatorul supervizor și poziția reală. Această eroare este prelucrată în baza unei legi de reglare (numerice) și se obține o mărime de comandă pentru circuitul de reglare a vitezei. Întrucât acest circuit este realizat analogic mărimea de comandă este convertită din numeric în analogic. În componența sistemului de comandă mai intră 4 interfețe programabile. Două interfețe seriale (DLV-11) conectează la magistrala centrală (Q-BUS) dispozitivele periferice, interfața ALTER (asupra căreia se va reveni în paragraful următor) și un calculator extern (supervizor). A treia interfață, paralelă (DRV-11), realizează legătura dintre magistrala principală și magistrala J-BUS la care sunt conectate cele 6 procesoare de axă. Ultima interfață, paralelă, stabilește legătura dintre magistrala principală Q-BUS cu porturile paralele de intrări - ieșiri numerice (I/O).

Sistemul de comandă, în configurația prezentată mai sus, a fost utilizat doar în cadrul experimentelor legate de monitorizarea forței și conducerea paralelă în teleoperarea informatizată, care vor fi prezentate în paragraful următor. Pentru realizarea celorlalte teste legate de controlul bilateral în poziție și forță s-a renunțat la serviciile calculatorului central, cu alte cuvinte cele două funcții ale calculatorului central menționate mai sus au fost suspendate temporal. Funcția de comandă a mișcării brațului slave a fost transferată *blocului de control bilateral*, conceput de autor. Acest transfer a presupus intervenții (modificări pe partea de hard) în schema sistemului de comandă amintit. S-au conceput două variante de realizare a sistemului master-slave experimental:

- **Vrianta I**, prevede folosirea numai a amplificatoarelor finale din sistemul de comandă. Pentru aceasta, intrările în acele amplificatoare (tensiunea de comandă U_c) au fost deviate printr-un comutator (marcat în schemă cu simbolul \times) spre blocul de control bilateral. În schemă modificarea este marcată doar pentru axa 6.
- **Varianta II**, prevede utilizarea atât a amplificatoarelor finale cât și a reguletoarelor analogice de viteză din sistemul de comandă în cauză. Pentru aceasta au fost deviate intrările reguletoarelor spre blocul de control bilateral (modificare marcată în schemă doar pentru axa 1).

Amplificatoarele finale (care sunt utilizate în ambele variante de realizare) sunt amplificatoare de putere clasice, având un etaj final în contratimp cu tranzistoare de putere, complementare și simetrice care lucrează în clasă B. Pentru creșterea curentului prin acest etaj s-a adoptat varianta cuplării în paralel a două tranzistoare de putere.

Reguletoarele analogice sunt reguletoare de viteză clasice, realizate cu două bucle de reglare în cascadă. Bucla exterioară urmărește viteza, în baza unei legi de reglare de tip PID (proporțional-integrator-derivativ). Bucla internă este una de reglare a curentului rotorului după o lege de tip PI (proporțional-integrator). Reacția de viteză în prima buclă se obține prin diferențierea semnalelor de la traductorul incrementale de deplasare, iar reacția de curent din a doua buclă este culeasă de la traductorul de curent care este, în fapt, o rezistență de putere (cu valoarea de $0,1\Omega$ pentru axele de poziționare și de $0,2\Omega$ pentru axele de orientare) înseriată în circuitul rotorului al motorului.

În schema din fig.4.4 au fost evidențiate și semnalele care sunt achiziționate în vederea utilizării ca reacții în schemele de control concepute pentru sistemul master-

slave experimental. Este vorba de semnalele de poziție θ_i de la traductoarele potențiometrice (P) și de semnalele de la traductoarele de curent (I_i).

3. Blocul de achiziție și control

Acest bloc este constituit dintr-un calculator personal PC 486 în care sunt montate două plăci electronice multifuncționale. Prima placă, DAS 1600 (produsă de Keithley MetraByte -Asyst) este o interfață multifuncțională, analogică și numerică, de mare viteză care conține: 16 intrări analogice cu rezoluție de 12 biți ; trei numărătoare programabile în timp (timer INTEL 8254); două canale de conversie N / A, pe 12 biți și patru porturi paralele pe 8 biți (de intrări /ieșiri numerice). În cadrul experimentelor s-a folosit în principal funcția de achiziție a acestei plăci.

A doua placă (proiectată de autor) este o interfață specializată pentru achiziția semnalelor de la traductoarele incrementale de rotație (denumită pe scurt **TIRO**). Această placă, care se montează în unul din slot-urile de extensie ale plăcii de bază a unui microcalculator IBM PC sau compatibil, poate achiziționa în paralel semnalele de la patru traductoare. Pentru fiecare canal de achiziție s-a utilizat circuitul SN74 LS2000 AN, specializat în prelucrare și numărarea semnalelor de la TIRO. Interfața mai conține patru circuite L290 (câte unul pe fiecare canal), specializate în procesarea semnalelor de la TIRO și extragerea prin diferențiere a semnalului analogic de viteză. Aceste semnale de viteză sunt scoase la un conector de ieșire și pot fi utilizate ca reacții în cadrul schemelor de reglare a vitezei. În fig.2A și tabelul 2A din Anexa A sunt prezentate caracteristicile tehnice mai importante ale celor două plăci.

4. Blocul analogic pentru controlul bilateral

Funcțional, acest bloc are rolul de a realiza legile de control pentru master și pentru slave, cu alte cuvinte de a determina semnalele de comandă pentru: amplificatoarele finale din partea de master și din partea de slave în cazul primei variante de control (amintită mai sus) sau pentru amplificatoarele finale din partea de master și pentru reglatoarele analogice din partea de slave în cazul variantei a doua de implementare a controlului bilateral.

Blocul în discuție conține 6 module (plăci electronice) asemănătoare, conectate pe același fund de sertar. În componența fiecărui modul intră șase circuite electronice realizate cu amplificatoare operaționale. În fig.3A din Anexa A se prezintă schemele de principiu ale acestora. Se pot distinge următoarele circuite electronice :

- două sumatoare amplificatoare (unul format dintr-un singur amplificator operațional cu intrare pe borna inversoare, iar al doilea este format din două amplificatoare operaționale, intrarea făcându-se pe bornele neinversoare);
- un amplificator cu factor de amplificare reglabil (regulator proporțional);
- un circuit de integrare cu elemente de desaturare (antisaturație);
- un circuit de derivare cu filtrare (cu funcție de transfer cauzală);
- două circuite de amplificare cu reacție neliniară care își modifică amplificarea în funcție de nivelul semnalului de intrare;

Fiecare din module are disponibile 6 intrări în tensiune (trei pentru partea de master și trei pentru slave). Acestea pot fi conectate la traductoarele potențiometrice, la traductoarele de viteză și respectiv la traductoarele de forță, în cazul măsurării acesteia pe cale directă, sau la traductoarele de curent, în cazul măsurării indirecte. La ieșirea fiecărui modul se obțin două tensiuni de comandă, una pentru amplificatorul de puterea din partea de master iar cealaltă pentru amplificatorul final sau pentru regulatorul de viteză din partea de slave (funcție de variană de control adoptată, I sau II). Detaliile privind funcțiile de intrare-ieșire ale fiecărui modul vor fi prezentate cu ocazia testelor experimentale, legate de contrulul bilateral, care vor fi expuse în paragrafele următoare.

5. Dispozitivul pentru orientarea camerei de luat vederi.

Dispozitivul este un mecanism cu două grade de libertate , acționat cu două micromotoare de curent continuu cu reductor de turație încorporat, care orientează o cameră CCD pe două direcții (azimut și înălțare). Comanda acestui dispozitiv este originală, ea realizându-se prin cuplarea unui sistem de urmărire a poziției cu un sistem de comandă de la distanță (emițător și receptor în infraroșu) utilizat pe scară largă în aparatura audio-video. Schema circuitului electronic de comandă pentru una din axele acestui dispozitiv este prezentată în fig.4A din Anexa A.

Majoritatea procesoarelor de semnal din cadrul unui receptor de telecomandă au cel puțin trei ieșiri în impulsuri, modulate în durată (pentru sunet, pentru contrast, pentru luminozitate). Printr-o filtrare corespunzătoare a acestor semnale se obține o tensiune continuă al cărei nivel variază într-o plajă prestabilită (de obicei 0-12V). Dacă această tensiune se cuplează la intrarea unui sistem de urmărire a poziției (reacția de poziție obținându-se de la un potențiomtru) , mijlocul plajei amintite se sincronizează cu mijlocul cursei axei comandate, atunci deplasarea (rotire) într-un sens sau în celălalt a dispozitivului va fi proporțională cu intervalul de timp în care operatorul ține apăsată

tasta de creștere sau pe cea de micșorare a semnalului de sunet, spre exemplu. Butoanele de comandă pentru sunet și luminozitate de pe emițător au fost dublate de patru butoane aflate pe manșa de comandă (fig.4.2).

Camera de luat vederi împreună cu dispozitivul de orientare, cu toate că nu sunt implicate direct în performanțele controlului bilateral, s-au dovedit foarte utile în testele experimentale care au vizat faza de poziționare fină, în apropierea țintei, a efectorului final și în testele în care acest efector vine în contact cu obiecte aflate în spațiul de lucru al brațului slave.

– **Contribuții personale:**

Autorul puctează, în continuare, câteva dintre contribuțiile personale esențiale, legate de concepția structurală și de realizarea sistemului master-slave experimental:

- S-a conceput o schemă structurală, pentru sistemul în discuție, care a ținut cont de baza materială disponibilă, dar a luat în calcul și verificarea experimentală a conceptele teoretice, referitoare la controlul bilateral, introduse de autor pe parcursul tezei.
- S-a conceput și realizat o schemă de control originală, care prin flexibilitatea ei permite implementarea majorității variantelor de realizare ale unui teleoperator bilateral, cunoscute din literatura de specialitate.
- S-a conceput un bloc de achiziție de date performant care permite prelevarea rapidă a unui număr important de date, facilitând astfel desfășurarea unor teste experimentale complexe, pe sistemul în cauză.
- S-a realizat un sistem original de comandă (în infraroșu) de la distanță a orientării pe două direcții a unei camere de luat vederi, care s-a dovedit util în cadrul experimentelor cu sistemul master slave precum și în alte aplicații.

4.3 Monitorizarea reacției de forță

Cercetarea experimentală legată de monitorizarea reacției de forță a fost direcționată spre următoarele obiective:

- Validarea ideii introduse de autor în paragraful 2.4, prin care într-o cuplă cinematică reversibilă motoarele pot fi folosite ca senzori de efort (forță / moment);
- Verificarea în practică a ideilor lansate prin conceptul de monitorizare a forței (introdus de autor în paragraful 2.5) și urmărirea efectului acestei monitorizări în senzația operatorului asupra încărcării reale a brațului manipulator condus.
- Determinarea caracteristicilor statice ale traductoarelor desemnate pentru măsurarea momentului de încărcare în articulațiile brațelor master și slave.
- Monitorizarea forței de contact la nivelul efectorului final pe baza momentelor de încărcare în articulațiile brațului manipulator.

Aceste obiective sunt legate, în fapt , de o singură idee și anume aceea de a determina pe cale indirectă forța de interacțiune dintre un braț manipulator și mediu. Această idee se regăsește în cercetările teoretice și experimentale efectuate de autor în ultimul timp [Diaconu 92], [Diaconu 94], [Diaconu 96], [Diaconu 97], [Diaconu 98a], [Diaconu 98b]. Ideea în discuție apare și în literatura de specialitate, dar mai rar. Se citează în acest context următoarele referințe bibliografice: [Kazeroni 94], [Vischer 95], [Salcudean 95], [Luh 85], [Hill 85], [Jezierski 97], [Naghdy 85].

Un braț manipulator , fie că este comandat manual , fie că este comandat automat, are două regimuri de mișcare :

1. Mișcare într-un spațiu liber (când transferă un obiect dintr-un loc în altul, *pick and place*).
2. Mișcare într-un spațiu cu constrângeri sau în contact cu un obiect cu rigiditate infinită (în cazul operațiunilor de montaj, spre exemplu) [Youm 96].

În primul caz forțele dinamice (inerțiale, centrifugale, de frecare vâscoasă) au o pondere mare în încărcarea brațului manipulator. Estimarea acestor forțe, prin măsurări indirecte, este foarte dificil de realizat, dar totuși posibilă, dacă se utilizează, spre exemplu , tehnici complexe de estimare a stării în prezența perturbațiilor stochastice (cum este, spre exemplu, tehnică ce utilizează filtru Kalman, adaptiv, pe post de *observer*) [Diaconu 98a], [Hill 85]. Cazul al doilea este întâlnit în aplicații specifice teleoperatorilor cum sunt: operațiunile de montaj, operațiunile de polizare, operațiunile de tăiere etc. În acest caz se poate vorbi de o încărcare statică. Estimarea

acestei încărcări, fără a folosi senzori de forță / moment este mai ușor de realizat, chiar cu tehnici mai simple. Testele din cadrul acestui experiment vin să confirme această afirmație. Aceste teste s-au realizat cu brațul robot PUMA 600 (brațul slave din sistemul experimental) folosindu-se blocul de achiziție și control, prezentat în paragraful anterior.

Pentru determinarea momentelor de încărcare la nivel de articulație s-a procedat la măsurarea semnalelor de poziție și a celor de curent (prin motor). Semnalele de poziție sunt tensiuni continue (culese de pe cursoarele potențioanelor din articulații) al căror nivel variază în plaja de ± 10 V pentru o rotație completă (360°). Pentru determinarea curentului s-a măsurat tensiunea pe rezistențele montate în circuitul rotor (între o bornă a motorului și masă) al fiecărui motor. Aceste rezistențe au valoarea de $0,1\Omega$ pentru axele 1, 2, 3 și $0,2\Omega$ pentru axele 4, 5 și 6. Pentru măsurare s-a utilizat placa de achiziție DAS 1600 care dispune de 16 canale de conversie analog-numerică cu rezoluția de 12 biți. Perioada de eșantionare a semnalelor achiziționate poate fi de maxim 70 kHz. Având în vedere faptul că programul de achiziție creează fișiere de date cu 1000 de eșantioane s-a mers, în general, pe o frecvență de 200 Hz care corespunde unui interval de achiziție de 5 s.

Achiziția celor 12 semnale nu a creat probleme tehnice, în schimb interpretarea rezultatelor primului set de măsurări a fost aproape imposibilă. Două motive au generat această imposibilitate:

- Primul motiv (subiectiv) a fost acela că nu s-au stabilit precis toate condițiile în care s-au realizat măsurările. Acesta a fost eliminat prin organizarea unui program mai riguros de realizare a acestor măsurări. În tabelul B1 din anexa B se prezintă testele efectuate și condițiile în care s-au realizat.
- Al doilea motiv (obiectiv) a fost generat de faptul că peste semnalele de curent achiziționate s-a suprapus un zgomot cu nivel destul de ridicat. Acest zgomot nu se datorează plăcii de achiziție și nici legăturilor dintre aceasta și punctele de unde s-au achiziționat semnalele. Zgomotul provine de la oscilațiile din blocul de reglare analogică și din amplificatorul final. Această afirmație este susținută și de unele experiențe similare, unele realizate chiar cu un braț robot de tip Unimation PUMA 560, care se deosebește puțin de PUMA 600. [Harison '84] [Naghdy '85]. În aceste referințe se propun tehnici complexe pentru eliminarea acestui zgomot. Aceste tehnici sunt bazate pe modelul stocastic al fiecărei articulații, identificat printr-o metodă cunoscută în literatură sub denumirea de ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average).

Autorul a stabilit, prin cercetare proprie [Diaconu 97], [Diaconu 98a], că această problemă a zgomotului poate fi rezolvată în două moduri:

a. printr-o filtrare optimă folosind Filtre Kalman, dacă se cunoaște funcția de autocorelație a zgomotului. Implementarea acestei metode pune probleme dificile de acordare a matricilor de covarianță a zgomotului de măsurare și al celui de sistem. Un alt aspect care pune probleme serioase în implementare pe sisteme de calcul digitale, îl reprezintă rezolvarea în timp real al *ecuațiilor Riccati*.

b. printr-o filtrare clasică cu filtre RC pasive sau cu filtre active. Cu această metodă, mult mai simplă, s-au obținut rezultate apreciate ca satisfăcătoare pentru scopul urmărit. Astfel, prin utilizarea unor filtre pasive RC trece jos, cu frecvența de

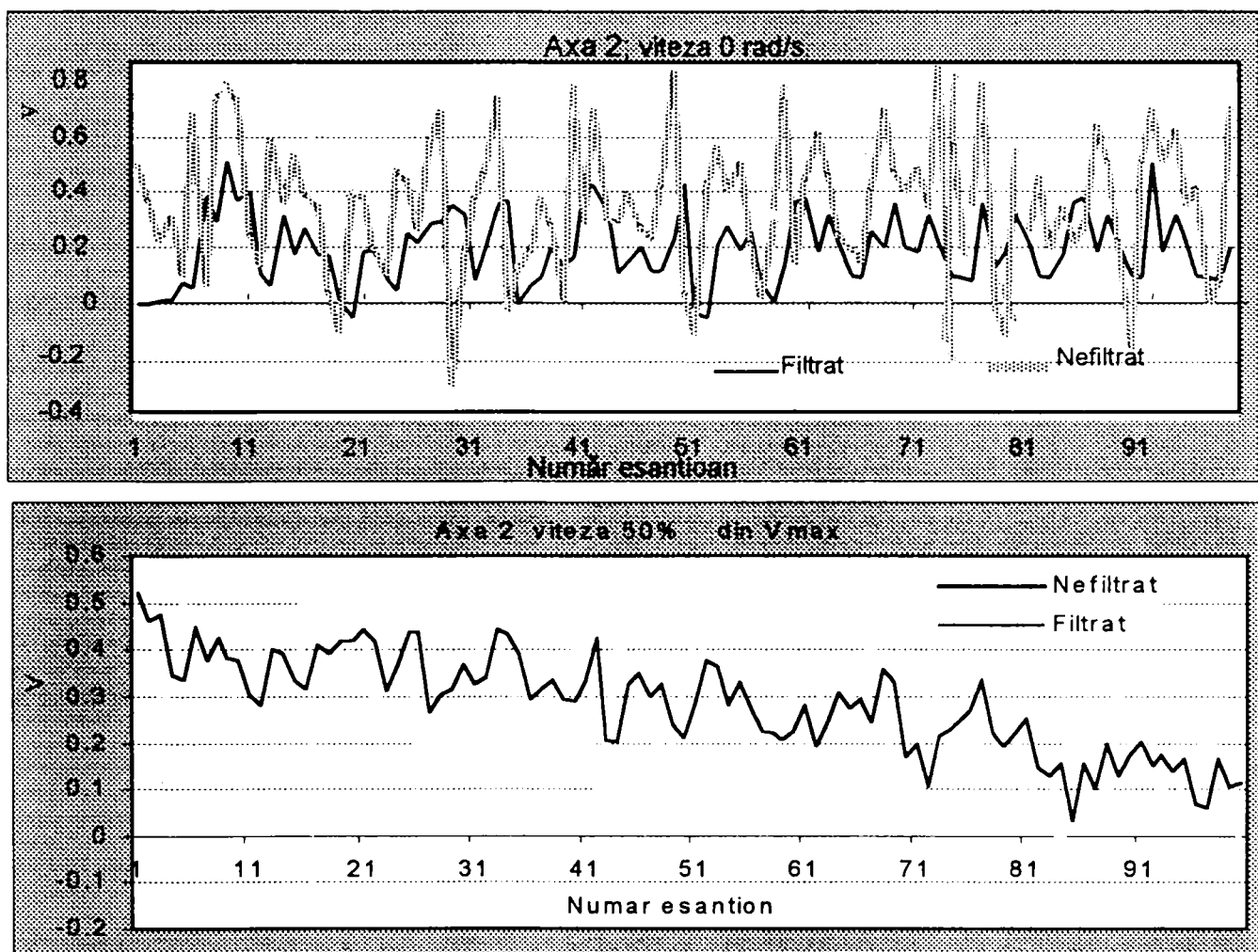


Figura 4.5

tăiere de 10Hz deviația maximă a semnalelor față de valoarea medie s-a redus de circa 4 ori la axa 2 și de aproximativ două ori la axele 1 și 3. În diagramele din fig.4.5 se prezintă formele de undă (nefiltrate și filtrate) pentru curent, înregistrate la axa 2 a robotului PUMA 600, în două situații: la viteză 0 și la viteză de 50% din viteza maximă.

Prin prelucrarea fișierelor de date, rezultate în urma testelor menționate mai sus s-a ajuns la concluzia că pentru 1Nm încărcare, tensiunea pe rezistențele folosite ca traductoare de curent se modifică cu 20 mV. Această proporționalitate se menține până la o încărcare de 80 Nm. (încărcarea maximă admisibilă este de 100 Nm). Se poate afirma, prin urmare, că în regim static dependența curentului prin motor de momentele de încărcare externă este liniară. Pentru a standardiza această dependență s-a prevăzut o amplificarea a semnalului de tensiune cu un factor de 5. S-a obținut astfel un traductor de moment cu constanta de 100 mV / Nm și ieșire standard (în plaja de ± 10 V). Acest traductor este foarte util pentru experimentele legate de controlul bilateral, care vor fi prezentate în paragraful următor.

În regimul dinamic al brațului manipulator, caracteristica de încărcare menționată mai sus nu mai este valabilă, deoarece intervin o serie de momente de încărcare perturbatoare, care sunt greu de estimat prin simpla măsurare a curentului prin motor. În acest context Dieter Vischer face o analiză detaliată a dependenței dintre momentul dezvoltat de motor (proporțional cu curentul rotoric) și momentul de sarcină real [Vischer 95]. El constată că pentru articulațiile în care reductorul de turație are un raport mare de transmisie, așa cum este cazul brațului analizat, momentul dinamic (perturbator) datorat inerției rotorului motorului, spre exemplu, are o pondere importantă în momentul dezvoltat de motor.

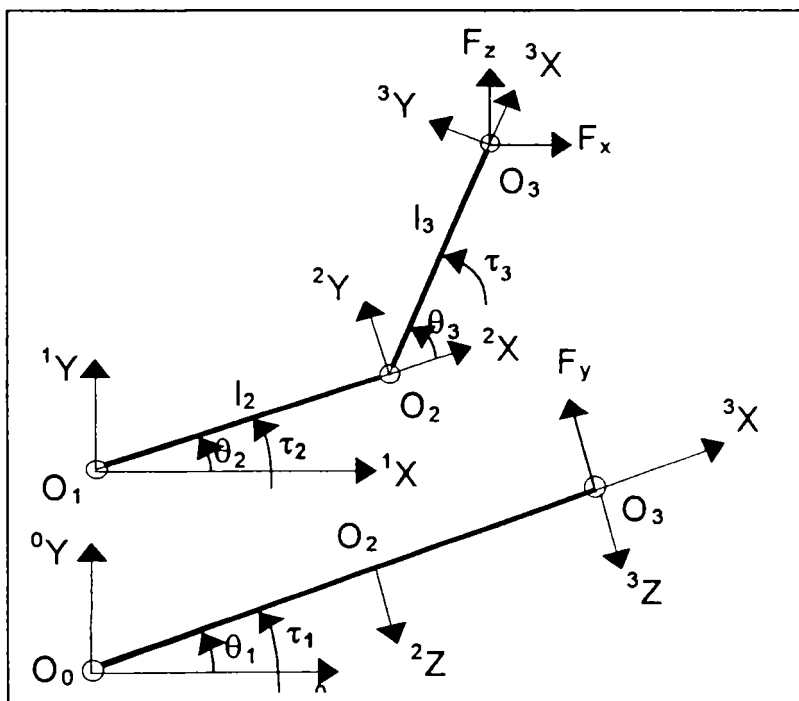


Figura 4.6

În regim static, pe baza momentelor de încărcare la nivel de articulație se poate estima și forța de contact dintre brațul robot și un obiect rigid din mediu. Este vorba de forța de la nivelul efectorului final. Această idee se regăsește la E. Jezierski care determină o astfel de forță, dar pentru un manipulator cu acționare pneumatică. [Jezierski 97]. În fig.4.6 se prezintă structura cinematică a brațului manipulator,

cu trei grade de libertate, utilizat de autorul amintit pentru a verifica teoria propusă. Această structură este valabilă și pentru mecanismul generator de traiectorii al brațului

PUMA (brațul fără mecanismul de orientare), fapt pentru care s-a preluat ideea amintită mai înainte în vederea determinării forței de contact la nivelul efectorului final. Forța de contact $F = [F_x, F_y, F_z]^T$ poate fi calculată (în regim static) pe baza momentelor de încărcare τ_1, τ_2, τ_3 și a pozițiilor unghiulare $\theta_1, \theta_2, \theta_3$. Aceasta a fost descompusă pe trei componente așa cum se prezintă în figură. În baza unor calcule algebrice simple (realizate după formalismul Newton-Euler) se deduce:

- Componenta (orizontală) tangențială; $F_y = \frac{\tau_1}{l_2 c_2 + l_3 c_{23}}$
- Componenta pe axa orizontală; $F_x = \frac{l_3 c_{23} (F_z - k_3 m_3 g) - \tau_3}{l_3 s_{23}}$
- Componenta pe verticală; $F_z = \frac{\tau_3 (1 + \frac{l_2 s_2}{l_3 s_{23}}) - \tau_2 + l_2 g (k_3 m_3 \frac{s_2 c_{23}}{s_{23}} - m_3 c_2 - k_2 m_2 c_2)}{l_2 (s_2 c_{23} - c_2 s_{23})} s_{23}$

unde: $s_i = \sin(\theta_i)$, $c_i = \cos(\theta_i)$, $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$, $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$, iar k_2 și k_3 reprezintă poziția centrului de greutate al axei 2 și respectiv axei 3.

Pentru testarea acestei metode de estimare a forței de contact s-a utilizat un senzor de forță pe o singură direcție, montat între dispozitivul de prehensiune și ultimul element al brațului robot. Dispozitivul de orientare al brațului robot a fost utilizat pentru a orienta senzorul pe direcțiile în care s-a descompus forța de contact. În tabelul 1B din anexa B sunt prezentate rezultatele măsurării și cele ale estimării bazate pe relațiile prezentate mai sus. În urma prelucrării rezultatelor experimentale s-a dedus o eroare de 10% în estimarea componentei verticale și tangențiale. Pentru componenta orizontală eroarea de estimare a fost de 18%. Pentru o măsurare de precizie, aceste erori sunt inacceptabile; în schimb pentru scopul propus, adică pentru monitorizarea forței în vederea creerii senzației de încărcare, acestea pot fi rezonabile. În acest context se mai menționează faptul că apar situații reale în care unele componente ale forței de contact nu pot fi determinate datorită anulării expresiilor de la numitor. Printr-un program adecvat de calcul aceste singularități pot fi eliminate fără probleme.

4.3.1 Program pentru monitorizarea forței de încărcare

În paragraful 2.6 s-a introdus conceptul de *monitorizare a reacției de forță*. Programul de achiziție, prelucrare și afișare prezentat succint în continuare vine să completeze ideile lansate odată cu conceptul menționat. Acest program s-a realizat QBASIC pentru a putea folosi facilitățile plăcii de achiziție DAS 1600, sau mai precis,

pentru a putea utiliza funcțiile din softul de comandă (driver) al plăcii. În tabelul B1 din Anexa B se prezintă programul sursă realizat pentru monitorizarea momentelor de încărcare din cuplele cinematice ale brațului manipulator PUMA 600 și a forței de contact, în regim staționar de mișcare. În fig. 4.7 se prezintă o secvență de lucru a programului (de execuție) discutat. Facilitățile acestui program sunt următoarele:

- Posibilitatea de a selecta orice combinație de axe, prin opțiunea **Axa**;

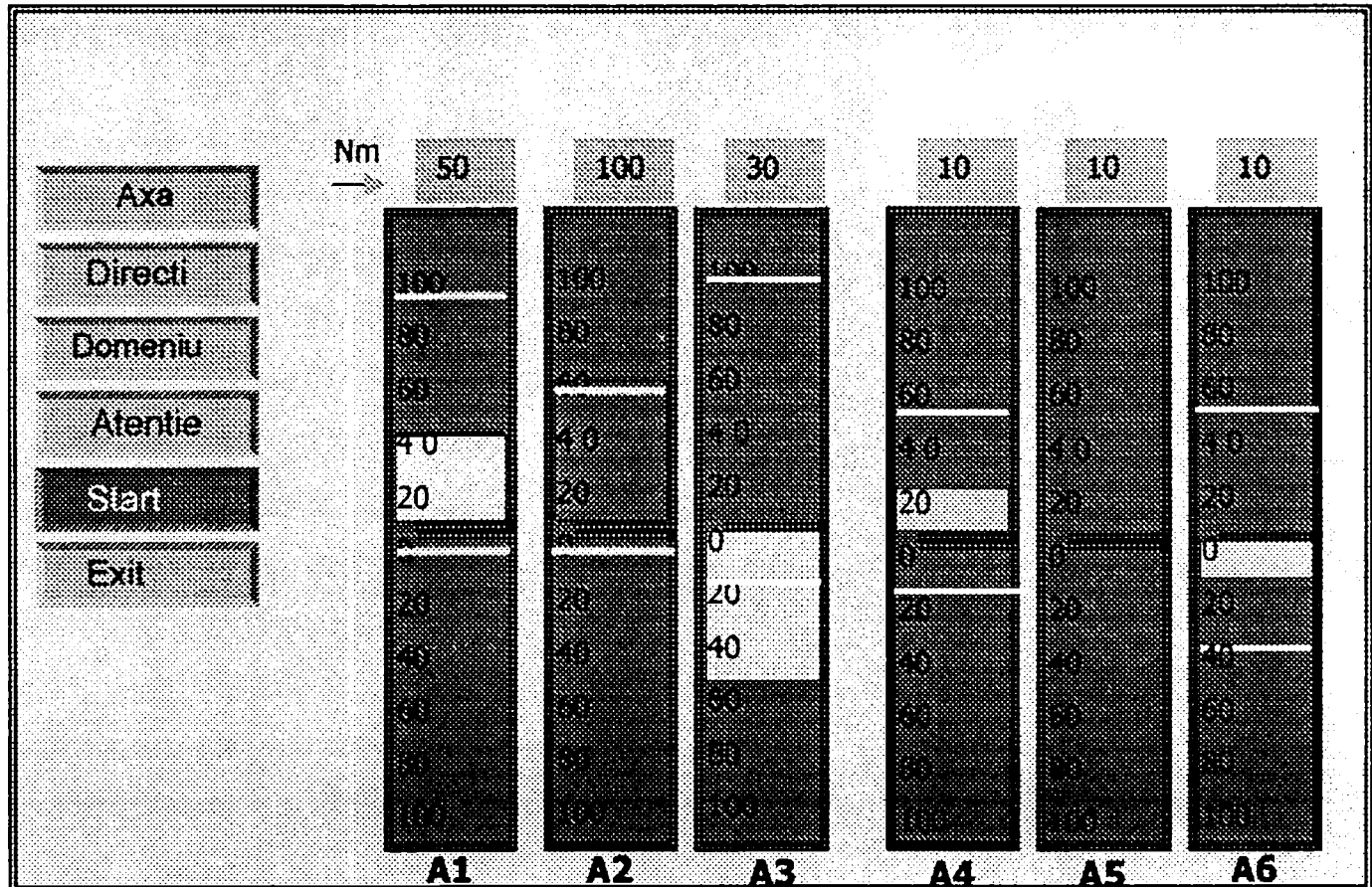


Figura 4.7

- Posibilitatea de a modifica scala de afișare pe fiecare axă prin opțiunea **Domeniu**
- Posibilitatea de a marca limitele plajei de încărcare pe axă, prin opțiunea **Limite**;
- Posibilitatea de monitorizare separată sau simultană a componentelor forței de contact (F_x , F_y , F_z) prin opțiunea **Direcție**;
- Posibilitatea de avertizare sonoră în cazul depășirii limitelor prestabilite.

Acest program a fost testat în cadrul mai multor experimente axate pe conducerea manuală de la distanță, în poziție, sau în viteză cu controlul simultan al forțelor de încărcare. Cele mai relevante, în acest sens, au fost experimentele privind comanda manuală a unei operațiuni de polizare sau de debitare cu un braț manipulator dotat cu sculele corespunzătoare (fig.3B din Anexa B). În urma acestor teste experimentale s-au tras câteva concluzii, considerate importante pentru conceptul de monitorizare a forței de reacție:

- Prin monitorizarea forței se poate crea (operatorului) o senzație asupra încărcării, dar numai după un antrenament prealabil, în care operatorul înțelege semnificația simbolurilor grafice și realizează proporția (scala) dintre forța reală și cea monitorizată.
- Monitorizarea este mai eficientă dacă se limitează la două componente ale forței de contact sau la două momente de încărcare în articulații (două axe).
- Viteza de reacție a operatorului la modificarea forței de încărcare este mai mică decât în cazul în care reacția de forță se obține la nivelul mâinii.

- Ultima concluzie a condus spre ideea completării acestui program cu încă o facilitate, și anume aceea de a comanda și convertorul numeric-analogic al plăcii DAS1600, astfel ca la ieșire să se obțină două semnale analogice proporționale cu cele două forțe (momente) monitorizate. Aceste semnale pot comanda, prin intermediul unor amplificatoare de putere, două micromotoare ale unui dispozitiv special de prescriere a mișcării pe două direcții.

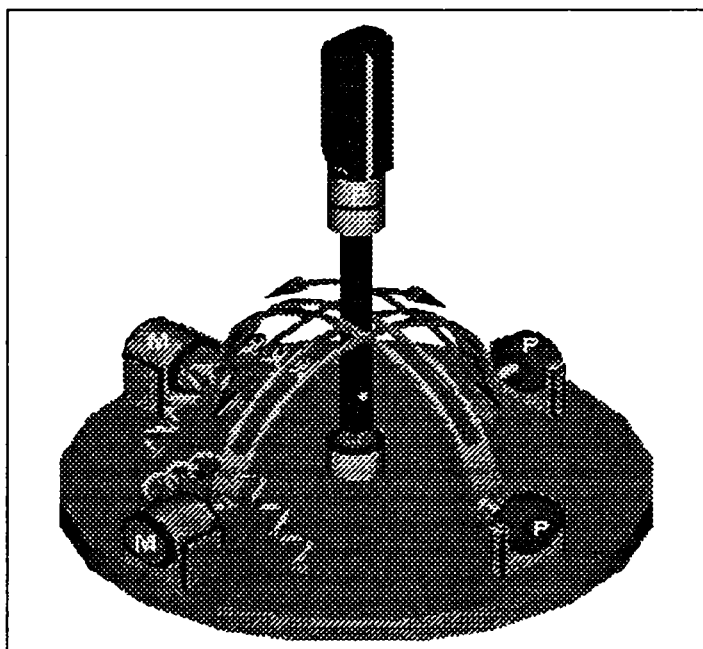


Figura 4.8

Acest dispozitiv schițat într-o vedere 3D în fig.4.8, a fost denumit de autor *Joystick cu încărcare activă*. Cu acesta se poate prescrie poziția sau viteza pe orice direcție din plan (prin intermediul potențioanelor P). Reacția de încărcare este dată de cele două micromotoare M. Dispozitivul, de concepție originală, se află în faza de testare, existând câteva probleme legate de dimesionarea optimă a elementelor componente.

4.3.2 Monitorizarea forței de reacție și conducerea paralelă

În capitolul 2 s-au introdus câteva concepte originale referitoare la teleoperarea informatizată. Conducerea paralelă și monitorizarea forței sunt două dintre acestea. Experimentul care urmează vine să confirme ideile lansate prin conceptele amintite și să demonstreze capabilitatea programului de monitorizare, prezentat în paragraful anterior. În esență, este vorba de conducerea mișcării efectorului final, al brațului manipulator (slave), pe un profil cu geometrie complexă, controlând concomitent forța de apăsare exercitată asupra profilului respectiv.

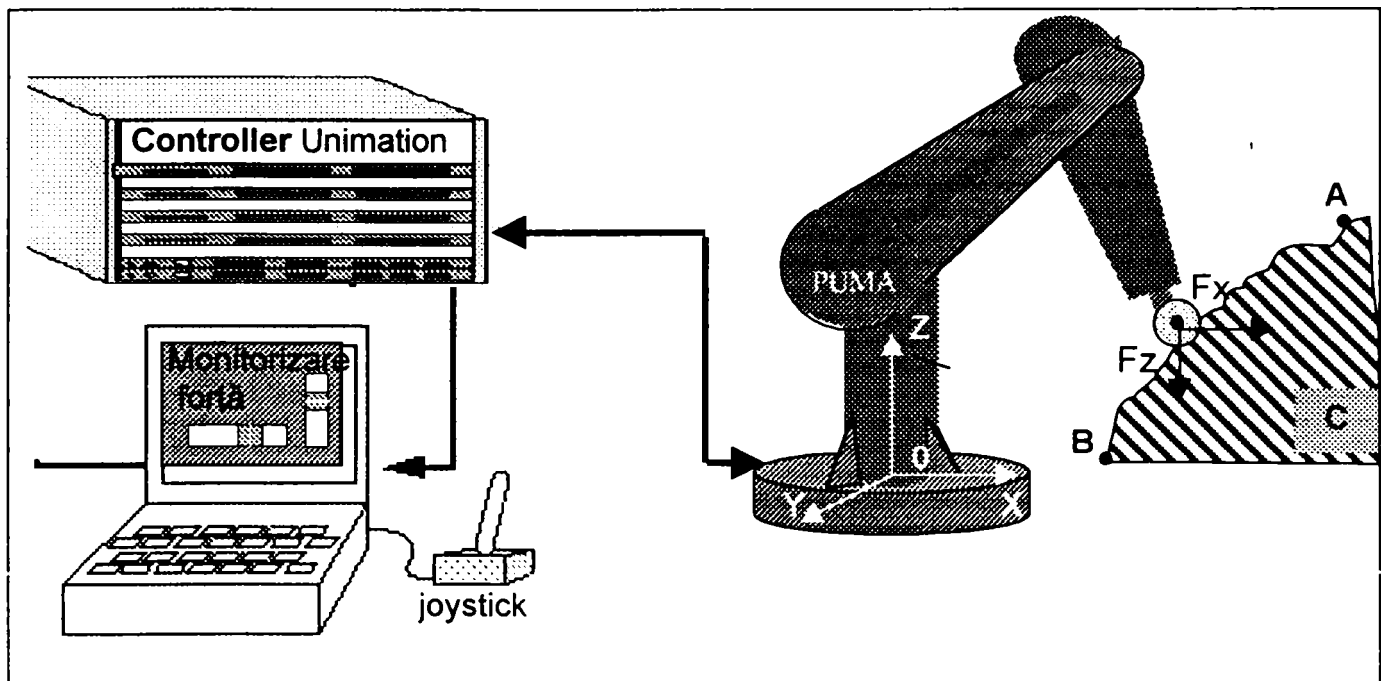


Figura 4.9

Pentru realizarea acestui experiment au fost utilizate numai o parte din componentele sistemului master-slave experimental, descris în paragraful anterior. Acestea sunt prezentate schematizat în fig.4.9. Efectorul final al brațului manipulator (slave) este un cap de forță, mai precis un disc abraziv acționat de un motor electric. În fig. B3 (din anexa B) se prezintă o imagine cu acest cap de forță. Scula de lucru trebuie să parcurgă profilul AB. Forța de apăsare a sculei trebuie menținută în cadrul unor limite prestabilite, cu alte cuvinte componentele F_x și F_z ale forței de contact trebuie să varieze numai în cadrul unei plaje prestabilite. Pentru aceasta brațul robot a fost programat să deplaseze automat scula pe direcția z, în sens negativ, între punctele A și C. Încercarea de deplasare spre punctul C, aflat în interiorul profilului, va produce forțe mari pe direcțiile x și z. Aceste forțe sunt monitorizate și urmărite de operatorul uman. El va încerca să aducă aceste forțe în plaja marcată (pe monitor) prin corectarea traiectoriei pe direcția axelor O_x și O_z . Cu alte cuvinte se va comanda depărtarea sau apropierea sculei de profil în funcție de mărimea forțelor monitorizate. Pentru aceasta el acționează un joystick normal, cu patru contacte (două pentru corecția $\pm dx$ și două pentru corecția $\pm dz$). Cele patru contacte sunt legate la patru intrări numerice ale controllerului brațului slave.

Corecția în timp real a traiectoriei se poate realiza datorită sistemului de conducere al brațului slave și limbajului VAL II, implementat pe acest sistem. Într-un paragraf anterior s-a subliniat faptul că sistemul de conducere al robotului PUMA are la bază o structură multiprocesor ierarhizată, care mai este cunoscută sub denumirea de

structură de conducere *concurrentă*. Limbajul VAL II este unul dintre cele mai cunoscute și utilizate limbaje de programare pentru roboți. Fără a insista asupra instrucțiunilor, funcțiilor și transformărilor introduse de acest limbaj se scoate în evidență o caracteristică foarte interesantă și deosebit de utilă a limbajului amintit care este *cvasiconcurența*. [Unimation 84]. Aceasta constă în posibilitatea definirii unui task de control al procesului, numit *task PC*, care se desfășoară simultan, mai precis cvasiconcurent, cu taskul de conducere automată a brațului robot. Taskul PC nu conține, prin definiție, nici o instrucțiune de mișcare. Taskul robot poate lansa un task PC prin intermediul instrucțiunii:

PCExecute < nume program > ,

unde, < nume program > este numele unui task PC. Întreruperea execuției unui task PC se poate face prin instrucțiunea:

PCEnd

plasată în corpul taskului robot.

În general, scopul unui task PC este de a calcula corecțiile traiectoriei programate, în funcție de informațiile de la senzorii exteroceptivi (de forță / moment, tactili, etc.). Taskul PC se termină prin execuția instrucțiunii :

AltOut < cod de execuție>, < dx>, < dy>, < dz>, < dα >, < dβ >, < dγ > ,

Aceasta specifică corecțiile care se transmit taskului robot. Codul < cod de execuție> este un număr întreg (în mod normal egal cu 0). Prin intermediul acestui cod, taskul PC poate informa taskul principal despre apariția unor evenimente neașteptate, cum ar fi producerea unei erori în procesul de calcul al corecțiilor. După cod urmează corecțiile pe cele șase axe.

Pentru ca taskul robot să poată comunica în timp real cu taskul PC sau cu un proces exterior, trebuie ca acesta să deschidă un canal de comunicație prin intermediul instrucțiunii **Alter**. La sfârșitul comunicației canalul se închide prin instrucțiunea **NoAlter**.

În cazul în discuție task-ul robot, prioritar, este cel care controlează mișcarea brațului manipulator, în timp ce task-ul PC citește informația logică furnizată de cele patru intrări numerice la care este legat joystick-ul. În baza acestei informații sunt stabilite corecțiile care trebuie aplicate traiectoriei, astfel încât forța pe care scula o exercită asupra profilului să fie cea normală. Aceste corecții sunt transmise task-ului robot prin utilizarea instrucțiunilor **AltOut** și **Alter**, prezentate mai înainte. Se specifică faptul că intervalul de timp între două corecții este de 28 ms. Fără a intra în amănunte

cu realizarea programului se specifică doar că el s-a realizat în două faze. În prima s-au stabilit (prin învățare) coordonatele punctelor A, B și C, iar în a doua s-a editat programul propizis folosind comenzile limbajului VAL II, din care câteva au fost prezentate mai înainte. În tabelul B3 din Anexa B se prezintă programul editat și comentat. În urma unor execuții repetate, în condiții diferite (alte profile, alte viteze și alți incrementi de corecție), s-au dsprins următoarele concluzii :

- Pentru parcurgerea unui profil având geometrie necunoscută cu controlarea concomitentă a forței normale la acest contur este necesară corelarea vitezei de deplasare pe profil cu valorile incrementilor de corecție pe cele două direcții de mișcare și cu viteza de reacție a operatorului.
- Viteza mare de parcurgere a profilului, sau un profil care își modifică repetat panta cu mai mult de 90^0 , conduc la situații în care se pierde contactul dintre piesă și profil (forță de apăsare nulă) caz în care există o ambiguitate în alegerea direcției și sensului corecției.
- Sarcina de teleoperare rezolvată prin acest experiment este catalogată ca fiind una dificilă. Acest fapt validează conceptul original de conducere paralelă (operator-calculator) în teleoperarea informatizată, introdus de autor în paragraful 2.6

– **Contribuții personale:**

Dintre contribuțiile personale referitoare la conceptul de monitorizare a reacției de forță autorul le punctează pe următoarele:

- Se demonstrează teoretic și practic că în multe situații este posibil și chiar avantajos să se determine pe cale indirectă forțele de încărcare la nivelul articulațiilor unui braț manipulator. Pentru cazul cuplelor cinematice acționate de motoare de curent continuu se prezintă soluții originale, verificate în acest sens.
- S-a realizat un program de monitorizare a forței în care se îmbină tehnici de achiziție în timp real cu cele de prezentare (afișare) eficientă a rezultatelor achiziției. Testat în condiții concrete, programul s-a dovedit util în crearea senzației operatorului asupra forțelor de încărcare.
- S-a conceput un experiment complex în care sunt puse în evidență o parte din posibilitățile pe care le poate oferi conducerea paralelă, operator-calculator (concept original introdus de autor în capitolul 2) în rezolvarea sarcini de conducere a mișcării efectorului final, al unui manipulator, pe un profil cu geometrie nedeterminată asigurând concomitent o anumită forță de apăsare pe direcția normală la acesta

4.4 Simularea în timp real a controlului bilateral în teleoperare

Sistemele de teleoperare controlate bilateral fac parte din categoria sistemelor cu dinamică complexă. Simularea este una dintre cele mai utilizate metode de investigare a comportării acestor sisteme dinamice în regim tranzitoriu și staționar [Călin 72], [Lee 93], [Pană 95], [Schmidt 99]. În concepția autorului, simularea, ca tehnică de cercetare, trebuie privită ca un triplet, alcătuit din sistemul simulat, modelul sistemului și dispozitivul fizic care materializează modelul, între cele trei componente existând relații biunivoce.

Calculatorul oferă, datorită flexibilității sale, posibilități largi de reproducere a comportării dinamice a sistemelor aparținând diferitelor clase. Structura și relațiile dintre mărimile sistemelor fizice sunt reproduse în calculator fie utilizând direct elemente fizice ale acestuia, ca în cazul calculatoarelor analogice, fie evaluând, prin algoritmi numerici implementați sub formă de program de calcul, funcțiile ce descriu structura și relațiile sistemelor reale, ca în cazul numeric. În ambele cazuri se realizează o transpunere pe calculator a informațiilor a modelului matematic al sistemului studiat. Pentru o simulare corectă procesul sau sistemul modelat trebuie cunoscut foarte bine din punct de vedere cantitativ și cât mai bine din punct de vedere cantitativ, în special în ceea ce privește valorile limită ale variabilelor din sistem [Călin 84].

În contextul amintit mai sus se prezintă succint cele trei componente ale procesului de simulare pentru cazul concret, în discuție:

1. **Sistemul de studiat (S)** este sistemul master-slave experimental, realizat fizic și prezentat în paragraful 4.2. Se face precizare că, pentru simplificare, simularea în discuție nu vizează comportamentul dinamic la nivel global ci la nivelul fiecărei articulații. O astfel de simplificare facilitează interpretarea rezultatelor și este folosită în aproape toate referințele bibliografice care prezintă rezultate experimentale legate de tema în discuție. [Egorov 80], [Yokokohji 94], [Son 96].
2. **Modelul matematic (M)** ales pentru descrierea sistemului (S) este un element abstract, reprezentat printr-un sistem de ecuații diferențiale liniare (în domeniul timp) cu coeficienți constanți. Acest sistem de ecuații stă la baza unui alt model, denumit *model de simular* (MS), care transpune ecuațiile diferențiale din domeniul timp în domeniul complex și este adaptat mediului de simulare implementat pe calculator.

3. **Calculatorul numeric (C)** este noul sistem fizic folosit pentru realizarea modelului de simulare (MS). Mediul software utilizat pentru aceasta este MATLAB (denumire derivată de la MATrix LABoratory). Acesta este prevăzut cu un sistem software adiacent denumit SIMULINK. Mediul de simulare SIMULINK, conceput ca o extensie a mediului MATLAB, este destinat simulării sistemelor dinamice. SIMULINK-ul adaugă facilități suplimentare specifice sistemelor dinamice, elementelor funcționale caracteristice mediului MATLAB [SIM 91], [MAT 89], [Schmidt 99], [Croke 96].

Simularea unui sistem dinamic se poate realiza în două moduri: direct sau structural. În simularea directă se utilizează, pentru realizarea modelului de simulare (MS), funcția de transfer globală a sistemului în forma ei generală. Este o soluție, în general mai economică însă, se pierde corespondența fizică între anumite elemente și parametri ai sistemului fizic și elemente și parametri corespunzători modelului. În simularea structurală se utilizează funcțiile de transfer individuale ale elementelor ce compun sistemul, schema de simulare a sistemului alcătuindu-se prin interconectarea schemelor individuale. Fiecare element al sistemului real este simulat cu un grup anumit de elemente din calculator, astfel se realizează o corespondență fizică permanentă între elemente componente ale sistemului și model. Acest lucru ușurează considerabil studiul influenței variațiilor elementelor sistemului fizic asupra comportării acestuia. Acest tip de simulare a fost utilizat pentru cazul în discuție.

4.4.1 Modelul de simulare pentru sistemul master-slave experimental

Mediul de simulare SIMULINK permite reprezentarea sistemelor dinamice sub forma grafică. Definirea (descrierea) acestor sisteme se reduce de fapt la desenarea schemei bloc a acestora. Există de asemenea posibilitatea "importării" blocurilor, fie din bibliotecile proprii ale mediului (denumite TOOLBOX-uri), fie din bibliotecile create de utilizator [SIM '91]. Pentru simularea sistemului master-slave experimental s-a creat o bibliotecă de blocuri, fiecare bloc având un corespondent fizic (un subsistem) în cadrul sistemului real. În fig.4.10 se prezintă principalele blocuri din structura bibliotecii MS, din mediul SIMULINK, creată de autor pentru simularea sistemului master-slave experimental. Prin deschiderea oricăruia din cele șase subsisteme din cadrul bibliotecii (prin poziționarea prompter-ului pe simbolul acestuia și un "double-click" efectuat cu ajutorul mouse-ului) se obține o nouă fereastră în care apar 6 blocuri de același tip, diferențate la nivel de indice care se referă la numărul axei. Aceste blocuri au aceeași

structură. Diferența dintre ele este dată de valoarea parametrilor incluși în structura respectivă.

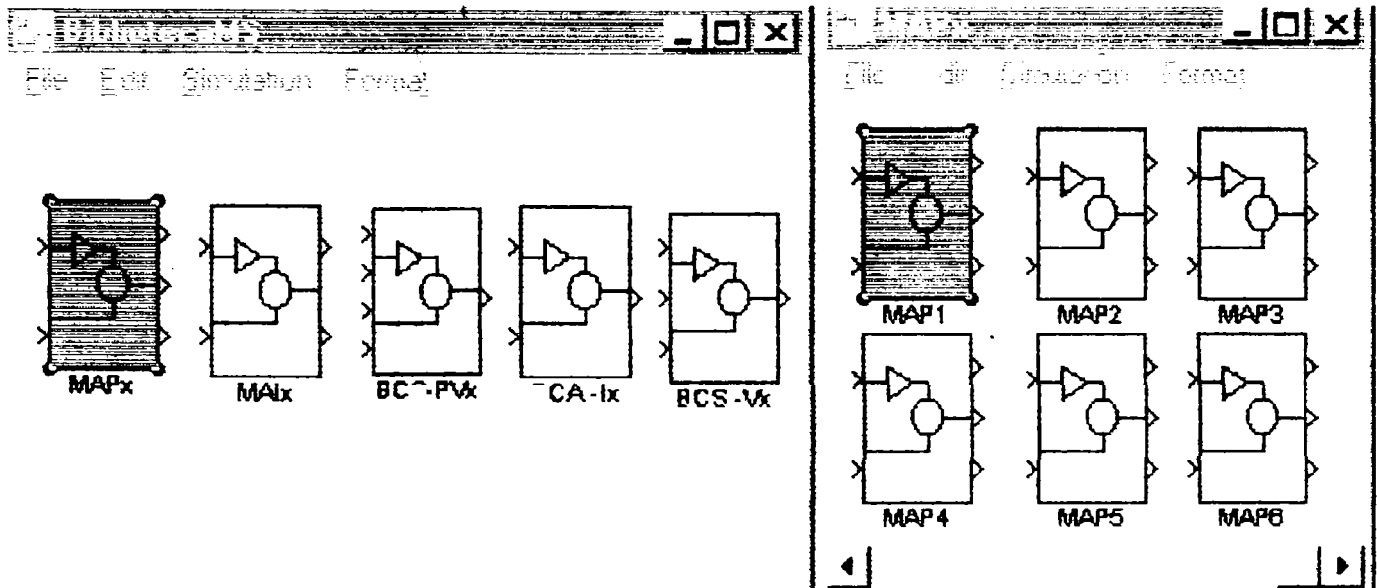


Figura 4.10

Blocurile **MAP_x**, **MAF_x** sunt modelele de simulare pentru două variante ale subsistemului de acționare al brațului manipulator PUMA 600. La baza acestora stă modelul matematic care descrie analitic dinamica mișcării unei cuple cinematice de rotație, acționată de un motor de curent continuu. Acest model este foarte bine cunoscut în literatura de specialitate [Călin 72], [Paul 84], [Ivănescu 94], [Hofer 90], [[Vischer 95], fapt pentru care se va insista mai puțin asupra lui. În anexa C se prezintă, în sinteză, relațiile analitice care descriu modelul matematic (M), precum și cele care stau la baza celor două modele de simulare. Blocul **MAP_x** are două intrări și trei ieșiri. Intrările sunt: 1. tensiunea de comandă (U_c) a amplificatorului final (AF), considerată mărime principală; 2. momentul de sarcină (τ_w), considerat mărime perturbatoare. Ieșirile sunt: 1. poziția unghiulară la arborele de ieșire al reductorului de turație (θ_w), considerată ieșire principală; 2. viteza la arborele motorului considerată mărime intermediară; 3. curentul rotor I_a , considerat ieșire intermediară. Această schemă se referă la o funcție tipică a motorului de curent continuu, și anume aceea de generator de mișcare (viteză și deplasare). Din acest motiv schema respectivă este foarte cunoscută, ea regăsindu-se în referințele bibliografice menționate mai sus și în multe altele.

Blocul **MAF_x** are la bază același model matematic ca și **MAP_x**, dar se deosebește de acesta atât structural cât și principal. Mărimea de intrare principală în acest model este poziția unghiulară θ_w a elementului mobil al cuplei cinematice, adică

poziția unghiulară a arborelui de ieșire din reductorul de turație, reductor care trebuie să fie reversibil. Această poziție unghiulară este impusă de operator care acționează, cu mâna, elementul mobil al cuplei cinematice. Dacă momentul dezvoltat de operator (τ_{op}) este mai mare decât momentul dinamic (datorat accelerației impuse și momentelor de inerție) la care se adaugă sau se scade momentul dezvoltat de motorul brațului master (proporțional cu momentul de încărcare al brațului slave) atunci operatorul poate să impună mișcarea și să prescrie o poziție pentru brațul master și respectiv pentru brațul slave. În caz contrar, când momentul dezvoltat de motorul din partea de master (la ieșirea reductorului de turație) este mai mare decât momentul dezvoltat de operator mișcarea îi este impusă operatorului, cu alte cuvinte operatorul pierde controlul asupra mișcării sistemului. A doua mărime de intrare este tensiunea de comandă U_c a amplificatorului final AF. Mărimile de ieșire sunt: 1. Momentul dezvoltat de brațul master (τ_1), care se compune din momentul (dinamic și static) dezvoltat de operator și momentul dezvoltat de motor (ca reacție de forță). Ambele componente sunt multiplicare cu factorul N , care este raportul de transmisie al reductorului de turație; 2. Viteza unghiulară la axul motorului (Ω_m), considerată ieșire intermediară; 3. Curentul rotoric I_a , considerat ieșire intermediară. În fig.4.11 se prezintă schemele generale a

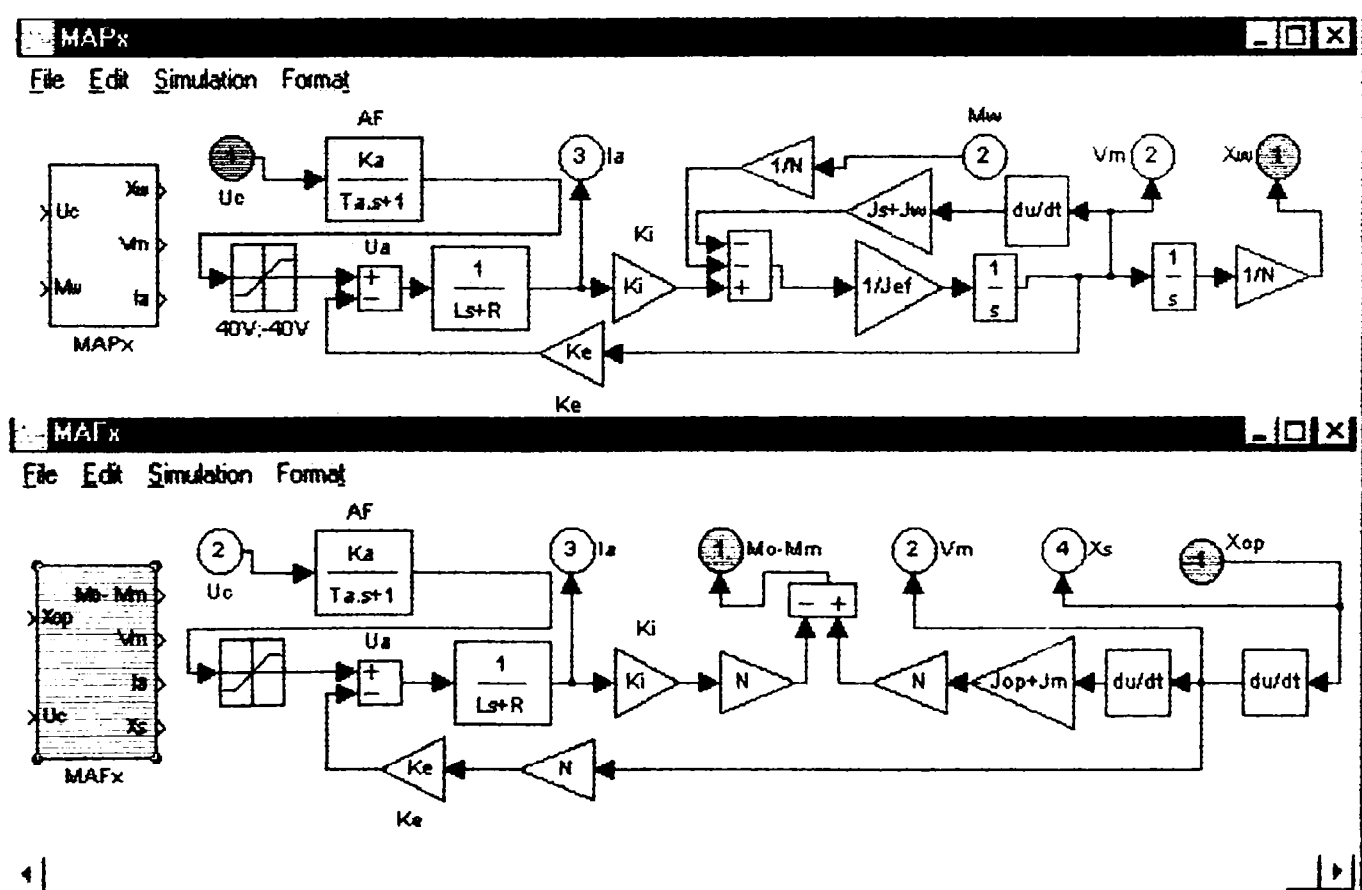


Figura 4.11

celor două modele de simulare. Semnificația notațiilor din figură este următoarea: AF - amplificator final; U_c - tensiune de comandă; U_a - tensiunea rotorică a motorului; R - rezistența rotorică; L - inductivitatea rotorică; K_i - constanta de moment a motorului; K_e - constanta tensiunii electromotoare; N - raportul de transmisie al reductorului; J_e , J_w , J_s , J_m și J_{op} - momentul de inerție redus la arborele motorului, al sarcinii, al brațului slave, al brațului master și respectiv al operatorului; M_{op} , M_w - momentul dezvoltat de operator și respectiv de sarcină; V_{m_m} , V_{m_s} - viteza la arborele motorului în partea de master respectiv în partea de slave; X_w - poziția unghiulară la ieșirea reductorului de turație. [Observație: Se face precizarea că, deoarece editorul de texte din SIMULINK nu are simbolurile grecești, s-au înlocuit unele notații (consacrate) ale modelului matematic (M), după cum urmează: $\Theta \rightarrow X$; $\Omega \rightarrow V$; $\tau \rightarrow M$].

Principial, schema structurală **MAFx** are la bază o funcție mai puțin tipică pentru motorul de curent continuu și anume cea de generator de forță (moment). În literatură, această funcție este abordată mai rar existând, totuși, câteva referințe interesante pe această temă [Hofer 90], [[Vischer 95]. Acest bloc este utilizat pentru simularea părții de master în cadrul sistemului bilateral de tip asimetric unde brațul slave este comandat în poziție iar brațul master în forță. Cu alte cuvinte, motorul din partea de master este comandat să genereze moment de încărcare (reacția) la mâna operatorului, care la rândul ei, generează mișcarea brațului master. Schema în discuție este o contribuție originală din punct de vedere teoretic și practic [Diaconu 94], [Diaconu 99].

Celelalte trei blocuri din bibliotecă se referă la modelele de simulare ale subsistemului de control. Acestea simulează funcțiile de reglare (după eroare) ale blocului de control analogic, prezentat în paragraful 4.2, după cum urmează;

- Blocul **BCS -PVx** simulează controlul bilateral de tip simetric în poziție și în viteză, cu alte cuvinte controlul proporțional-derivativ (PD) al poziției. Funcția de control modelată este :

$$\begin{aligned}
 U_c(t) &= K_p (x_1(t) - x_2(t)) + K_v (v_1(t) - v_2(t)) \quad \text{sau} \\
 U_c(s) &= K_p \left(1 + s \frac{K_v}{K_p} \right) [(X_1(s) - X_2(s))]
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

unde: K_p este factorul de amplificare al erorii de poziție, iar K_v este factorul de amplificare al erorii de viteză. Prin anularea factorului K_v se obține varianta de control cea mai simplă, pentru un sistem master-slave, și șăpanume *controlul în modul poziție-poziție*, sau controlul proporțional (P) al poziției, analizat în paragraful 3.2.

- Blocul **BCA-Ix** simulează legea de control pentru partea de master în cazul *controlului bilateral de tip asimetric*. Funcția de control modelată de acesta este cea a unui regulator clasic de tip PID (proporțional-integrator-derivativ) [Călin 84] :

$$U_c(s) = K_R \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) [I_1(s) - I_2(s)] \quad (4.2)$$

unde: K_R este factorul de amplificare , T_I este constanta de timp de integrare, T_D este constanta de timp de derivare, iar I_1 și I_2 sunt intrările acestui bloc (în cazul de față sunt curenții rotorici ai motorului master și respectiv motorul slave).

-Blocul **BCS-Vx** simulează blocul de reglare a vitezei brațului slave și are ca echivalent fizic blocul de reglare analogică a vitezei din controllerul brațului slave, prezentat în paragraful 4.2. Legea de reglare este una complexă, fiind vorba de o reglare cu bucle multiple cunoscută sub denumirea de reglare în cascadă [Hofer 90].

4.4.2 Verificarea performanțelor sistemului master-slave.

Două categorii de performanțe au fost în obiectivul cercetărilor prin simulare asupra sistemului master-slave experimental:

- A. performanțele de urmărire a poziției brațului master de către brațul slave
 - B. performanțele legate de reacția de forță
- A. Performanțele de urmărire a poziției.**

În cazul unui sistem de teleoperare de tip master-slave, indiferent de felul cum este controlat, performanțele de urmărire a poziției brațului master de către brațul slave depind în exclusivitate de parametrii tehnici ai părții conduse (slave), incluzând aici și parametrii subsistemului de control al acestei părți. În aceste condiții este evident că pentru simulare se va utiliza numai modelul de simulare al părții de slave, care în fapt este modelul unui sistem clasic de urmărire unilaterală a poziției. Această categorie de sisteme este tratată pe larg în literatura de specialitate, iar metodele teoretice de apreciere a performanțelor acestora sunt diversificate și puse la punct. [Călin 85], [Akihiro 97], [Lee 93]. Una dintre aceste metode se bazează pe analiza răspunsului în timp al sistemului la un anumit semnal aplicat la intrare. Această metodă a fost utilizată și în cazul de față. În acest context s-au realizat o serie de simulări prin care s-au urmărit :

1A. Determinarea răspunsului indicial (răspunsul sistemului la un semnal treaptă

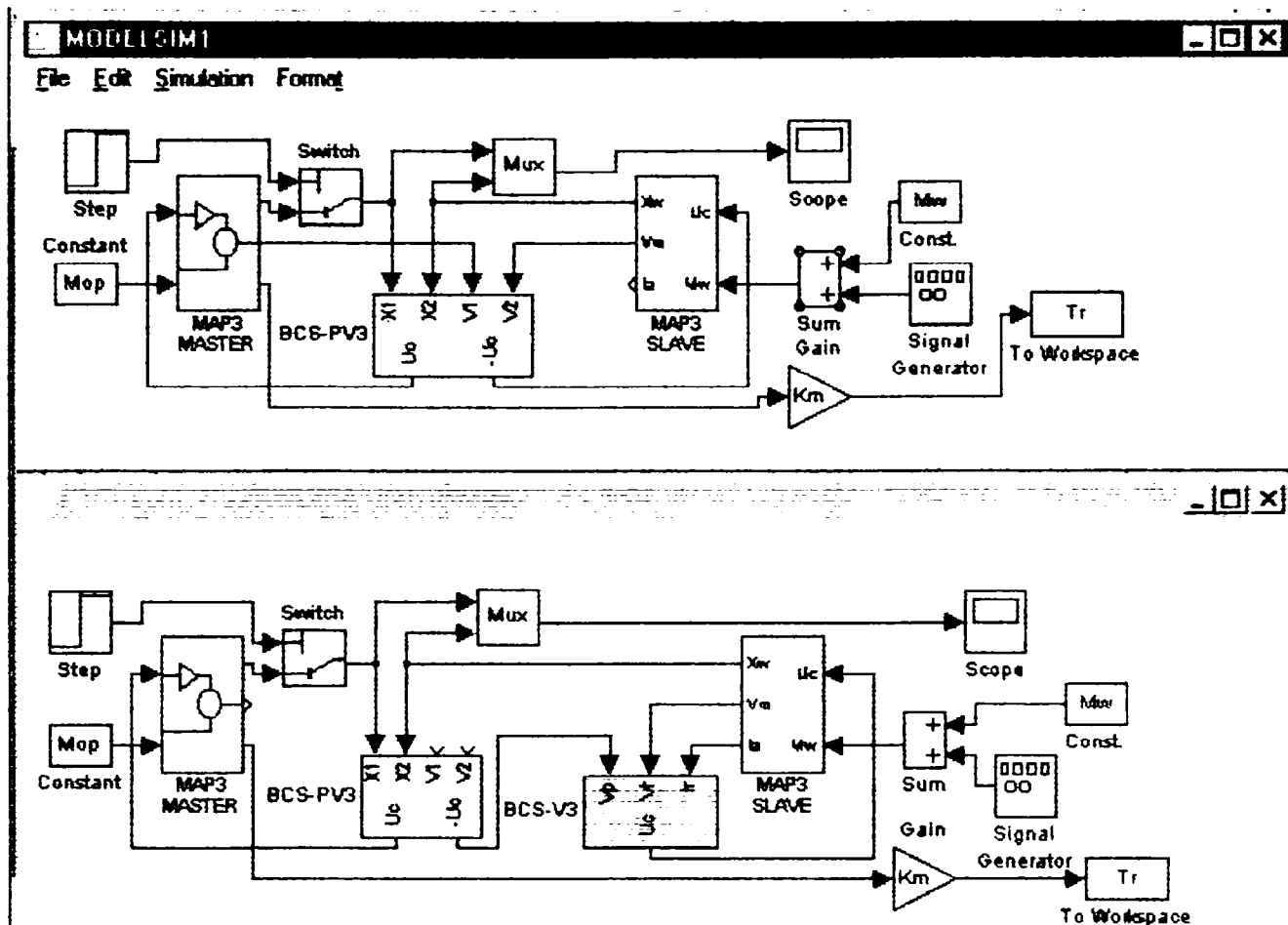


Figura 4.12

unitară) la mersul în gol (sarcină nulă) pentru mai mulți parametri ai schemei de control (factori de amplificare, constante de timp de integrare și derivare). S-au cercetat performanțele staționare (eroarea staționară de poziție) și performanțele tranzitorii (suprareglajul și timpul de răspuns). Determinarea răspunsului indicial la mersul în sarcină pentru momente de inerție diferite ale brațului slave încărcat.

Determinarea coeficientului de rigiditate a sistemului pe baza răspunsului în poziție la o variație în treaptă a momentului de încărcare externă. S-a cercetat eroarea staționară de poziție pentru încărcări constante și factori de amplificare variabili ai schemei de control. Determinarea erorii de urmărire a poziției în cazul în care la intrarea modelului de simulare se aplică un semnal asemănător cu cel aplicat de operator sistemului real, în vederea unei analize comparative a răspunsului simulat cu cel real, care va fi făcută în paragraful următor. S-au luat în considerare două modele de simulare (fig. 5.12), concepute în concordanță cu cele două variante de realizare ale sistemului master-slave real, expuse în paragraful 5.2. Acestea diferă prin blocul de control sau mai precis prin legea de control (de reglare a poziției), modelată. Trei legi de control au fost simulate cu aceste două modele:

1C. Controlul proporțional al poziției, simulat cu modelul 1;

2C Controlul proporțional-derivativ al poziției sau controlul paralel al poziției și vitezei; simulat cu modelul 1;

3C Controlul proporțional al poziției cu reglarea în cascadă a turației și curentului; simulat cu modelul 2.

După realizarea modelului, simularea devine foarte comodă, așa că s-au realizat un număr important de determinări pentru fiecare dintre cele 6 axe ale brațului slave obținându-se, în consecință, un volum mare de rezultate experimentale. Prezentarea, în totalitate, a acestor rezultate (majoritatea diagrame) nu este relevantă și în plus ar necesita un spațiu mult prea mare. În fig. 4.13 se prezintă, spre exemplificare, în două diagrame, răspunsurile indiciale ale modelului de simulare al axei 1. În prima diagramă sunt prezentate răspunsurile modelului controlat cu legea 1C. (control proporțional în poziție). S-au ales 4 răspunsuri pentru a ilustra influența factorului amplificare K_p asupra performanțelor tranzitorii și staționare. Această diagramă este utilă în stabilirea valorii orientative a factorului de amplificare care să asigure performanțe rezonabile dar să mențină și o rezervă de stabilitate pentru sistem. Pentru situația de față, în literatură, se recomandă o amplificare în jurul valorii de 50 [Florea 80]. În a doua diagramă s-au prezentat, pentru comparație, răspunsurile indiciale ale aceluiași model, controlat după legile 2C și respectiv 3C. Este evidentă îmbunătățirea vitezei de răspuns față de cazul precedent. Mai mult, factorul de amplificare K_p poate fi crescut la valori care depășesc cu aproape două ordine de mărime pe cele din cazul 1C, sistemul rămânând stabil.

În fig.5.14 se prezintă răspunsul în poziție al aceluiași model (axa1) la variația în treaptă a sarcinii (momentului) de încărcare. Pe baza acestui răspuns se determină rigiditatea (compliance) sistemului funcție de factorul de amplificare K_p . În prima diagramă se prezintă eroarea de poziție în regim staționar la o încărcare de 10 Nm pentru 4 factori de amplificare ai legii 1C. A doua diagramă evidențiază aceeași eroare pentru legile de control 2C și 3C. Din analiza răspunsurilor din cele două diagrame se constată că în regim stabilizat rigiditatea sistemului nu depinde de legea de control ci doar de factorul de amplificare al erorii de poziție. În regim tranzitoriu se constată că în cazul 2C și 3C viteza de răspuns este mai mare dar și suprareglajul crește. Aceasta explică tendința de oscilație a sistemului, aflat în mișcare, la contactul cu un obiect cu rigiditate infinită. Această problemă importantă va fi reluată în discuție pe parcursul acestui paragraf și în cel care urmează. În fig. 5.15 sunt prezentate două diagrame, obținute prin simularea mișcării axei 2 a sistemului master-slave, în care se evidențiază

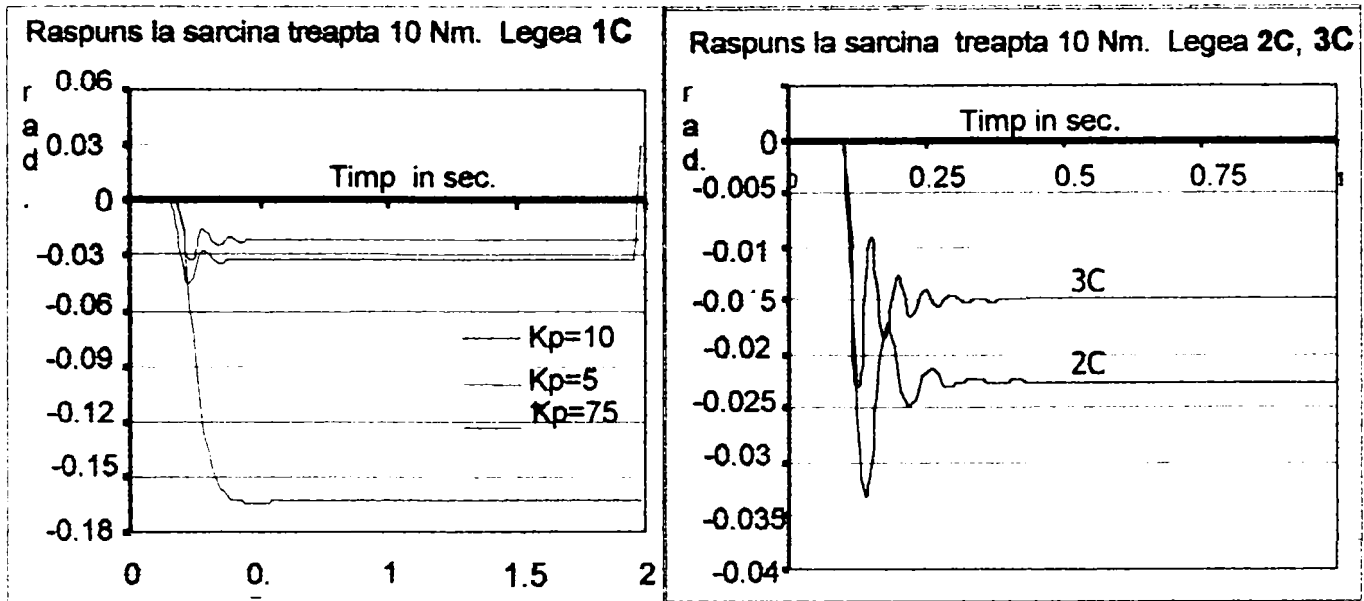


Figura 4.14

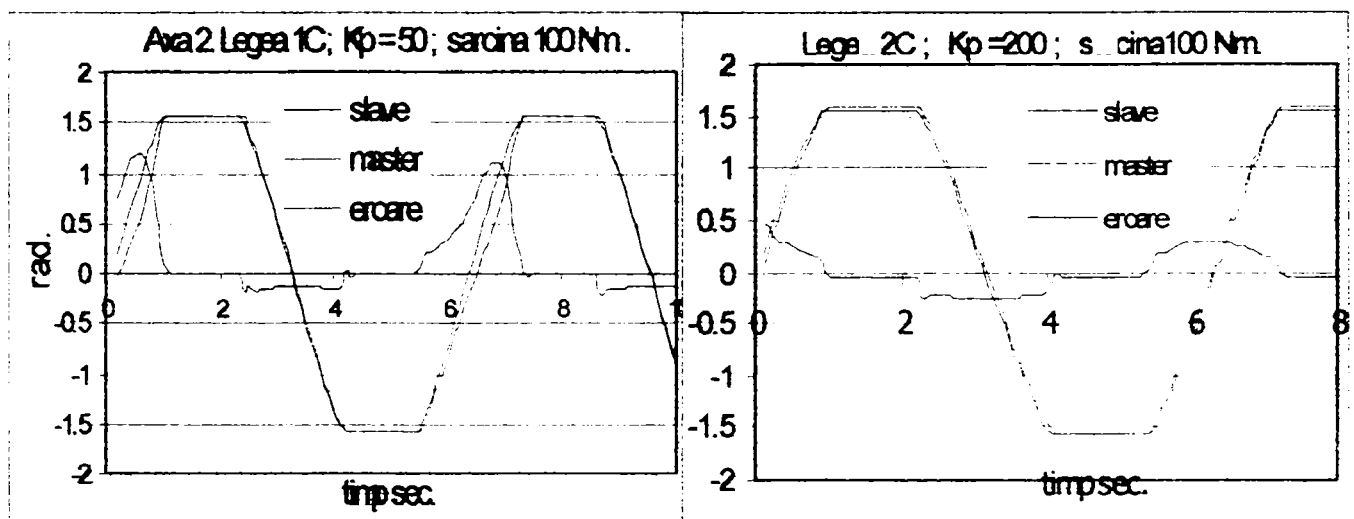


Figura 4.15

eroarea de urmărire a poziției pe o traiectorie prestabilită. Traiectoria și viteza pe traiectorie s-au ales pentru a evidenția o situație reală complexă. Este vorba de urmărirea poziției pentru o axă de rotație în plan vertical (cazul axei 2 a sistemului master-slave) unde momentul de încărcare depinde de unghiul acestei axe cu orizontală, de lungimea brațului și evident de greutatea sarcinii manipulate. Pentru relevanță s-a simulat unul din cazurile cele mai defavorabile de urmărire a poziției și anume cazul în care brațul are lungime maximă (brațul și antebrațul sunt în prelungire), iar deplasarea se face între $(-\pi/2 \div \pi/2)$, cu viteza de 1 rad./s. Aceste precizări sunt necesare pentru a explica curba de evoluție a erorii de urmărire a poziției din diagramele prezentate în fig. 4.15, care atinge maximum pentru poziția de 0 rad. și are valori mai mari pe panta ascendentă a traiectoriei. Semnalul de eroare de poziție prezentat în cele două diagrame s-a amplificat de zece ori pentru a putea fi vizualizat împreună cu semnalele de poziție ale părții de master și respectiv slave.

B. Verificarea prin simulare a performanțelor reacției de forță

Dacă pentru determinarea performanțelor de urmărire a poziției literatura de specialitate oferă o gamă diversificată de metode teoretice și experimentale, pentru determinarea performanțelor legate de calitatea reacției de forță nu există o metodologie clară, iar referințele pe această temă sunt foarte puține. În aceste condiții autorul a introdus, într-o viziune proprie, câteva concepte teoretice și indicatori care vizează calitatea reacției de forță într-un sistem de teleoperare controlat bilateral. Acestea au fost prezentate pe larg în capitolul 3. Simulările din acest paragraf au fost concepute în ideea unei verificări preliminare pe cale experimentală a respectivelor concepte teoretice, verificarea finală urmând să fie realizată pe sistemul real. Pentru aceasta s-au folosit două modele de simulare ale sistemului master-slave experimental. Primul model denumit MODELSIM1, care a fost folosit și la determinarea performanțelor de urmărire a poziției, este modelul de simulare al unui sistem master-slave de tip simetric. Al doilea model, denumit MODELSIM3, se referă la un sistem master-slave de tip asimetric și diferă de primul pe partea de master unde în locul blocului **MAPx** este utilizat blocul **MAFx** și pe partea de control, unde în locul blocului **BCS-VPx** se utilizează blocul **BCA-lx**. Schema celui de-al doilea model de simulare este prezentată în fig. 4.16. Pentru o aprecierea performanțelor legate de reacția de forță, simulările au fost focalizate pe următoarele probleme:

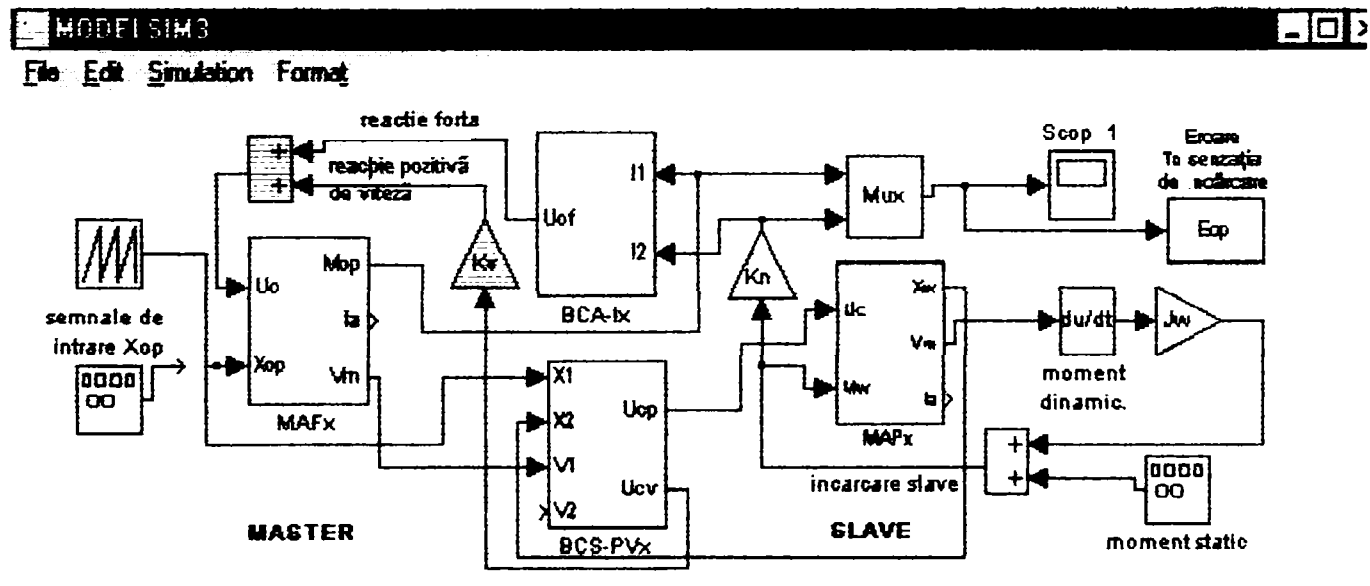


Figura 4.16

1B. Stabilirea pe cale experimentală a dependenței dintre coeficientul de scalare al forței (n) și parametrii sistemului master-slave. Acest coeficient, introdus în paragraful

3.2, este dat de raportul dintre momentul de sarcină și momentul depus de operator pentru a menține sistemul master-slave în echilibru (viteză zero). Pentru verificarea, prin simulare, a dependenței acestui coeficient de parametrii sistemului s-au luat în

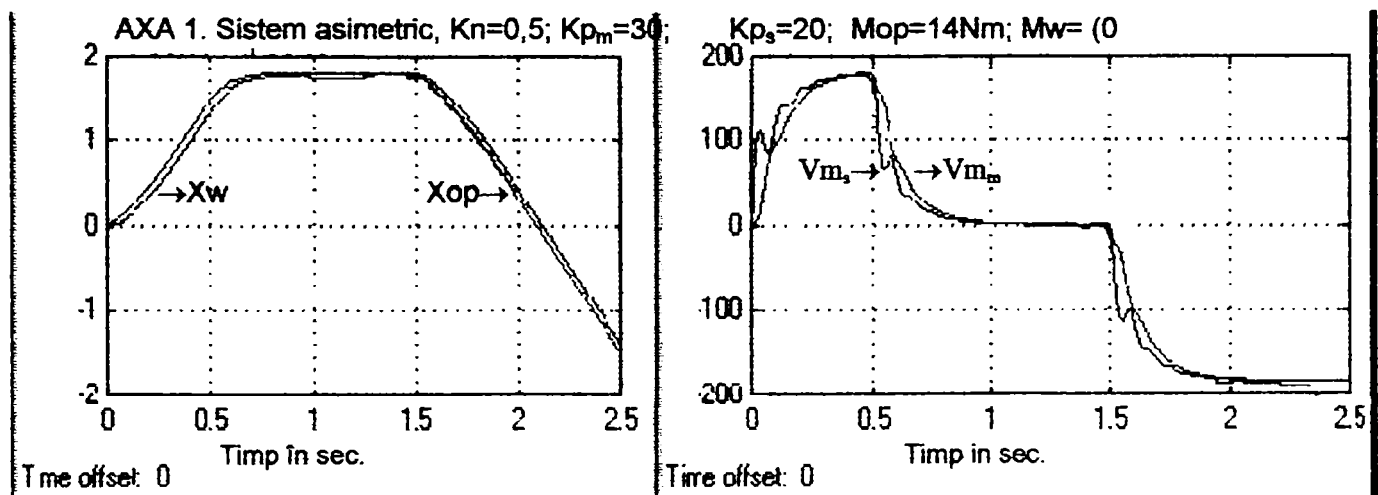


Figura 4.18

considerare mai multe cazuri, din care se prezintă două. Primul se referă la un sistem master-slave de tip simetric în care motorul din partea de master este identic cu motorul din partea de slave. Coeficientul de scalare în această situație este dat de relația (3.56), adică de raportul dintre factorii de amplificare a servoamplificatoarelor din cele două părți. Relația este validată de rezultatele obținute prin simulare. În cele două

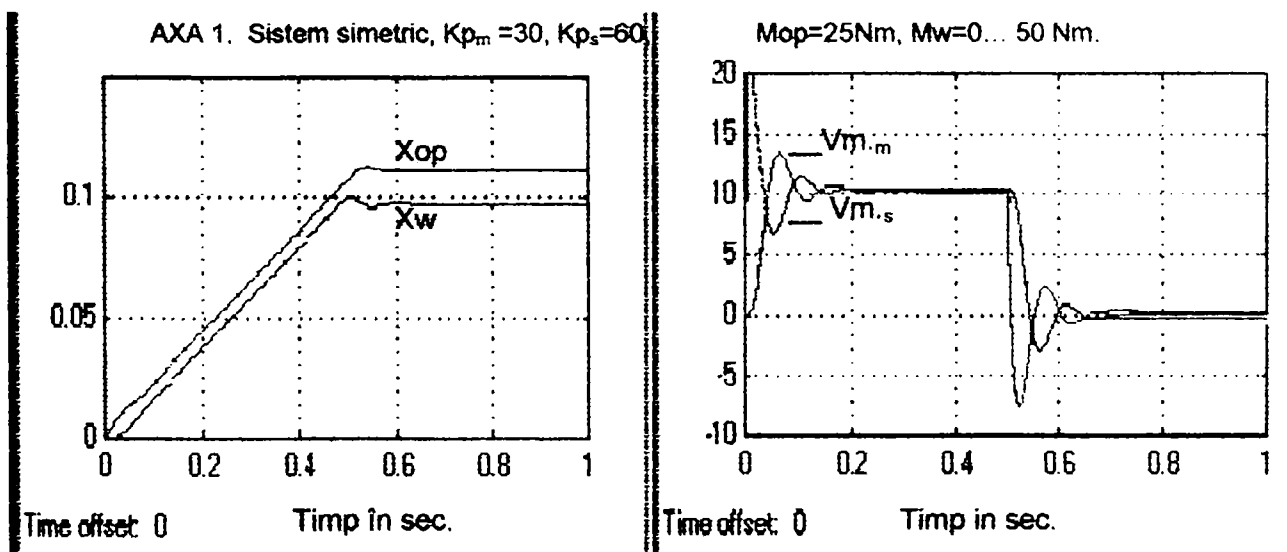


Figura 4.17

diagrame din fig. 4.17, se prezintă evoluția în timp a pozițiilor unghiulare și respectiv a vitezelor unghiulare în faza premergătoare echilibrului și în cea de echilibru. Diagramele folosite ca exemplu se referă la axa 1 a sistemului simulat. Parametrii de simulare sunt prezentați în figură. Al doilea caz, prezentat, se referă la un sistem master-slave de tip asimetric.

Coeficientul de scalare al forței, în acest caz, este dat de relația (3.57). Diagramele din fig. 4.18 confirmă relația în cauză. Acestea se referă la aceeași axă a sistemului master-slave (axa 1).

2B. Determinarea coeficientului general de calitate a transmiterii momentelor de încărcare externă (D), introdus prin relațiile (3.31) și (3.32), care definește *sensibilitatea* sistemului master-slave la modificarea condițiilor de încărcare în partea de master și în partea de slave. El poate fi determinat pe baza raportului dintre diferența de încărcare a celor două unități și viteza de deplasare a acestora. Din diagramele prezentate în fig.4.17 și 4.18 se deduc următoarele valori ale coeficientului în discuție: pentru sistemul de tip simetric $D = 0,4 \text{ rad / (s.N.m)}$, iar pentru sistemul de tip asimetric $D = 6 \text{ rad / (s.N.m)}$

3B. Momentul de încărcare reflectat la mâna operatorului în condițiile în care brațul master este ținut în aceeași poziție iar brațul slave este încărcat cu o sarcină variabilă. Prin această determinare se urmărește capacitatea sistemului master-slave, controlat bilateral, de a transmite pe calea inversă forța de încărcare (*backdrivability*). În fig.4.19 sunt prezentate rezultatele simulării pentru cele două sisteme, de tip simetric și de tip asimetric. Modelul și parametrii de simulare sunt cei folosiți la determinările **1B** și **2B**. Diagramele din figură evidențiază calitatea transferului forței de reacție, care este mai bună în cazul sistemelor asimetrice. Se evidențiază de asemenea factorul de scalare al forței, care are o valoare de aproximativ de $1/2$, în ambele cazuri.

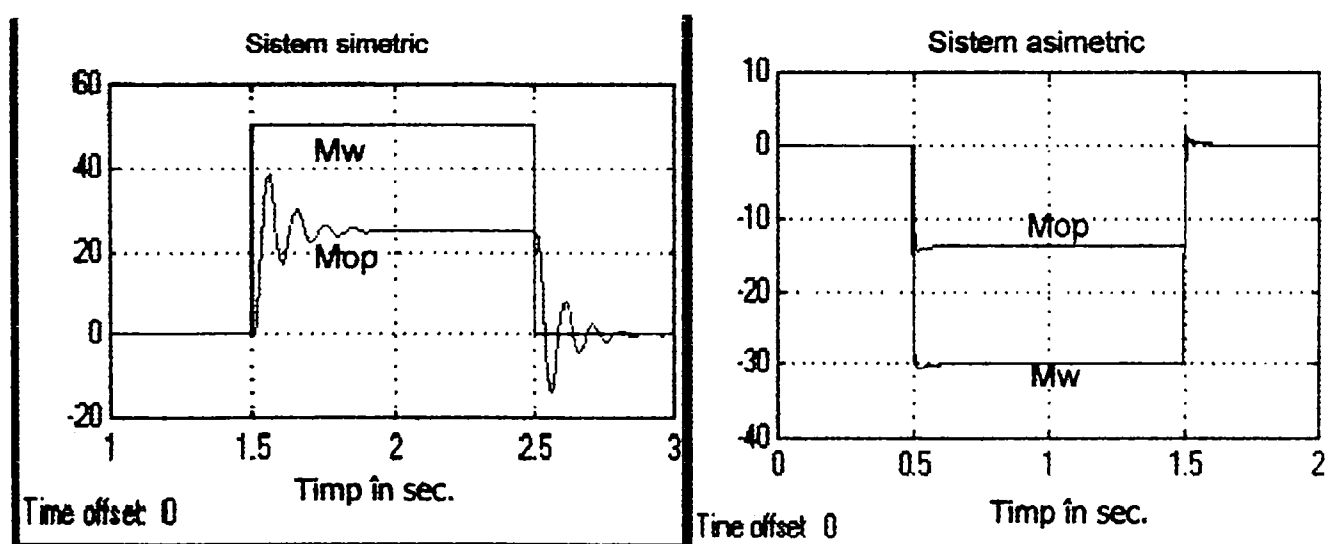


Figura 4.19

4B. Determinarea momentului reflectat la mâna operatorului la contactului brațului slave cu un mediu cu o rigiditate (elasticitate) cunoscută. Pentru simularea acestui contact, brațul slave se încarcă suplimentar cu un moment de sarcină proporțional cu

rigiditatea mediului, c_w , și cu poziția unghiulară a brațului ($M_{cw} = c_w X_w$). În cazul în care suma momentelor de încărcare devine egală cu momentul maxim dezvoltat de motor mișcarea brațului slave încetează chiar dacă cea a brațului master așa cum reiese din diagramele prezentate în fig.4.20. Acestea s-au obținut prin simularea axei 1 în condițiile de simulare prezentate în fig.4.14 la care se adaugă condiția contactului cu un mediu, cu rigiditatea $c_w = 200 \text{ Nm / rad}$. În prima diagramă din fig.4.20 se prezintă cazul sistemului de tip simetric controlat cu legea **2C** unde momentul dezvoltat de motoarele din partea de slave și respectiv din partea de master este proporțional cu abaterea de poziție și de viteză între cele două unități. În diagramă apare clar tendința de oscilație a sistemului, mai pronunțată la eliberarea contactului. Aceasta se datorează amortizării sistemului care joacă rolul inductivității din circuitele electrice. Diagrama a doua din fig. 4.14, în care s-a prezentat răspunsul sistemului la o încărcare

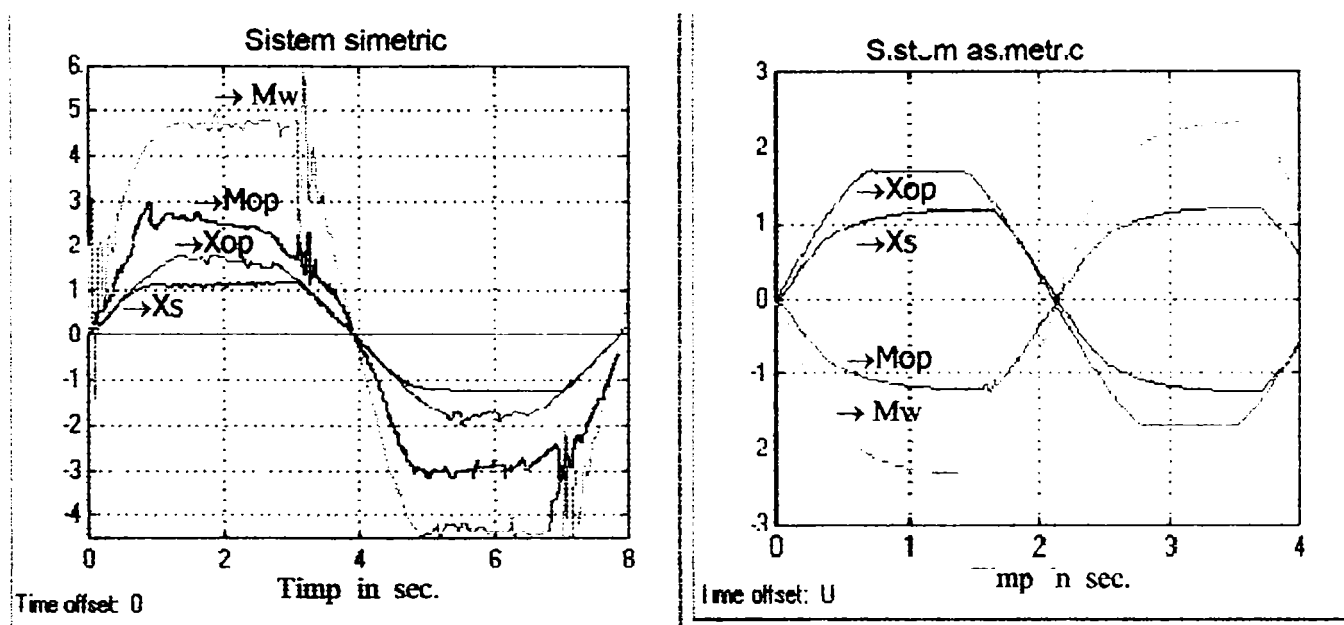


Figura 4.20

treaptă, (bruscă, echivalentă cu contactul cu un mediu neelasic sau cu rigiditate infinită), evidențiază tendința de oscilație mai pronunțată în momentul încărcării. Aceasta confirmă ideea lansată mai înainte. În a doua diagramă din fig.4.20 se evidențiază răspunsul sistemului de tip asimetric la contactul cu un mediu elastic. În cadrul acestui sistem brațul slave este controlat în poziție după o lege proporțională cu factorul $K_p = 50 \text{ V / rad}$, iar brațul master este controlat în forță (moment), după o lege proporțională cu factorul $K_f = 20 \text{ V / Nm}$. Factorul de scalare a forței a fost de 1/2. La acești parametri de simulare complianța sistemului asimetric este mai mare decât a celui nesimetric. Acest fapt se evidențiază și în forma semnalelor din diagrama în discuție.

5B. Determinarea erorii în senzația de încărcare a operatorului, concept original introdus de autor în paragraful 3.4 prin relațiile analitice (3.60) și (3.61), în condițiile în care operatorul impune o lege de mișcare brațului master. S-au simulat mai multe situații în care s-a urmărit influența vitezei și accelerației (impuse de operator) asupra erorii în senzația de încărcare. În fig. 4.21 sunt prezentate, în două diagrame, rezultatele în urma simulării axei 3 a sistemului master-slave, modelate cu MODELSIM3, prezentat în fig.4.16. Cele două diagrame au fost obținute cu aceiași parametri de simulare, însă pentru variații diferite ale mărimii de intrare, adică ale poziției unghiulare X_{op} , impusă de operator. Prin dublarea accelerației unghiulare și, prin urmare, a vitezei unghiulare eroarea de încărcare ε_{op} se dublează. Acest fapt validează relația (3.40) care stabilește relația dintre eroarea de încărcare, viteza în regim stabilizat și coeficientul de transmitere a momentelor de încărcare externă. În ambele diagrame se remarcă valoarea mult mai mare a erorii de încărcare în regim dinamic față de cea în regim static (pe palierul mărimii de intrare). În regimul static simulat, brațul slave este în contact un mediu cu rigiditate cunoscută (caz discutat deja la **4B**), iar eroarea de încărcare este aproape insesizabilă în raport cu eroarea în regim dinamic, cu alte cuvinte problemele legate de senzația operatorului apar în regimul dinamic de mișcare.

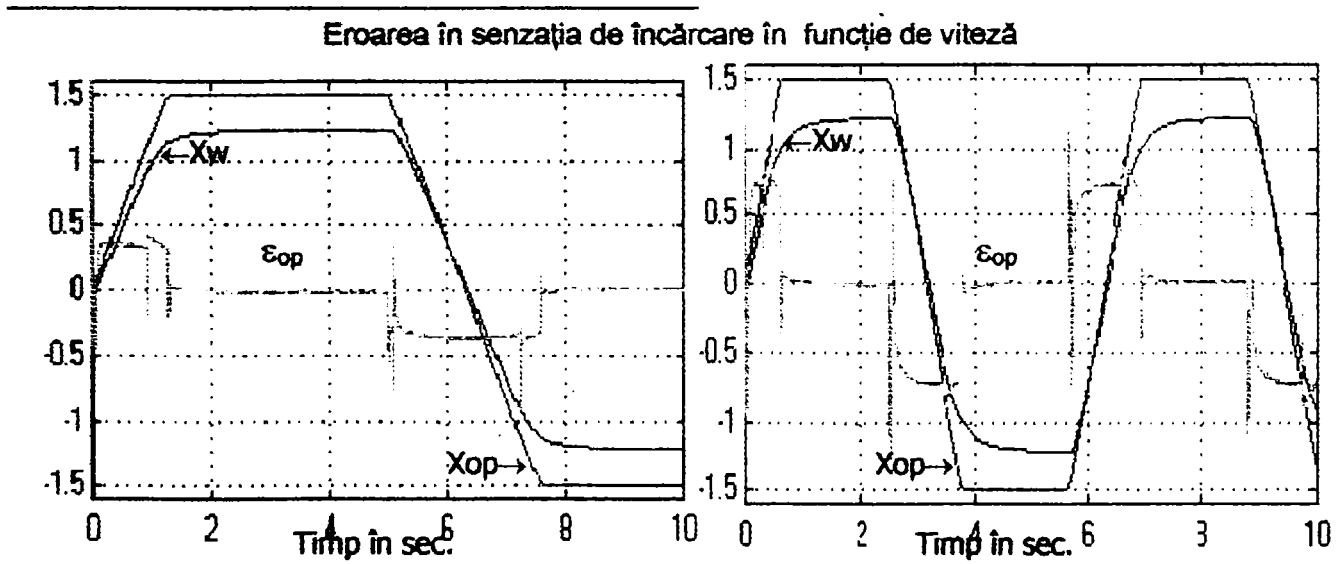


Figura 4.21

6B. Determinarea erorii de încărcare în senzația operatorului în funcție de amortizarea sistemului. Relațiile (3.67), (3.68), (4.69) și (3.70) evidențiază dependența dintre eroarea de încărcare și forțele de amortizare datorate frecărilor vâscoase. S-a stabilit, analitic, că în cazul sistemelor master-slave acționate cu motoare de curent

continuu ponderea cea mai mare în amortizare o are tensiunea contraelectromotoare (E_0) care este proporțională cu viteza unghiulară.

Pentru micșorarea erorii în senzația de încărcare a operatorului s-a propus o soluție

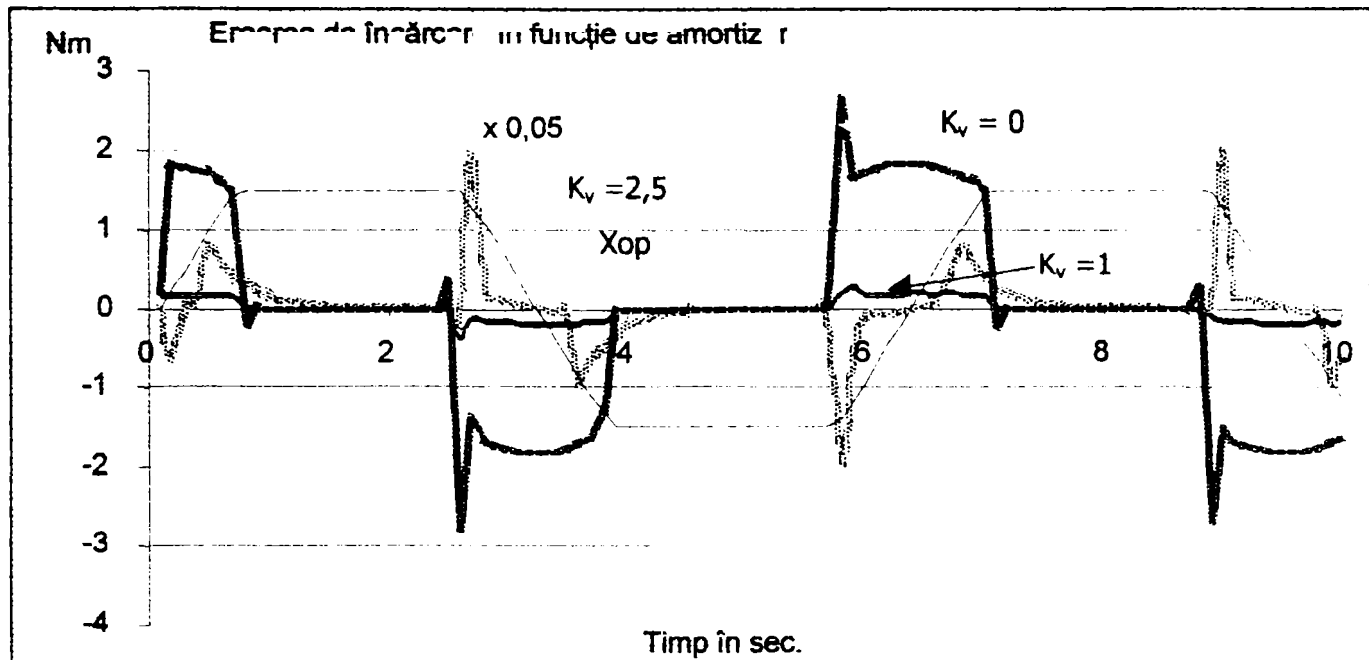


Figura 4.22

originală și anume cea de compensare a frecărilor vâscoase prin introducerea unei reacții pozitive de viteză atât în partea de master cât și în cea de slave. În fig. 4.22 se prezintă rezultatele simulării reacției pozitive de viteză în partea de master a sistemului modelat cu MODELSIM3. S-au luat în considerare trei cazuri:

1. sistem master-slave de tip asimetric fără reacție pozitivă de viteză în partea de master, $K_v=0$ V.s./rad. Eroarea de încărcare în acest caz este semnificativă, ea depinzând de viteza impusă de operator brațului master, raportul de transmisie al reductorului de turație și constanta tensiunii electromotoare K_e .
2. Sistem master-slave de tip asimetric cu reacție pozitivă (moderată) de viteză în partea de master, $K_v=1$ V.s./rad. Eroarea de încărcare în acest caz este cu un ordin de mărime mai mică decât în cazul 1.
3. Sistem master-slave de tip asimetric cu reacție pozitivă (totală) de viteză în partea de master, $K_v=2,5$ V.s./rad. În această caz sistemul master devine astatic de ordinul 2, cu alte cuvinte un sistem cu amortizare zero. Eroarea în senzația operatorului, în acest caz, este cu două ordine de mărime mai mică decât cea din cazul 1. În diagrama din figură semnalul de eroare, în cauză, a fost amplificat cu factorul 20, pentru a-l vizualiza pe aceeași scală cu semnalele de eroare de la cazurile 1 și 2.

Contribuții personale

Contribuțiile personale referitoare la simularea sistemelor dinamice, în general, și a teleoperatoarelor controlate bilateral, în particular, sunt prezentate succint în următoarele:

- S-au stabilit, într-un mod clar, care sunt entitățile unui proces de simulare a unui sistem dinamic și care sunt condițiile ce trebuiesc îndeplinite pentru o simulare corectă.
- S-a realizat o bibliotecă de utilizator care permite o abordare flexibilă, prin simulare, a controlului bilateral în teleoperare.
- Modelele de simulare concepute de autor sunt originale. Ele sunt bazate pe un fundament teoretic solid și pe o bună cunoaștere, cantitativă și calitativă, a proceselor simulate. Față de modelele asemănătoare din literatură cele create de autor țin cont de situațiile reale și în special valorile limită a variabilelor din proces. Cu alte cuvinte, s-a ținut cont de faptul, spre exemplu, că tensiunea de la ieșirea unui circuit de reglare este limitată, sau că puterea sursei care alimentează amplificatorul final nu este infinită. În aceste condiții multe dintre rezultatele simulărilor diferă de cele din literatură, dar se apropie mai mult de cele din realitate.
- Modul de organizare al cercetării prin simulare a proceselor legate de controlul bilateral, prezentarea rezultatelor experimentale și mai ales interpretarea acestora sunt contribuții personale considerate, de autor, valoroase pentru cercetarea experimentală în general.

4.5 Rezultate experimentale și concluzii privind controlul bilateral

Pentru validarea în practică a ipotezelor și concluziilor referitoare la controlul bilateral în poziție și forță, emise în baza analizelor făcute pe modelele analitice și modelele de simulare s-au efectuat o serie de teste experimentale pe un sistem de teleoperare real. Este vorba de sistemul master-slave experimental descris succint în paragraful 4.2. Organizarea testelor pe acest sistem s-a făcut în strânsă corelație cu ipotezele și conceptele teoretice referitoare la controlul bilateral, introduse de autor în capitolele precedente. S-a mai ținut cont de aplicațiile specifice teleoperatoarelor bilaterale și de experimentele, pe tema în discuție, comunicate în literatura de specialitate. În acest sens s-a exprimat și observația proprie, conform căreia: teoria teleoperatoarelor bilaterale este relativ bogată în referințe, în schimb partea practică, experimentală este reliefată mai rar și atunci foarte sumar sau cu o transparență foarte redusă. Se citează, totuși, câteva referințe care au inspirat organizarea testelor experimentale care vor fi prezentate succint în continuare [Olac 96], [Boyer 96], [Eusebi 95], [Asada 91]. Testele experimentale au fost grupate în două clase: prima vizează comportarea sistemului master-slave într-un spațiu liber ; a doua vizează comportarea acestuia la contactul cu un mediu rigid.

4.5.1. Mișcarea brațului slave într-un spațiu liber

Testele experimentale din această clasă au fost direcționate spre:

- a. determinarea performanțelor de urmărire a poziției
- b. determinarea calității transferului invers al forței (*backdrivability*).

Testele s-au realizat cu sistemul master-slave experimental (fig. 4.23), prezentat în paragraful 4.2. Axele mecanismului de orientare (4, 5 și 6) au fost controlate numai după legea **1C** (controlul proporțional în modul *poziție-pozitie*), iar axele 1, 2 și 3, ale mecanismului generator de traiectorii [Kovacs 82], sunt controlate atât după legea amintită mai înainte cât și după legile introduse prin relațiile: (4.11), adică controlul *proporțional-derivativ al poziției* și (4.12), adică controlul în modul *poziție-forță*

Efactorul final (dispozitivul de prehensiune -3) al brațului slave (2) a fost dotat cu doi senzori de proximitate (produși de Vest DIGITAL) bazați pe principiul emisie și recepției (unde reflectate), în infraroșu, care pot detecta suprafața unui obiect aflat la o distanță maximă de 400 mm. În partea de slave sunt fixate trei repere (4) a căror



Figura 4.23

poziția și direcția poate fi ușor modificată. Pe un panou mobil (5) s-au montat trei lămpi de semnalizare de culori diferite, câte una pentru fiecare reper. Acestea se aprind una câte una, indicând reperul spre care operatorul (1) trebuie să dirijeze mișcarea efectorului final astfel încât senzorul (senzorii) să detecteze reperul în cauză. În momentul detectării acestuia,

de către unul din senzorii de proximitate, lampa în cauză se aprinde intermitent, iar la detectarea și cu cel de-al doilea senzor, aceasta se stinge. Tot în partea de slave este montată, pe un dispozitiv de orientare cu două axe, o cameră de luat vederi. Prin intermediul acesteia operatorul poate urmări (pe un display) scenele din apropierea reperelor amintite.

Testele relevante din această clasă și rezultatele lor sunt prezentate în cele urmează.

1a . Urmărirea mișcării în regimul de poziționare grosieră.

În viziunea autorului (prezentată în paragraful 2.2), mișcarea de poziționare și orientare a efectorului final are două faze : faza de mișcare grosieră și faza de mișcare fină în apropierea țintei. Testele experimentale destinate fazei grosiere de mișcare au vizat, în primul rând, timpul de execuție al acesteia, adică timpul scurs între momentul aprinderii unei lămpi de semnalizare și momentul în care aceasta începe să lumineze intermitent. Cu alte cuvinte, s-a înregistrat timpul scurs între lansarea comenzii și momentul în care primul senzor a detectat reperul țintă. În cadrul experimentelor s-au luat în considerare schemele de control, și parametri acestora, folosite în procesul de simulare, prezentat în paragraful anterior. S-au înregistrat, pe lângă timpul

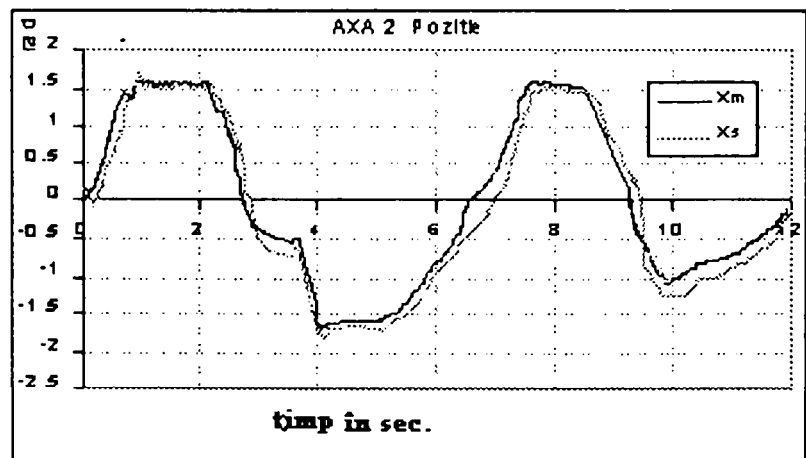


Fig. 4.24

de execuție al operațiunii, pozițiile brațului master și ale brațului slave. După prelucrare rezultatele experimentale s-au emis următoarele concluzii:

- timpul de execuție al fazei de mișcare grosieră este comparabil cu timpul în care operatorul execută această fază acționând direct asupra obiectului manipulat.
- Performanțele de urmărire a traiectoriei brațului master de către brațul slave nu diferă în mod esențial de cele determinate prin simulare în paragraful anterior. În această idee, pentru exemplificare se prezintă în fig. 4.24 traiectoriile înregistrate pentru axa 2 a sistemului master-slave real pentru a fi comparate cu cele ale sistemului simulat, prezentate în fig.4.13. Condițiile reale de testare sunt asemănătoare cu cele simulate.

2.a Urmărirea mișcării în regimul de poziționare fină.

Acest regim de mișcare este prezent în majoritatea aplicațiilor în care brațul slave evoluează liber și execută operațiuni de transfer de obiecte (*pick and place*), sau de menținere a acestora într-o poziție fixă. Testele efectuate vizează, în esență, poziționarea cu o toleranță impusă. În cazul discutat aceasta se realizează când ambii senzori de proximitate detectează reperul. Dimensiunile reperului și distanța dintre senzori determină finețea poziționării.

Concluziile autorului, în urma prelucrării rezultatelor obținute pe baza testelor, sunt sintetizate în următoarele observații:

- timpul de execuție a unei operațiuni de poziționare fină depășește cel puțin cu un ordin de mărime timpul necesar operatorului să efectueze aceeași operațiune în mod direct. Pentru această fază a mișcării rezultatele experimentale diferă de cele obținute prin simulare. În acest sens două constatări sunt relevante. Prima se referă la axele controlate numai în poziție (legea 1C, din paragraful precedent), unde se înregistrează un prag de insensibilitate la transferul direct al poziției, dinspre master spre slave. Cu alte cuvinte la o variație lentă și cu amplitudine redusă a poziției brațului master, brațul slave nu răspunde. Această comportare nu este specifică numai sistemului master-slave analizat. Ea a fost înregistrată și la manipuloarele sincrone MS 500, cu acționare hidraulică, testate de autor [Diaconu 89]. În literatura de specialitate acest fenomen, în opinia autorului, foarte important, pentru sistemele de urmărire a poziției, este prezentat (sumar) doar într-o singură referință [Egorov 80], în care se constată tendința de "lipire" aparentă a elementelor cuplelor cinematice la viteze mai mici decât una critică (neprecizându-se valoarea critică).

- A doua constatare se referă la axele controlate după legile 2C și 3C, unde la viteze mici se observă o deplasare în salturi a brațului slave și o tendință de autooscilație a acestuia la anularea vitezei de deplasare (în poziție fixă). Fenomenele care fac obiectul celor două constatări, se datorează momentelor forțelor de frecare a căror caracteristică este neliniară la viteze reduse. Datorită acestei neliniarități în majoritatea modelelor analitice (liniare), consacrate descrierii dinamicii unei cuple cinematice,

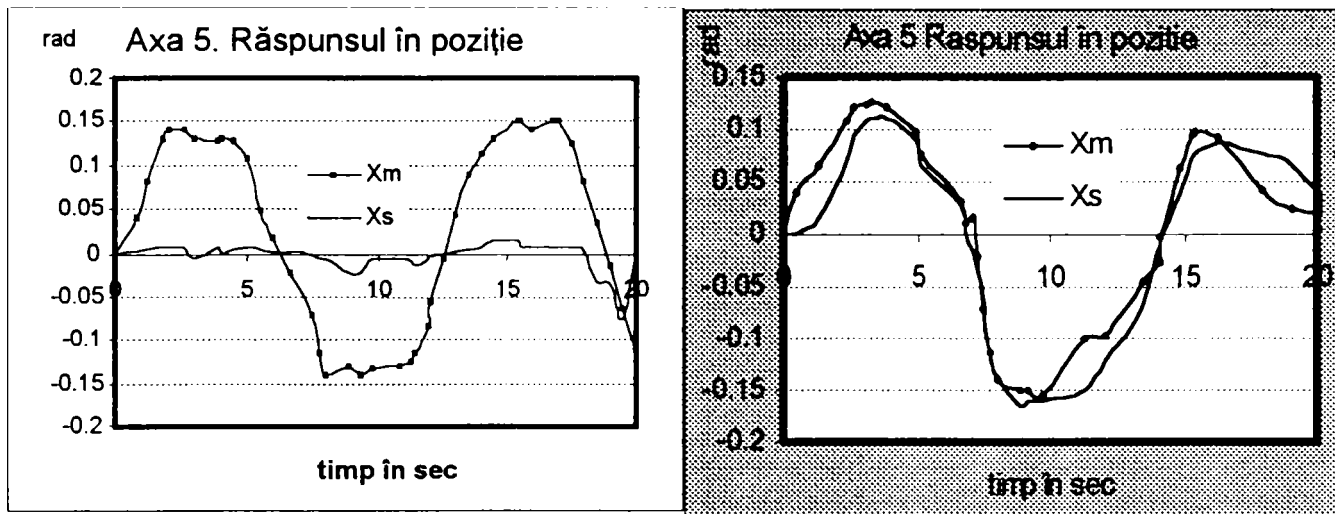


Figura 4.25

frecările amintite sunt neglijate. Această neglijare, intenționată, este prezentă și în modelele de simulare realizate de autor și prezentate în paragraful anterior. Așa se explică faptul că fenomenele menționate mai înainte nu au fost evidențiate în procesele simulate. Pentru contracararea acestor fenomene autorul a propus, și verificat în practică, o soluție tehnică originală care constă în utilizarea unei legi de control neliniare pentru eroarea de poziție. Aceasta se realizează printr-un amplificator cu reacție neliniară din care la erori mici de poziție realizează o amplificare mai mare. [Diaconu 88], [Ciugudean 89], [Diaconu 94]. În fig.4.25 se prezintă, spre exemplificare, răspunsurile în poziție ale axei 5 a sistemului master slave, axă controlată în modul poziție-poziție: a) după o lege liniară; b) după lege neliniară. În literatura de specialitate apare această idee a legii de control neliniare, numai că în majoritatea referințelor se recomandă o amplificare mai mare nu la erorile mici ci la cele mari [Călin 84], [Menken '98]. O astfel de lege este adecvată situației în care se constată tendința de mișcare în salturi sau cea de oscilație în poziția de echilibru. În fig. 3A din Anexa A se prezintă schemele amplificatoarelor care realizează cele două legi neliniare, amintite mai înainte.

1b . Teste experimentale în care brațul master este lăsat complet liber, iar brațul slave este încărcat cu sarcini cunoscute, urmărindu-se vitezele de deplasare ale celor două brațe. Aceste teste, cunoscute în literatură ca teste pentru "*backdrivability*", [Eusebi 95], [Salcudean 95] au fost dirijate, în cazul de față, spre verificarea coeficientului de calitate al transferului momentelor de încărcare externă (D), care este un indicator de calitate al reacției de forță introdus de autor în paragraful 3.2.

2b .Teste experimentale în care brațul master este ținut de operator într-o poziție fixă, iar brațul slave se încarcă cu sarcini cunoscute. Se urmărește transferul momentelor de sarcină la mâna operatorului, măsurând momentul dezvoltat de motorul brațului master. Detalii în legătură cu aceste experimente se găsesc în [Diaconu 96], [Diaconu 97]. În continuare sunt punctate câteva dintre concluziile autorului emise în baza rezultatelor experimentale.

- Se constată și în cazul transferului invers, dinspre slave spre master, existența unui prag de insensibilitate, care în procesul de simulare nu a fost evidențiat. Această insensibilitate, se manifestă prin faptul că forțele (momentele) mici de încărcare și cu variație lentă ale brațului slave nu se transmit spre brațul master. Valoarea pragului de insensibilitate este determinată de parametri tehnici ai transmisiilor mecanice din partea de master și partea de slave și de parametri schemei de control bilateral. În cazul controlului de tip simetric, în modul poziție-poziție, pragul în discuție se încadrează în plaja $(0 \div 0.3)$ Nm. În cazul controlului de tip asimetric, în modul poziție-forță, bazat pe determinarea indirectă a momentelor de încărcare, pragul de insensibilitate este determinat, în principal, de raportul de transmisie al reductorului de turație din partea de slave. Plaja de variație a acestuia, determinată experimental, este de $(0 \div 0,2)$ Nm. Pentru același tip de control, bazat însă pe senzori de forță / moment montați la ieșirea reductorului de turație, sau la nivelul efectorului final, pragul de isensibilitate este foarte redus , el depinzând doar de caracteristica statică a senzorului [Vischer 95].

- Pentru sarcini de încărcare care depășesc pragul de insensibilitate comportareamodelului real se apropie de cea a modelului simulat. Se exemplifică în acest sens cu valorile coeficientului de calitate D , determinate pe cale experimentală, care se încadrează în intervalul $(0.2 \div 0, 6)$ rad/(N.m.s) pentru axele 4,5 și 6, controlate în modul poziție-poziție și în intervalul $(3,5 \div 8)$ rad/(N.m.s) pentru axele 1,2 și 3, controlate în modul poziție-forță. Aceste valori sunt comparabile cu cele determinate

în modul poziție-poziție și în intervalul $(3,5 \div 8)$ rad/(N.m.s) pentru axele 1,2 și 3, controlate în modul poziție-forță. Aceste valori sunt comparabile cu cele determinate prin simulările din grupa 2B, prezentate în paragraful precedent.

În fig.4.26 se prezintă două diagrame obținute prin prelucrarea rezultatelor experimentale ale unor teste din categoria 2b. În acestea se prezintă momentul de încărcare al brațului slave și momentul transmis de brațul master la mâna operatorului, înregistrate la axa 5, a sistemului master-slave, controlată în *modul poziție - poziție* și respectiv la axa 1, controlată în modul poziție-forță. Parametrii schemelor de control sunt apropiați, valoric, de cei utilizați în simularea 3B. Comparând diagramele din fig.4.13, obținute prin simulare cu cele din fig.4.26, obținute prin prelucrarea rezultatelor

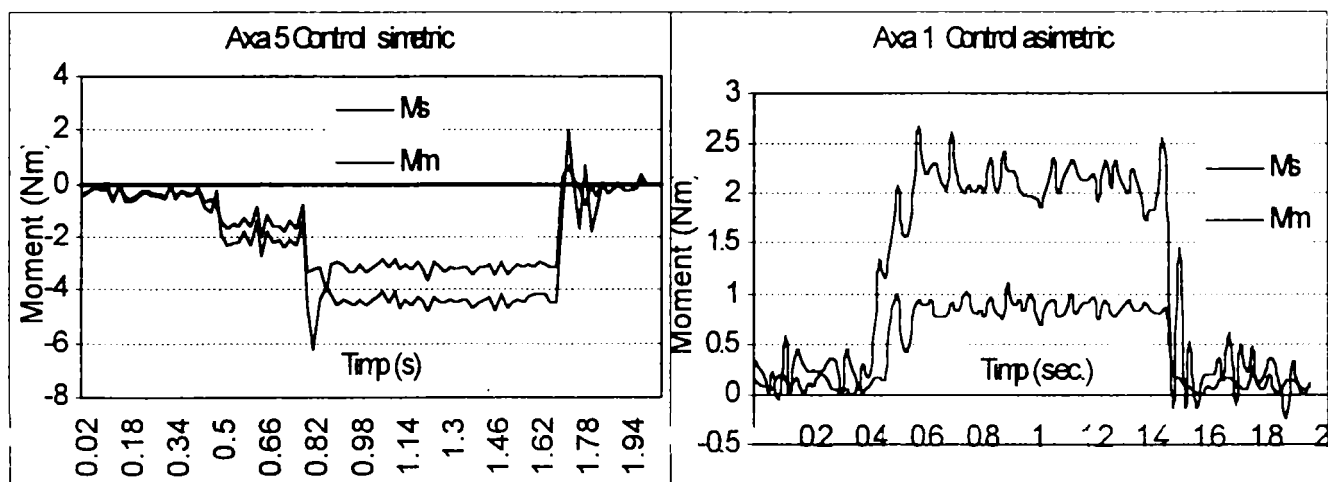


Figura 4.26

testelor pe modelul real, concluzia punctată mai sus este susținută

4.5.2 Mișcarea brațului slave într-un spațiu cu constrângeri.

Testele experimentale din această clasă au vizat determinarea comportamentului sistemului master-slave la contactul brațului slave cu medii având impedanțe (mecanice) diferite. Au fost testate două categorii de contact:

1.Contactul cu medii care au impedanță infinită. Acest contact (impact) poate să apară în următoarele situații: la coliziunea brațului slave, aflat în mișcare, cu un obstacol aflat în spațiul său de lucru; în aplicațiile de montaj și în cele de prelucrare mecanică (debavurare, polizare, șlefuire, etc). Testele din această categorie au vizat: determinarea forțelor / momentelor de reacțiune la nivelul brațului slave; a forțelor transmise brațului master și forțelor reflectate la mâna operatorului, în momentul impactului. Pentru realizarea experimentelor din această categorie brațul slave (1) a fost dotat cu un cap de forță pentru debitare, constând dintr-un motor electric (2) care

acționează un disc abraziv (3) (fig. 4.27). Pe o platformă fixă, aflată în spațiul de lucru al brațului slave, este montat un corp din aluminiu (4). Efectorul final s-a deplasat cu viteze diferite (prestabilite) spre obiectul montat pe platformă. S-au înregistrat următoarele mărimi: poziția brațului master, poziția brațului slave, curentul rotorului a motorului din partea de slave și respectiv din partea de master.

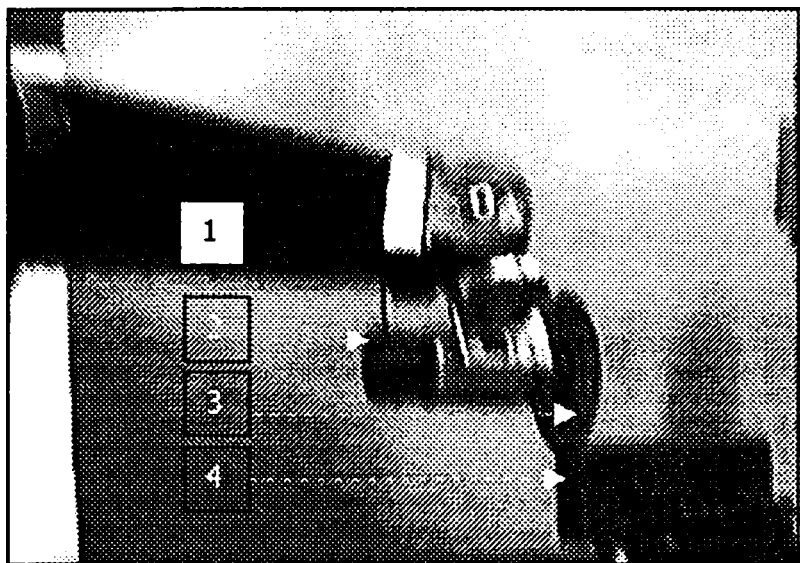


Figura 4.27

Pentru a facilita interpretarea rezultatelor experimentale, în contextul controlului bilateral, și pentru o comparație cu rezultatele obținute prin simulare, s-a comandat numai una dintre axele sistemului master-slave. Comanda s-a realizat în două moduri: *modul poziție-poziție* și *modul poziție-forță*. În fig.4.28 se prezintă diagramele rezultate în urma prelucrării rezultatelor experimentale obținute pentru axa 5 a sistemului master-slave, comandată în modul poziție-poziție.

Valoarea factorilor de amplificare în partea de master și în partea de slave a fost în jur de 10 V/rad. La această valoare (relativ mică) s-a putut detecta impactul atât în partea de slave cât și în partea de master. Concluzia autorului bazată pe aceste teste este aceea că în cazul unui sistem de tip simetric (în care reacția de forță se obține pe baza diferenței de poziție) calitatea reacției de forță este mai bună dacă rigiditatea sistemului este mai mică. Micșorarea rigidității conduce, în schimb, la înrăutățirea

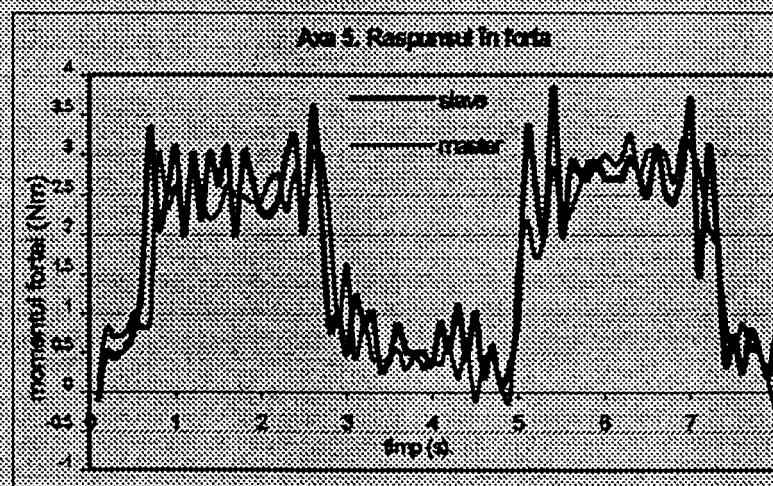
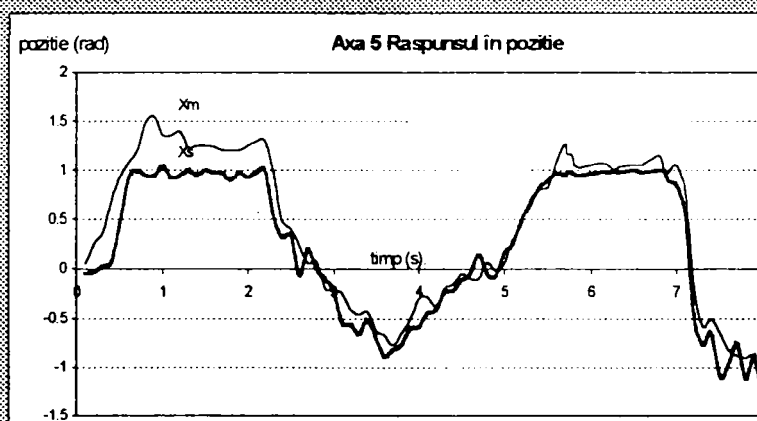


Figura 4.28

modifice rigiditatea (prin modificarea amplificării), în funcție de tipul aplicației [**Diaconu 97**].

2. Contactul cu medii care au impedanță finită

Problema principală la acest tip de contact este creată, în cele mai multe cazuri, de necunoașterea impedanței mediului. În teleoperare această problemă apare frecvent în procesul de fixare a unui obiect în dispozitivul de prehensiune, unde forța de apăsare (de prindere) trebuie corelată cu rigiditatea obiectului astfel încât acesta să nu fie deteriorat dar nici scăpat din

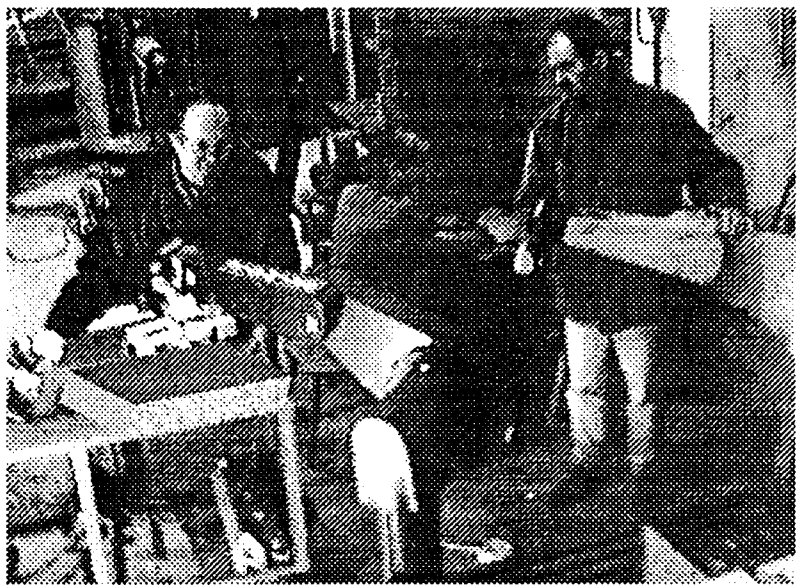


Figura 4.29

dispozitiv. Un experiment sugestiv, pe această temă, întâlnit în mai multe referințe, îl constituie testul de prehensiune al unui ou [Eusebi 95] [Mesaroș 88].

În aplicațiile din medicină , mai precis în endoscopie și laparoscopie, problema simțului contactului cu un obiect cu rigiditate mică este foarte importantă. Un țesut sănătos , spre exemplu, are o altă impedață decât unul bolnav (inflamat) [Schraft 94], [**Diaconu 94**].

Testele experimentale din această categorie, s-au rezumat la mișcarea sacadată (oscilatorie) a brațului slave (fig.4.29), care apasă un obiect spongios realizat din spume poliuretanică (burete). S-au înregistrat pozițiile și respectiv momentele de încărcare din articulațiile brațului slave și ale brațului master, la diverse amplitudini și frecvențe ale mișcării oscilatorii. După prelucrarea rezultatelor experimentale nu s-a putut evidenția în mod clar contactul cu obiectul amintit și nici impedanța s-a mecanică. Prin micșorarea factorului de amplificare servoamplificatoarelor din partea de slave cu un ordin de mărime (la valoarea 10 V/rad), față de cel utilizat în testele legate de performanțele urmăririi poziției, operatorul a putut să sesizeze contactul în discuție, dar numai pe o singură axă, axa de pivotare în plan orizontal (axa 1). Rezultatele amintite mai sus puteau fi anticipate, însă, în ideea formulării unei concluzii clare și argumentate, experimentele din această categorie au fost reluate, dar pe un alt sistem experimental.

argumentate, experimentele din această categorie au fost reluate, dar pe un alt sistem experimental.

Este vorba de un sistem de tip *Macro – micro manipulator* , cu un singur grad de

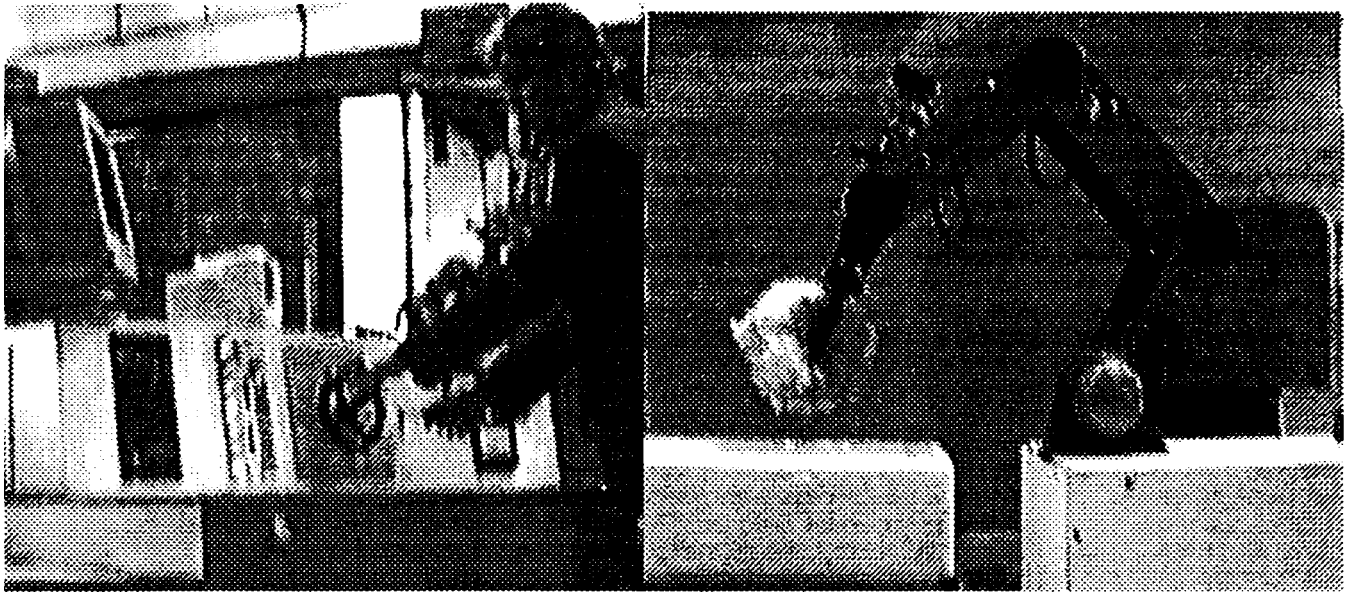


Figura 4.30

libertate (fig. 4.30), a cărei structură este prezentată succint în continuare:

- *Unitatea locală* (master) este formată dintr-un motor de curent continuu cu rotor disc (cu moment de inerție foarte mic) și intrefier axial și un reductor de turație cu raport de transmisie mic. În serie cu arborele reductorului este montat un arbore elastic (arc de torsiune), iar în continuare un arbore rigid pe care s-a montat o roată tip volan cu raza de 12 cm (1). Prin două potențiometre rotative se măsoară pozițiile unghiulare ale arborilor rigizi. Prin intermediul lor se determină atât poziția impusă de operator cât și momentul forței reflectat la mâna acestuia.
- *Unitatea îndepărtată* (slave) este un dispozitiv de prehensiune (al robotului SCORBOT ER III) cu două degete (2), acționat de un motor de curent continuu prin intermediul unui reductor de turație, cu raportul de transmisie 1:20. Poziția relativă a celor două degete este măsurată cu un potențiomtru liniar. Forța de apăsare se determină pe baza unui senzor de forță montat pe unul din degetele dispozitivului. Detaliile privind caracteristicile tehnice ale celor două unități se găsesc în [Diaconu 97], [Scorbot 94].
- *Schema de comandă* pentru acest sistem s-a realizat în baza legii de control bilateral de tip asimetric dată de următoarele relații:

$$\begin{aligned} \tau_m &= -K_n f_s - K_f (f_s - f_m) \\ \tau_s &= K_p (x_m - x_s) \end{aligned} \quad (4.3)$$

unde: τ_m și τ_s sunt momentele dezvoltate de motoarele din cele două părți; f_m - forța (momentul) măsurat la partea de master, f_s - forța în partea de slave (de strângere); x_m și x_s - poziții; K_n - factorul de amplificare, care dă coeficientul de scală al forței (în cazul de față s-a ales valoarea 2) K_f și K_p - factorii de amplificare ai erorii de forță și respectiv de poziție.

Testele cu acest sistem au vizat același obiectiv și anume cel de a reflecta la mâna operatorului forțele de interacțiune ale brațului slave cu medii având rigiditate relativ mică. Pentru aceasta, dispozitivul de prehensiune este comandat, în poziție, să strângă și să elibereze un obiect cu rigiditate mică, din spume poliuretanică (burete). Sau înregistrat: pozițiile în partea de master și în partea de slave și forța și respectiv momentul măsurate cu senzorii specializați din părțile amintite înainte. În fig. 4.31 se prezintă două diagrame care s-au obținut prin prelucrarea rezultatelor experimentale ale unuia dintre aceste teste.

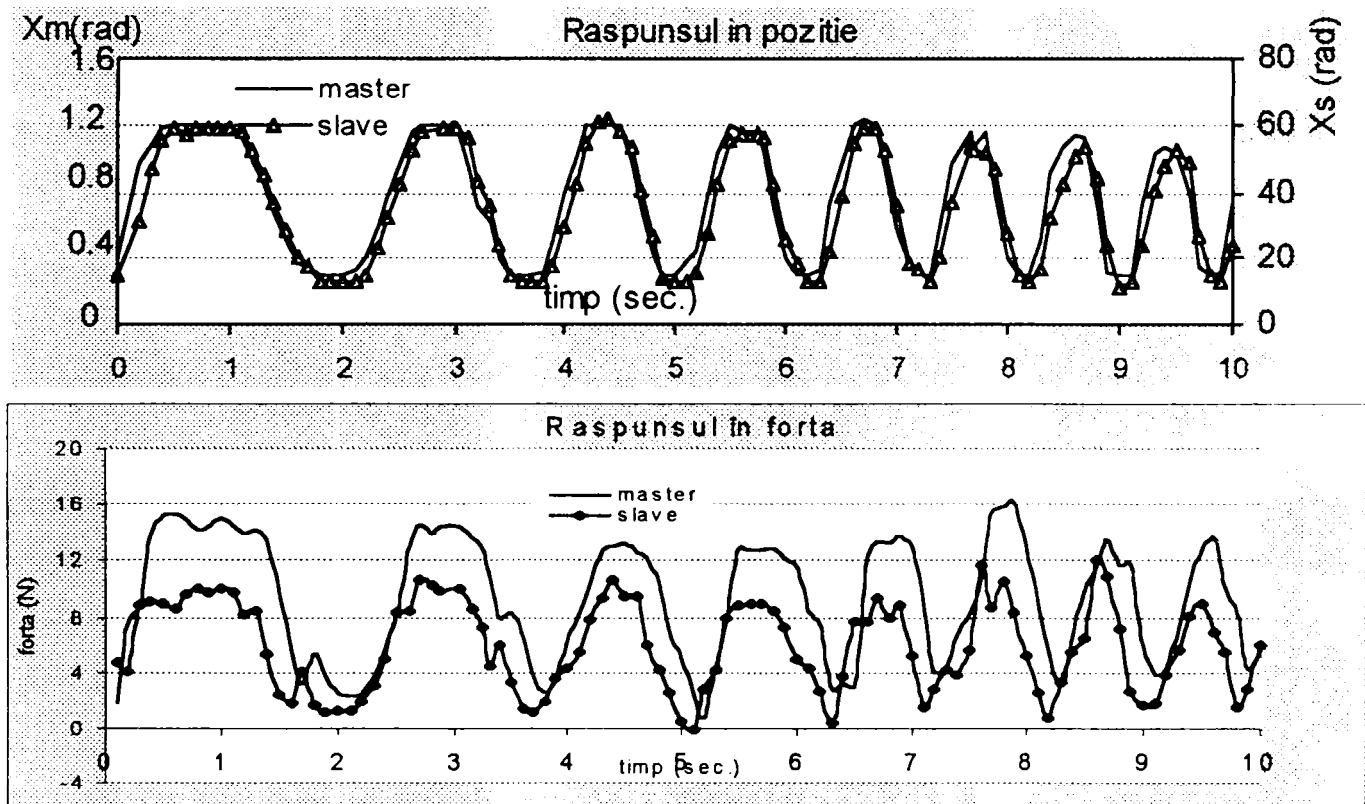


Figura 4.31

Bazat pe rezultatele testelor experimentale efectuate autorul emite, într-o viziune proprie, două concluzii privind interacțiunea unui sistem master-slave, controlat bilateral, cu mediu:

- În controlul bilateral sunt trei probleme care trebuie rezolvate în modul optim: precizia de poziționare, senzația operatorului și stabilitatea sistemului de teleopeare. Creșterea preciziei de poziționare prin mărirea spre exemplu a raportului de transmitere

a mișcării sau prin mărirea factorului de amplificare al servoamplificatorului vine în contradicție cu calitatea reacției de forță și respectiv cu stabilitatea.

- Formula de a optimizare a celor trei categorii de performanțe trebuie să fie flexibilă, adică să țină cont de sarcinile de teleoperare pe de-o parte și de posibilitățile operatorului pe cealaltă parte.

– Contribuții personale

Contribuțiile autorului în domeniul cercetării experimentale a controlului bilateral în teleoperare sunt sintetizate în următoarele:

- S-a conceput și realizat, într-o viziune proprie, fundamentul pentru o cercetare experimentală avansată în domeniul sistemelor de teleoperare controlate bilateral. Mai exact, este vorba de două sisteme (fizice) de teleoperare de tip master-slave, controlate bilateral pe care, datorită structurii lor flexibile, s-au putut verifica o serie de concepte legate de reacția de forță în teleoperare, unele cunoscute în literatura de specialitate, iar altele introduse de autor
- Testele experimentale au fost organizate în strânsă corelație cu problematica controlului bilateral abordată de autor pe parcursul tezei.
- Rezultatele experimentelor au fost analizate prin prisma comparației. Cu alte cuvinte acestea au fost evaluate în raport cu rezultatele obținute din analiza modelului teoretic și a modelului de simulare. În baza acestei evaluări au fost emise câteva observații și concluzii precise privind avantajele cercetării pe modelele amintite. În aceeași bază s-au evidențiat și fenomene specifice care scapă analizei pe aceste modele, cum este, spre exemplu, fenomenul legat de pragul de insesibilitate la transmiterea bilaterală a poziției și a forței într-un sistem master-slave.
- S-a prezentat într-o formulare originală și sintetică, problema principală, specifică a unui sistem de teleoperare controlat bilateral în poziție și forță, fără timp de întârziere pe canalul de comunicație și anume, cea de optimizarea raportului între precizia de urmărire a poziției sau vitezei, calitatea reacției de forță și rezerva de stabilitate a sistemului.

Capitolul 5

Contribuții personale și concluzii finale

Rezultat a peste 10 ani de cercetare în domeniu, lucrarea de față aduce o serie de contribuții teoretice și practice originale în ceea ce privește teleoperarea în general și teleoperatorii controlate bilateral în particular. O parte din acestea au fost subliniate pe parcursul tezei în contextul problematicii expuse la nivel de capitol sau la nivel de paragraf. În prezentarea care urmează, contribuțiile personale au fost grupate pe două secțiuni: teoretice (T) și practice (P). Ordinea de prezentare în fiecare secțiune reprezintă punctul de vedere al autorului asupra importanței științifice a contribuțiilor evidențiate.

T. Contribuții teoretice

- 1T. S-a realizat un model descriptiv original care ilustrează comportamentul uman în cadrul unui sistem om – mașină (*paragraful 2.1*). Acesta evidențiază căile de formare a comenzilor de conducere destinate mașinii în general și telemanipulatorului în particular. Pe această bază se introduce și se argumentează un concept original, care stabilește că trei factori sunt esențiali în conducerea de la distanță: reacția vizuală, reacția de contact (de efort) și antrenamentul operatorului. Cu alte cuvinte, în conducerea de la distanță, calitatea comenzii depinde de rațiune și de simț.
- 2T. S-a întocmit o diagramă originală privind delimitările și convergența dintre teleoperare și robotică (*paragraful 1.4*). Aceasta exprimă în mod sintetic punctul de vedere propriu în legătură cu întrebarea “*Teleoperare sau Robotică?*” care a fost mult timp subiect de polemică între partizanii roboților și cei ai teleoperatorilor. Diagrama în discuție poate fi interpretată ușor și poate constitui un punct de plecare în luarea unei decizii în legătură cu utilizarea unui robot sau a unui teleoperator pentru rezolvarea unor sarcini concrete de manipulare.

- 3T. Este definită în mod clar și sintetic filozofia controlului bilateral în teleoperarea clasică, care constă în faptul că: partea de master reprezintă unitatea de comandă pentru partea de slave și viceversa, partea de slave exercită preogative de control pentru partea de master (*paragraful 2.2*). În acest context sunt definite mai precis unele concepte din literatură ca: *acțiune reciprocă, control bilateral, teleprezență, teleexistență, etc*, care în limbajul obișnuit au un alt înțeles (nu numai în limba română).
- 4T. S-a realizat o sistematizare originală, bazată pe criterii practice, a posibilităților de materializare a controlului bilateral în teleoperarea clasică (*paragraful 2.3*). Se pune accentul, în mod special, pe metoda de a realiza reacția de forță fără utilizarea senzorilor specializați de forță / moment, pentru că în literatura de specialitate aceasta este ignorată, cu toate că are avantajele ei specifice. Cu această ocazie sunt evaluate și realizările personale în domeniul controlului bilateral din faza de început a cercetărilor proprii în domeniu. Este vorba de sistemele de comandă și control al manipuloarelor sincrone: MS.500, MS.1000, MS.200 H (hidraulic) și MS. 200E (electric), concepute de autor.
- 5T. S-au pus în evidență câteva principii de bază ale teleoperatorilor controlate bilateral în poziție și forță, care nu se regăsesc în literatura de specialitate. Este vorba, printre altele, de relația dintre coeficientul de scalare a forței și factorii de amplificare a servoamplificatoarelor din partea de master și partea de slave, sau de eroarea în senzația operatorului în funcție de momentele de inerție și frecările vâscoase din părțile amintite (*paragraful 3.2*). Această evidențiere și altele s-au făcut pe baza analizei originale a unui model analitic al controlului bilateral în poziție și forță, preluat din literatura de specialitate. Este vorba de *modelul dinamic al transmisiei elastice cu două mase inerțiale* care a fost investigat cu tehnici de analiză din teoria sistemelor automate.
- 6T. Se propune o metodă modernă de analiză a teleoperatorilor bilaterale, care se bazează pe echivalența electro-mecanică (*paragraful 3.3*) și folosește tehnici de analiză din teoria circuitelor electrice (care sunt bine puse la punct). În acest context autorul folosește două modele originale pentru descrierea unui sistem de teleoperare bilateral: modelul rețelei de circuite electrice pasive și modelul cuadripol (bi-port). Pentru investigarea acestora se folosesc două tehnici care

sunt alternative dar pot fi și complementare: prima se bazează pe matricea de impedanță $Z(s)$ a unui sistem master-slave, iar a doua pe matricea parametrilor hibridi $H(s)$, a aceluiași sistem.

- 7T.** Se introduce conceptul de *reacție kinesthetică ideală* care este considerat mai relevant decât conceptele de *teleprezență* sau *transparentă totală* întâlnite în literatură. Cu această ocazie se prezintă o lege de control (teoretică), denumită de autor *lege de control generalizat* (relațiile (3.97) și (3.98)), care conduce la obținerea reacției kinesthetice ideale. În acest context autorul propune o metodă proprie de evaluare a indicatorului de *manevrabilitate* bazată pe matricea de impedanță și realizează un program de calcul (în MATLAB) în acest sens. Acest indicator, preluat din literatură, evaluează calitatea reacției kinesthetice a unui sistem real, raportând-o la reacția ideală.
- 8T.** Se propune o soluție practică și originală pentru îmbunătățirea senzației operatorului asupra sarcinii de încărcare. În esență această soluție vizează compensarea efectului forțelor de frecare vâscoasă prin introducerea reacției pozitive de viteză încrucișate în cazul sistemelor de tip simetric, sau a reacției pozitive de viteză în partea de master pentru sistemele de tip asimetric (*paragraful 3.2*).
- 9T.** Se prezintă o viziune proprie asupra funcțiilor calculatorului în cadrul unui sistem de teleoperare informatizat. Pornind de la un model descriptiv simplificat și de la câteva exemple concrete autorul a identificat trei modalități concrete prin care operatorul uman poate conlucra cu calculatorul pentru rezolvarea unor sarcini de teleoperare complexe. În acest context s-au introdus trei concepte originale privind această conlucrare în procesul de conducere: conducere alternativă, conducere paralelă și conducere serială (*paragraful 2.4*).
- 10T.** Prezentarea sintetică a stadiului actual al realizărilor și identificarea direcțiilor principale de cercetare în trei domenii de aplicații ale teleoperării: medicină, spațiul cosmic și mediul submarin (*paragraful 1.6*).

P. Contribuții practice și experimentale

- 1P.** Participarea la proiectarea și punerea în funcțiune a manipulatorului sincron cu acționare hidraulică MS.500, produs distins cu medalia de aur la Târgul Internațional București 1988. Este vorba de un manipulator de tip master-slave controlat bilateral în poziție și forță al cărui sistem de comandă a fost conceput în totalitate de autor.
- 2P.** Proiectarea sistemului de control bilateral pentru manipuloarele sincrone MS. 200 și MS.1000 în cadrul unor contracte de cercetare-proiectare [Diaconu 88].
- 3P.** Concepția și realizarea sistemului master-slave experimental (prezentat în paragraful 4.2) care, prin flexibilitatea sistemului său de control, permite efectuarea unei game diversificate de experimente legate de sistemele de teleoperare bilaterale.
- 4P.** Realizarea unei biblioteci de modele de simulare, în mediul SIMULINK, pentru sistemul master – slave experimental și pentru sisteme similare.
- 5P.** Conceperea și realizarea unor experimente originale și relevante, în domeniul controlului bilateral. Majoritatea testelor experimentale s-au realizat atât pe modelul de simulare, cât și pe modelul real.
- 6P.** Concepția și realizarea unui teleoperator de tipul macro-micro manipulator și utilizarea lui la în cadrul unor teste experimentale legate de contactul brațului slave cu medii având rigiditate mică .
- 7P.** Realizarea unui program de monitorizare a forței de încărcare a unui braț manipulator acționat cu motoare de curent continuu.
- 8P.** Concepția și realizarea unor dispozitive originale de prescriere a mișcării printre care și joystick-ul cu încărcare activă, prezentat în paragraful 4.3
- 9P.** Realizarea unui sistem de telecomandă proporțională în infraroșu pentru un dispozitiv de orientare a unei camere TV, cu două grade de mobilitate.
- 10P.** Participarea la proiectarea, punerea în funcțiune și testarea a peste 30 de sisteme robotice, în diverse întreprinderi din România. La ora actuală, în cadrul Laboratorului de Robotică din Universitatea “Politehnica” din Timișoara există 15

sisteme robotice puse și menținute în funcțiune de autor. Acestea sunt folosite în scop didactic și pentru activitatea de cercetare experimentală.

F. Concluzii finale

- 1F.** Sistemele de teleoperare bilaterale, cercetate în această lucrare, au o complexitate deosebită datorită interacțiunilor care se stabilesc între elemente de natură mecanică, electrică și fiziologică. Din acest motiv o cercetare eficientă a acestora presupune în primul rând o colaborare strânsă între specialiști în domeniul mecanicii, automatizării, electronicii, etc. Această complexitate dublată de diversitatea constructivă a sistemelor în discuție a făcut ca până la ora actuală să nu existe o teorie sau o metodologie clară privind analiza și evaluarea performanțelor unor astfel de sisteme.
- 2F.** Fără să ignore complexitatea problematicei abordate în această teză autorul consideră că obiectivele propuse și enumerate în primul capitol au fost atinse în totalitate.
- 3F.** Una dintre problemele cele mai delicate a sistemelor de teleoperare, în care distanța dintre punctul de comandă și mediul de acțiune este mare, o constituie timpul de întârziere pe canalul de comunicație. Spre această problemă sunt direcționate preocupările de cercetare viitoare ale autorului. Mai precis, se cercetează posibilitatea folosirii Internetului ca și canal de comunicație în teleoperare.

Bibliografie

- [Akazawa91] Akazawa , K.; *Neuromuscular control system and hardware models* , in *Advanced Robotics*, vol.5, no.1, pg.75-85, 1991.
- [Akin 93] Akin, D., Howard,R. *The Role of Free-Flight in Space Telerobotic Operations*, in *International Conference on Automation and Robotics*, 1993, pg.322-331.
- [Anderson 89] Anderson J. A., Spong M. W.; *Bilateral Control of Teleoperators wit Time Delay*; in *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol.34; No. 5.;mai 1989; pg.494-595.
- [Anderson 95] Anderson J. A.; *SMART: A Modular Control Architecture for Telerobotics*; in *IEEE Robotics & Automation Magazine*; vol.3; No. 3; sept.1995; pg.10-18.
- [Aronov 69] Aronov, I.; *Nekatorîie printîpi postroienia bezusilitelnîh sistem upravlenia electromecaniceschie manipulator*. in *Nauka* 1969.
- [Asada 86] Asada, H., Youcef,T. *Direct-drive robots. Theory and practice*, The MIT Press, Cambridge, 1986.
- [Bejczy 76] Bejezy, A. "Allocation of control betwen man and computer in remote manipulation." *Proc. Second International CISM-IFTOMM Symposionum, Warsovia* 1976, pg.417-425
- [Bejczy 93] Bejezy, A., s.a. *Integrated Interface for Advaced Teleoperation*, in *IEEE Control Systems*, vol.13, no.5, pg.15-20, oct.1993
- [Bogdanov 89] Bogdanov, I. *Microprocesorul în comanda acțiunărilor electrice*. Editura Facla 1989.
- [Burtnyk 91] Burtnyk N., Greenspan M. A.; *Supervised Autonomy–Partitioning Telerobotic Responsibilities Between Human and Machine*; *International Conference on Intelligent Teleoperation*, Nov.1991; pg. 34-42;
- [Canadian 95] Canadian Space Agency; *Statement of Work: Stear #11 – Imaging Systems*; Canadian Space Agency, Space Station Program Office, Strategic Technologies for Automation and Robotics Program, File No. 02SW.9F006-5-0272/00/00, Appendix A, Sept. 14; 54-55; 1995
- [Călin 72] Călin, S.,Dumitrache, I.; *Automatizări electronice*; Ed. Didactică și Pedagogică, București 1972.

- [Călin 85] Călin, S., Dumitrache, I.; *Regulatoare automate*, Ed. Didactică și Pedagogică, București 1985
- [Ciugudean 89] Ciugudean M., **Diaconu A.**; *Servoamplificator pentru manipuloarele sincrone hidraulice*; Al IX-lea Simpozion Național de RI ROBOT '89, Baia-Mare, vol 2, pg. 131-136.
- [Coiffet 76] Coiffet, Ph. "Computer aided control of force reflecting manipulators." IFac Symposium: Automatic Control in Space 1976,pg.724-732
- [Coiffet 86] Coiffet Ph. ; *Robotic. Principes et Aplications*; Editions Hermes, Paris 1986.
- [Coiffet 89] Coiffet Ph.; *Les robots. Principes et Comande*; Hermes Publshing, Paris 1989.
- [Coiffet 92] Coiffet Ph.; *Robot habilis, robot sapiens*; Editions Hermes, Paris 1992.
- [Conway 87] Conway L., Volz R., Walker M.; *Tele-Autonomous Systems: Methods and Architectures for intermingling Autonomous and Telerobotic Technology*, Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, vol. 3; 1121-1130; 1987.
- [Corke 96] Corke, P.; *A robotics TOOLBOX for MATLAB*, IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 1, no.1, pg.24-32, martie 1996.
- [Das 92] Das H., Zak H., Kim W. S., Bejczy A. K., Schenker P. S.; *Operator Performance with Alternative Manual Control Modes in Teleoperation*; Presence, Volume 1, Number 2; 201-218; Spring 1992
- [Davidovici 86] Davidovici A., Moangă A.; *Modelarea, simularea și comanda manipuloarelor și roboților industriali*; Editura Tehnică, București, 1986.
- [Deacu 89] Deacu L., s.a.; *Tehnica hidraulicii proporționale*; Ed. Dacia, Cluj-Napoca; 1989.
- [Diaconu 86] Diaconu A., Varga S. Maniu I. s.a.; *Manipulator sincron MS-500*; Raport de cercetare la Contract 88/1986 cu CIUMMR Timișoara.
- [Diaconu 88a] Diaconu A., Maniu I. s.a.; *Controlul unui manipulator sincron și reacția de forță-moment* ; Simpozionul "Realizări de vârf ale științei și tehnologiei românești", Baia-Mare 1988; pg.109-115.
- [Diaconu 88b] Diaconu A. *Instalații master-slave cu reacție de forță/moment*; Al VIII-lea Simpozion Național de RI. "ROBOT '88", Cluj-Napoca, 1988; pg.153-158.
- [Diaconu 88c] Diaconu A. ; *Sistem de comandă pentru un manipulator sincron*. Al VIII-lea Simpozion Național de RI. "ROBOT '88", Cluj-Napoca, 1988; pg.161-167.
- [Diaconu 88d] Diaconu A., Maniu I. s.a.; *Manipulator sincron MS-200*; Raport de cercetare la Contract 26/1988 cu intreprinderea IMMUM Baia-Mare.

- [Diaconu 89a] Diaconu A., Ciugudean M.; *Contribuții privind comanda manipuletoarelor sincrone*; Al IX-lea Simpozion Național de RI ROBOT '89, Baia-Mare; vol. 2 pg.204-209.
- [Diaconu 89b] Diaconu A., s.a.; , *Metode și echipamente pentru determinarea parametrilor cinematici ai roboților industriali*. Al IX-lea Simpozion Național de RI ROBOT '89, Baia-Mare; vol.3, pg. 104-109.
- [Diaconu 89c] Diaconu A., Tănase M. s.a. ; *Utilizarea microsistemului MICRO-E la determinarea performanțelor manipuletoarelor și roboților*; Al IX-lea Simpozion Național ROBOT '89, Baia-Mare; vol. 2, pg.209-213.
- [Diaconu 89d] Diaconu A., Tănase M.; *Bloc electronic pentru testarea sistemului RS 501*. Al IX-lea Simpozion Național de RI ROBOT '89, Baia-Mare; vol. 3, pg. 109-113.
- [Diaconu 90] Diaconu A., s.a. ; *Studiul, proiectarea și realizarea unui sistem automat de manipulare a casetelor cu plachete de siliciu în "cameră curată"* ; Raport de cercetare la contractul 16 / 1990 cu CCSIT-CE București.
- [Diaconu 91a] Diaconu A., s.a.; *Cercetări fundamental-orientate și aplicative privind realizarea și implementarea industrială a unor sisteme de fabricație integrate cu calculatorul (CIM)* ; Raport de cercetare la Contract 46/1991 cu Ministerul Învățământului și Științei-Departamentul știință.
- [Diaconu 91b] Diaconu A., Maniu I.; *Sistemul de control al manipuletoarelor sincron MS-1000*; Al X-lea Simpozion Național de RI, "MERO '91"; București 1991; vol.2 pag.428-433.
- [Diaconu 92] Diaconu A.; *Conducerea manuală de la distanță a unui manipuletor sincron*. Al XI-lea Simpozion Național de RI, vol.2, pg.101-106, Timișoara 1992.
- [Diaconu 93] Diaconu A. ; *Sisteme de comandă pentru instalațiile de teleoperare*. Referat 2 al tezei de doctorat. Univ. Tehnică Timișoara, 1993.
- [Diaconu 94a] Diaconu A. ; *Dispozitive de urmărire a poziției bazate pe aliaje cu memorie*; Al XII-lea Simpozion Național de RI, Timișoara 1994, vol.2,pg.27-33
- [Diaconu 94b] Diaconu A. ; *Endoscopul activ aplicație, a mecanismelor de execuție bazate pe aliaje cu memorie*; Al XII-lea Simpozion Național de RI, Timișoara 1994; pg.97-103.
- [Diaconu 95] Diaconu A.; *The Extension of the Kalman Filter as Parameter Estimator for Liniar Systems*. The 7th Conference of Manufacturing Engineering; iunie 1995; Timișoara; vol.2, pg. 65-71.
- [Diaconu 96a] Diaconu A., Diaconu D.; *Metode indirecte de măsurare a momentelor de încărcare într-o cuplă cinematică conducătoare*. Al XIII-lea Simpozion Național de RI, Reșița 1996; pag.198-204.

- [Diaconu 96b] Diaconu A., Luchin, M. s.a.; *Studii privind controlul dinamic adaptiv al unui manipulator-Contact task*, Raport de cercetare la Contractul 66 / 1996 cu Ministerul Cercetării.
- [Diaconu 97] Diaconu A.; *Instalații de teleoperare sau roboți ?* Simpozionul "Robotică-perspective în România", inclus în "Zilele Academice Timișene", ediția V; Timișoara 1997.
- [Diaconu 98a] Diaconu A.; *The estimation the actuator torque in the presence of stochastic disturbance*; International Seminar on Vibrations and Acoustic Noise of Electric Machinery; mai 1998; Bethune, France.
- [Diaconu 98b] Diaconu A.; *Robot force sensing using stochastic monitoring of the actuator torque*; Revista română de mecanică fină și optică-supliment-COMEFIN -5; oct.1998; pg. 583-589.
- [Diaconu 99] Diaconu A., Verbințchi V. *Considerații privind sudarea robotizată a unor subansamble cu geometrie complexă*. Simpozionul Tehnologii Moderne de sudare și Procedee Conexe, inclus în "Zilele Academice Timișene", ediția VII; Timișoara, mai 1999.
- [Drascic 91] Drascic D.; *An Investigation of Monoscopic and Stereoscopic Video for Teleoperation*; M.A.Sc Thesis, University of Toronto;1991.
- [Draper 93] Draper J. V.; *Teleoperators for Advanced Manufacturing: Applications and Human Factors Challenges*; International Journal of Human Factors in Manufacturing
- [Drăgulescu 97] Drăgulescu, D. *Dinamica Roboților*, Ed. Didactică. și Pedagogică, R.A, București 1997
- [Dudragne 89] Dudragne, J.; *A generalized bilateral control applied to master-slave manipulators*. in Proc. 20th ISIR, pg.435-442, 1989.
- [Egorov 80]. Egorov, I.N.; *Proectirovanie sledascix sistem dvustoronnego deistvia*. Mașinostraienie, Moscova 1980.
- [Filatov 76] Filatov, A., Alabian A.; *Distantionno upravlenia robotî – manipulatorî*, (Colegere de articole traduse din engleză și japoneză în rusă); Editura "MIR", Moscova 1976.
- [Fischer 90] Fischer P., Daniel R., Siva K.V.; *Specification and Design of Input Devices for Teleoperation*; Proceedings of International Conference of Robotics and Automation, Vol. 1; 540-545; 1990
- [Flatau 69] Flatau, C. ; *Compact servo master-slave manipulator with optimized comunication links*, in 17th Conf. Remote Systems Technology, pg.154-162, 1969.
- [Funda 96] Funda, J., s.a.; *Constrained Cartesian Motion Control for Teleoperated Surgical Robots*. In IEEE Tran. On Robotics and Automation, vol.12, no.3. pg. 453-465, iunie1996.
- [Geortz 66] Geortz, R. "ANL Mark E4 A electric master slave manipulator."

- Proc. 14th Conf. on Remote Systems and Technology pg.115-124, 1966.
- [Goldenberg 95] Goldenberg, A.A.; *A Remote Manipulator for Forestry Operation*, În Proc. IEEE Trans. Robotics Automat., vol. 11, no.2, pg.185-196, april. 1995
- [Hanaford 89] Hanaford B. *A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback*. În Proc. IEEE Trans. Robotics Automat., vol. 5, no.4 pg.426-434, 1989.
- [Harrison 84] Harison,d., Naghdy, F. *Simple force sensing with the Unimation PUMA*, in Symposium: Robotic-tactile sensing and force feedback, Londra, oct.1984, pg.224-229
- [Hill 73]. Hill, J.W; Sword, A.J., *Manipulation based on sensor direct control*. Proc. Of the 17th Annual Human Factor Society Convention, Washinton,1973.
- [Hirzinger 93] Hirzinger G., Brunner B., Dietrich J., Heindl J.; *Sensor-Based Space Robotics - ROTEX and Its Telerobotics Features*; IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, Number 5; 649-663; 1993
- [Ionescu 86] Ionescu, V.; Popeea, C. *Conducerea structurală a sistemelor liniare*. Ed. Didactică și Pedagogică, București 1986.
- [IPA 94] Fraunhofer –Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, *Serviceboter ein Beitrag zur Innovation im Dienstleistungswesen*. Durchführungszeitraum 01.April 1993-31 März1994.
- [Ivănescu 94] Ivănescu, M. ; *Roboți industriali* , Ed. "Universitaria" Craiova, 1994.
- [Jezireski 97] Jezireski, E., Granosik, G. ; *Monitoring of contact forces in a pneumatically driven manipulator*. in ISMCR'97, vol. IXB, pg.272-277, iunie 1997, Tampere, Finlanda.
- [Kazerooni 94] Kazerooni, H. Ming-Gou Her, *The Dynamics and Control of the Haptic Interface Device*. IEEE Trans. on Robotics and Automat., vol. 10, nr.4, august1994, pg. 453-463.
- [Kosuge 96] Kosuge, K., Fukuda,T.; *Scaled Telemanipulation with Communication Time Delay* ; in Proc.of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation , Minneapolis, Minnesota-april 1996.
- [Kovacs 82] Kovacs, Fr. Cojocaru, G.; *Manipulatoare roboți și aplicațiile lor industriale*. Ed. Facla 1982
- [Kovacs 87] Kovacs, Fr. s.a. Manipulatorul sincron MS-200. Al VIII-lea Simpozion Național de RI. "ROBOT '88", Cluj-Napoca, 1988; pg.461-468.

- [Kovacs 89] Kovacs, Fr. s.a. Manipulatorul sincron MS-1000. Al IX-lea Simpozion Național de RI. "ROBOT '89", Baia-Mare, 1989; pg.243-248.
- [Kruger 96] Kruger, F.D. și alții. *Improving Remote Manual Control of Unmanned Gound Vehicles through Automatic TV Camera Motion*, în: Proc. of ISMCR' 96 pg. 251-256, Brussels, mai 1996.
- [Lee 93] Lee,S.& Lee,H.*Modeling, Design, and Evaluation of Advanced Teleoperator Control Systems With Short Time Delay*. IEEE Trans. on Robotics and Automat., vol.9, nr.5, august1993, pg. 607-622.
- [Maniu 91] Maniu, I. **Diaconu, A.** s.a.; *Instalația hidraulică a manipulatorului sincron MS-1000*. . Al X-lea Simpozion Național de RI. "MERO 91", București , 1991; pg.424-429.
- [Maniu 95] Maniu, I.; *Sinteza optimală a sistemului de acționare hidraulică și pneumatică a roboților industriali*. Teză de doctorat, U.P.Timișoara 1995
- [Maslowski 97] Maslowski A ;l alții, *Internet Teleoperation of Mobil Robots*. În Proc. of ISMCR' 97 pg. 188-193, Tampere, Finlanda.
- [Massimino 94] Massimino M., Sheridan T. B.; *Teleoperator Performance with Varying Force and Visual Feedback*; Human Factors, 36(1),pg.145-157;1994.
- [McKinnon 88] McKinnon M., King M.; *Manual control of telemanipulators*; Proceedings of International Symposium on Teleoperation and Control, July 1988, Bristol, England; pg.263-276;1988
- [McGovern78]. McGovern, D. ; *Factors Affecting Control Alloction for Augmented Remote Manipulation* , Ph.D. Thesis, Standford University, nov.1978.
- [McGee 89] McGee, D.; *Robots In Sercice To Humans*; in Robotics World, mai-iunie 1989
- [McRuer77] McRuer, D. *Dinamica umană în sistemele om-mașină*. In Congresul mondial IFAC-1978, traducere în Automatică Management Calculatoare vol.31, pg 62-86, Ed. Tehnică 1980.
- [Miller 91] Miller, R. *Assistence for the desabled elderly people*.in Robotic Application in Non-industrial Environments vol.1& 2, Robert Miller Associates, Inc.91
- [Mesaroș 88] Mesaroș-A., V., **Diaconu, A.**, s.a. ; *Despre dispozitivele de prehensiune și orientare ale manipolatoarelor sincrone pentru sectoare calde*, Simpozionul "Realizări de vârf ale științei și tehnologiei românești",Baia Mare 1988; pg.94-99.

- [Mesaroş 89] Mesaroş-A., V., Diaconu, A., s.a. ; *Dispozitivele de orientare și prehensiune ale manipulatorului sincron MS-1000*. Al IX-lea Simpozion Național de RI. "ROBOT '89", Baia-Mare, 1989, pg.337-342.
- [Miller 91] Miller, R. *Assistence for the desabled elderly people*.in *Robotic Application in Non-industrial Environments* vol.1& 2, Robert Miller Associates, Inc.91
- [Naghdy 85] Naghdy, F. s.a. *Robot force sensing using stochastic monitoring of the actuator torqu*, in *Robot and automated manufacture*; IEE control Engineering Series 28, pg.138-144, Londra 1985.
- [Oprean 89] Oprean, A. *Acționări și automatizări hidraulice*. Ed. Tehnică, București 1989.
- [Osuka 97] Osuka, K., Ono, T. ; *Master-Slave Type Humanoid Robot Project*, in ISMRC'97, vol. IXB, pg.170-175, 1997, Tampere, Finlanda.
- [Pană 95] Pană, T. *MATLAB în sisteme de acționare electrică automate*. Liito. Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 1995.
- [Paul 82] Paul, R. P.; *Robot Manipulators: Matematics, Programming, and Control*, MIT Press, Cambridge, 1982.
- [Perju 86] Perju, D., Varga, St. *Manipulator sincron MS-500*, AL VI-lea Simpozion Național de RI. "ROBOT 86" Braşov 1986, vol.3, pg 45-50.
- [Raju 89] Raju, G., J. *Design issues in 2-port network models of bilateral remont manipulation*, in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation pg.1316-1321, 1989.
- [Raju 90] Raju, G., J. ; *An experiment in bilateral manipulation with adjustable impedance*, in Proc. Japan-USA Symp. On Flexibile Autmation, pg 395-399, 1990.
- [Salcudean 94] Salcudean, S. E., s.a. *Design and Control of a Force-Reflecting Teleoperation System*. In IEEE Trans. on Robotics and Automat., vol. 11, nr.6, decembrie1995, pg. 844-857.
- [Schmidt 99] Schmidt, M., Hadrich, O. *Simulation elektrischer und regelungs-technischer Teilsysteme*, in *Antribstechnik* no.10, pg.48-61, 1999.
- [Sharidan 86] Sheridan, T "Modelling supervisory control of robots." Proc. Second International CISM-IFTOMM Symposionum, Warsawia 1976, pag.394-403.
- [Sharidan 92] Sheridan, T.; *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. The MIT Pres, Cambridge, MA 1992.

- [SIM 91] ***SIMULAB a program for simulating dynamic systems. User's Guide, 1991.
- [Son 96] Son, J. s.a. *An Easily Attainable and Effective Bilateral Control for Teleoperation*, in Proc.of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation , Minneapolis, Minnesota, april 1996, pg.1357-1362.
- [Tachi 98] Tachi, Ph.D. *Virtual Reality in Robotics*, in Proc.ISMCR '98 pg.29-37.
- [Tokashiki 96] Tokashiki, H. s.a. "Macro-Micro Teleoperation Systems with Integrations Sensory" Proc. of the 1996 IEEE International Conf. on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota-April 1996, pag.1687-1696.
- [Unimation 84] ***** *User's Guide for PUMA Robots and VAL*, Unimation Inc. 1984
- [Varga 88] Varga, St. s.a. *Calculul și construcția modului de pivotare al manipuletoarelor sincrone MS-200 și MS-1000.* ; Al VIII-lea Simpozion Național de RI."ROBOT '88", Cluj-Napoca,1988; pg.83-88.
- [Vertut 64] Vertut, J.; *Control of master-slave manipulators and force feedback*. In Proc. 12 th.Conf. on Remote Systems Technology, Sacaly 1964.
- [Vertut 73] Vertut, J. "Contribution to define dexterity factor for manipulators." Proc. 21th. Conf. on Remote Systems Technology pag.38 , 1973.
- [Vertut 76] Vertut, J., Coiffet, P.; "Advance of the new MA 23 force reflecting manipulator system." Proc.Secon International CISM-IFTOMM Symposionum, Warsawia 1976, pag.307.
- [Vibet 87] Vibet, C. *Robots-Principes et controle*. Ed. Marketing, Paris 1987.
- [Vischer 95] Vischer, D., Khatib, O.; *Desing and Development of the High-Performance Torque-Controlled Joints.* . IEEE Trans. on Robotics and Automat., vol.11, nr.4, aug.1995, pg. 537-546.
- [Voroșilov 73] Voroșilov, M.S. Analiticeski metod sinteza obratimi slediaiușicie sistem, în Nauka 1973, pg. 83-95.
- [Vukobratovic 89] Vukobratovic, M. ; *Applied Control of Manipulator Robots*. Springer Verlag Berlin, Hiedelberg,1989.
- [Wayne 95] Wayne J. B., Love, J. Y. *Environment Estimation for Enhanced Impedance Control* în Proc. of the IEEE International Conf. On Robotics and Automation, vol.2, pg. 854-859, Nagoya, Japan, mai 1995.

- [Wood 71] Wood N. *Wahat's New in Underwater Manipulators*, Oceanology, noembrie 1971.
- WWW 1 [http // clr.edu / telerob](http://clr.edu/telerob).
- WWW 2 [http: // rsc.ee.washington. edu / brl/ ..](http://rsc.ee.washington.edu/brl/)
- WWW 3 [http: // poseiclonmech kyoto-u.ac..](http://poseiclonmech.kyoto-u.ac..)
- WWW 4 [http: // Nasa Discovery /Exploration..](http://NasaDiscovery/Exploration..)
- WWW 5 [http: // www. Teleop.com/ "itsd1](http://www.Teleop.com/itsd1)
- WWW 6 [http: // telerobot. mech. wa.edu.au./](http://telerobot.mech.wa.edu.au/)
- [Yokokohji 94] Yokokohji, Y., Yoshikawa, T. *Bilateral Control of Master-slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling*. In IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol.10, no.5, pg. 605-619, oct.1994.
- [Zhai 95] Zhai S.; *Human Performance in Six Degree of Freedom Input Control*; Ph. D. Thesis, Department of Industrial Engineering, University of Toronto, Toronto; 1995

ANEXA A

◆ Brațul robot PUMA 600

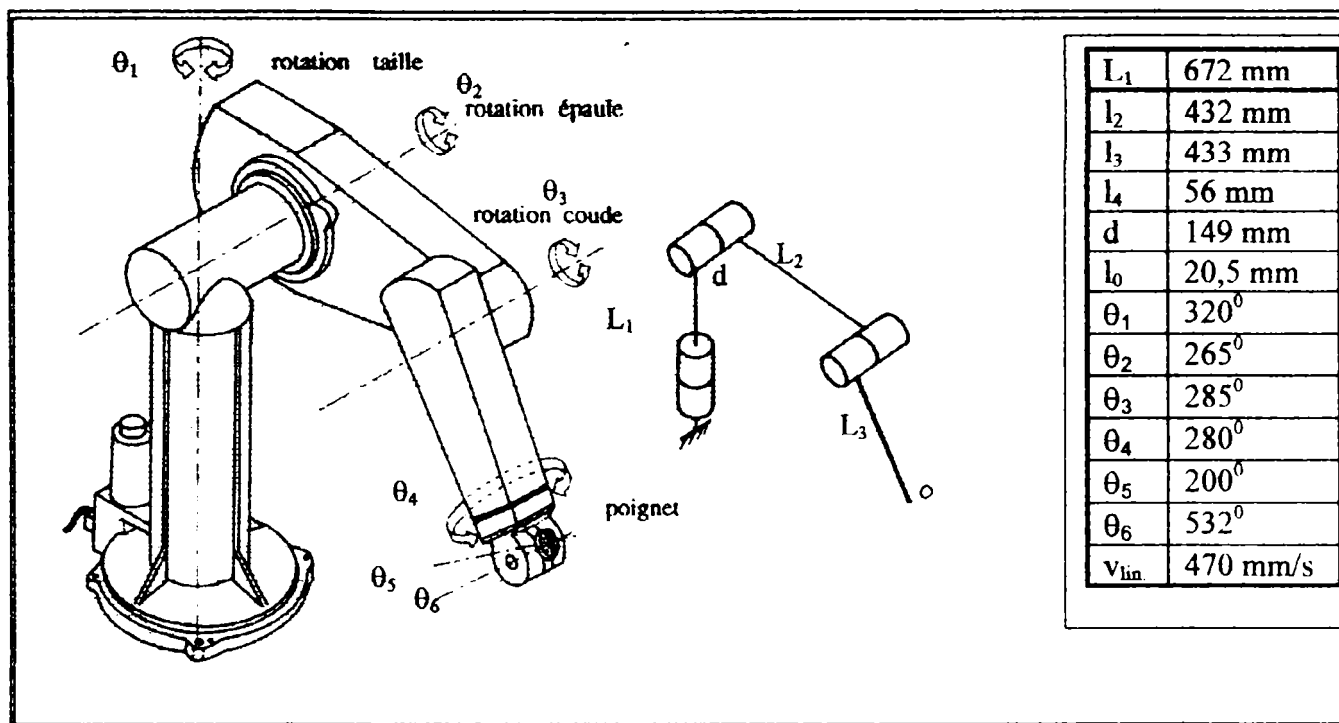
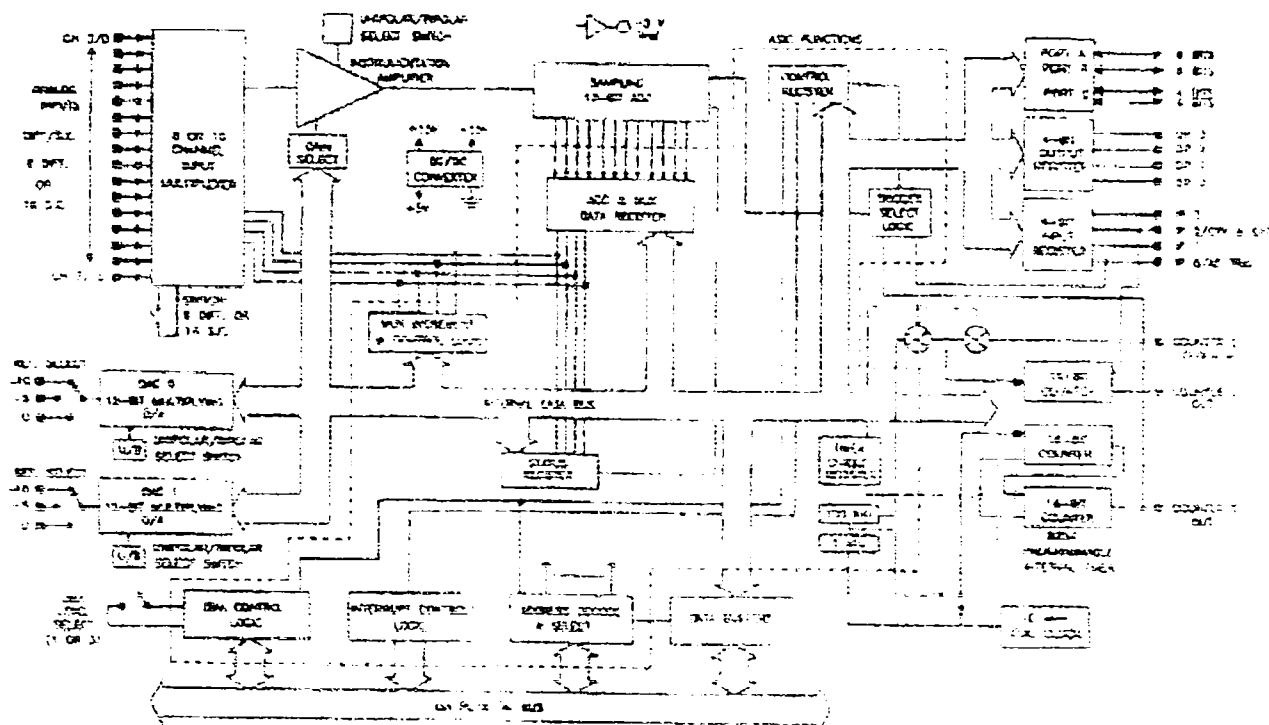


Figura 1A Brațul robot PUMA 600. Dimensiuni constructive, parametrii cinematici.

Tabelul 1A Caracteristicile tehnice ale sistemului de acționare

Parametru / axă	AXA1	AXA2	AXA3	AXA4	AXA5	AXA6
Putere motor [W]	150	150	150	50	50	50
Constanta de coplu [Nm / A]	0,19	0,19	0,19	0,13	0,13	0,13
Constanta de viteză [Vs / rad]	0,19	0,19	0,19	0,12	0,12	0,12
Raport de transmisie N	53,7	107,81	62	31	31	31
Moment de ieșire [Nm]	98	133	98	15	12,6	13,4
Rezistența rotorică R_a [Ω]	1,6	1,6	1,6	1,4	1,4	1,4
Inductivitatea rotorică L_a [H]	0,0048	0,0048	0,0048	0,0032	0,0032	0,0032
Moment de inerție rotor [Kg.m ²]	$288 \cdot 10^{-6}$	$288 \cdot 10^{-6}$	$288 \cdot 10^{-6}$	$183 \cdot 10^{-6}$	$138 \cdot 10^{-6}$	$123,1 \cdot 10^{-6}$
Moment de inerție axă [Kg.m ²]	0,336	0,776	0,277	0,098	0,075	0,022

◆ Blocul electronic de achiziție date

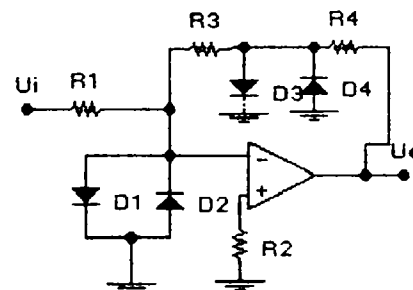
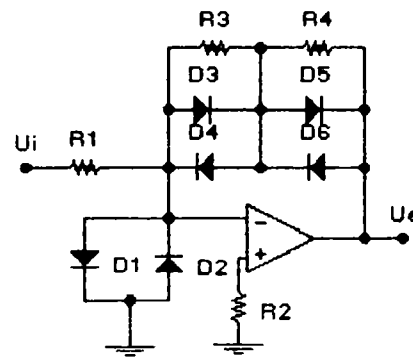
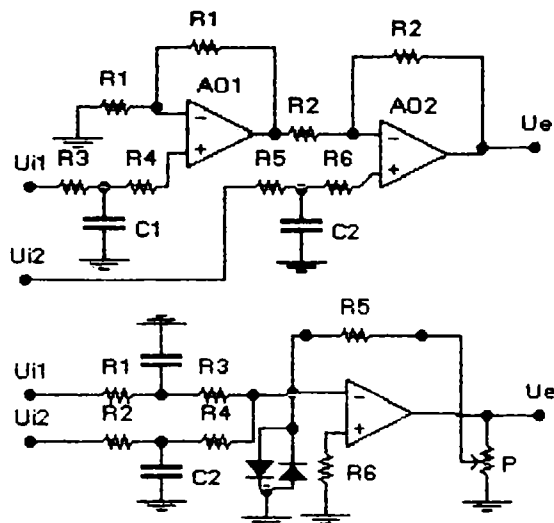


Tabelul 2A. Parametrii tehnici ai plăcii DAS 1600

	Număr de canale	8 diferențiale sau 16 unipolare
1. Convertorul analog-numeric	Rezoluție	12 biți
	Viteza de transfer	100.000 eșantioane / sec.
	Factor de amplificare	1; 10; 100; 500.
	Tensiunea de intrare	0-10V unipolar; ±10V bipolar
	Tensiunea maximă admisibilă	±36V c.c
2. Convertor numeric-analogic	Eroarea maximă	0,02% pentru amplif. <500 0,03% pentru amplif. =500
	Număr de canale	2
3. Intrări / ieșiri numerice	Rezoluție	12 biți
	Tensiunea de ieșire	0-5V; 0-10V ±5V; ±10V
	Curentul de ieșire	±5mA max.
	Tensiunea de referință	-5V ±50mV
	0 intrări pe 4biți	Nivel LSTTL
0 ieșiri pe 4 biți	Nivel LSTTL	
3 intrări pe 8 biți	Tip NMOS 8255A	
3 ieșiri pe 8biți	Tip NMOS 8255A	
4. Numărător programabil (TIMER), tip 82C54-2	Număr de canale programabile	3
	Frecvența: de la 2,5MHz la 1 impuls pe oră	
	Ieșirea: nivelul scăzut 0,5V max; nivelul ridicat 2V, minim	
Tensiunea de alimentare	Intrarea : nivelul scăzut 0,8Vmax.nivelul ridicat 2V min.	
	+5V, 800mA	
	+12V, 40mA	

◆ Blocul electronic de control analogic

Circuite de însumare și amplificare **NEL2 Amplificatoare neliniare 1; 2**



Circuit de integrare cu desaturare **Circuit de derivare și filtrare**

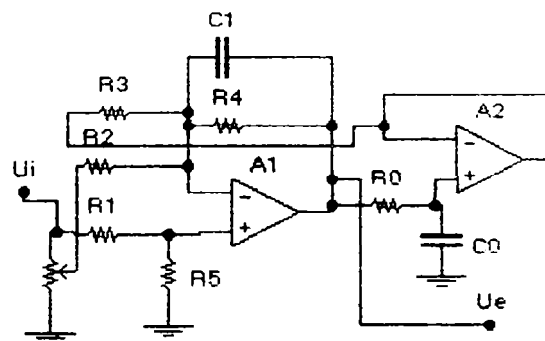
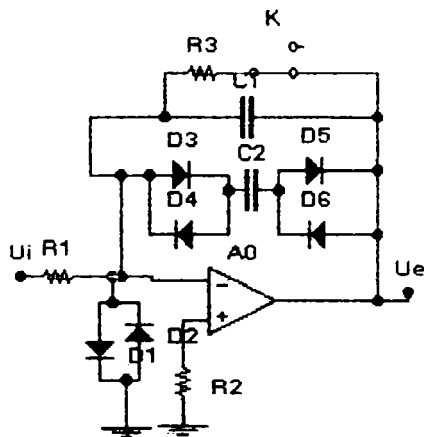


Figura 3A Circuite electronice din blocul de control analogic

URM.CA4

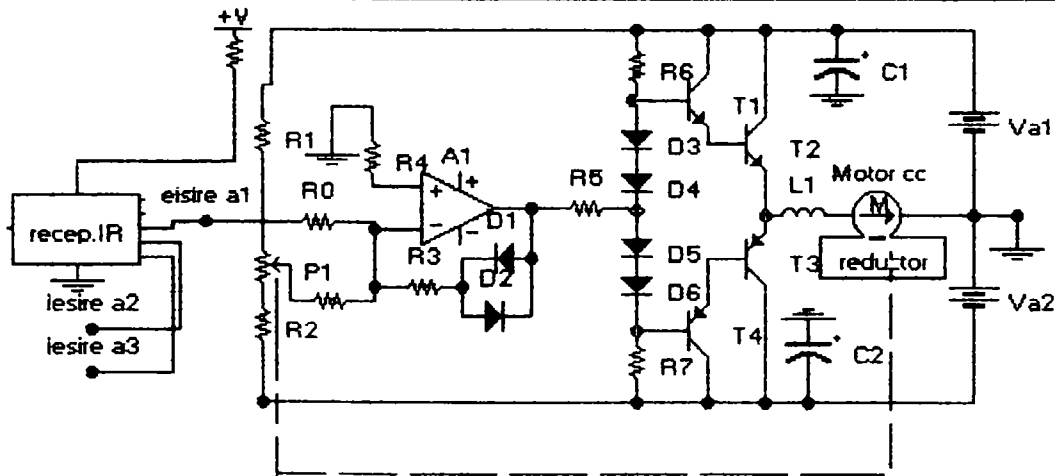


Figura 4A. Schema sistemului de urmărire a poziției cu telecomandă în infraroșu

ANEXA B

PROGRAM DE MONITORIZARE
A FORȚEIVIEW(0,0), -(639,349),&,4
GOSUB sterge

Tabelul 1B

INSTRUCȚIUNI

COMENTARII

LOCATE 2,6: COLOR 4,4
PRINT " MONITORIZARE
FORTA CU DAS 1600"

CALL SETUP

inițializare
variabile de
intrare

GOSUB meniu

"este necesar ca
Caps Lock
;Num Lock sa
fie OFF"DEF SEG= VARSEG(Driver
Ary(0))Adresa unde se
încarcă driver-ulBLOAD "DAS 1600Q.BIN", 0
A\$ ="DAS1600.cfg"
+CHR\$(0)

Încărcare driver

KEY 15,
CHR(&H8)+CHR\$(46)Set up alt +C as
Key 15CALL ABSOLUTE
(A\$,NUMBERFORBOARD,D
ERR,DAS1600DEVELOPEN)KEY 16,
CHR(&H8)+CHR\$(19)Set up alt +r as
Key 16

IF DERR<>0 THEN BEEP:

Stabilirea
comunicatioeiKEY 17,
CHR(&H8)+CHR\$(30)Set up alt +A as
Key 17

PRINT "ERROR";

KEY 18,
CHR(&H8)+CHR\$(33)Set up alt +F as
Key 18HEX\$(DERR); "OCCURED
DURING..DEVELOPEN":ST
OPKEY 19,
CHR(&H8)+CHR\$(22)Set up alt +U as
Key 19'CALL
ABSOLUTE(BRDNUM,
DEVHANDLE, DERR,
DAS1600 GETDEVHANDLE)
'IF(DERR<>0) THEN BEEP:
PRINT "ERROR:"<
HEX\$(DERR); "BOARD NOT
FOUND AT CONFIGURED
ADDRES!" : STOPKEY 20,
CHR(&H8)+CHR\$(31)Set up alt +S as
Key 20

SCREEN 9

KEY 21,
CHR(&H8)+CHR\$(20)Set up alt +T as
Key 21

CLS 0

KEY 22,
CHR(&H8)+CHR\$(45)Set up alt +x as
Key 22

Clock\$="INT"

KEY 23,
CHR(&H8)+CHR\$(35)Set up alt +h as
Key 23

Acqutype\$= "SCAN"

ON KEY (15) GO SUB clock

// activare
optiuni meniu

Trigtype\$="INT"

ON KEY (16) GO SUB
TrigSource

Unit\$="V"

ON KEY (17) GO SUB
AcqType

Freq=1

ON KEY (18) GO SUB
Frequency

Chstart=0

ON KEY (19) GO SUB units

Chstop=0

ON KEY (20) GO SUB
Save DataON KEY (21) GO SUB
Startacq

ON KEY (22) GO SUB Fuga

```
ON KEY (23) GO SUB
```

```
Channel
```

```
GOSUB enablemenu
```

```
q=0
```

```
WHILE q<>1
```

```
WEND
```

```
END
```

```
enablemenu:
```

```
KEY(20) ON: KEY(21) ON:
```

```
KEY(22) ON: KEY(23) ON
```

```
KEY(15) ON: KEY(16) ON:
```

```
KEY(17) ON: KEY(18) ON:
```

```
KEY(19) ON
```

```
RETURN
```

```
disablemenu:
```

```
KEY(20) OFF: KEY(21)
```

```
OFF: KEY(22) OFF:
```

```
KEY(23) OFF
```

```
KEY(15) OFF: KEY(16)
```

```
OFF: KEY(17) OFF:
```

```
KEY(18) OFF: KEY(19) OFF
```

```
RETURN
```

```
menu:
```

```
LOCATE 6,2:
```

```
COLOR 1,7: PRINT " C";:
```

```
COLOR 14,7:PRINT "lock ";
```

```
->
```

```
;clock$
```

```
LOCATE 7,2:
```

```
COLOR 14,7: PRINT " T";:
```

```
COLOR 1,7: PRINT
```

```
"r";:COLOR 14,7: PRINT
```

```
"igSOURCE";"->"; trigtype$
```

```
LOCATE 8,2:
```

```
COLOR 1,7 : PRINT "
```

```
A";:COLOR 14,7:PRINT
```

```
"cq.type";"->";acqutype$
```

```
LOCATE 9,2
```

```
COLOR 1,7: PRINT "F";:
```

```
COLOR 14,7: PRINT "nits";
```

```
->"; unit$
```

```
LOCATE 11,2:
```

```
COLOR 14,7:PRINT "C";:
```

```
COLOR 1,7: PRINT
```

```
"h";:COLOR 14,7: PRINT
```

```
"annels";chstart;". ";chstop
```

```
LOCATE 16,2:
```

```
COLOR 1,7 : PRINT
```

```
"S";:COLOR 14,7: PRINT
```

```
"aveData"
```

```
LOCATE 15,2
```

```
COLOR 1,7: PRINT " T";:
```

```
COLOR 14,7: PRINT
```

```
"rigA/D"
```

```
LOCATE 17,2:
```

```
COLOR 14,7:PRINT "E";:
```

```
COLOR 1,7 : PRINT "x";:
```

```
COLOR 14,7: PRINT "it"
```

```
RETURN
```

```
Fuga:
```

```
SOUND 2000,3
```

```
q=1
```

```
RETURN
```

```
clock:
```

```
DIM ct AS STRING
```

```
LOCATE 22,3
```

```
PRINT" Enter Clock source
```

```
(INT or EXT)";
```

```
LOCATE 24,3
```

```
COLOR 4,14
```

```
PRINT " "
```

```
LOCATE 24,3,1,14,14
```

```
COLOR 4,14
```

```
INPUT ; "->", ct
```

```
clock$=ct
```

```
GOSUB menu
```

```
GOSUB clean
```

```
RETURN
```

```
TrigSource:
```

```
DIM ts AS STRING
```

```
COLOR 14,7
```

```
LOCATE 22,3
```

```
PRINT "Enter Trigger
```

```
Source (INT or EXT)";
```

```
LOCATE 24,3,1,14,14
```

```
COLOR 4,14
```

```
INPUT ;">",ts
```

```
Trigtype$=ts
```

```
GOSUB menu;
```

```
GOSUB clean;
```

```
RETURN
```

Rutina de
deservire a
primei optiuni
din meniu

Color este
14,7

Rutina de
deservire
pentru a doua
optiune

AcqType:	Rutina de deservire pentru optiunea 3	LOCATE 10,24 PRINT "7" LOCATE 11,24 PRINT "6" LOCATE 12,24 PRINT "5" LOCATE 13,24 PRINT "4" LOCATE 14,24 PRINT "3" LOCATE 15,24 PRINT "2" LOCATE 16,24 PRINT "1" LOCATE 17,24 PRINT "0" LOCATE 19,35 PRINT "Press <ENTER> to stop the aquisition ..." GOSUB disablemenu DO GOSUB sterge ex=0 FOR x=200 TO 633 CALL ABSOLUTE(DEVHANDLE, 0, 0, advalue, DERR , KADREAD)	
DIM at AS STRING COLOR 14,7 LOCATE 22,3 PRINT "Enter acquisition type (INT, DMA, SYNC, or SCAN); LOCATE 24,3,1,14,14 COLOR 4,14 INPUT;">",at acqutype\$=at GOSUB meniu GOSUB clean RETURN Frequency:	Rutina de deservire pentru optiunea 4	IF DERR<> THEN BEEP: P RINT "ERROR"; HEX\$(DERR);" DURING ' KADRead":STOP advalue=advalue/16 v=advalue*230/4096	Apel functie predefinita pentru citirea unei valori analogice
DIM fr AS INTEGER COLOR 14,7 LOCATE 22,3 PRINT " Enter frequency (1 to 99,009 Hz)"; LOCATE 24,3,1,14,14 COLOR 4,14 INPUT ;">", fr freq=fr GOSUB meniu GOSUB clean RETURN units:	Rutina de deservire a optinuii 5	PSET(x, 42+v),1 IF INKEY\$=CHR\$(13) THEN ex=1:EXIT FOR NEXT x LOOP UNTIL ex=1 LOCATE 19,35 DIM fm AS STRING	Se calculeaza valoarea reala
DIM un AS STRING COLOR 14,7 LOCATE 22,3 PRINT "Enter Units Type (BIN,V or mV)"; LOCATE 24,3,1,14,14 COLOR 14,4 INPUT ; " >", un unit\$=un GOSUB meniu GOSUB clean RETURN Startacq:	Rutina de deservire corespunzatoare pominii achizitiei	COLOR 14,7 LOCATE 22,3 PRINT "Enter data format (BIN or ASC):" LOCATE 24,3,1,14,14 COLOR 4, 14 INPUT;">",fm SOUND 500, 10 GOSUB c lean RETURN.	Rutina de deservire optiune 7 meniu
LOCATE 7,23 PRINT "10": LOCATE 8,24 PRINT "9" LOCATE 9,24 PRINT "8"			

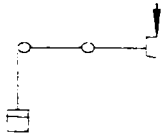
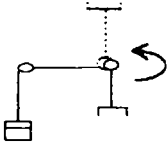
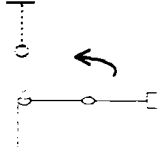
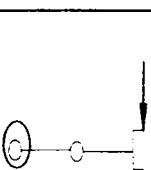
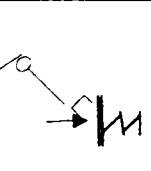
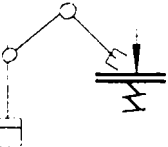
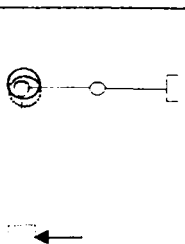
TABELUL 2B; Program POLIZARE

Program de conducere pe contur cu menținerea constantă a forței de apăsare;
Robotul PUMA 600, limbajul VAL II

Instrucțiuni	Comentarii
1. Wait Sig (1007) or (Sig (1008)	Așteaptă condiția de pornire
2. TH (RECORD)	Pozitiile înregistrate prin învățare
3. TA (RECORD)	
4. TB (RECORD)	
5. TC (RECORD)	
6. Speed 50	Apropiere și poziționare în A
7. Appro A, 70	
8. Moves A	
9. Continue = True	Validarea taskului de control al procesului
10. PC Execute	Lansarea în paralel a taskului de control
11. Alter (-1, 18, 1)	Recepționarea datelor de la taskul de control
12. Speed 5 MMPS	Viteză de 5mm/sec.
13. Moves C	Depolasare pe traiectorie liniară spre C
14. While X (HERE)< X (B)	Se aștepta atingerea coordonatei X a punctului B
15. End.	
16. Continue = False	Mișcarea spre C este abandonată
17. Brake	
18. Speed 100	Retragere cu viteza maximă în poz. HOME
19. Move H	
20. .End.	
22. Program PC	Taskul de control al sistemului
23. While Continue Do	Cât timp taskul este validat
24. If Sig (1001) Then	Corecție pe direcția X în +
25. dx = 10	
26. If Sig (1002) Then	Corecție pe direcția X în -
27. dx = -10	
28. If Sig (1003) Then	Corecție pe direcția Z în +
29. dz = 10	
30. If Sig (1004) Then	Corecție pe direcția Z în -
31. dz = -10	
32. AltOut dx, 0, dz, 0, 0, 0.	Transmiterea corecției spre programul de mișcare
33. End; While	Sfârșitul taskului de control
34. . End	Sfârșitul programului de mișcare

ANEXA C

TABELUL 1C. Momentele de încărcare în articulațiile brațului robot PUMA 600

POZIȚIE INIȚIALĂ, INTERMEDIARĂ, FINALĂ	FORȚA DE ÎNCĂRCARE [N]	TENSIUNEA PE TRADUCTOARELE DE CURENȚ			FORȚA DE CONTACT [N]		
		EXTERNĂ [N]	Axa1 [mV]	Axa2 [mV]	Axa3 [mV]	F _x	F _y
 $(90^0, 0^0, 0^0)$ $(90^0, 0^0, 0^0)$ $(90^0, 0^0, 0^0)$	0	12	640	360	-	-	-
	8	13	740	432	-	-	-
	20	13	970	640	-	-	-
	-10	10	470	240	-	-	-
 $(90^0, 0^0, -90^0)$ $v = 50\% v_{max}$ $(90^0, 0^0, 90^0)$	0	13	fig.1C	fig.2C	-	-	-
	8	14	fig.1C	fig.2C	-	-	-
	20	12	fig.1C	fig.2C	-	-	-
 $(90^0, 0^0, 0^0)$ $v = 30\% v_{max}$ $(90^0, 90^0, 90^0)$	0	16	fig.3C	fig.4C	-	-	-
	8	17	fig.3C	fig.4C	-	-	-
	20	28	fig.3C	fig.4C	-	-	-
 $(90^0, 0^0, 0^0)$ $(90^0, 0^0, 0^0)$ $(90^0, 0^0, 0^0)$	10	160	780	462	13	9,4	-37
	20	322	960	650	13	18	-33
	-20	-290	966	645	13	-18	-28
 $(90^0, 45^0, -45^0)$ $(90^0, 45^0, -45^0)$ $(90^0, 45^0, -45^0)$	40	18	480	360	0,8	-41	-38
	60	20	560	570	0,9	-57	-44
	20	16	446	234	0,8	-27	-30
 $(90^0, 45^0, -45^0)$ $(90^0, 45^0, -45^0)$ $(90^0, 45^0, -45^0)$	40	6	680	490	0,9	-36	-44
	60	-10	745	550	0,9	-46	-65
	20	16	446	234	0,8	-27	-30
 $(90^0, 0^0, 0^0)$ $v = 50\% v_{max}$ $(0^0, 0^0, 0^0)$	0	fig.5C	710	350	-	-	-
	10	fig.5C	750	439	-	-	-
	20	fig.5C	890	620	-	-	-

Figurile tabelului 1C

