

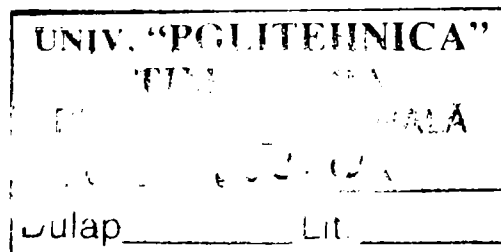
OPTIMIZAREA CONSTRUCTIV – FUNCȚIONALĂ A ROBOȚILOR MOBILI PATRUPEZI

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul INGINERIE INDUSTRIALĂ
de către

Ing. Steliana Vatai

Conducători științifici: Prof.dr.ing. dr.h.c.m. Francisc Villiam KOVACS
Prof.dr.ing. Inocențiu MANIU
Referenți științifici: Prof.dr.ing. Mircea IVĂNESCU
Prof.dr.ing. Ion VELA
Prof.dr.ing. Corneliu RĂDULESCU

Ziua susținerii tezei: 07.11.2008



Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2008

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Prezenta lucrare este rezultatul activității prestate în perioada stagiului ca doctorand cu frecvență la Facultatea de Mecanică, Departamentul de Mecatronică, Universitatea "Politehnica" din Timișoara.

Pentru început, doresc să mulțumesc coordonatorilor Prof.dr.ing.dr.h.c.m. Francisc Villiam Kovacs și prof.dr.ing. Inocențiu Maniu pentru sfaturile și suportul acordat în toate problemele apărute pe parcursul elaborării tezei.

Îmi exprim întreaga considerație față de membrii comisiei de doctorat, domnul președinte al comisiei Prof.dr.ing. Dumitru Țucu, prodecanul Facultății de Mecanică din Timișoara și domnii Prof.dr.ing. Mircea Ivănescu de la Universitatea din Craiova, Prof.dr.ing. Ion Vela de la Universitatea "Eftimie Murgu" din Reșița și Prof.dr.ing. Corneliu Rădulescu de la Universitatea "Politehnica" din Timișoara, care au răspuns solicitării de a face parte din comisia de analiză a tezei, pentru observațiile făcute și pentru timpul acordat lucrării.

De asemenea mulțumesc tuturor ce m-au ajutat cu diverse sfaturi și indicații utile finalizării tezei.

Această teză a fost redactată în LaTeX utilizând distribuția "free" MiKTeX pentru Windows.

Timișoara, noiembrie 2008

Steliana Vatau

Vatau, Steliana

Optimizarea constructiv - funcțională a roboților mobili patrupezi

Teze de doctorat ale UPT, Seria 8, Nr. 12, Editura Politehnica, 2008, 276 pagini, 164 figuri, 19 tabele.

ISSN: 1842-8967

ISBN: 978-973-625-753-7

Cuvinte cheie:

Roboți pășitori, Locomoție, Stabilitate, Simulare, JQuadRobot

Rezumat:

Domeniul roboților mobili autonomi s-a dezvoltat foarte mult în ultimii ani având în prezent aplicații în majoritatea domeniilor de activitate. Spre deosebire de roboții instalați în puncte fixe care pot lucra într-un spațiu limitat, roboții mobili au capacitatea de a opera într-un spațiu ce depășește cu mult dimensiunile proprii. Crearea unui robot pășitor autonom, înzestrat cu funcții de manipulare a obiectelor, locomoție, percepție, navigație, învățare, raționament, stocare de informație și control inteligent, este scopul multor centre de cercetare din diferite părți ale globului.

În acest context lucrarea de față își propune să studieze problematica roboților mobili pășitori, în special roboții mobili pășitori patrupezi. Autoarea a proiectat și construit robotul pășitor patrupeze JQuadRobot, respectiv a dezvoltat în Java și Java3D aplicația modulară "JQuadRobot", cu ajutorul căreia este comandat și controlat robotul.

Din punct de vedere financiar, la realizarea acestei teze, granturile de tip CNCSIS TD GR49/11.05.2007, derulat pe parcursul anului 2007 și GR98/11.06.2008, derulat pe parcursul anului 2008, la care autoarea a fost director, a adus o mare contribuție calității rezultatelor.

O parte a rezultatelor tezei sunt prezentate și pe web la adresa <http://www.jquadrobot.org>.

Cuprins

1	Introducere	1
1.1	Roboții mobili cu roți versus roboții mobili pășitori	3
1.2	Avantajele roboților pășitori	7
1.3	Roboți mobili pășitori - din trecut în viitor	9
1.4	Obiectivele tezei	22
1.5	Concluzii	23
2	Locomoția roboților pășitori	25
2.1	Locomoția cu picioare	25
2.2	Mecanisme pentru picioare	33
2.3	Configurații de roboți pășitori	39
2.4	Parametrii de bază în studiul mersului roboților pășitori	43
2.5	Stabilitatea roboților cu picioare	56
2.5.1	Stabilitatea statică a roboților cu picioare	57
2.5.2	Stabilitatea cvasistatică a roboților cu picioare	60
2.6	Concluzii	65
3	Modelarea geometrică a robotului pășitor JQuadRobot	67
3.1	Sinteza piciorului robotului pășitor JQuadRobot	67
3.2	Sinteza structurală a lanțului cinematic minimal	69
3.3	Sinteza dimensională a lanțului cinematic minimal	70
3.4	Aplicația "DimLegJQuadRobot"	76
3.5	Concluzii	78

4	Modelarea cinematică a piciorului robotului JQuadRobot	79
4.1	Analiza cinematică a piciorului robotului pășitor JQuadRobot	80
4.2	Exprimarea funcțiilor de poziție, viteză și accelerație printr-o lege de mișcare	81
4.3	Sinteza funcțiilor de pseudocomandă	83
4.4	Sinteza funcțiilor de comandă	88
4.5	Algoritm pentru configurarea sistemului de locomoție	88
4.6	Determinarea variației centrului de masă al robotului JQuadRobot	92
4.7	Rezultate experimentale	96
4.8	Concluzii	128
5	Analiza cinetostatică a robotului pășitor JQuadRobot	129
5.1	Calculul forțelor de reacțiune ce acționează asupra picioarelor aflate în faza de suport	130
5.2	Studiul forțelor când punctul caracteristic urmărește o lege de mișcare . .	133
5.3	Efectul dinamic al piciorului care se ridică asupra stabilității platformei .	137
5.4	Rezultate experimentale	140
5.5	Concluzii	150
6	Contribuții la proiectarea și realizarea robotului mobil pășitor JQuadRobot	151
6.1	Robotul pășitor patruped JQuadRobot	152
6.2	Servomotoare de curent continuu	155
6.3	Sistemul de comandă și control	159
6.4	Funcționarea robotului pășitor patruped JQuadRobot	166
6.5	Concluzii	171
7	Contribuții la dezvoltarea și testarea unui software pentru conducerea robotului mobil pășitor JQuadRobot	173
7.1	Open Source	173
7.2	Java3D	175
7.3	IDE	175
7.4	Aplicația "JQuadRobot"	176
7.5	Aplicația "JQuadRobot" - Communication	177
7.6	Aplicația "JQuadRobot" - Editor	182

7.7	JQuadRobot Editor - salvare, deschidere și rulare fișiere	188
7.8	Aplicația "JQuadRobot" - Simulator	191
7.9	Concluzii	195
8	Deplasarea roboților pășitori pe suprafețe accidentate	197
8.1	Deplasare robotului pășitor pe o pantă	199
8.2	Modalități de deplasare peste un obstacol de tip șanț	210
8.3	Modalități de deplasare peste un obstacol de tip treaptă	217
8.4	Modalități de deplasare peste un obstacol de tip prag	228
8.5	Concluzii	232
9	Aplicații ale roboților pășitori	233
9.1	Aplicații ale roboților pășitori în medii cu risc maxim	233
9.2	Aplicații ale roboților pășitori în explorări planetare	234
9.3	Aplicații ale roboților pășitori în medii subacvatice	236
9.4	Aplicații ale roboților pășitori în medii agricole și forestiere	236
9.5	Aplicații ale roboților pășitori în domeniul prestărilor de servicii	237
9.6	Aplicații ale roboților pășitori în domeniul educațional și didactic	239
10	Concluzii finale	241
10.1	Structura tezei	242
10.2	Contribuții teoretice și aplicative	244
	Bibliografie	247

Prefață

Pentru început doresc să-mi exprim pe această cale întreaga recunoștință domnilor prof.dr.ing.dr.h.c.m. Viliam Francisc KOVACS și prof.dr.ing. Inocențiu MANIU, conducătorii științifici, cărora le datorez toată gratitudinea pentru sprijinul constant, competent și eficient primit pe întreaga evoluție a stagiului de pregătire și pentru suportul acordat în toate problemele apărute pe parcursul elaborării tezei.

De asemenea aduc mulțumirile mele în mod deosebit domnului profesor dr.ing. Corneliu Rădulescu și domnului conf.dr.ing. Ștefan Varga, pentru disponibilitatea, opiniile competente bazate pe experiență și deosebit de utile, care au adus un aport substanțial la realizarea acestei teze.

Mulțumesc întregului colectiv al Departamentului de Mecatronică, în special doamnei prof.dr.ing. Arjana Davidescu și doamnei conf.dr.ing. Carmen Sticlaru pentru sugestiile, sprijinul și înțelegerea acordată pe parcursul elaborării tezei, dar mai ales pentru atmosfera colegială.

De asemenea, mulțumesc domnului prof.dr.ing. Valer Dolga pentru sugestiile și sprijinul moral acordat.

Adresez de asemenea mulțumiri tuturor celor care, într-un fel sau altul au contribuit la finalizarea acestei lucrări.

În final, dar nu în ultimul rând, mulțumesc familiei pentru susținerea și înțelegerea de care a dat dovadă în tot acest timp.

* * *

Această teză a fost redactată în LaTeX utilizând distribuția "free" MiKTeX pentru Windows.

Capitolul 1

Introducere

Unul din obiectivele esențiale ale Roboticii este elaborarea roboților autonomi. Asemenea roboți ar putea accepta o descriere naturală - formală - (de nivel înalt) a sarcinilor de îndeplinit și executarea comenzilor fără alte intervenții umane [6]. Domeniul roboților mobili autonomi s-a dezvoltat foarte mult în ultimii ani având în prezent aplicații în majoritatea domeniilor de activitate. Spre deosebire de roboții instalați în puncte fixe care pot lucra într-un spațiu limitat, roboții mobili au capacitatea de a opera într-un spațiu ce depășește cu mult dimensiunile proprii.

Crearea unui robot pășitor autonom, înzestrat cu funcții de manipulare a obiectelor, locomoție, percepție, navigație, învățare, raționament, stocare de informație și control inteligent, este scopul multor centre de cercetare din diferite părți ale globului.

În acest context lucrarea de față își propune să studieze problematica roboților mobili pășitori, în special roboții mobili pășitori patrupezi. Subiectul tezei de doctorat îl constituie dezvoltarea roboților pășitori prin înzestrarea roboților mobili autonomi cu abilitatea de a păși pe anumite tipuri de sol într-un mod mai stabil și mai eficient decât roboții convenționali ce folosesc roți sau șenile. Prezenta teză reliefează contribuțiile proprii, rezultate din activitatea de cercetare pe parcursul a patru ani de studiu în cadrul programului de doctorat cu frecvență cu tema "Optimizare constructiv - funcțională a roboților mobili patrupezi".

Pentru a sistematiza volumul de informație cuprins în cadrul tezei, lucrarea este structurată pe zece capitole.

Capitolul 1, "Introducere", prezintă pentru început o comparație între roboții mobili pe roți, pe de o parte și roboții pășitori pe de altă parte cu avantajele și dezavantajele aferente. După un scurt istoric al roboților mobili pășitori, se prezintă obiectivele prezentei teze. Astfel, în conformitate cu obiectivele formulate, în următoarele capitole sunt prezentate contribuțiile teoretice și practice ce au dus la realizare lor.

Capitolul 2, "Locomoția roboților pășitori", tratează problemele locomoției roboților pășitori, tipuri de mecanisme pentru picioarele roboților pășitori, parametrii de bază în studiul roboților pășitori. Se trece apoi la problema stabilității roboților pășitori, iar în final se prezintă tipul de mecanism și schema cinematică pe care autoarea a ales-o pentru construcția robotului mobil pășitor JQuadRobot.

În **Capitolul 3**, "Modelarea geometrică a robotului pășitor JQuadRobot", se prezintă sinteza piciorului platformei mobile pășitoare. Capitolul se încheie cu prezentarea aplicației "DimLegJQuadRobot", pe care autoarea a realizat-o utilizând limbajul Java și API-ul Java3D pentru determinarea lungimile elementelor piciorului robotului pășitor pa-truped JQuadRobot, respectiv a cursele unghiulare ale acestora, având ca date de intrare dimensiunile spațiului de lucru al piciorului.

Capitolul 4, "Modelarea cinematică a piciorului robotului pășitor JQuadRobot" abordează analiza cinematică a piciorului platformei mobile pășitoare. Capitolul se încheie cu prezentarea unui algoritm de configurare a sistemului de locomoție.

Capitolul 5, "Analiza cinetostatică a robotului pășitor JQuadRobot", tratează modelarea cinetostatică a roboților pășitori quadrupezi. Se prezintă calculul forțelor de reacțiune ce acționează asupra picioarelor în faza de suport, studiul forțelor când punctul caracteristic urmărește o lege de mișcare, precum și efectul dinamic al piciorului care se ridică asupra stabilității platformei pășitoare.

Capitolul 6, "Contribuții la proiectarea și realizarea robotului mobil pășitor JQuadRobot", prezintă detaliat robotul mobil pășitor JQuadRobot, proiectat și realizat fizic de către autoarea prezentei teze, reprezentând componenta hardware a sistemului mobil pășitor JQuadRobot. Sunt prezentate problemele și soluțiile ce rezolvă aceste probleme, apărute pe parcursul realizării robotului.

Capitolul 7, "Contribuții la dezvoltarea și testarea unui software pentru sistemul JQuadRobot", prezintă detaliat aplicația "JQuadRobot" dezvoltată în limbajul Java și

API-ul Java3D de către autoarea prezentei teze, reprezentând componenta software a sistemului mobil pășitor JQuadRobot.

Capitolul 8, "Deplasarea roboților pășitori pe suprafețe accidentate", abordează modalități de pășire pe terenuri care prezintă neregularități.

Capitolul 9, "Aplicații ale roboților pășitori", prezintă aplicații ale roboților pășitori în diverse medii de lucru.

Lucrarea se încheie cu **Capitolul 10**, "Concluzii finale", ce prezintă o sinteză a concluziilor și contribuțiilor desprinse din prezenta lucrare, analizate din diverse puncte de vedere. De asemenea, se prezintă punctual gradul de realizare a obiectivelor prezentate în capitolul 1 prin soluțiile prezentate pe parcursul tezei, cât și problemele întâmpinate pe parcursul atingerii fiecărui obiectiv formulat.

Volumul de față este o lucrare completă, interesantă, cu numeroase elemente de noutate, ce se bazează pe o bogată documentație bibliografică.

1.1 Roboții mobili cu roți versus roboții mobili pășitori

Impunerea vehiculelor cu roți a făcut ca cel mai adesea să fie complet neglijate implicațiile utilizării lor excesive. Într-adevăr, acest tip de locomoție este o sursă importantă de transformări majore asupra mediului natural, cu consecințe dintre cele mai nefaste. Deoarece vehiculele cu roți operează calitativ superior pe suprafețe terestre prelucrate, omul a intervenit asupra naturii construind căi de comunicație pe trasee convenabile, ceea ce a dus la modificări uneori nebanuite asupra ecosistemelor naturale [49].

Studiile statistice arată că peste jumătate din suprafața terestră rămâne și în prezent practic inaccesibilă oricărui vehicul cu roți, indiferent de complexitatea sa, în timp ce omul și alte ființe biologice au puține probleme în deplasarea pe aceste terenuri folosind locomoția pășitoare. Mai mult, sistemele biologice pășitoare pot realiza viteze de până la 100 Km/h, iar greutatea suportată de acestea poate atinge domeniul tonelor.

Apare deci firească întrebarea: de ce nu a fost creată de om, ca primă soluție artificială de locomoție, cea pășitoare în locul celei bazate pe roți? Răspunsul la această întrebare trebuie căutat în faptul că un picior artificial complet adaptiv trebuie coordonat în timp real, aspect ce a devenit tehnologic posibil abia după anul 1980, odată cu dezvoltarea calculatorului numeric sub aspectul performanțelor, volumului și costului.

De îndată ce această barieră a fost depășită s-a stimulat și interesul pentru fundamentarea teoretică și practică a locomoției pășitoare. Chiar dacă și în prezent soluțiile comerciale sunt relativ restrânse, robotica mobilă a preluat și impulsionat aceste cercetări în vederea elaborării unor soluții viabile pentru aplicații speciale: explorarea terenurilor extrem de accidentate și periculoase omului (proximitatea craterelor vulcanice, a terenurilor mlăștinoase), întreținerea suprafețelor exterioare ale clădirilor moderne, aplicații astronautice pe planetele explorate, aplicații submersibile, etc [49].

În mod tradițional, pentru cercetarea unor zone terestre accidentate și periculoase s-au folosit adesea tot vehicule cu sustentație prin roți, deși acest sistem de locomoție este inferior celui prin pășire. Dacă primele nu pot depăși 10-20 Km/h pe astfel de terenuri, sistemele biologice pot atinge viteze maxime de 40-50 Km/h. Din punct de vedere energetic, anumite studii statistice arată că pentru un teren acoperit cu cca. 25 cm de pământ afânat, puterea specifică necesară (respectiv puterea raportată la masa proprie) este de două ori mai mare pentru locomoția prin roți.

În figura 1.1 se poate observa cum a evoluat dezvoltarea roboților mobili în decursul anilor.

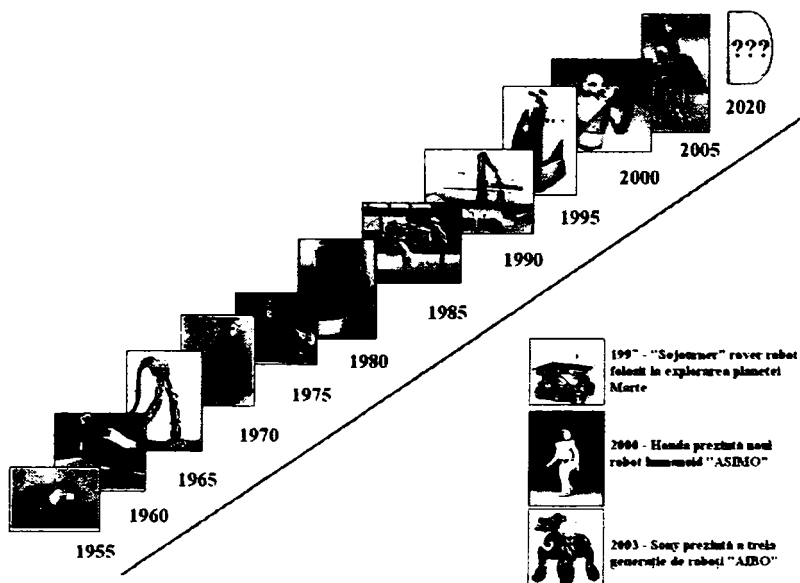


Figura 1.1: Evoluția roboților mobili de-a lungul timpului.

Mai mult, confortul pe durata deplasării și izolarea față de neregularitățile terenului accidentat sunt clar favorizate de locomoția pășitoare. Cel puțin din experiența coti-

diană se cunoaște faptul că, pentru aceeași viteză de croazieră, este preferabilă explorarea călare în fața utilizării unui vehicul cu roți ce produce oscilații și vibrații greu de suportat, atât pentru om cât și pentru aparatura de cercetare. Din punct de vedere ecologic, spre deosebire de locomoția prin roți care creează urme continue ce favorizează eroziunea solului, locomoția pășitoare creează urme discontinue, ajutând natura la reținerea umidității în sol.

Aspectele relevate anterior permit evidențierea a cel puțin șase avantaje potențiale ale structurilor pășitoare față de cele convenționale pe terenuri accidentate [48]:

- Viteza mai mare de croaziera.
- Consum energetic mai mic.
- Îmbunătățirea substanțială a mobilității.
- Izolare mult mai bună a sarcinii transportate în raport cu neregularitățile terenului.
- Reducerea efectelor distructive asupra naturii.
- Posibilitatea abordării unor terenuri extrem de accidentate pentru care locomoția convențională este imposibilă sau complet inadecvată.

Încercări pentru realizarea structurii mecanice a unor mașini pășitoare au fost semnalate de istoria tehnicii încă de la sfârșitul secolului XIX, dar cercetări teoretice mai riguroase asupra problematicii specifice au început după anul 1950, iar peste zece ani au fost abordate și primele proiecte constructive în centre universitare sau de cercetare prestigioase din SUA, Japonia și Rusia. Aceste proiecte au fost finalizate în general prin structuri de locomoție bazate pe patru sau șase picioare, fiecare picior dispunând de două sau trei grade de libertate.

Aționările au fost hidraulice sau electrice, mecanisme speciale de tip pantograf tridimensional și coordonări prin sisteme complexe de came profilate fiind adeseori folosite. Inițial, controlul a fost realizat cu ajutorul unor calculatoare externe, mai întâi analogice și apoi numerice, iar ulterior noile structuri de microcalculatoare numerice au putut fi și imbarcate pe roboți. Primele proiecte au vizat mersul rectiliniu în scene de operare substanțial prelucrate aprioric, iar apoi au fost abordate și mișcări complexe pe soluri mai accidentate [32].

Motivul pentru acest progres lent apar în principal din complexitatea deosebită a controlului și coordonării procesului de pășire, înțelegerea limitată a mersului și insuficiența dezvoltare a picioarelor mecanice în practică. Totuși, pe baza eforturilor anterioare din cercetare și a tehnologiilor moderne din robotică și microcomputere, s-a realizat o îmbunătățire importantă la nivelul mașinilor pășitoare.

Un subiect major este proiectarea cinematică a mecanismului piciorului, precum și proiectarea geometriei globale a vehiculului cu locomotie prin pășire. Pentru a sprijini proiectarea geometriei piciorului este necesară o analiză a stilului de mers și a mobilității de pășire și o înțelegere a controlului și coordonării. Deci, această analiză poate fi împărțită în două părți importante:

- Coordonare și analiza mersului - mersul este partea legată de coordonare.
- Proiectarea vehiculului și a geometriei piciorului - este necesară proiectarea unei geometrii optime a piciorului care să furnizeze volumul de lucru necesar, randament bun și simplitate în structură, pentru o fiabilitate mecanică bună. Geometria globală a vehiculului trebuie să fie proiectată în așa fel încât să corespundă obiectivelor de traversare a unui obstacol mare și a unei locomotii eficiente pe distanță mare.

În cele ce urmează sunt prezentate două aspecte care subliniază elementele importante referitoare la mașinile pășitoare. Un aspect înglobează partea hard construită în trecut, cu accent pe structurile piciorului. Celălalt aspect conține cercetările asupra mersului.

Înainte de a prezenta aceste două considerații, este util de semnalat insuccesul în proiectarea practică a unei mașini pășitoare deși realizarea a fost semnificativă. Acest fapt rezultă în principal din insuficiențele cunoștințe în trei domenii: controlul piciorului, acționarea și proiectarea piciorului. Dacă oricare din aceste trei domenii nu este dezvoltat la nivelul necesar pentru proiectare și funcționarea unei mașini pășitoare practice, succesul va fi limitat.

Controlul unui vehicul pășitor a fost privit în trecut, ca fiind aspectul cel mai important și i s-a acordat o atenție considerabilă. Aproape toate mașinile pășitoare au fost construite pentru studiul controlului. Totuși multe aspecte ale controlului sunt încă în studiu activ. Acest fapt este adevărat mai ales pentru controlul unei locomotii instabile din punct de vedere static.

Mersul a fost studiat inițial de către zoologi cu scopul de a înțelege locomoția animalelor. Dezvoltarea studiului asupra mersului a inclus studiul locomoției animale, studiul mersurilor periodice, unele simulări pe calculator ale deplasării pe teren accidentat și implementarea câtorva maniere de deplasare pe teren moale. Cu cât mai mare este nevoia de mașini pășitoare reale pentru orice tip de teren, cu atât mai multe studii sunt necesare pentru sporirea mobilității vehiculului pe teren accidentat și la traversarea obstacolelor.

Cercetarea privind transmisia puterii, acționarea și geometria piciorului este cel mai nou subiect de cercetare dintre cele trei. S-a recunoscut treptat că un picior funcțional și eficient nu poate depinde numai de control. Mai multe cercetări asupra acestor subiecte sunt necesare pentru o mașină pășitoare practică.

Evoluțiile spectaculoase ale microtehnologiilor de natură electrică și mecanică, precum și dezvoltarea accelerată a roboticii din ultima perioadă sub aspect practic și conceptual, au orientat din nou interesul pentru locomoția pășitoare ca soluție modernă a roboticii mobile în general.

Ca rezultat al acestor proiecte au fost definite trei direcții principale de cercetare:

- Controlul general al stabilității structurii robotice pășitoare.
- Studiul procesului de locomoție prin pășire.
- Proiectarea unor structuri de pășire cât mai performante.

1.2 Avantajele roboților pășitori

Modelarea și controlul roboților pășitori este o adevărată provocare. Sistemul mecanic este complex, fiind compus dintr-o multitudine de articulații. Modelul matematic, deși la prima vedere pare simplu, este foarte complex. Universității din toata lumea au construit diferiți roboți pășitori (bipezi, quadrupezi, hexapozi, etc) în vederea studierii comportamentului acestor la diferite ordini de pășire, la deplasarea pe suprafețe cu texturi diferite, elaborării unor metode de control, studierii stabilității atât din punct de vedere static cât și dinamic, în scop educațional, etc.

Roboții mobili pășitori se disting prin aceea ca nu necesită neapărat căi de ghidare special amenajate (distrug mai puțin mediul decât roboții mobili cu roți / șenile), motiv

pentru care pot fi utilizați atât în mediul industrial, cât și în mediul neindustrial.

De ce folosim locomoția pășitoare în locul celei pe roți? Câteva argumente în favoarea locomoției pășitoare sunt prezentate în cele ce urmează [47]:

- Mai mult de jumătate din suprafața Pământului este inaccesibilă roboților mobili cu roți / șenile. Terenurile pe care roboții pășitori prezintă avantaj față de cei cu roți / șenile sunt cele accidentate, respective extreme, de exemplu acele terenuri ce prezintă obstacole, găuri, trepte sau șanțuri. Astfel de terenuri pot fi găsite în păduri, munții, dar și mediile interioare pot fi incluse în această categorie, deoarece prezența scărilor sau pragurile înalte pot pune roboții mobili convențional în dificultate.
- Un alt avantaj al roboților pășitori este dat de contactul acestora cu solul, care nu este un contact de rostogolire, mai degrabă fiind unul discontinuu, iar suprafața de sprijin poate fi selectat în așa mod încât obstacolele să fie evitate, pe când roboții cu roți trebuie să urmărească un contur pe sol. Pe suprafețele moi, roboții cu roți pot rămâne blocați datorită patinării, totodată deteriorând și suprafața. Roboții pășitori, pe de altă parte, lasă numai urme separate pe sol, deoarece locomoția lor nu se bazează pe alunecare, deteriorând astfel mult mai puțin suprafața.
- Roboții pășitori au capacitatea de adaptare la terenurile accidentate, astfel încât deplasarea să fie lină, mai mult chiar dacă este echipat cu un manipulator, picioarele pot fi transformate într-o bază de sprijin activă până când manipulatorul își îndeplinește sarcina. Pot fi omnidirecționali, se pot deplasa înainte, într-o parte sau se pot întoarce pe loc, mai mult ei au abilitatea de a se ridica, de a se apleca sau înclina prin modificarea lungimii picioarelor (de exemplu îndoirea genunchilor). Această abilitate le conferă un avantaj în ceea ce privește deplasarea prin spații înguste, cu înălțimii variabile.

Toate aceste avantaje ale roboților pășitori, menționate mai sus, depind de structura mecanică a acestora și de sistemul de control. În proiectarea unei platforme mobile pășitoare apar și o serie de probleme cum ar fi [61]:

- Cinematica și dinamica unui robot pășitor sunt neliniare, din acest motiv este dificil realizarea unui model exact, iar modelele simple în general nu sunt adecvate.

Parametrii robotului (poziția centrului de masa, valoarea sarcinii utile, etc.) nu sunt exact cunoscuți și de asemenea valorile lor variază în timp.

- Mediul în care navighează robotul pășitor este unul necunoscut și dinamic. Suprafața, de exemplu, poate fi elastică, umedă, moale sau accidentată.
- Menținerea stabilității platformei pășitoare în timpul pășirii este una dintre problemele majore ce apar în proiectare acestor sisteme. Simpla blocare a tuturor articulațiilor nu poate fi de ajuns pentru asigurarea stabilității.
- Menținerea echilibrului este dificil de realizat, deoarece picioarele prezintă multe grade de libertate ce trebuie controlate simultan. De exemplu, pentru deplasarea pe un teren accidentat este necesar ca fiecare picior să aiba cel puțin 3 grade de libertate, ceea ce presupune controlul simultan a cel puțin 12 actuatoare pentru un robot quadruped.
- O altă problemă ce apare este legată de autonomia sistemului. Sursa de energie crește mult greutatea platformei, iar folosirea unor cabluri de alimentare limitează spațiul de lucru al acesteia.
- Numărul mare de grade de libertate ce trebuie acționate face roboții pășitori mai greu de realizat, mai complecși și mai scumpi decât roboții mobili cu roți. În prezent, cei mai mulți roboți pășitori au viteze de deplasare mici, iar costul de fabricație este mult mai mare decât la roboții mobili convenționali.

1.3 Roboți mobili pășitori - din trecut în viitor

Reproducerea mecanică a mișcărilor ființelor vii (oameni, animale și insecte) a constituit în decursul civilizației umane o preocupare constantă. Începuturile pot fi plasate în jurul anului 270 î.c. și pot fi legate de numele învățatului grec Ctesibius. Acesta a strâns și aplicat cunoștințele epocii în domeniul hidraulic și pneumatic pentru a realiza un ceas cu figuri mobile acționat de forța apei. Probabil cel mai mare tehnician al antichității este Heron din Alexandria care a alcătuit câteva tratate: "Despre teatrul automat" ; "Despre pneumatică" ; "Despre mecanică", fiind în același timp și un cunoscut constructor.

Dacă prin decăderea civilizației antice și mai apoi arderea bibliotecii din Alexandria cunoștințele de mecanică și de hidro-pneumatică acumulate s-au pierdut pentru Europa evului mediu timpuriu, civilizația arabă a preluat unele dintre ele. Mărturie stă cartea "Kitab al-Hiyat" ("Cartea dispozitivelor ingenioase") apărută în timpul secolului IX. În Europa abia în epoca renasterii reînvie interesul pentru arta și știința antică. Din pleiada de mari artiști și cercetători se cuvine să ne referim la Leonardo da Vinci a cărui operă pe lângă excepționalele realizări artistice cuprinde și un segment important consacrat științei și tehnicii epocii.

Lista marilor realizări ar putea continua, de aceea în cele ce urmează se încearcă o prezentare sintetică a principalelor evenimente de-a lungul istoriei contemporane a roboților.

Primii roboți pășitori au apărut la sfârșitul secolului XIX. Astfel în anul 1893, Rygg a obținut un brevet de invenție pentru proiectul unui cal mecanic (figura 1.2). Nu există dovezi care să demonstreze că acesta a fost realizat și în practică [63].

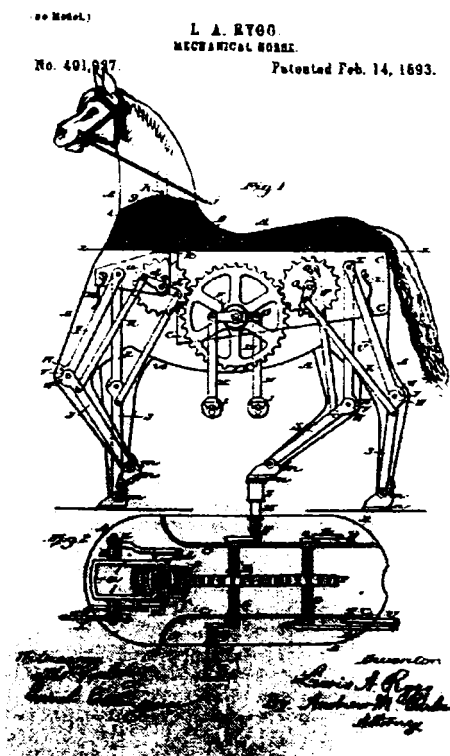


Figura 1.2: Brevet de invenție pentru construirea unui cal mecanic în 1893.

Figura 1.3 prezintă o mașină bipedă numită Steam Man. Această mașină, proiectată de Georges Moore în 1893, a fost, poate, primul biped din lume. Era acționat cu gaz și putea atinge o viteză de 14 km/h [63].

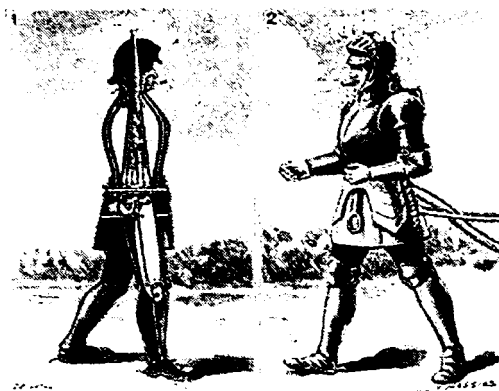


Figura 1.3: The Steam Man - prima mașina bipedă construită în 1893.

În anul 1913, Bechtolsheim a obținut un brevet pentru proiectarea unui vehicul pășitor cu patru picioare (figura 1.4). Dar iarăși nu există dovezi despre succesul său în construirea acestei mașini [63].

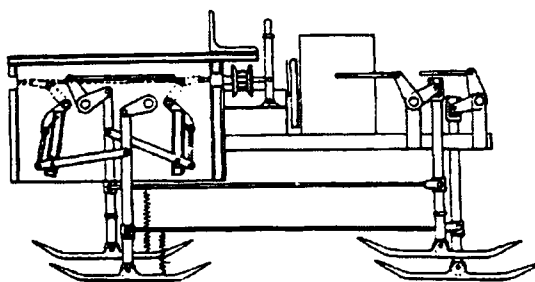


Figura 1.4: Brevet de invenție pentru construirea unui vehicul pășitor în 1910.

În 1963 firma General Electric a realizat primul robot patruped controlat manual în laboratorul profesorului R. Moshier (figura 1.5), demonstrând că un patruped se poate deplasa în spații cu profile neregulate, menținându-și echilibrul. Greutatea robotului este de 1363 Kg fiind destinat transportului de bombe și traversării unor cataracte ale râurilor rapide. Este condus de un operator uman și poate transporta 227 Kg fiind deservit de un motor pe gaz de 90 CP [98].

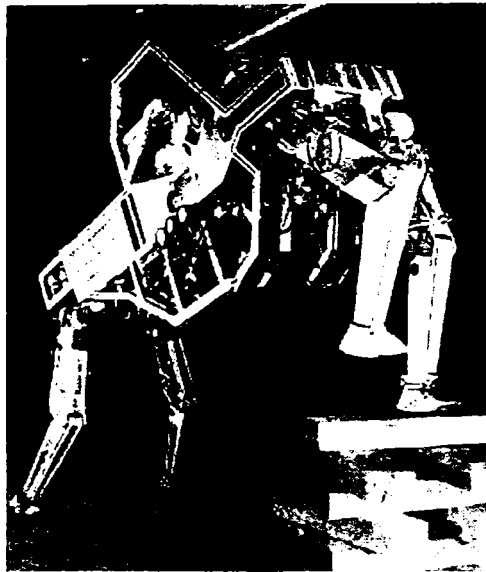


Figura 1.5: Robotul construit de firma General Electric

În 1966 s-a realizat primul robot patruped controlat de calculator, Phoney Poney (figura 1.6), construit de McGhee și Frank la University of South Carolina [76].

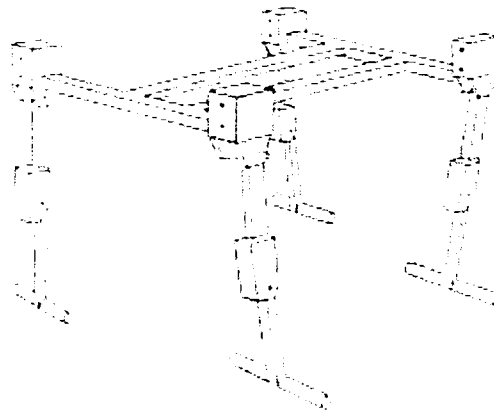


Figura 1.6: Robotul Phoney Poney

În perioada 1976-1979, Y. Ishino, T. Naruse, T. Sawano și N. Honma de la Centrul Tehnic de Cercetare al firmei Komatsu Ltd. din Japonia au construit un robot subacvatic pășitor, Aquarobot, cu șase picioare comandat de la distanță (figura 1.7). Mașina pășitoare are lungimea de 8 m, lățime 5.35 m, înălțime 6.4 m și masa de 29 de tone care poate atinge o viteză de maximum 0.07 m/s [98].

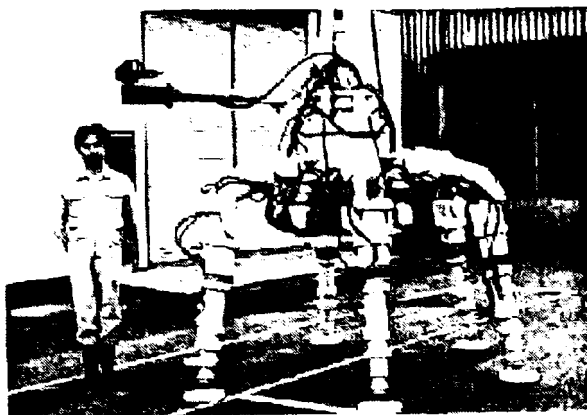


Figura 1.7: Robotul subacvatic pășitor - Aquarobot

La Academia de Științe din Rusia în cadrul Departamentului de Controlul Mișcării în Sisteme Vii și Artificiale, Dr.sc.prof. V.S. Gurfinkel și Dr.sc. A.Yu Schneider au realizat o mașină pășitoare cu șase picioare, iar în anul 1977 Prof. Devjanin, Prof. Gurfmkelt, Dr. Lensky și Dr. Schneider au realizat un robot hexapod pășitor denumit Mascha în două variante (figura 1.8).

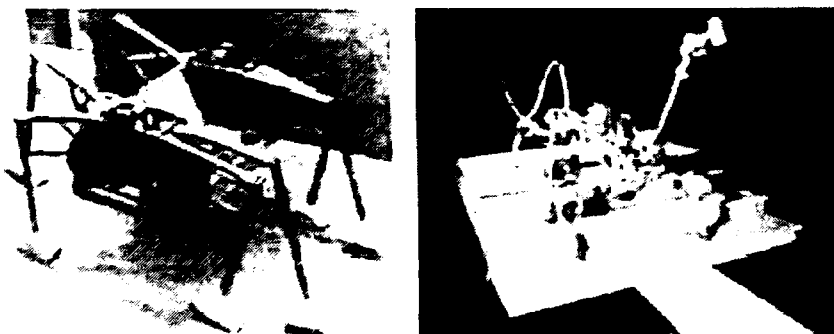


Figura 1.8: Robotul Mascha

La Tokyo Institute of Technology s-a realizat robotul Titan III (figura 1.9). Picioarele acestui robot sunt echipate cu senzori și sistem de procesare a semnalului. A fost realizat din aliaje cu memoria formei având proprietăți și caracteristici superelastice care îi determină starea de contact cu solul automat. Mai mult decât atât, robotul este echipat cu senzori care permit, în conexiune cu sistemul inteligent de control al mersului, denumit PEGASUS (PErspective GAit SUPervisory System), să ia decizii privind configurația terenului.

Varianta următoare, Titan IV (figura 1.9) a fost prezentată la Pavilionul expozițional de la Tsukuba, Japonia, în anul 1985. Prototipul a mers continuu 40 Km folosind diferite tipuri de pășire cu viteza de 40 cm/s. Lungimea robotul este de 1.2 m și greutatea totală de 160 kg. Trei prototipuri ale acestui robot au fost realizate ulterior la Mitsubishi Heavy Industries în variante autonome cu acumulatori la bord și controlate de calculator [72].

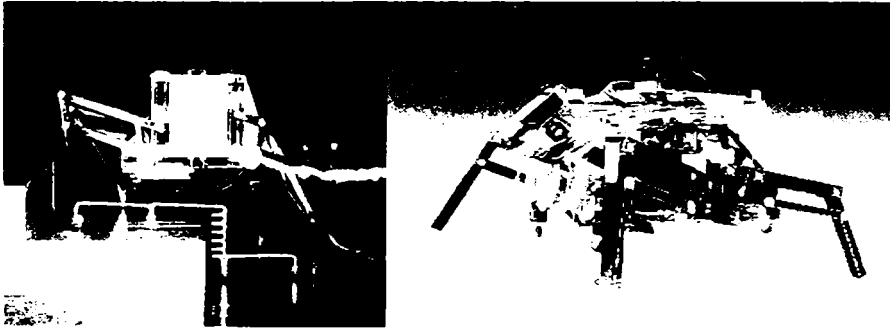


Figura 1.9: Robotul Titan III și Robotul Titan IV

Robotul Odex I (figura 1.10) a fost prezentat pentru prima dată în 1983. Hexapodul a fost dezvoltat la Odetics Inc., Savannah River Laboratory, și era destinat intervențiilor în medii ostile omului, cum ar fi industria nucleară și chimică. Piciorul are trei grade de mobilitate, fiind constituit dintr-un mecanism pantograf tridimensional. Pentru control era utilizat un mers de tip tripod alternant [11].

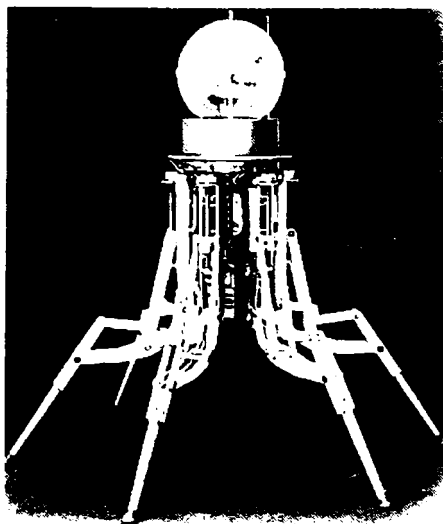


Figura 1.10: Robotul Odex I

Între anii 1988-1992 la Universitatea Carnegie Mellon s-a construit robotul pășitor AMBLER - modelul a fost descris ca Robot Autonom de Exploatare Mobilă (figura 1.11). Cântărește 2 tone, având 5.8 m în înălțime fiind din acest punct de vedere cel mai înalt robot de acest tip din lume. Destinația robotului era exploatarea planetei Marte (proiect finanțat de NASA) [3]. Acest proiect a fost ulterior abandonat în favoarea unor vehicule mai compacte. Cinematica piciorului este asigurată de un mecanism de tip RTT. Robotul se distinge printr-o cinematică originală și anume: cele șase picioare sunt articulate câte trei, rotindu-se în jurul a două axe verticale, ceea ce îi conferă o stabilitate statică deosebită în timpul locomoției.



Figura 1.11: Robotul Ambler

Vehiculul cu Suspensie Adaptivă (ASV) al Universității din Ohio (figura 1.12), proiectul a fost finanțat de DARPA, este probabil una dintre cele mai rapide mașini pășitoare din lume, capabilă să se deplaseze cu viteza de 2.3 m/s, viteză de croazieră, viteza maximă fiind de 3.6 m/s. Are o lungime de 5.2 m, înălțimea de 3 m și lățimea de 2.4 m și poate transporta o sarcină de 220 kg. Este proiectat pentru locomoția pe terenuri aspre și poate opera pe terenuri umede, cu corpul aproape paralel cu panta. Este acționat de un motor de motocicletă cu capacitatea de 0.9 litri (900 cc) și 70 kw ce conduce un volant de 0.25 kw/h care transferă puterea / energia la 18 pompe variabile cu piston prin curele dințate. Actuatorii sunt formați din cilindri hidraulici cu dublă acțiune, încărcarea actuatorilor este dictată de presiunile din cilindrii acestora [64].

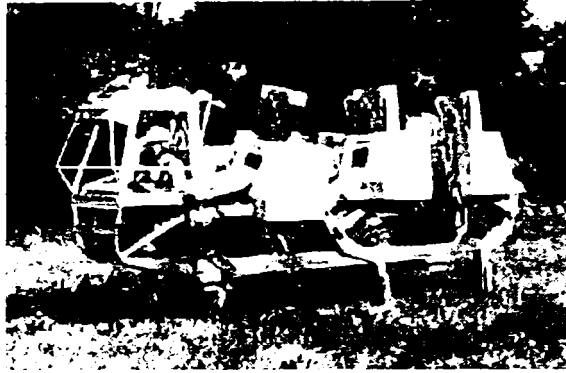


Figura 1.12: Vehiculul cu Suspensie Adaptivă (ASV)

După 1990 cercetările în domeniul roboților pășitori au luat un mare avânt datorită noilor tehnologii. Astfel în perioada 1992-1995, la CWRU Bio-Robotics Laboratory, Ohio State University, a fost construit CWRU Robot (figura 1.13). Picioarul robotului este de tip "insectă", având patru grade de mobilitate, dintre care un grad de mobilitate este parazit.

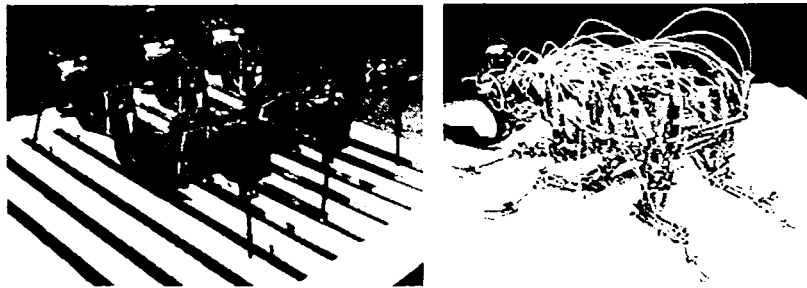


Figura 1.13: Robotul CWRU

Robotul Tarry a fost construit în 1992 (figura 1.14) în urma colaborării dintre Universitatea din Duisburg și Universitatea din Bielefeld. Principalul scop a fost acela de a realiza un robot pășitor autonom cu șase picioare ce se poate deplasa pe teren accidentat. Acest lucru pare să nu fie o problemă pentru cele mai multe animale, chiar și pentru acelea care nu sunt prea inteligente.

Din punct de vedere ingineresc acest lucru este foarte complex, mai ales pășirea care necesită mai mult efort tehnic decât deplasarea cu roți. Deplasarea prin pășire este mult mai convenabilă decât cea cu roți. În 1998 s-a început construirea robotului Tarry II, care are șase picioare cu 18 actuatoare, care pot fi controlate simultan.

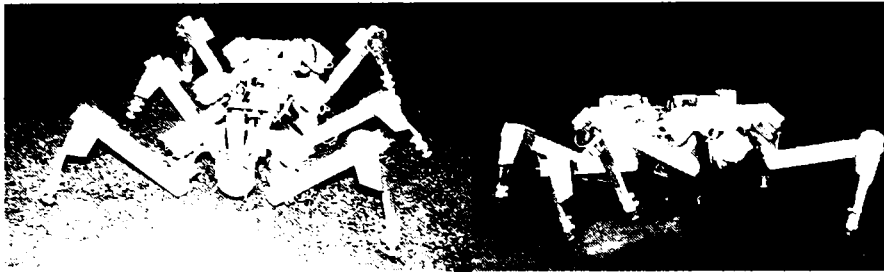


Figura 1.14: Robotul Tarry

Robotul Sprawl (construit în 2001 la Universitatea Stanford), prezentat în figura 1.15, face parte din familia roboților hexapozi. Este un robot rapid (pâna la 5 pași pe secundă) și are picioare robuste în comparație cu alți roboți. Este rezultatul unei strânse colaborări între robotică, inginerie industrială și biologie [74]. Acest robot este îmbunătățit continuu.

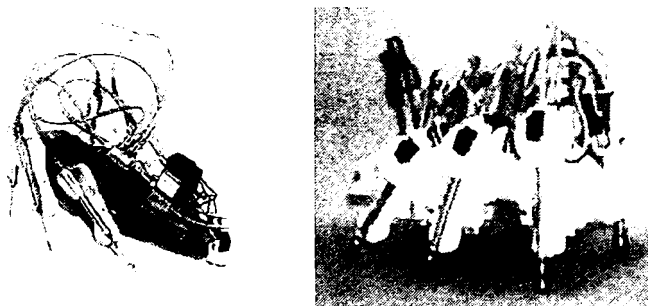
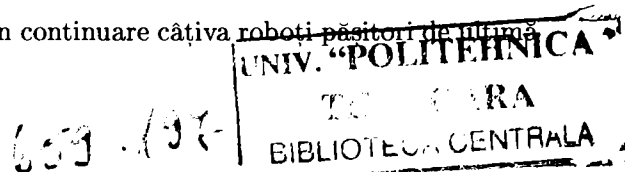


Figura 1.15: Robotul Sprawl

Universitatea Stanford în colaborare cu NASA's Jet Propulsion Laboratory (JPL) a construit în 2003 robotul LEMUR (Limbed Excursion Mechanical Utility Robots), prezentat în figura 1.16 [75]. Este un robot pășitor mic, agil cu șase picioare. Scopul pentru care a fost construit este acela de a realiza ușor mici asamblări, inspecții și întrețineri ale macro spațiului.

Controlul și stabilitatea roboților cu șase picioare sunt mai ușor de realizat în raport cu roboții cu două sau patru picioare. Creșterea performanțelor și miniaturizarea calculatoarelor a constituit un pas important în dezvoltarea prototipurilor de roboți pășitori cu patru și două picioare. Astfel se prezintă în continuare câțiva roboți pășitori de ultimă generație.



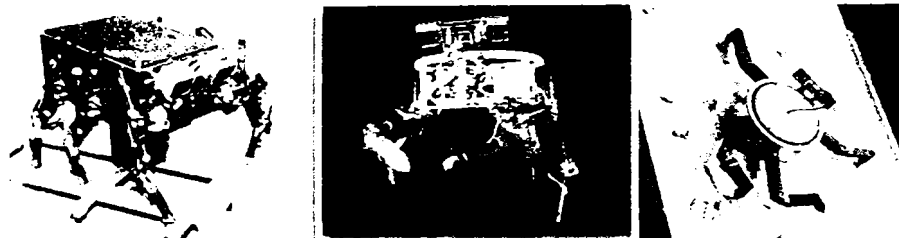


Figura 1.16: Robotul LEMUR

Dintre roboții patruzeți se prezintă robotul Colt3 (figura 1.17) construit la Universitatea Gifu din Japonia. Este acționat electric, are o masă de 45 kg, lungime de 94 cm și înălțime de 88 cm. Robotul este echipat cu senzori de forță, inclinometru, accelerometru, senzori ultrasonici [17].

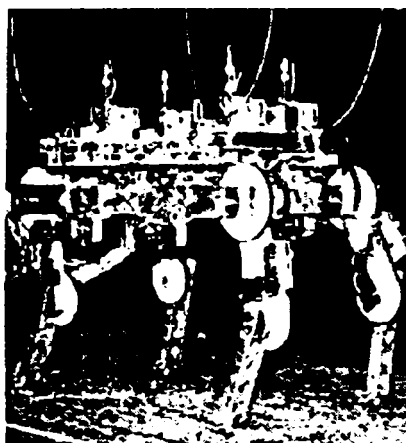


Figura 1.17: Robotul Colt3

Robotul Robug II (figura 1.18) a fost construit în perioada 1993-1995 la Universitatea din Portsmouth, Anglia. Este un robot construit pentru a escalada pereți verticali și face trecerea de la mersul pe orizontală la mersul pe verticală fără ajutorul operatorului. Acționarea este pneumatică, iar controlul este ierarhic pe patru nivele. O variantă îmbunătățită este Robug III, cu opt picioare [29].

În perioada 1994-1999, la Universitatea "Politehnica" din București, în cadrul catedrei de Teoria Mecanismelor și Roboților, laboratorul Merotehnica, este construit robotul Mero (în variantele hexapod, patrupez și biped) (figura 1.19). Sistemul mecanic este format din unul, două sau trei module articulate și configurate conform cerințelor

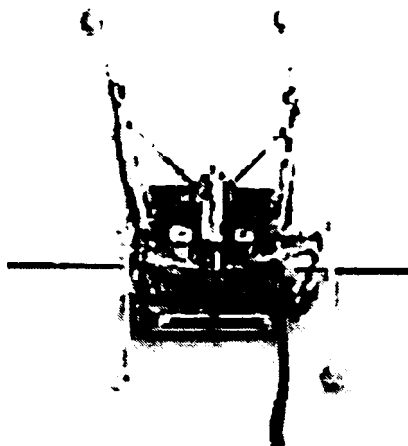


Figura 1.18: Robotul Robug II

deplasării pe o suprafață neregulată, sistemul de deplasare fiind construit astfel încât să fie posibilă realizarea unei mulțimi de traiectorii ale vârfului piciorului, traiectorii care să se poată modifica la fiecare pas, iar sistemul de acționare este hidraulic [29].

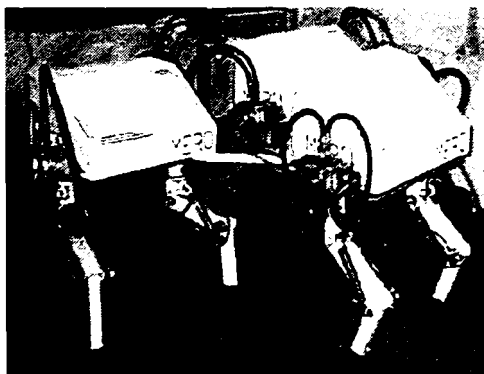


Figura 1.19: Robotul pășitor modular MERO

La Massachusetts Institute of Technology (MIT), în cadrul laboratorului de Inteligență Artificială, s-au construit în perioada 1994 - 1996, roboții bipezi: Troody, Spring Turkey și Spring Flamingo (figura 1.20). Roboții au fost construiți în vederea efectuării diferitelor cercetări în ceea ce privește mersul și stabilitatea roboților bipezi. Robotul Troody, simulează deplasarea dinozaurului Troodon și poate să pășească, să alerge, să se deplaseze înapoi, să se oprească și să rămână în echilibru stabil după încetarea deplasării, cu perioade de tranziție continue între aceste faze de locomoție. Robotul Spring

Turkey s-a construit pe baza observațiilor și studiilor experimentale realizate pe un curcan. Articulațiile genunchiului și gleznei sunt acționate independent, prin motoare plasate în partea superioară a corpului, și alimentate de la distanță printr-un cablu. Controlul forței se realizează la o frecvență de 20 Hz, greutatea prototipului fiind de 10 kg, la o înălțime de 60 cm. Robotul Spring Flamingo a fost construit pentru implementarea unor algoritmi pentru diferite tipuri de pășire, pentru descrierea mișcării prin tehnici de control și pentru controlul forței de acționare. Are o viteză de deplasare variabilă (0.75 m/s - 1.2 m/s), o bandă largă de stabilitate dinamică și o fiabilitate bună [42].

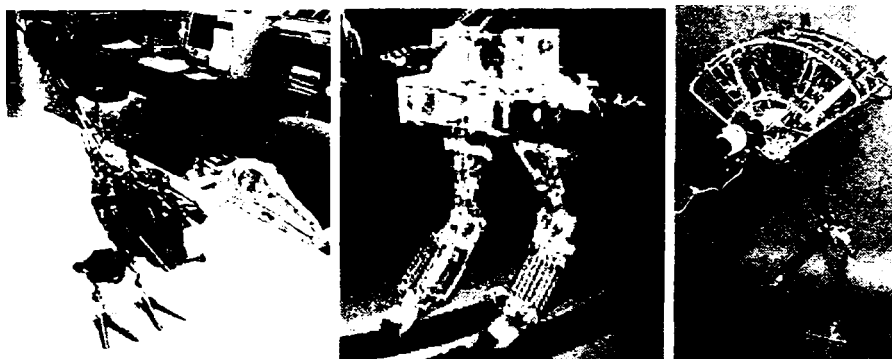


Figura 1.20: Roboții bipezi de la MIT: Troddy, Spring Turkey și Spring Flamingo

Firma Honda, în cadrul unui program de cercetare-dezvoltare lansat în 1986 împreună cu Universitatea Waseda, a reușit să prezinte în 1996 prima variantă de robot biped Honda Humanoid Robot - P2 (figura 1.21), cu o înălțime de 182 cm, iar în 1999 a finalizat varianta Honda Humanoid Robot - P3, cu o înălțime de 160 cm [26].

Un proiect cu totul deosebit de robot mobil cu locomoție bipedă a fost prezentat în noiembrie 2000 de concernul HONDA, sub numele de ASIMO (Advanced Step in Innovative MObility) (figura 1.22).

Rezultat a peste 10 ani de eforturi de cercetare și proiectare, ASIMO reprezintă în prezent una dintre cele mai valoroase și complexe realizări în domeniul roboticii bipede. Dimensiunile de gabarit ale robotului ASIMO au fost alese astfel încât acesta poate opera cu ușurință în mediul natural în care omul își desfășoară activitățile în mod curent. Mai multe studii ergonomice efectuate asupra dimensiunilor și modului de dispunere a obiectelor și dispozitivelor cu care omul interacționează zilnic, au fundamentat atât baza de dimensionare gabaritica a robotului ASIMO, cât și definirea formelor și di-



Figura 1.21: Robot biped Honda Humanoid Robot - P2

mensiunilor geometrice optime ale spațiilor de operare aferente fiecărei articulații ce intră în componența lanțurilor sale cinematice.

Se remarcă faptul că robotul dispune în total de un număr de 26 articulații ce pot fi comandate independent, distribuite astfel: 2 pentru direcționarea capului, 6 pentru fiecare mână și 6 pentru fiecare picior. Fiecare acționare include un servomotor electric cu reductor armonic încorporat și este coordonată de câte un controler numeric specializat. Robotul este capabil să transporte corpuri cu greutatea maximă de 0.5 Kg în fiecare mână a sa [25].

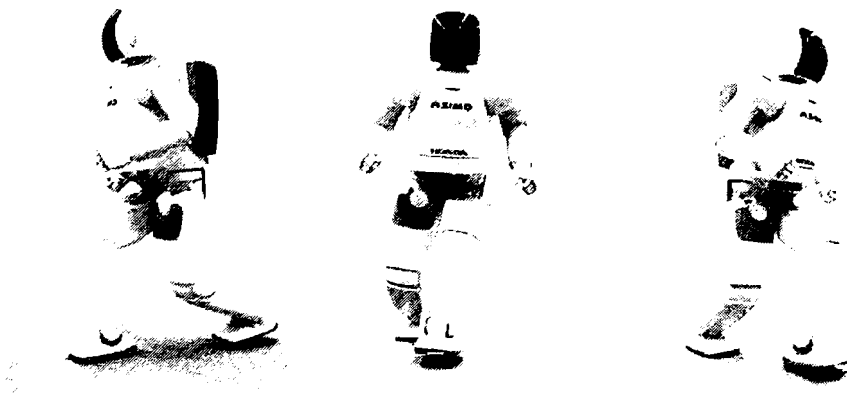


Figura 1.22: Robotul humanoid cu locomoție pășitoare bipedă - ASIMO

1.4 Obiectivele tezei

Plecând de la ipoteza că roboții mobili pășitori vor înlocui în viitorul apropiat roboții mobili cu roți, prezenta teză de doctorat are ca obiectiv central conceperea și realizarea unui sistem mobil pășitor format dintr-un robot mobil pășitor patruped și o aplicație *Open Source* cu scopul realizării conducerii robotului.

Ținând seama de realizările actuale în domeniul roboticii mobile pășitoare, lucrarea își propune următoarele obiective:

- Realizarea unui studiu cu privire la realizările până în acest moment în domeniul roboticii pășitoare.
- Realizarea unui studiu cu privire la modalitățile de realizare a mecanismelor pentru picioarele roboților pășitori.
- Realizarea unui studiu original al modalității de realizare ale unui robot mobil pășitor.
- Realizarea unui studiu original al tipurilor de mers disponibile în contextul asigurării stabilității robotului pășitor pe diferite suprafețe de mișcare.
- Elaborarea unui algoritm de sinteză dimensională pentru robotul pășitor folosind noțiunea de conexiune, și dezvoltarea pe baza acestuia a aplicației "DimLegJQuadRobot".
- Elaborarea unei metode de modelare cinematică pentru robotul pășitor.
- Elaborarea unei metode de modelare cinetostatică pentru robotul pășitor.
- Concepția unei arhitecturi *software* a interfeței care combină robotul mobil pășitor și modulul *software* corespunzătoare modalităților de conducere considerate.
- Proiectarea și realizarea unei aplicații *software* care trebuie să cuprindă următoarele module:
 - modulul de învățare a robotului a unei secvențe de pășire, ce permite utilizare diferitelor ordinii de pășire
 - modulul de import / export al parametrilor ce definesc ordinea de pășire considerată

- modulul de implementare a tipului de mers definit
- Aplicația trebuie să fie de tip *cross platform*. Alegerea limbajului de programare pentru dezvoltarea aplicației trebuie să țină cont de această cerință.
- Declarația aplicației *open source* sub licență GPL (General Public License) în scopul unei continue dezvoltări.
- Proiectare, realizarea și testarea unui robot mobil pășitor patruped.
- Implementare robotului construit în aplicația software realizată.
- Realizarea de cercetări experimentale privind implementarea diferitelor tipuri de ordini de pășire existente.
- Realizarea de cercetări experimentale privind stabilitatea robotului mobil pășitor la deplasarea pe diferite suprafețe.

1.5 Concluzii

Modelarea și controlul roboților pășitori este o adevărată provocare. Sistemul mecanic este complex, fiind compus dintr-o multitudine de articulații. Modelul matematic, deși la prima vedere pare simplu, este foarte complex. Universitățile din toata lumea au construit diferiți roboți pășitori (bipezi, quadrupezi, hexapozi, etc) în vederea studierii comportamentului acestor la diferite ordini de pășire, la deplasarea pe suprafețe cu texturi diferite, elaborării unor metode de control, studierii stabilității atât din punct de vedere static cât și dinamic, în scop educațional, etc.

Utilizarea noțiunii de conexiune cinematică în cercetarea sistemelor robotice mobile pășitoare, permite elaborarea unor metode de modelare cinematică, cinetostatică și sinteză dimensională mai eficiente decât cele uzuale.

Conexiunile cinematice sunt constituite din elemente și cuple cinematice, asamblate în lanțuri cinematice deschise [34]. Un mecanism poate fi sintetizat din punct de vedere structural prin legarea între ele a unui număr de elemente "inițiale", dintre care unul fix, prin intermediul unor conexiuni cinematice.

Sistemele robotice mobile pășitoare se aseamănă din punct de vedere structural cu mecanismul unui dispozitiv de ghidare cu topologie paralelă, în care:

- șasiul robotului = platforma mobilă,
- solul = platforma fixă,
- picioarele = conexiunile de legatura între cele două platforme.

Modelarea cinematică și sinteza dimensională a mecanismelor dispozitivului de ghidare cu topologie paralelă se face pornind de la constrângerile geometrice introduse de conexiuni în mișcarea relativă a platformelor fixă și mobilă, respectiv de la condițiile de rigiditate ale acestor platforme. Modelarea cinetostatică a mecanismelor dispozitivului de ghidare cu topologie paralelă se face pe baza constrângerilor cinetostatice introduse de conexiuni în mișcarea relativă a platformelor mobilă și fixă.

Din punct de vedere istoric, deplasarea cu ajutorul roților datează de numai câteva mii de ani. Așa cum se cunoaște, inventarea roții este considerată o descoperire epocală, ce a asigurat dezvoltarea societății umane. Natura a creat însă pentru sistemele biologice locomoția pășitoare încă de acum câteva sute de milioane de ani.

Roboții mobili pășitori se disting prin aceea că nu necesită neapărat căi de ghidare special amenajate (distrug mai puțin mediul decât roboții mobili cu roți / șenile), motiv pentru care pot fi utilizați atât în mediul industrial, cât și în mediul neindustrial.

Astfel, în acest capitol, exemplele prezentate pe scurt, fac o introducere a realizărilor în domeniul roboților pășitori, dar ne arată și avantajele și dezavantajele utilizării acestor în diferite aplicații comparativ cu cei cu roți.

În concluzie, se poate spune ca după o anumită perioadă de timp, roboții mobili pășitori vor înlocui roboții cu roți în majoritatea aplicațiilor.

Capitolul 2

Locomoția roboților pășitori

Dezvoltarea locomoției roboților pășitori s-a făcut pornind de la studierea mersului la animale. De exemplu, structura diferitelor animale au inspirat design-ul la o multitudine de roboți pășitori [2], [10], [47], [56], iar analiza mecanismului de pășire a dus la găsirea unor metode de conservare a energiei [43], [55]. Studiarea sistemului muscular și neuronal au dus la dezvoltarea diferitelor metode de control a roboților pășitori [6], [57], [13], [96], [59]. S-a încercat construcția diferitelor prototipuri de roboți mobili pășitori ce imita complexitatea animalelor [64], [22], [4], [19], [8], [46].

2.1 Locomoția cu picioare

Platformele mobile care se deplasează prin pășire mai poartă și denumirea de "mașini pășitoare" ("walking machines") [35]. Platformele mobile pășitoare se sprijină pe sol (sau în general, pe o suprafață fixă) prin intermediul unor mecanisme având la bază lanțuri cinematice articulate deschise, denumite "picioare", deplasarea platformei mobile rezultând prin mișcarea acestor mecanisme. Numărul p al picioarelor la platforma mobilă pășitoare este de obicei par, fiind cel puțin doi.

Pășirea se realizează prin întreruperea contactului unuia sau mai multor picioare cu solul, deplasarea relativă a elementelor piciorului în raport cu șasiul platformei mobile și restabilirea contactului picior-sol într-o altă situație relativă decât înainte. Mișcarea de mai sus poartă denumirea de pas.

În contextul ordinei de pășire, se înțelege prin mișcarea unui picior al platformei mobile pășitor secvența conținând ridicarea extremității acestuia de pe sol, avansarea ei în "aer" și revenirea extremității în contact cu solul, într-o situație diferită de prima. O asemenea secvență se cheamă pas [35]. În cazul roboților pășitori prezintă importanță ordinea de pășire ("gait"). Conținutul ordinei de pășire stabilește succesiunea mișcării picioarelor. De regulă, picioarele sunt dispuse pe două linii, câte una pe fiecare latură a șasiului robotului pășitor.

Platformele mobile cu destinație tehnică înaintează cu ordine de pășire previzând mișcarea necesară doar a câte unui picior (ordine de pășire "pas cu pas"). Platformele mobile "zoomorfe" pot avea și alte ordine de pășire (spre exemplu "galop").

Dacă numărul picioarelor $p \geq 2$, pășirea se realizează în condițiile menținerii echilibrului platformei mobile artificiale, astfel încât vectorul greutatei să intersecteze solul în interiorul suprafeței poligonului care are drept vârfuri punctele de contact dintre sol și picioarele care nu se mișcă în momentul respectiv.

În figura 2.1.a se prezintă schema contactului dintre picioarele în număr de $p = 4$ ale unui robot pășitor pe sol. Picioarele sunt numerotate de la 1 la 4. În figura 2.1.b se prezintă înaintarea robotului pășitor de la stânga spre dreapta cu ordinea de pășire "pas cu pas" 4-2-3-1.

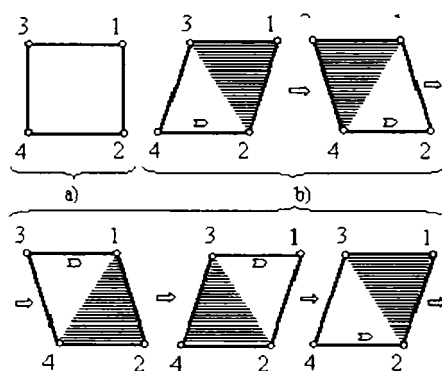


Figura 2.1: Ordinea de pășire 4-2-3-1 a unui robot pășitor cu patru picioare

Succesiunea cifrelor indică succesiunea mișcării picioarelor. Pentru fiecare secvență s-a hașurat triunghiul având ca vârfuri extremitățile de contact cu solul ale picioarelor imobile. Ordinea de pășire 4-2-3-1 corespunde deplasării lente a majorității patrupedelor. Se mai folosesc ordinele de pășire "pas cu pas" 2-4-3-1, 2-3-4-1, 4-3-2-1 și 3-4-2-1. Cu cât

numărul de picioare este mai mare, cu atât numărul variantelor ordinei de pășire crește.

În figura 2.2 este prezentat un patruped ce se deplasează în "pas cu pas". Deplasarea după un traseu diferit de linia dreaptă - "înscrierea robotului pășitor într-o curbă" - se realizează impunând amplitudini diferite pașilor efectuați de picioarele existente pe cele două laturi ale șasiului.

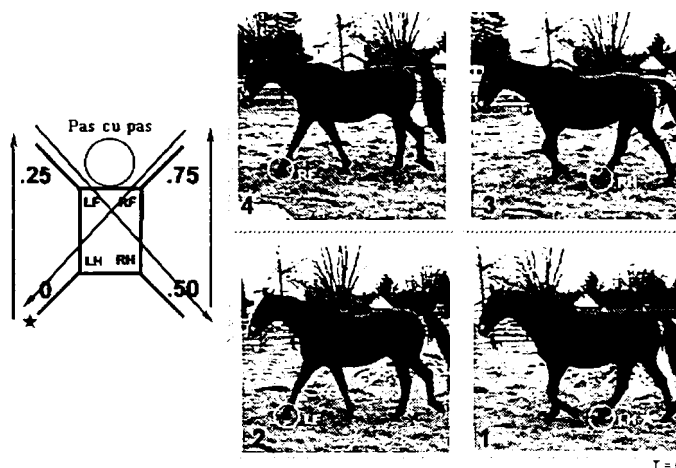


Figura 2.2: Deplasarea unui patruped în "pas cu pas"

În cazul platformei mobile cu două picioare ("antropomorfe"), ordinea de pășire este 1-2 (-1-2), echilibrul în timpul pășirii realizându-se în mod dinamic. Șasiul vehiculului se deplasează în raport cu piciorul fix astfel, încât vectorul greutatei întregului ansamblu trece mereu prin suprafața de contact dintre piciorul fix și sol.

În cazul platformei mobile pășitoare cu patru picioare, ordinea de pășire "galop" 1,2-3,4 presupune la rândul ei un echilibru dinamic: în secvența primă de mișcare (1, 2) vectorul greutatei robotului pășitor trebuie să treacă prin suprafața de sol cuprinsă între punctele de contact ale picioarelor 3 și 4.

Roboții pășitori "zoomorfi" au de regulă $p \geq 6$ și pot avea ordine de pășire la care deodată două sau mai multe picioare execută mișcări, ceea ce permite o deplasare mai rapidă.

În figura 2.3 se prezintă ciclograme ale mișcării picioarelor platformei mobile pășitoare [30]. Ciclograma din figura 2.3.a, se referă la mișcările picioarelor unui robot pășitor cu $p = 2$ ("antropomorfe"), cea din figura 2.3.b se referă la mișcările picioarelor unui robot pășitor cu $p = 4$ în regim "pas cu pas" și ordinea de pășire 4-2-3-1 iar cea din

figura 2.3.c se referă la mișcările picioarelor unui robot pășitor cu $p = 4$ în regim "galop" și ordinea de pășire 1,2-3,4.

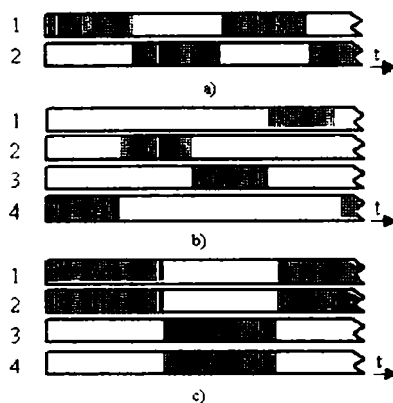


Figura 2.3: Ciclograme de mișcare ale picioarelor roboților pășitori cu $p = 2$ și $p = 4$

Putem spune, în concordanță cu cele prezentate mai sus că exista două tipuri de ordini de pășire:

- ordine de pășire simetrică - ordine de pășire de tip trap (*trot*) și de tip pas (*pace*)
- ordine de pășire asimetrică - ordine de pășire de tip salt (*bound*), jumătate de salt (*half-bound*), ghemuit (*crouch-walk*), salt cu toate picioarele odată (*pronk*), galop (*gallop*)

Mai există o ordine de pășire de tip "galop mic (*canter*)", despre care unii cercetători [16], [67] susțin că este simetrică, dar [27] și [20] consideră că este asimetrică.

Ordinea de pășire de tip "trap" este cea mai folosită de animale în general. Când se trece din faza de mers în cea de alergare crește viteza de deplasare. În acest caz picioarele lucrează câte două în diagonală. Este în general o ordine de pășire cu stabilitate dinamică ridicată, deoarece fiecare pereche de picioare diagonale sunt în contact cu solul, ceea ce face ca centrul de greutate să fie întotdeauna pe diagonală ce unește picioarele respective. În figura 2.4 se prezintă o astfel de ordine de pășire.

Ordinea de pășire de tip "pas" este asemănătoare cu cea de tip "trap". În acest caz picioarele lucrează câte două pe aceeași parte. Este o ordine de pășire cu stabilitate dinamică mică, motiv pentru care este mai puțin folosită. Când picioarele de pe aceeași parte se află în faza de pășire, corpul este supus la o mișcare de rotație specifică acestei

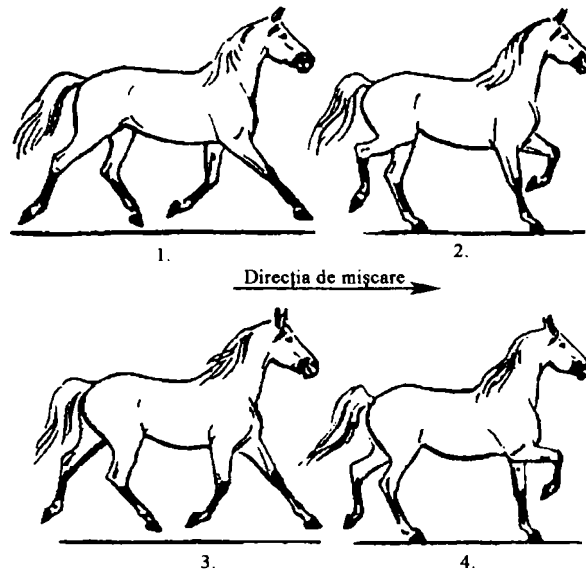


Figura 2.4: Deplasarea unui patruped în "trap" [62]

ordinii. Totuși un avantaj major îl au animalele foarte înalte (girafa, cămilele, etc.), deoarece pentru ele este mai ușor să se deplaseze cu această ordine de pășire decât în "trap" (dacă s-ar deplasa în trap atunci există riscul interferenței picioarelor din față cu cele din spate datorită lungimii acestora). În figura 2.5 se prezintă o astfel de ordine de pășire.

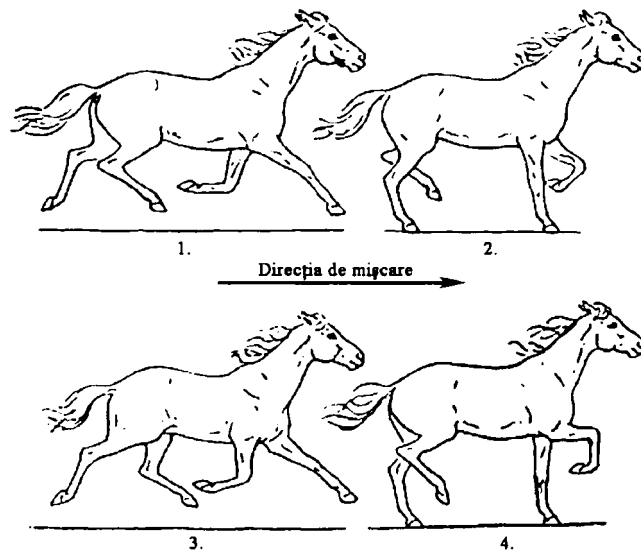


Figura 2.5: Deplasarea unui patruped în "pas" [62]

Ordinea de pășire de tip "salt" (figura 2.6) este specifică animalelor mici ce se deplasează foarte repede pe suprafețe neregulate (de exemplu rozătoarele de câmp). În acest caz picioarele ce se află în faza de pășire sunt fie perechea din față fie cea din spate. caracteristica acestei ordini de pășire o constituie mișcarea de tip "pitch" pe care o execută picioarele aflate în faza de pășire, s-au mai bine spus în faza de săritură (deplasarea în acest caz se face prin sărituri succesive).

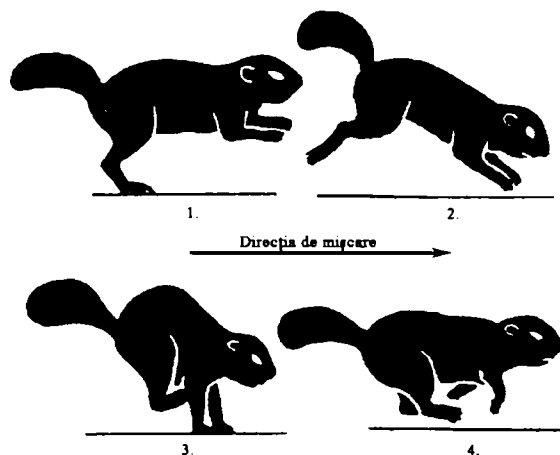


Figura 2.6: Deplasarea unui patruped în "salt" [62]

Ordinea de pășire de tip "jumătate de salt" (figura 2.7) este aproape identică cu cea descrisă anterior, excepție făcând picioarele din față care operează oarecum defazat. Este specifică deplasării în mare viteză (de exemplu la iepuri, dar și la majoritatea felinelor).

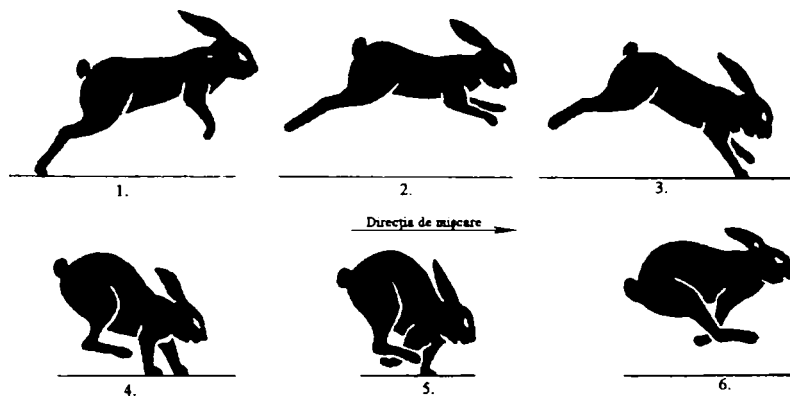


Figura 2.7: Deplasarea unui patruped în "jumătate de salt" [62]

Ordinea de pășire de tip "ghemuit" poate fi considerată opusa ordinii de pășire "jumătate de salt", deoarece picioarele din față operează împreună, iar cele din spate defazate. Acest tip de deplasare este foarte rar folosit de animale.

Ordinea de pășire de tip "salt cu toate picioarele odată" este aceea deplasare în care toate cele patru picioare se află în faza de pășire simultan. Deplasarea în acest caz se face printr-o săritură foarte mare, iar corpul nu mai execută mișcarea "pitch", deoarece toate picioarele sar simultan. Acest tip de deplasare este foarte rar folosit, câteodată cerbii și căprioarele o folosesc când urcă dealuri și antilopele când se deplasează cu viteze foarte mari.

Ordinea de pășire de tip "galop" este cel mai des întâlnită la animalele ce se deplasează cu viteze mari. Este cea mai rapidă deplasare săltată, executată în trei timpi, la un pas auzindu-se trei bătăi. Succesiunea bătăilor este următoarea: biped, diagonal drept stâng, anterior. Galopul este un mers care se caracterizează printr-o succesiune de suspendări totale, la care mișcarea membrelor se face uneori izolat și succesiv sau asociate simultan, în funcție de viteza de deplasare. Cu cât diferența dintre spațiul de sprijin și a celui acoperit în suspensie este mai mare, cu atât galopul este mai accelerat. Figura 2.8 prezintă deplasarea unui patruped în galop transversal, iar figura 2.9 prezintă deplasarea unui patruped în galop rotativ.

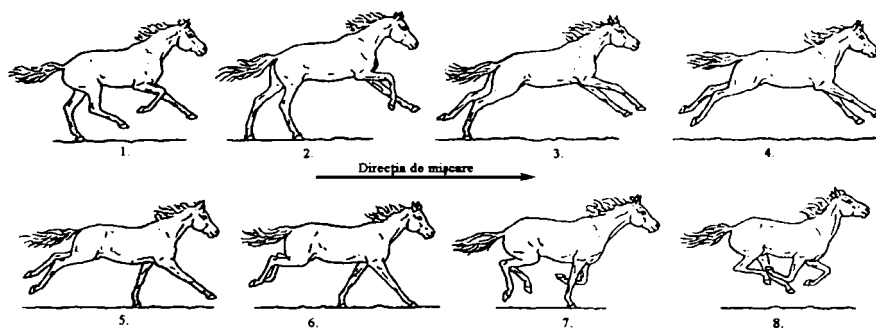


Figura 2.8: Deplasarea unui patruped în "galop" transversal [62]

Literatura de specialitate prezintă o serie de avantaje atât pentru galopul transversal cât și pentru cel rotativ. Astfel galopul transversal este bun în cazul deplasării pe suprafețe plane, pentru alergare de rezistență la viteze mici motiv pentru care există o singură fază de zbor, și pentru alergări cu mici felxiuni în spate. În schimb, galopul rotativ

este bun în cazul deplasării pe suprafețe denivelate, pentru sprint cu două faze de zbor și pentru alergători cu spate flexibil. Aceste teorii se bazează mai mult pe comportamentul specific al animalelor, decât pe mecanismele existente în prezent.

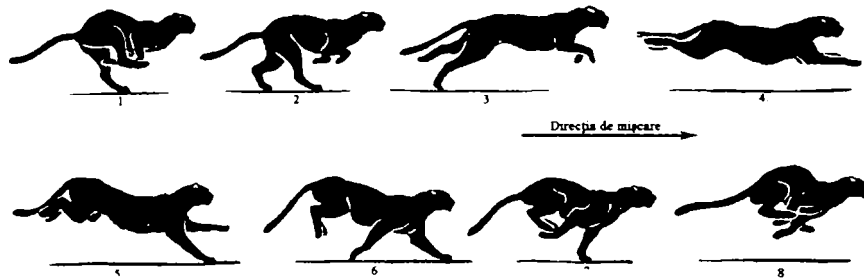


Figura 2.9: Deplasarea unui patruped în "galop" rotativ [62]

Din punct de vedere al stabilității, galopul transversal este mai stabil decât cel rotativ. Deoarece există doar o singură fază de zbor la galopul transversal, atunci apare periodic o diagonală de suport, în timp ce la galopul rotativ apare periodic o dreapta laterală ca suport de stabilitate. Dacă trei picioare sunt pe pământ în același timp, triunghiul poligonului de sprijin ce are în vârfuri punctele de sprijin ale celor trei picioare este mai mare în cazul galopului transversal [21].

Galopul mic (*canter*) este o ordine de pășire tranzitorie între trap și galop, ce comportă câteva asemănări de la amândouă. O pereche de picioare diagonale operează în fază, în timp ce celelalte două picioare lucrează individual. În figura 2.10 este prezentată o astfel de ordine de pășire.

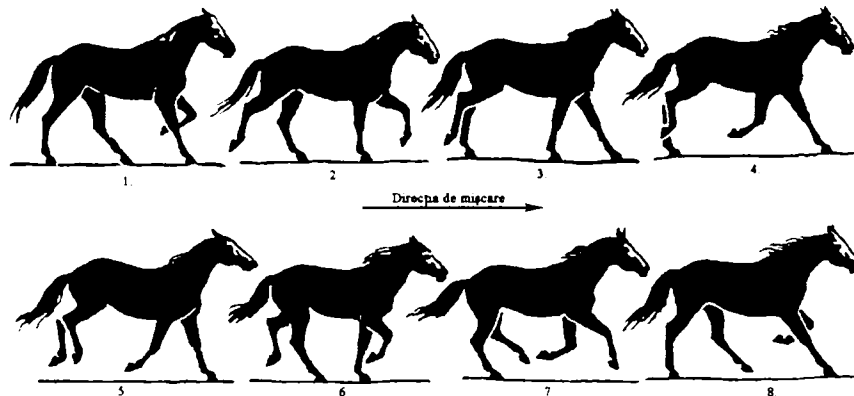


Figura 2.10: Deplasarea unui patruped în "galop mic" [62]

2.2 Mecanisme pentru picioare

Lanțurile cinematice deschise care stau la baza mecanismelor picioarelor roboților trebuie să îndeplinească anumite condiții structurale. În cazul roboților pășitori, cu ordine de pășire "pas cu pas", un mecanism de picior funcționează în două faze:

- în faza secvenței de "suport", piciorul cu o extremitate a sa în contact cu solul suportă șasiul și prin mișcarea relativă a elementelor unor cuple cinematice conducătoare imprimă acestuia o mișcare de înaintare
- în faza secvenței de "pășire", mecanismul realizează modificarea situației contactului extremității "ultimului element" al său cu solul

În cazul roboților pășitori cu $p \geq 4$, șasiul robotului pășitor și picioarele aflate în secvența suport, constituie de fapt un dispozitiv de ghidare cu structură topologică paralelă: șasiul robotului pășitor constituie în acest caz platforma mobilă, solul este platforma fixă, iar picioarele îndeplinesc rolul conexiunilor care le leagă [35].

Condiția desmodromiei unui dispozitiv de ghidare cu topologie paralelă este:

$$(c_{5m})_S = (p)_S = (M)_S = 6 - \sum L_c \quad (2.1)$$

unde $(c_{5m})_S$ este numărul cuplelor cinematice conducătoare de clasa a V-a, în faza secvenței "suport", $(p)_S$ - numărul parametrilor cinematici impuși mecanismului de către sistemele de acționare, $(M)_S$ - numărul gradelor de mobilitate în faza secvenței "suport" iar L_c este suma gradelor de libertate ale conexiunilor.

În relația 2.1 s-a considerat că $(n - 1) = 1$, deoarece șasiul robotului pășitor constituie un singur element. Dacă robotul pășitor trebuie să aibă o mișcare în spațiul tridimensional, numărul gradelor de mobilitate al sistemului trebuie să fie:

$$(M)_S = 6 \quad (2.2)$$

Ca urmare $\sum L_c = 0$ și $(c_{5m})_S = 6$.

În consecință, lanțurile cinematice care stau la baza mecanismelor picioarelor trebuie să fie conexiuni de tip C, cu numărul gradelor de libertate $L_c = 0$ fiecare iar picioarele trebuie să aibă "în funcțiune" în faza secvenței "suport" un total de 6 cuple

cinematice conducătoare de clasa a V-a. Pentru oricare conexiune este valabilă relația 2.3 [53].

$$L_c = 6 * n_c - \sum i * c_{ic} \quad (2.3)$$

unde n_c este numărul de elemente al conexiunii și c_{ic} - numărul cuplelor cinematice de clasa i conținute în cadrul conexiunii. În secvența de "pășire", desmodromia mecanismului piciorului este asigurată dacă este îndeplinită relația 2.4.

$$(c_{5m})_P = (p)_P = (M)_P = 6 * n_P - \sum i * c_{iP} \quad (2.4)$$

unde $(c_{5m})_P$ este numărul cuplelor cinematice conducătoare de clasa a V-a, în faza secvenței de "pășire" a unui picior, $(p)_P$ - numărul parametrilor cinematici impuși de către sistemul de acționare al piciorului considerat, $(M)_P$ - numărul gradelor de mobilitate al mecanismului în timpul secvenței de "pășire", n_P este numărul elementelor iar c_{iP} - numărul cuplelor cinematice de clasa i din mecanismul piciorului.

Particularitatea sintezei structurale a mecanismelor roboților pășitori constă în faptul că mecanismele picioarelor trebuie să aibă structură variabilă, pentru a putea asigura atât faza secvenței "suport" cât și cea a secvenței "pășire".

Unii roboți pășitori execută mișcări plan-paralele, caracterizate prin aceea că toate punctele elementelor conținute în mecanismele acestora se deplasează în plane paralele, perpendiculare pe sol. Mecanismele respective sunt deci mecanisme plane. Pentru aceste mecanisme condiția desmodromiei dispozitivului de ghidare cu topologie paralelă în faza secvenței "suport" devine:

$$(c_{5m})_S = (p)_S = (M)_S = 3 - \sum L_c \quad (2.5)$$

iar în faza secvenței de "pășire":

$$(c_{5m})_P = (p)_P = (M)_P = 3 - \sum (i - 3) * c_{iP} \quad (2.6)$$

Mecanismele de picior ale roboților pășitori sunt similare dispozitivelor de ghidare cu topologie serială, având corpul robotului ca element de bază. În acest context, se pot stabili pentru fiecare dintre ele "spații de lucru" și "unghiuri" de servicii.

Literatura de specialitate conține diferite tipuri de mecanisme, utilizate de-a lungul timpului drept mecanisme ale unor roboți pășitori. În continuare se prezintă câteva mecanisme utilizate în construcția piciorului robotului pășitor [35]:

1. mecanism tip RRRS(P), prezentat în figura 2.11

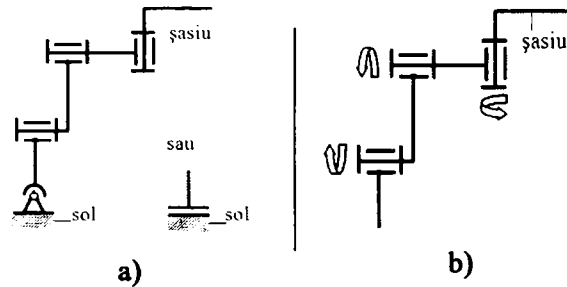


Figura 2.11: Mecanism de tip RRR: a) faza de suport; b) faza de pășire

2. mecanism tip TRRS(P), prezentat în figura 2.12

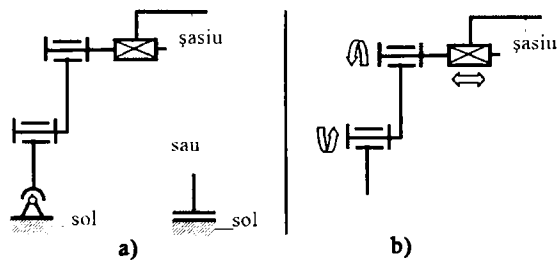


Figura 2.12: Mecanism de tip TRR: a) faza de suport; b) faza de pășire

3. mecanism tip RTRS(P) prezentat în figura 2.13

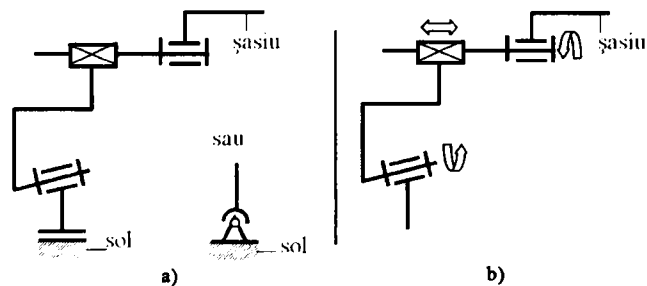


Figura 2.13: Mecanism de tip RTR: a) faza de suport; b) faza de pășire

4. mecanism tip RRTP(S), prezentat în figura 2.14

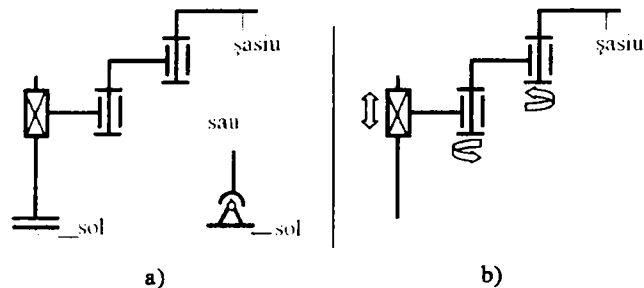


Figura 2.14: Mecanism de tip RRT: a) faza de suport; b) faza de pășire

5. mecanism tip RRR plan, prezentat în figura 2.15

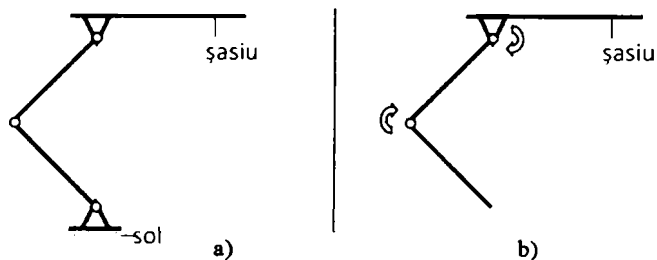


Figura 2.15: Mecanism de tip RRR plan: a) faza de suport; b) faza de pășire

6. mecanism tip TRRRRRRRRRRT plan - denumit și picior "Odetics" de structură variabilă, prezentat în figura 2.16

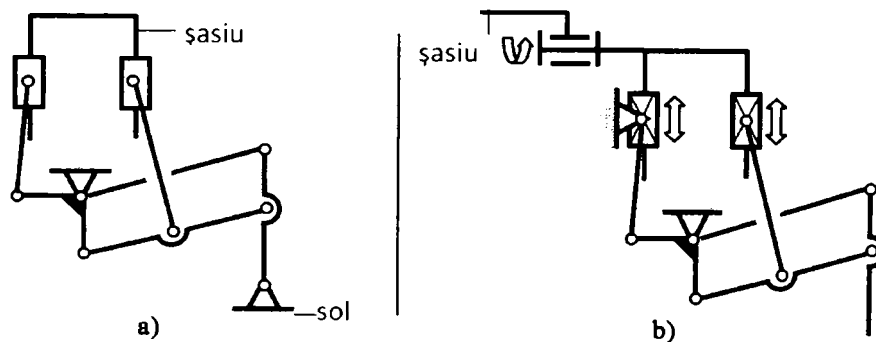


Figura 2.16: Mecanism de tip TRRRRRRRRRRT plan - picior "Odetics": a) faza de suport; b) faza de pășire

7. mecanism tip TRRRRRRRT - denumit și picior "ASV" de structură variabilă, prezentat în figura 2.17

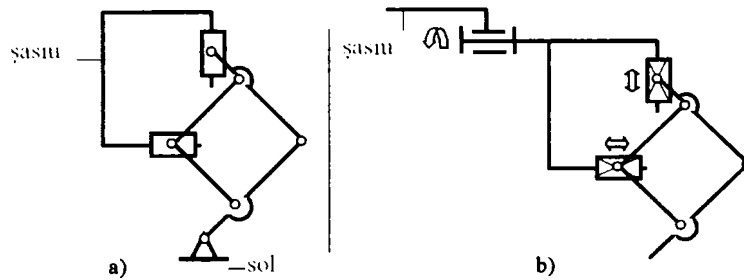


Figura 2.17: Mecanism de tip TRRRRRRRT - picior "ASV": a) faza de suport; b) faza de pășire

8. mecanism tip SSS - denumit și multipicior, prezentat în figura 2.18

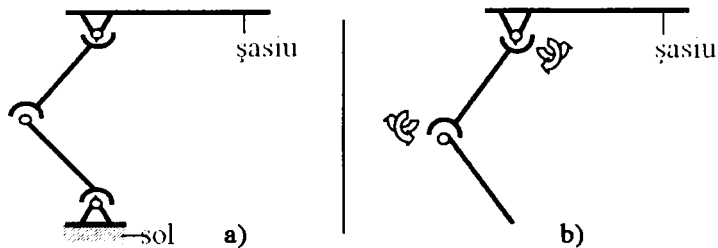


Figura 2.18: Mecanism de tip SSS - multipicior: a) faza de suport; b) faza de pășire

Contactul între ultimul element al mecanismului piciorului și sol este modelat în faza secvenței suport: "plan pe plan" - P sau prin intermediul unei cuple cinematice sferice - S, în componența cărora intră solul ca un element, așa cum s-a redat la variantele prezentate în figurile 2.11, 2.12, 2.13 și 2.14. Ambele cuple cinematice sunt de clasa a III-a.

Mecanismul plan al piciorului prezentat în figura 2.15 intră în componența roboților pășitori care au mișcări plan paralele. În acest caz contactul se modelează cu o cuplă cinematică de rotație, de clasa a V-a.

Mecanismele picioarelor prezentate în figurile 2.16 și 2.17 sunt mecanisme pseudospațiale [33]. În faza secvenței "suport" ele sunt mecanisme plane, iar în faza secvenței "pășire", cuplele cinematice de rotație conducătoare având un element șasiul, modifică

orientarea planului de mișcare a restului piciorului în raport cu șasiul.

Varianta de mecanism prezentată în figura 2.18, denumită "Multi-picior" conține în faza secvenței suport trei cuple cinematice de tip articulație sferică S de clasa a IV-a, iar în faza secvenței de pășire două cuple cinematice de tip articulație sferică S de clasa a IV-a la care sistemul de acționare poate impune simultan doi parametri cinematici independenți.

În figura 2.19 se prezintă schema cinematică a unei articulații sferice de tip S [30].

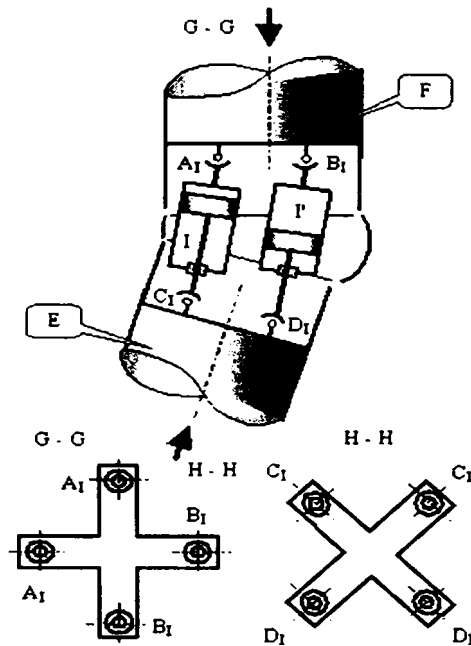


Figura 2.19: Articulația sferică S de clasa a IV-a, la care sistemul de acționare poate impune simultan doi parametri cinematici independenți mișcării relative a elementelor E și F

Elementele F și E legate între ele prin S conțin câte o piesă în formă de cruce. Fiecare cruce intră în componența a patru articulații sferice AI, AII, BI, BII, respectiv CI, CII, DI, DII. Fiecare articulație A, respectiv B este legată de câte o articulație C, respectiv D, prin intermediul a câte unui lanț cinematic cilindru-piston I, I', respectiv II, II'. Introducând ulei sub presiune în camera inferioară a cilindrului I, respectiv în camera superioară a cilindrului I', astfel ca pistoanele cilindrilor să se deplaseze cu viteze egale în sensuri contrare, se impune elementului E o mișcare relativă de rotație față de F în

planul desenului. În mod similar, acționând cu ajutorul hidromotoarelor II și II' se obține o mișcare relativă de rotație a celor două elemente într-un plan perpendicular pe planul desenului.

2.3 Configurații de roboți pășitori

În continuare sunt prezentate câteva scheme cinematice ale unor roboți pășitori cu două picioare, cu patru picioare și cu șase picioare (notația $1p$ se referă la piciorul 1 în faza secvenței "pășire" iar notația $2s$ - la piciorul 2 în faza secvenței "suport"):

1. în figura 2.20 se prezintă schema cinematică a unui robot pășitor biped cu următoarele caracteristici:

- număr de picioare: 2
- număr de elemente: $2 \times 3 + 2^* + 1^{****}$, unde $*$ bazinul și șasiu, $****$ solul
- cuple de clasa a V-a (c_5): 2×3 , $(c_{5m})_S = 3$, $(c_{5m})_P = 3$
- cuple de clasa a IV-a (c_4): 0
- cuple de clasa a III-a (c_3): $1^{***} + 1^{**}$, unde $***$ articulația bazin-șold, $**$ articulația cu solul
- simbol - $2 \times RRRS(P) + S^{**}$

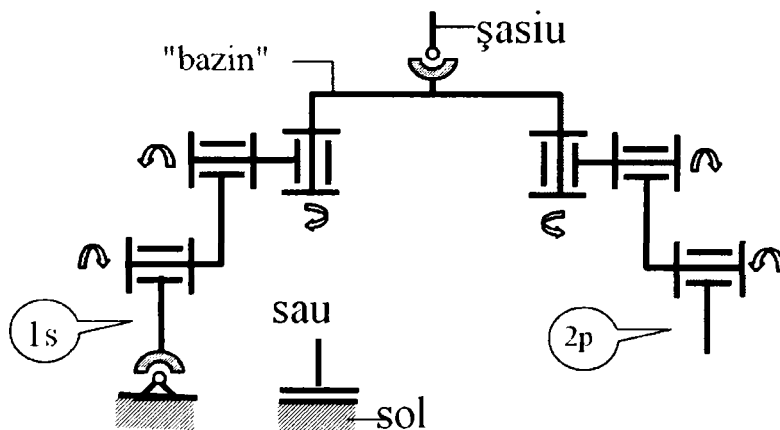


Figura 2.20: Schema cinematică a unui robot pășitor biped

2. în figura 2.21 se prezintă schema cinematică a unui robot pășitor patruped cu următoarele caracteristici:

- număr de picioare: 4
- număr de elemente: $4 \times 3 + 2^*$, unde * șasiul și solul
- cuple de clasa a V-a (c_5): 4×3 , $(c_{5m})_S = 9$, $(c_{5m})_P = 3$
- cuple de clasa a IV-a (c_4): 0
- cuple de clasa a III-a (c_3): 3^{**} , unde ** cuple cimenatice de contact cu solul
- simbol - $4 \times RRRP(S)$

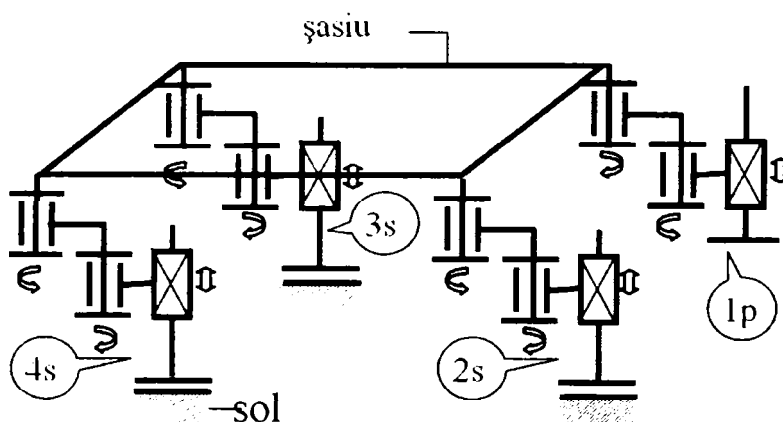


Figura 2.21: Schema cinematică a unui robot pășitor patruped

3. în figura 2.22 se prezintă schema cinematică a unui robot pășitor patruped cu următoarele caracteristici:

- număr de picioare: 4 picioare tip "Odetics"
- număr de elemente: $2 \times 8 + 2^*$, unde * șasiul și solul
- cuple de clasa a V-a (c_5): $4 \times 12 + 3^{**}$, ** cuple cu solul
- cuple de clasa a IV-a (c_4): 0
- cuple de clasa a III-a (c_3): 0
- simbol - $4 \times RTRRRRRRRRT$ pseudospațial

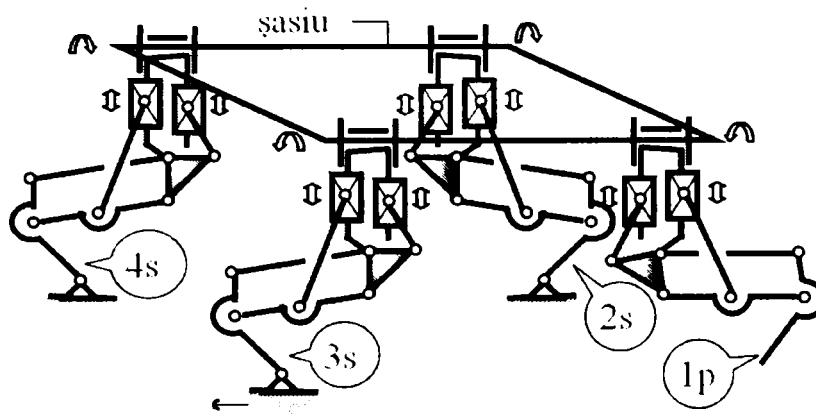


Figura 2.22: Schema cinematică a unui robot pășitor patruped "Odetics"

4. în figura 2.23 se prezintă schema cinematică a unui robot pășitor hexapod cu mișcare plan-paralelă cu următoarele caracteristici:

- număr de picioare: 6
- număr de elemente: $6 \times 2 + 2^*$, unde * șasiul și solul
- cuple de clasa a V-a (c_5): $5 \times 3 + 2^{**}$, unde ** cuplele piciorului în pășire
- cuple de clasa a IV-a (c_4): 0
- cuple de clasa a III-a (c_3): 0
- simbol - $6 \times RRR$ plan

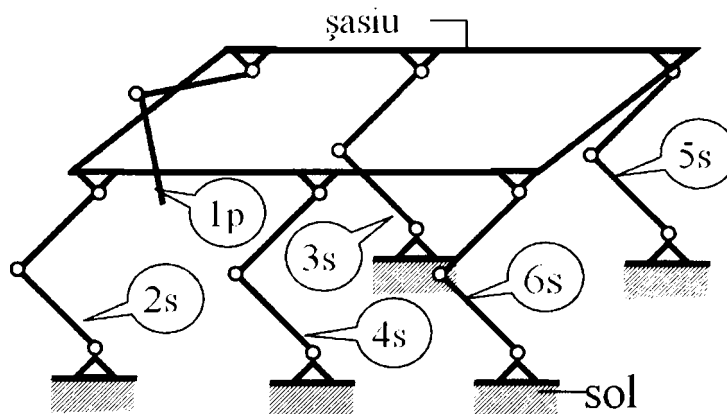


Figura 2.23: Schema cinematică a unui robot pășitor hexapod cu mișcare plan-paralelă

5. în figura 2.24 se prezintă schema cinematică a unui robot pășitor hibrid cu următoarele caracteristici:

- număr de picioare: 2
- număr de elemente: $2 \times 2 + 2^*$, unde $*$ șasiul și solul
- cuple de clasa a V-a (c_5): 2^{**} , unde $**$ cuplele roată - șasiu
- cuple de clasa a IV-a (c_4): $3 + 2$
- cuple de clasa a III-a (c_3): 2^{***} , unde $***$ cuplele între roți și sol
- simbol - $2 \times SSS + 2 \times RSup$

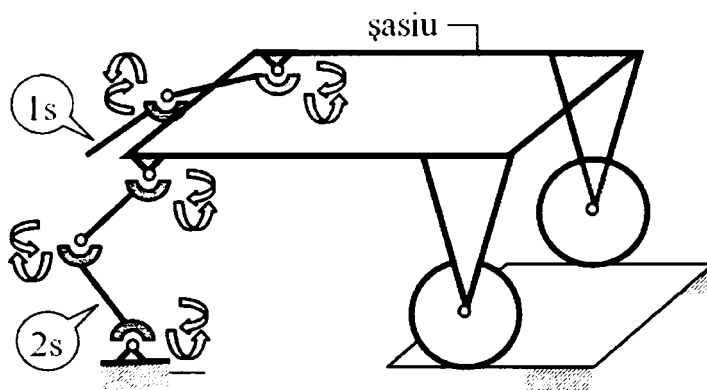


Figura 2.24: Schema cinematică a unui robot pășitor hibrid

La bipedul antropomorf prezentat în figura 2.20, piciorul care se găsește în faza secvenței "suport" este mișcat de trei cuple cinematice conducătoare, ca și cel aflat în faza secvenței de "pășire". Echilibrul dinamic al ansamblului este asigurat de forțele de inerție care acționează asupra șasiului în mișcare proprie și a piciorului în secvența de "pășire".

În cazurile roboților pășitori prezentați în figurile 2.21 și 2.22, câte un picior se află în secvența de "pășire" sub acțiunea a câte trei cuple cinematice conducătoare, în timp ce șasiul înaintează sub acțiunea a șase cuple cinematice conducătoare, distribuite pe trei picioare care se află în faza secvenței "suport".

Robotul pășitor prezentat în figura 2.23, are o mișcare plan-paralelă, mecanismele celor patru picioare fiind mecanisme plane. Piciorul în faza secvenței de pășire este pus

în mișcare de două cuple cinematice conducătoare, iar șasiul înaintează sub acțiunea a trei cuple cinematice conducătoare, distribuite pe trei dintre cele 5 picioare aflate în faza secvenței de suport.

În figura 2.24 este prezentată schema cinematică a unui robot pășitor hibrid. Robotul mobil are două picioare "multipicior" și două roți articulate de șasiu care rulează pe sol. Roțile constituie conexiuni $K_{C(0)}$. Multipiciorul $2s$ impune prin cele trei cuple cinematice conducătoare sferice de clasa a IV-a avansul șasiului, în timp ce multipiciorul $1p$ pășeste.

2.4 Parametrii de bază în studiul mersului roboților pășitori

Piciorul nu este un element de locomoție continuă, așa cum este o roată. De aceea, acesta trebuie ridicat de pe suprafața de sprijin, deplasat în direcția de înaintare a robotului pășitor și apoi așezat, după care se reia un nou ciclu cu un alt picior. Cum robotul pășitor are două sau mai multe picioare, mișcările acestora trebuie să fie coordonate astfel încât să fie asigurată deplasarea în condiții de stabilitate a sistemului.

Robotul pășitor se sprijină pe rând pe unele dintre picioare, mutându-le pe celelalte într-o nouă poziție, cu asigurarea unui sprijin stabil. Ocuparea succesivă de noi poziții, într-o deplasare sigură și stabilă, implică definirea *mersului*. Pasul robotului pășitor este definit ca distanța cu care se deplasează centrul de greutate al acestuia într-un ciclu de locomoție. Modul cum se realizează deplasarea robotului pășitor între două obiective, în condiții specifice, definește mersul.

Pentru realizarea și conducerea unui robot pășitor este necesară cunoașterea tuturor posibilităților de mers, deoarece alegerea numărului picioarelor și a structurii acestora depinde foarte mult de tipul de mers selectat. Selectarea tipului de mers depinde de o serie de factori, printre care sunt de menționat:

- forma și consistența terenului pe care se face deplasarea
- stabilitatea mersului
- modul de conducere și control al mișcărilor elementelor sistemelor de deplasare

- realizarea vitezei și mobilității necesare deplasării

Selectarea tipului de mers este foarte complicată, mai ales în condițiile reale de pășire în teren. De aceea, este necesar să se definească suprafața terenului înainte de a alege tipul de mers. Plecând de la definiția dată terenului plan și neted pe care s-au făcut primele experimente [45], unde pășirea poate avea loc în orice zonă din perimetrul acesteia, se mai pot defini:

- teren plan moderat, unde pășirea poate avea loc evitând anumite zone interzise, care pot fi depășite prin diferite manevre ale robotului pășitor.
- teren cu configurație puternic neregulată, cu multe zone interzise, unde pășirea are loc în condiții speciale.

Pe de altă parte, pentru un mers bine stabilit, poate fi definită precis deplasarea unui animal sau mașină pășitoare. În consecință, tipurile de mers descriu și determină viteza, direcția de deplasare și mobilitatea acestora.

Pentru a proiecta o mașină pășitoare este necesară o bună înțelegere a mersurilor, deoarece numărul picioarelor, structura și performanțele piciorului depind foarte mult de mersul selectat. În cele ce urmează vor fi prezentate câteva noțiuni de bază necesare pentru studiul mersului unui robot pășitor.

• Parametrii ce caracterizează mersul

Mersul robotului pășitor este o succesiune de mișcări ale picioarelor, coordonate cu o succesiune de mișcări ale corpului, în scopul deplasării acestuia dintr-un loc în altul. O abordare teoretică a mersului roboților pășitori presupune definirea unor parametri care să permită analiza acestuia. Definițiile și teoremele de bază utilizate pentru analiza unui mers au fost stabilite de către McGhee și colaboratorii săi [45], apoi completate de către Song și Waldron, [64], [66]. În concordanță cu aceste definiții, mersul poate fi periodic sau neperiodic. Pentru a înțelege mai bine aceste definiții, se consideră o schemă de principiu a unui robot mobil pășitor, numerotând corespunzător fiecare picior (figura 2.25).

Plecând de la figura 2.25, parametrii ce caracterizează mersul sunt:

- **Faza de pășire a unui picior** este intervalul de timp în care piciorul nu este în contact cu solul; timpul corespunzător acestei faze se notează cu τ .

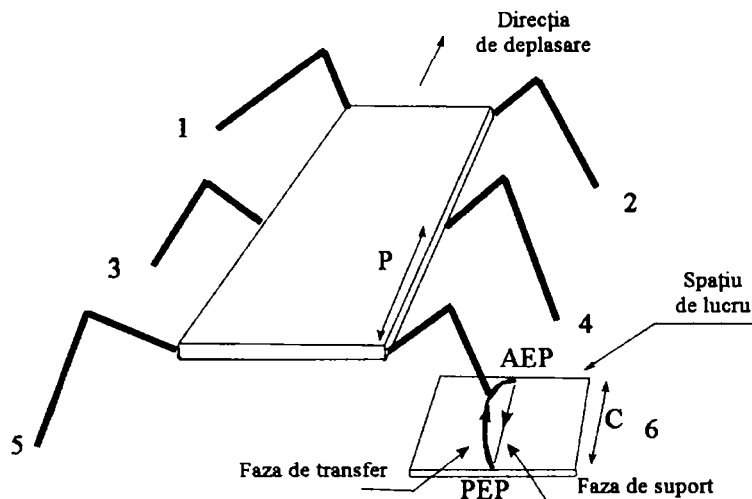


Figura 2.25: Definirea parametrilor geometrici și numerotarea picioarelor

- **Faza de suport a unui picior** este perioada în care piciorul se află în contact cu solul, timpul corespunzător notându-se cu s .
- **Durata unui ciclu**, T , este durata unui ciclu complet de locomoție a unui picior, respectiv $T = s + \tau$. Mersurile periodice sunt caracterizate prin aceeași durată a ciclului pentru toate picioarele.
- Pozițiile extreme ale fazei de suport sunt:
 - **poziție extremă anterioară (AEP - Anterior Extreme Position)**, este poziția punctului teoretic de contact al piciorului cu solul la momentul așezării, măsurată în raport cu șasiul robotului
 - **poziție extremă posterioară (PEP - Posterior Extreme Position)**, este poziția punctului teoretic de contact al piciorului cu solul la momentul ridicării, măsurată în raport cu șasiul robotului

În cazul unei deplasări rectilinii uniforme a robotului, în faza de suport extremitatea piciorului execută o mișcare opusă direcției de mers. De asemenea, în faza de pășire piciorul avansează în scopul căutării unui nou punct de sprijin. Din acest motiv, partea finală a fazei de pășire este foarte delicată și necesită o informație tactilă în cazul unui teren accidentat.

- **Factorul de utilizare** (*Duty Factor*) al unui picior se notează cu λ și este dat de relația $\lambda = \frac{s}{T}$. Dar $T = s + \tau$, ceea ce înseamnă că $\lambda = \frac{s}{s + \tau}$. În final se poate scrie că $\frac{s}{\tau} = \frac{\lambda}{1 - \lambda}$. Stabilitatea statică necesită ca permanent, cel puțin trei picioare să fie în contact cu solul, aceasta fiind condiția ce impune valoarea minimă a factorului de utilizare: $\lambda \geq 3/n$, unde n este numărul total de picioare ale robotului. Pentru roboții patrupezi aceasta înseamnă $\lambda \geq 3/4$. Un mers este numit *regulat* dacă factorul de utilizare are aceeași valoare λ pentru fiecare picior. Un mers este *singular* dacă două sau mai multe picioare sunt ridicate sau așezate în același timp.
- **Faza** ϕ_i a unui picior este fracțiunea de ciclu ce separă începutul ciclului piciorului i de cel al piciorului 1, luat drept referință. Un mers este numit *simetric* dacă perechile de picioare stânga-dreapta au mișcările decalate cu $1/2$ (jumătate) ciclu sau au o diferență de fază $\Delta\phi = 1/2$.
- **Caracteristica mersului**, β , este raportul dintre numărul picioarelor aflate la un moment dat în faza de suport și numărul total de picioare ale robotului.
- **Pasul piciorului**, L (*Leg Stride*), este distanța parcursă de centrul de masă al robotului pe durata unui ciclu de locomoție.
- **Cursa**, C (*Stroke*), este distanța parcursă de picior în faza de suport $C = \lambda * L$ (distanța dintre AEP și PEP).
- **Pasul cursei**, P (*Stroke Pitch*), este distanța dintre două picioare adiacente de pe aceeași parte a robotului.
- **Lungimea efectivă a corpului**, L_b , a unui animal sau robot cu n picioare este distanța dintre centrele de rotație ale piciorilor din fața, respectiv din spatele robotului, picioare aflate pe aceeași parte a corpului. Dacă distanțele dintre picioarele adiacente sunt aceleași, se poate scrie:

$$L_b = (n - 1) * L \quad (2.7)$$

- Un mers este *periodic* dacă toate picioarele au aceeași durată a ciclului de locomoție.

Viteza unui robot, pentru un mers periodic regulat, cu o cursă C fixă, este:

$$V = \frac{L}{T} = \frac{C}{\lambda * T} = \frac{C}{s} = \frac{C}{\tau} * \frac{1-\lambda}{\lambda} \quad (2.8)$$

Se poate observa că pentru o fază de pășire minimă τ_{min} , impusă de viteza servomotorului, o cursă C maximă, impusă de punctele AEP și PEP limită, depinzând de schema cinematică a robotului, viteza robotului poate fi mărită prin micșorarea factorului de utilizare λ . Deci, din relația (2.8), pentru un raport $\left(\frac{C}{\tau}\right)_{max}$ limitat, viteza poate varia prin modificarea lui λ . Se poate scrie, astfel:

$$V * \frac{\tau_{min}}{C} = \frac{1-\lambda}{\lambda} \quad (2.9)$$

Pentru o durată minimă a unui ciclu este necesar ca $s_{min} = \tau_{min}$, deci:

$$V * \frac{s_{min}}{C} = \frac{1-\lambda}{\lambda} \quad (2.10)$$

În cazul roboților hexapozi $\lambda \geq 1/2$, această limită este impusă de stabilitate statică (în permanență, cel puțin trei picioare trebuie să fie în contact cu solul). Aceasta înseamnă că raportul $\frac{1-\lambda}{\lambda}$ poate avea valoarea maximă 1 pentru roboții hexapozi.

Limita de stabilitate statică pentru roboții patruzezi impune ca $\lambda \geq 3/4$, ceea ce înseamnă că valoarea maximă a raportului $\frac{1-\lambda}{\lambda}$ poate fi 1/3, adică viteza maximă a unui robot hexapod este de trei ori mai mare decât cea a unui robot patruzeze, pentru aceleași condiții cinematice. De aceea se preferă mai mult utilizarea unui număr de șase picioare.

• Tipuri de mers

Coordonarea mișcării picioarelor unui robot este foarte importantă pentru menținerea robotului în echilibru și la deplasarea acestuia cu o anumită viteză impusă. Deplasarea roboților pășitori se poate face utilizând diferite tipuri de mers (figura 2.26).

În general mersul periodic este preferat, datorită implementării mai ușoare a programului de conducere cu calculatorul. Dintre mersurile periodice, mersul ondulat sau în valuri și mersul legănat sunt tipurile de mers cu stabilitate optimă, utilizat și de multe animale în condiții similare. Aceste tipuri de mers sunt specifice roboților patruzezi, și

sunt necesare pentru asigurarea stabilității mersului cvasistatic. Menținerea proiecției verticale a centrului de greutate al sistemului în interiorul poligonului de sprijin se realizează în timpul mersului ondulat printr-o deplasare de translație a platformei robotului. În timpul mersului legănat, deplasarea proiecției centrului de greutate se realizează prin rotirea platformei în jurul unei laturi a poligonului de sprijin.

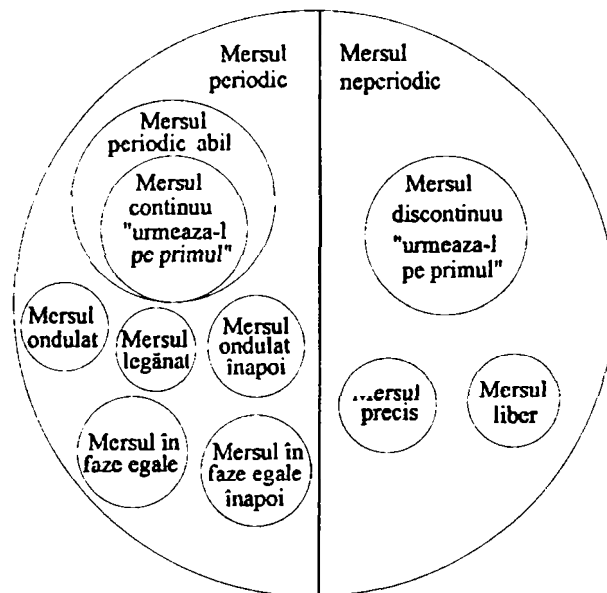


Figura 2.26: Tipurile de mers ale roboților pășitori

La mersul în faze egale, momentele de așezare și ridicare ale picioarelor, în timpul unui ciclu de locomoție, sunt distribuite în mod egal. Variațiile de putere consumată pentru acest tip de mers sunt minime, motiv pentru care este recomandat în cazul unor vârfuri instantanee de consum.

Pentru ambele tipuri de mers, ondulat și în faze egale, așezarea picioarelor de pe fiecare parte se face începând de la piciorul posterior spre piciorul anterior. De aceea, aceste tipuri sunt catalogate ca mersuri periodice înainte (*Forward Wave Gait*) (figura 2.27). Dacă momentele de așezare ale picioarelor sunt inversate, mersul se numește periodic înapoi (*Backward Wave Gait*) (figura 2.28).

La deplasarea pe un teren care are o configurație pronunțat neregulată, nu poate fi utilizat mersul periodic, deoarece lipsește abilitatea robotului de a așeza totdeauna picioarele în zonele permise. De aceea, în această situație, este recomandat mersul nepe-

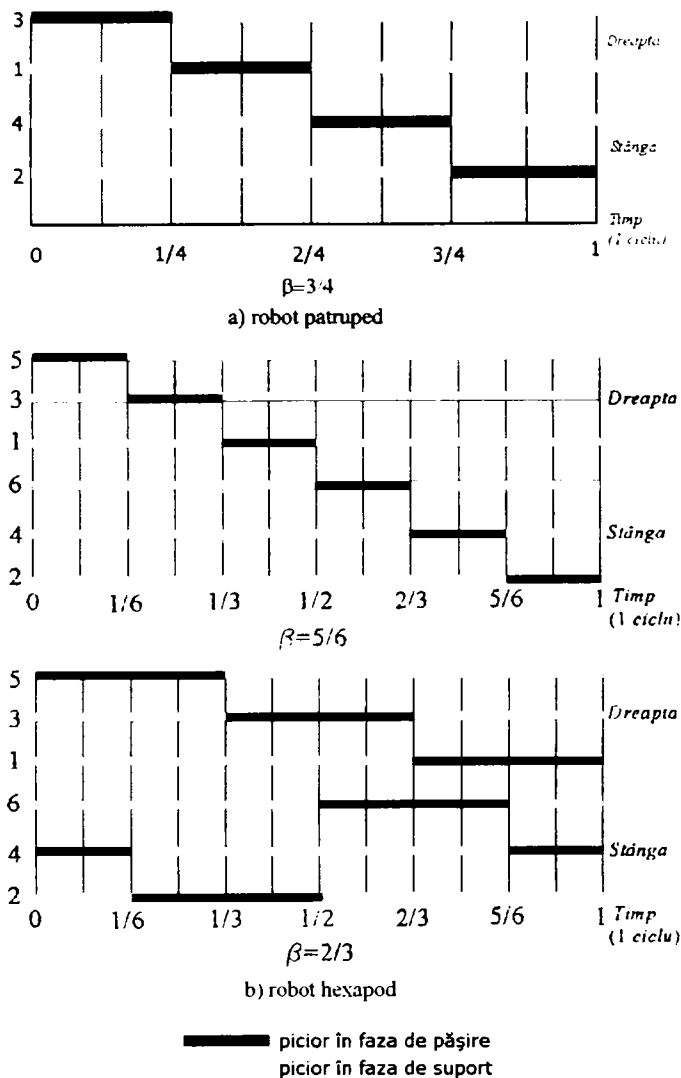


Figura 2.27: Mers undulat înainte

riodic. Dintre mersurile neperiodice, cel mai simplu este mersul precis, în care operatorul uman controlează direct mișcările picioarelor.

Dacă există obstacole pe suprafața de deplasare, trebuie folosit un mers specific traversărilor, după ce se cunosc dimensiunile acestor obstacole. În funcție de tipul obstacolului, depășirea acestuia se poate face prin așezarea cu precizie a picioarelor în zonele permise din jurul obstacolului. În această situație se recomandă mersul neperiodic denumit "urmează-1 pe primul" (*Follow The Leader*). La deplasarea pe un teren cu o mare diversitate a formelor și dimensiunile obstacolelor, se recomandă mersul precis.

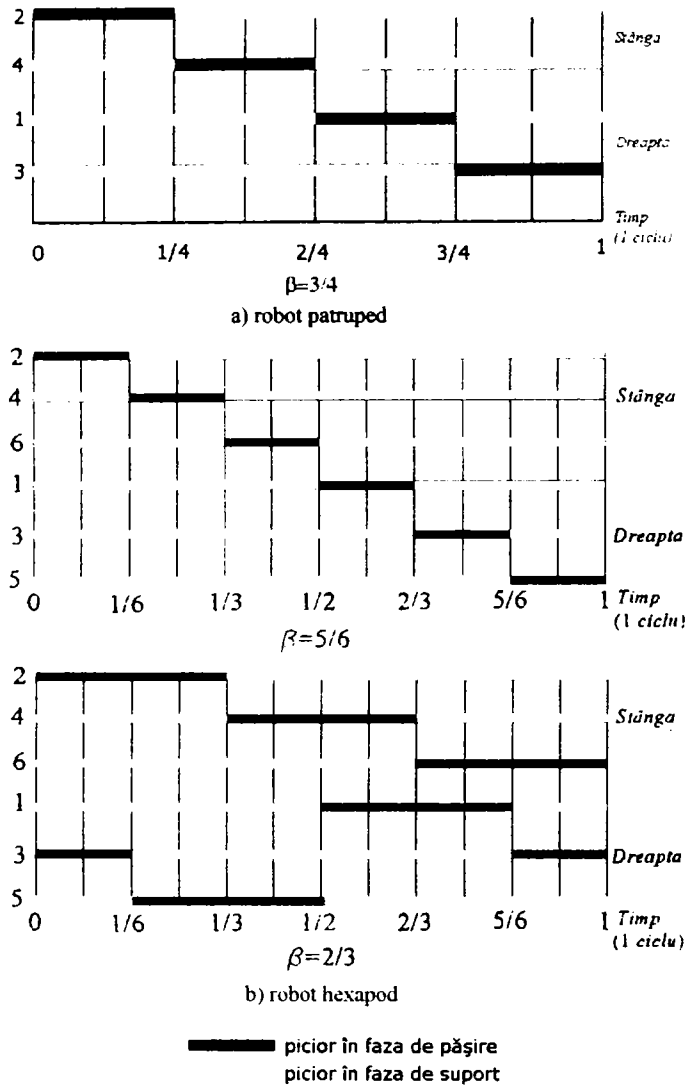


Figura 2.28: Mers undulat înapoi

• Mersul undulat

Robotul pășitor are un mers regulat dacă mișcările tuturor picioarelor se fac după același ciclu, adică au aceleași faze de sprijin și de pașire, pozițiile relative - în raport cu platforma - ale punctelor de așezate nu se schimbă de la un pas la altul [44], [52]. Dacă platforma robotului are o mișcare de translație rectilinie, punctele teoretice de contact ale tuturor picioarelor - în fazele de sprijin - se deplasează în lungul unor segmente, de dreapta, ale căror lungimi sunt aceleași pentru fiecare picior, iar amplasarea este

neschimbată în procesul de mișcare. Un astfel de mers este eficient la deplasarea pe terenuri puțin accidentate. Totodată, la mișcarea pe o suprafața cu neuniformități mici, este oportun ca - respectând ciclul de sprijin și pășire standard - să se admită schimbarea coordonatelor relative ale punctelor teoretice de așezare ale picioarelor pentru adaptarea la neuniformitatea terenului, dacă locurile de fixare ale tuturor picioarelor (punctele de suspendare) sunt amplasate pe corp simetric în raport cu un plan vertical. În acest caz, mersul se numește simetric dacă fiecare pereche de picioare care sunt fixate în puncte simetrice, funcționează simetric. Mai simplu, se prezintă mersul ondulat [51], [97], cu următoarele caracteristici:

- mersul este periodic, matricea mersului este regulată, iar mărimea coeficientului de utilizare P este aceeași pentru toate picioarele.
- punctele de fixare a picioarelor sunt simetrice față de planul vertical, intervalele de timp dintre momentele de așezare ale picioarelor vecine, situate pe o parte a platformei, sunt egale între ele și aceleași pentru ambele părți ale robotului pășitor.

Mersul ondulat poate fi caracterizat doar prin trei parametri:

- deplasarea fazei ϕ între momentele de așezare a picioarelor posterioare față de sensul de mișcare a corpului;
- timpul relativ τ între momentele de așezare a picioarelor vecine, care evidențiază succesiunea momentelor relative de ridicare a picioarelor;
- caracteristica mersului β

Mersul ondulat este simetric atunci când intervalele de timp dintre momentele de așezare a picioarelor posterioare ale părților opuse ale platformei sunt egale. Pentru aceasta, se admite că deplasarea de fază caracterizează întârzierea momentului de așezare a piciorului stâng posterior în raport cu momentul de așezare a celui drept posterior. Dacă se admite că mersul este simetric, atunci deplasarea fazei este $\phi = 0.5$ și intervalul de timp dintre momentul de așezare a piciorului drept posterior și momentul de așezare a piciorului stâng posterior, în virtutea periodicității, este egal cu intervalul de timp dintre momentul de așezare a piciorului drept anterior și momentul de așezare a piciorului stâng

anterior, și egal cu jumătate din perioada mersului. De asemenea, diferențele dintre momentele de așezare a picioarelor posterioare sunt egale.

Intervalul de timp dintre momentul de așezare a piciorului drept posterior și celui stâng posterior este $\phi * T$, unde T este perioada mersului. Intervalul de timp dintre momentul de așezare a piciorului stâng posterior și cel drept posterior este $(1 - \phi) * T$. Egalând aceste intervale rezultă că valoarea fazei este $\phi = 0.5$. Picioarele simetrice posterioare funcționează în antifază. Înseamnă că și celelalte picioare simetrice funcționează în antifază și mersul este simetric. Mersul ondulat este simetric atunci când intervalele de timp dintre momentele de ridicare a picioarelor posterioare corespunzătoare părților opuse sunt egale.

În continuare, se analizează câteva tipuri de mersuri ondulate simetrice, presupunând că mișcările picioarelor se fac suficient de repede, $(1 - \beta) \leq \tau$, iar numărul picioarelor robotului pășitor este egal fie cu șase, fie cu patru.

• Mersul ondulat succesiv

În figura 2.29 este prezentată diagrama mersului ondulat succesiv, unde undulația de pășire a picioarelor începe cu piciorul drept posterior.

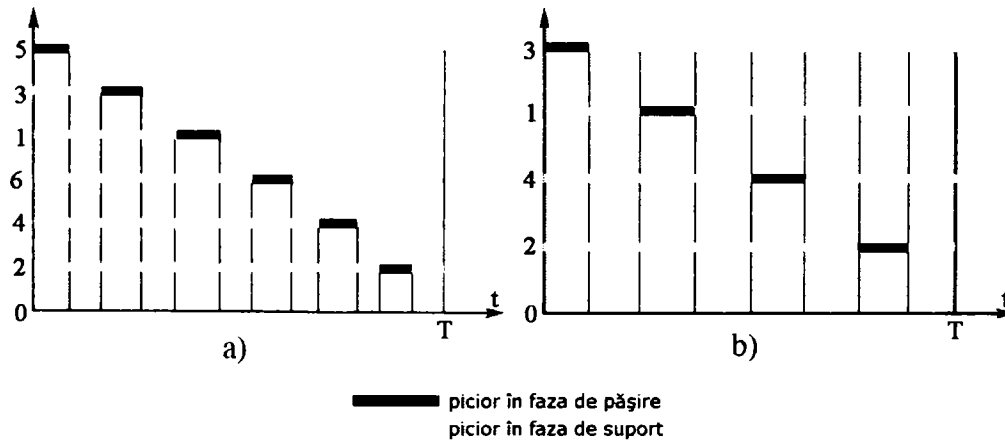


Figura 2.29: Ciclograma mersului succesiv: a) robot hexapod cu $\tau = 1/6$; b) robot patruped cu $\tau = 1/4$

Dacă robotul este privit din față, picioarele din partea dreaptă sunt numerotate cu numere impare, începând cu cel anterior. Momentele succesive de începere a mutării pentru toate picioarele sunt separate unele de celelalte prin intervale egale de timp. Trecând

în lungul picioarelor unei părți, undulația trece în cealaltă parte, după aceea se întoarce ș.a.m.d. Numărul picioarelor aflate în faza de suport alternează între cinci și șase, în cazul robotului hexapod, respectiv între trei și patru, în cazul robotului patruped. Intervalul de timp dintre momentele de începere a mutării picioarelor, anterior și posterior - ale părților opuse - este egal cu $T/6$, respectiv $T/4$. Treptat se mărește durata τ a fazei de pășire, păstrându-se valorile coeficienților β și ϕ nemodificate. Ondulațiile de pășire ale fiecărei părți se păstrează neschimbate în ce privește structura. Ele se repeta periodic. Ridicarea piciorului stâng posterior are loc mai târziu în raport cu ridicarea piciorului drept posterior.

• Mersul ondulat în diagonală

Diagrama mersului în diagonală este prezentată în figura 2.30. Prin urmare, undulațiile șirurilor de picioare situate pe cele două părți opuse ale robotului, în cadrul mersului în diagonală, se apropie de mărimea $1/4$, în cazul robotului hexapod, respectiv $1/2$, în cazul robotului patruped.

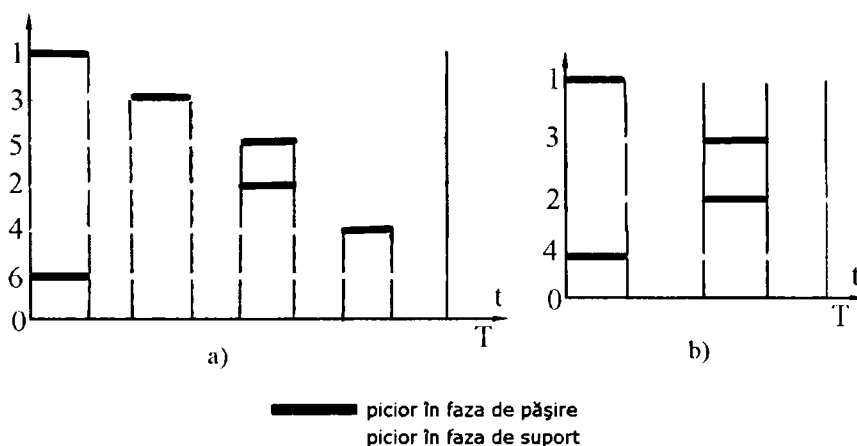


Figura 2.30: Ciclograma mersului în diagonală: a) robot hexapod cu $\tau = 1/4$; b) robot patruped cu $\tau = 1/2$

Picioarele dispuse în diagonală - cel din spate al unei părți și cel din față al celeilalte părți - se mișcă simultan. În intervalul dintre mutările în diagonală are loc transferarea picioarelor din mijloc - pe rând - de pe o parte și de pe cealaltă, pentru robotul hexapod. În cursul unui ciclu, numărul picioarelor care se află simultan în faza de suport este de patru sau șase în timpul mutării picioarelor de pe diagonală, și respectiv

de cinci sau șase în timpul mutării picioarelor din mijloc, pentru hexapod, respectiv două sau patru în timpul mutării picioarelor de pe diagonală, pentru patruped.

- **Mersul ondulat în trei picioare**

Mersul ondulat în trei picioare apare la roboții pășitori ce au un număr de picioare mai mare sau egal cu șase. Acest tip de mers se poate realiza prin mărirea coeficientului τ până la valoarea $\tau = 1/2$. Diagrama mersului unui robot hexapod este prezentată în figura 2.31.

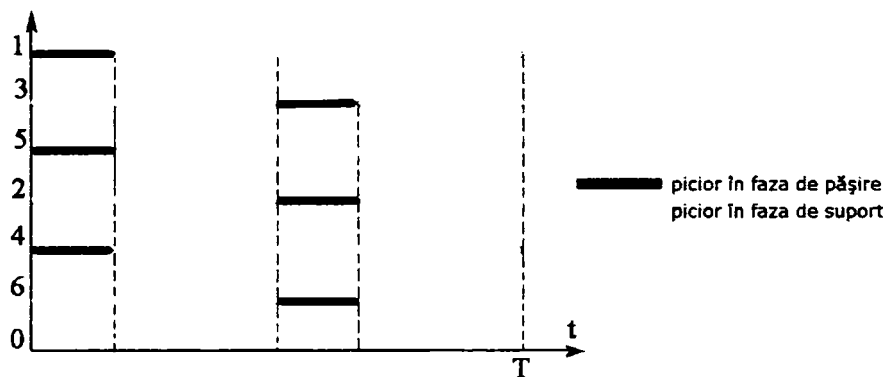


Figura 2.31: Ciclograma mersului în trei picioare cu $\tau = 1/2$ pentru un robot hexapod

La un astfel de regim are loc transferarea simultană a trei picioare, posterior și anterior pe de o parte și piciorul mijlociu al părții opuse. În tactul următor se vor muta simultan alte trei picioare, simetrice cu cele anterioare, ca și cum robotul ar merge pe două picioare, din care fiecare are trei puncte de sprijin. La mersul în trei picioare, numărul picioarelor de sprijin este trei sau șase.

Mersul ale cărui caracteristici sunt cuprinse între cele ale mersului succesiv și cel în diagonală ($1/6 \leq \tau \leq 1/4$) se numește *circumdiagonal*. Mersul ale cărui caracteristici sunt cuprinse între cele ale mersului diagonal și cel în trei picioare ($1/4 \leq \tau \leq 1/2$) se numește *circumpolar*. Dacă se consideră valoarea $\tau \geq 1/2$, atunci se obține mersul denumit *în trei picioare*.

- **Galopul**

Un astfel de mers ondulat apare dacă se reunesc momentele de pășire ale picioarelor situate pe partea din stânga a robotului și cele din partea dreaptă, anterioare

și posterioare. Picioarele se mută în perechi, la început cele posterioare, apoi cele medii, pe urma cele anterioare, și așa mai departe. Ciclograma mersului în galop pentru un robot hexapod este prezentată în figura 2.32, iar pentru un patruped mersul în galop se aseamănă cu mersul în diagonală la o viteză de deplasare mai mare.

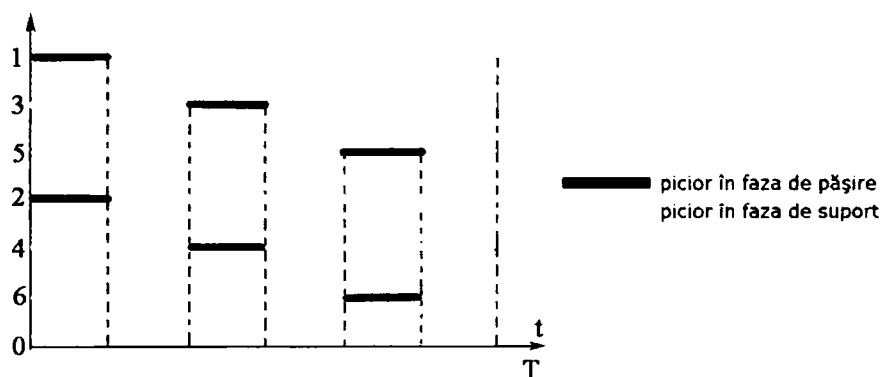


Figura 2.32: Ciclograma mersului în galop pentru un hexapod

• Mersul ondulat în semidiagonală

Diagrama mersului în semidiagonală are aspectul prezentat în figura 2.33. Intervalul dintre momentele de pășire ale picioarelor drept - anterior și respectiv stâng - anterior este egal cu $1/3$, iar întârzierea transferului pentru picioarele unei părți este egală cu $2/3$ din unitatea de măsură a timpului. Simultan se mută piciorul stâng - posterior și drept - mediu, stâng - anterior și drept - posterior, stâng - mediu și drept - anterior. În sensul invers al intervalelor se obține mersul simetric.

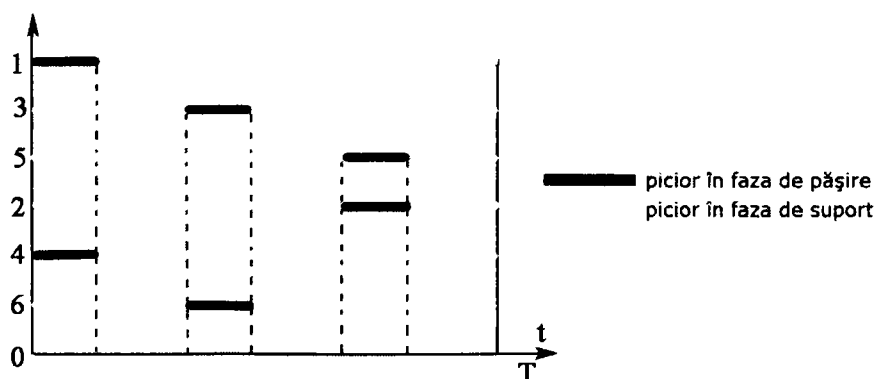


Figura 2.33: Ciclograma mersului în semidiagonală pentru un hexapod

În ultimul timp au fost recunoscute avantajele sistemelor de locomoție pășitoare pe terenuri neamenajate, în comparație cu sistemele care folosesc roțile. Unul din cele mai importante avantaje este mobilitatea. Un sistem pășitor poate traversa orice teren, deoarece necesită numai o serie de puncte discrete de sprijin de-a lungul traseului. Mobilitatea unui robot pășitor este strâns legată de tipul de mers adoptat. Mersul a fost definit ca o succesiune de mișcări ale picioarelor, coordonate cu o succesiune de mișcări ale corpului, realizate în scopul deplasării corpului dintr-un loc în altul. În funcție de modul cum se repetă, mersul este periodic (ciclic) sau neperiodic (neciclic), în tabela 2.1 sunt prezentate o serie de caracteristici ale diferitelor tipuri de mers analizate cu recomandările de rigoare. Mersul periodic este guvernat de reguli de control mai simple și rezultă o deplasare lină a corpului. Mersurile periodice se pot utiliza la deplasarea roboților pășitori pe terenuri plane, care au doar porțiuni limitate de zone interzise. Mersurile neperiodice oferă o mai bună mobilitate și sunt utilizate la deplasarea roboților pășitori pe terenuri accidentate, acolo unde performanțele acestora le impun față de celelalte vehicule create de om.

2.5 Stabilitatea roboților cu picioare

Menținerea echilibrului unui robot în timpul mersului este o problemă foarte importantă. În funcție de acest lucru, roboții pășitori se pot clasifica în următoarele tipuri:

- **Roboți stabili static.** Acești roboți sunt în permanență în echilibru, având cel puțin trei picioare în contact cu solul, în timpul locomoției. În general, roboții stabili static sunt prevăzuți cu 6 - 8 picioare.
- **Roboți cvasi-stabili static (semi-stabili static).** Acești roboți se pot regăsi ușor în configurații instabile pentru un timp scurt, pe durata locomoției. Roboții cvasi-stabili static au în general 4 picioare.
- **Roboți stabili dinamic.** Acești roboți nu au configurații stabile ale poligonului de suport, pe durata locomoției. Atunci când aceste configurații există, ele sunt sensibile la condițiile dinamice ale mișcării. În general, roboții stabili dinamic sunt cei cu 1 - 2 picioare.

Tabela 2.1: Caracteristicile diferitelor tipuri de mers

Mers	Tipuri de mers	Stabilitatea mersului	Recomandat pentru teren
Periodic	Mers ondulat înainte	bună	perfect plan
	Mers ondulat înapoi	acceptabilă	perfect plan
	Mers în faze egale înainte	bună	perfect plan
	Mers în faze egale înapoi	acceptabilă	perfect plan
	Mers periodic abil	bună	plan cu denivelări
	Mers continuu <i>urmează-l pe primul</i>	acceptabilă	cu denivelări sau accidentat
Neperiodic	Mers ondulat înainte	bună	perfect plan
	Mers discontinuu <i>urmează-l pe primul</i>	foarte bună	accidentat
	Mers peste obstacole largi	acceptabilă	cu obstacole
	Mers precis	foarte bună	accidentat cu obstacole
	Mers liber	bună	accidentat

2.5.1 Stabilitatea statică a roboților cu picioare

Ținând seama de faptul că în general se construiesc roboți hexapodzi, vor fi prezentate în continuare noțiuni generale cu privire la stabilitatea statică.

Echilibrul static al unui robot pășitor aflat sub efectul greutății proprii poate fi verificat cu ajutorul poligonului de sprijin (figura 2.34), care constituie poligonul format de proiecțiile în plan orizontal ale punctelor de sprijin ale picioarelor, în faza de suport.

Mersul este stabil static dacă, în orice moment, proiecția verticală a centrului de masă G este în interiorul poligonului de sprijin, putându-se defini următoarele limite de

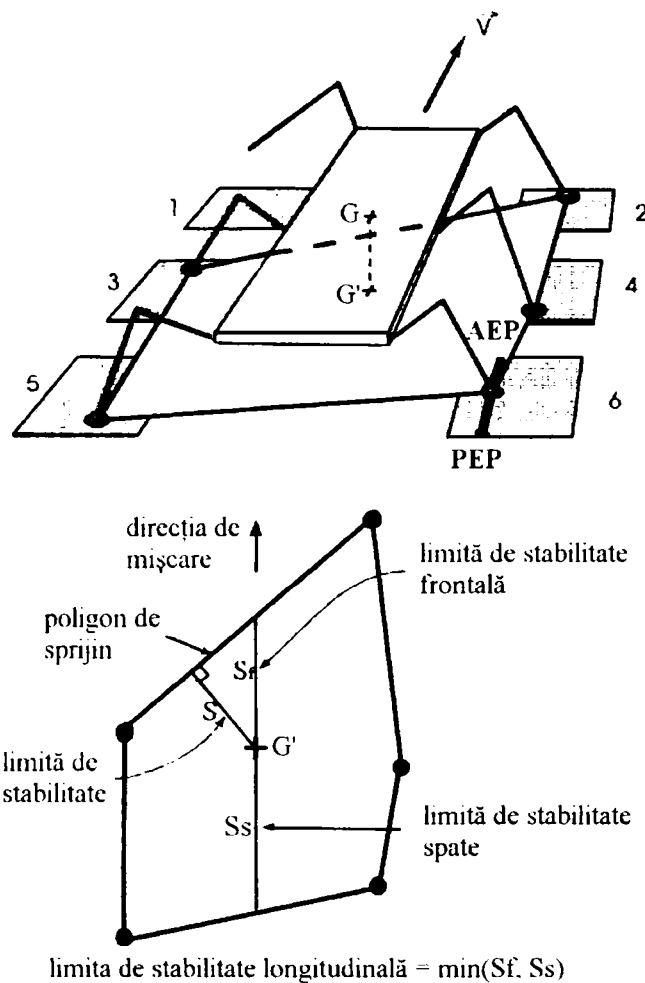


Figura 2.34: Poligonul de sprijin și definirea diferitelor limite de stabilitate

stabilitate:

- Limita de stabilitate S este distanța minimă de la proiecția G' a centrului de masă la poligonul de sprijin. Robotul este stabil static dacă $S \geq 0$.
- Limita de stabilitate frontală S_f este distanța de la proiecția G' a centrului de masă la latura frontală a poligonului de sprijin, măsurată pe direcția de mișcare.
- Limita de stabilitate spate S_s este distanța de la proiecția G' a centrului de masă la latura din spate a poligonului de sprijin, măsurată pe direcția de mișcare.
- Limita de stabilitate longitudinală S_l , este $S_l = \min(S_f, S_s)$

Definițiile prezentate mai sus caracterizează echilibrul static al robotului pentru o poziție dată, putând fi extinse în cazul echilibrului static al mersului. Limita de stabilitate longitudinală $S_l(M)$ a unui mers periodic M este valoarea minimă S_l în timpul unui ciclu de locomoție. Un mers este stabil static dacă $S_l(M) \geq 0$.

Pentru o configurație de suport dată, proiecția centrului de masă se deplasează în interiorul poligonului de sprijin din spate către față datorită înaintării robotului, ceea ce produce o diminuare a limitei de stabilitate frontale și o creștere corespunzătoare a limitei de stabilitate spate. Aceasta înseamnă că limita de stabilitate spate este minimă la începutul configurației de suport și maximă la sfârșit, în timp ce limita de stabilitate frontală este maximă la început și minimă la sfârșit. Această constatare permite determinarea momentelor critice pentru calculul limitei de stabilitate longitudinală a unui mers.

- Limita de stabilitate longitudinală redusă este dată de relația (2.11).

$$S_l^* = \frac{S_l}{L} = \frac{\lambda}{C} \times S_l \quad (2.11)$$

Limita de stabilitate a unui mers periodic de viteză dată (λ fix) depinde direct de diferențele de fază $\Delta\phi_i$ existente între mișcările picioarelor.

Condiții de evitare a interferenței geometrice a picioarelor

În cazul în care cursa picioarelor este mai mare decât distanța dintre două picioare adiacente ($C \geq P$), spațiile de lucru ale acestora se intersectează, ceea ce înseamnă că este posibilă interferența picioarelor succesive în timpul mersului.

Pentru a evita acest lucru (figura 2.35), trebuie respectate relații (2.12) și (2.13).

$$P \geq \frac{C * \phi_3}{\lambda} \quad (\phi_3 \leq \lambda) \quad (2.12)$$

$$P \geq \frac{C * (1 - \phi_3)}{1 - \lambda} \quad (\phi_3 \geq \lambda) \quad (2.13)$$

Prima condiție corespunde cazului în care așezarea piciorului 3 pe sol are loc atunci când piciorul 1 este în faza de suport, situație valabilă atunci când ($\phi_3 \leq \lambda$).

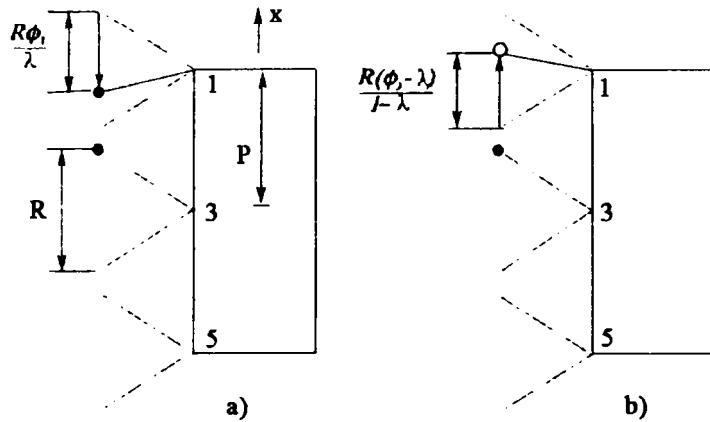


Figura 2.35: Condițiile de evitare a interferenței geometrice a picioarelor succesive: a) ($\phi_3 \leq \lambda$); b) ($\phi_3 \geq \lambda$)

Poziția piciorului 3 în raport cu centrul robotului are valoarea $x_3 = C/2(AEP)$, în timp ce piciorul 1 a parcurs în faza de suport (cu viteza $C/\lambda * T$) distanța $C * \phi_3/\lambda$, poziția acestuia în raport cu centrul robotului având valoarea $x_1 = P + C/2 - C * \phi_3/\lambda$. Pentru evitarea coliziunii dintre cele două picioare este necesar ca $x_1 \geq x_3$, de unde rezultă relația (2.12).

Dacă ($\phi_3 \geq \lambda$), piciorul 1 este deja în faza de pășire (cu viteza $C/(1-\lambda)*T$) atunci când piciorul 3 este așezat pe sol. Deci piciorul 1 a parcurs distanța $R * (\phi_3 - \lambda)/(1 - \lambda)$, poziția acestuia față de centrul robotului fiind $x_1 = P - C/2 + C * (\phi_3 - \lambda)/(1 - \lambda)$. În același timp, poziția piciorului 3 este $x_3 = C/2$. Pentru evitarea interferenței celor două picioare, în acest caz, este necesară existența aceleiași inegalități $x_1 \geq x_3$, de unde rezultă relația (2.13).

Este evitată interferența tuturor picioarelor robotului, pentru toate tipurile de mers simetrice cu increment de fază constant, dacă sunt respectate cele două inegalități.

2.5.2 Stabilitatea cvasistatică a roboților cu picioare

Mersul ondulat sau în unde (Wave Gait), [1], [28], [23], este caracterizat prin faptul că fazele de pășire ale mișcărilor picioarelor se propagă de la un picior la alți asemenea unor valuri, Mersul ondulat a fost observat atât la insecte cât și la animale și este folosit pentru programarea mișcărilor picioarelor roboților pășitori. În urma studiului

diferitelor tipuri de posibilități de deplasare a roboților, mersul ondulat al crabului este considerat a fi optim din punct de vedere al asigurării stabilității roboților patrupezi, în condițiile mersului cvasistatic.

Mersul ondulat în regim cvasistatic este cel mai stabil, datorită faptului că se poate realiza cel mai ușor condiția de stabilitate statică, și anume: proiecția verticală a centrului de greutate al robotului să se găsească totdeauna în interiorul poligonului de sprijin [29].

Poligonul de sprijin este un poligon convex conținut în planul orizontal, ale cărui vârfuri sunt proiecțiile verticale pe acest plan ale extremităților picioarelor aflate în faza de sprijin. În continuare se prezintă o metodă analitică de determinare a limitelor stabilității unui robot patrupezi.

În figura 2.36 este reprezentat schematic un model de robot pășitor patrupezi.

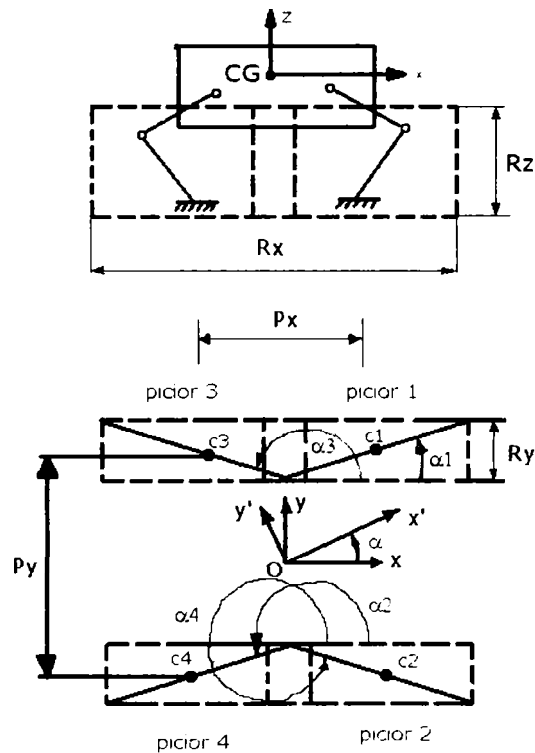


Figura 2.36: Robot pășitor patrupezi

Spațiile în care se pot găsi extremitățile picioarelor sunt desenate cu linii întrerupte. Cursa R_i a piciorului este distanța cu care piciorul i se deplasează în raport cu

platforma în timpul fazei de sprijin. Pasul λ al robotului este distanța cu care se deplasează centrul de greutate al platformei (corpul robotului) în timpul unui ciclu complet de deplasare. Pasul P al cursei este definit ca distanța dintre două picioare adiacente de pe aceeași parte a robotului.

În mod teoretic, spațiile de lucru ale picioarelor au forme paralelipipedice, centrele acestor spații de lucru, situate la intersecțiile diagonalelor, sunt notate cu C_i , $i=1,4$. Sistemul de axe OXYZ atașat robotului are originea în centrul de greutate al platformei, iar axa OX este axa longitudinală a acesteia.

Pentru analiza stabilității robotului pășitor se definesc următoarele noțiuni (figura 2.37):

- *axa crabului* este axa ce trece prin centrul platformei și este orientată în sensul mișcării robotului
- laturile poligonului de sprijin, care intersectează axa crabului, se numesc *marginea din față* sau *anterioară* și respectiv *marginea din spate* sau *posteroară* a poligonului de sprijin. Laturile care nu intersectează axa crabului se numesc *margini laterale*.
- unghiul α al crabului este unghiul, măsurat în sens invers acelor de ceasornic, dintre axa longitudinală a platformei (corpului) robotului și axa crabului și poate avea valori cuprinse în domeniul $\alpha \in [0, 2\pi]$

Se definesc *limitele stabilității*, care sunt distanțele minime ce asigură stabilitatea robotului, măsurate de la proiecția verticală a centrului de greutate al platformei robotului pe poligonul de sprijin până la laturile corespunzătoare ale acestuia:

- limita stabilității din față sau anterioare $S_{m,f}$
- limita stabilității din spate sau posterioare $S_{m,r}$
- limita stabilității laterale $S_{m,s}$

Limita minimă a stabilității este valoarea minimă a celor trei limite menționate:
 $S_{m,f} = \min S_{m,f}, S_{m,r}, S_{m,s}$.

În mod analog se definesc limitele stabilității robotului pășitor în raport cu axa crabului:

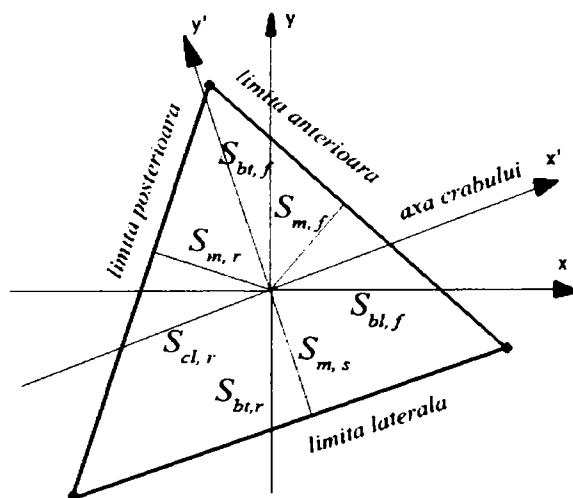


Figura 2.37: Limitele stabilității unui robot patruped

- Limitele stabilității longitudinale în față și în spate (anterioară și posterioară) sunt distanțele $S_{bt,f}$ și $S_{bt,r}$ respectiv măsurate de la proiecția verticală a centrului de greutate al platformei până la intersecțiile axei longitudinale OX a platformei cu cele două laturi, anterioară și posterioară, ale poligonului de sprijin, în condiții de stabilitate. Limita stabilității longitudinale este distanța cea mai scurtă din cele două menționate mai sus, și se notează cu $S_{bl} = \min S_{bt,f}, S_{bt,r}$.
- Limitele stabilității laterale, $S_{bt,f}$ și $S_{bt,r}$, sunt distanțele de la proiecția centrului de greutate până la intersecția axei transversale cu laturile laterale ale poligonului de sprijin. Cu ajutorul lor se determină limita minimă a stabilității laterale $S_{bt} = \min S_{bt,f}, S_{bt,r}$.
- limitele stabilității longitudinale a crabului, $S_{cl,f}$ și $S_{cl,r}$, sunt distanțele de la proiecția centrului de greutate la punctele de intersecție ale laturilor poligonului de sprijin cu axa crabului. Limita stabilității longitudinale a crabului este dată de relația $S_{cl} = \min S_{cl,f}, S_{cl,r}$.

Limita stabilității mersului $S_{m,g}$, limita stabilității longitudinale a mersului $S_{bl,g}$, limita stabilității laterale a mersului $S_{bt,g}$, limita stabilității longitudinale a crabului $S_{cl,g}$, sunt cele mai mici valori ale lui S_m , S_{bl} , S_{bt} și respectiv S_{cl} , calculate în cadrul unui ciclu de locomotie.

În figura 2.38 sunt prezentate: diagrama mersului ondulat cu coeficientul de utilizare $\beta = 3/4$, secvența de mers înainte de-a lungul axei ox și diagrama stabilității. Spațiile de lucru ale picioarelor, văzute de sus, sunt reprezentate cu linii întrerupte sub forma unor dreptunghiuri. Cursele picioarelor sunt desenate cu linii continue în interiorul spațiilor de lucru, și sunt împărțite în segmente egale. Numărul de segmente este egal cu cel în care este împărțită faza de sprijin din diagrama mersului. În figură sunt reprezentate cinci segmente în fiecare fază de sprijin. Fiecare segment este numerotat în concordanță cu diagrama mersului. În exemplul considerat, segmentele corespunzătoare cursei piciorului Cu numărul 2 sunt numerotate cu 3, 4, 5, 0, 1 și 2; corespunzător cu succesiunea în timp a segmentelor fazei de sprijin a piciorului 2. Poligonul de sprijin poate fi construit în fiecare moment. De exemplu, poligonul de sprijin în momentul în care piciorul cu numărul 3 este ridicat, poate fi obținut prin conectarea tuturor segmentelor care au numărul 4, cu excepția piciorului 3, care este în faza de transfer. Poligonul de sprijin este în acest caz un triunghi.

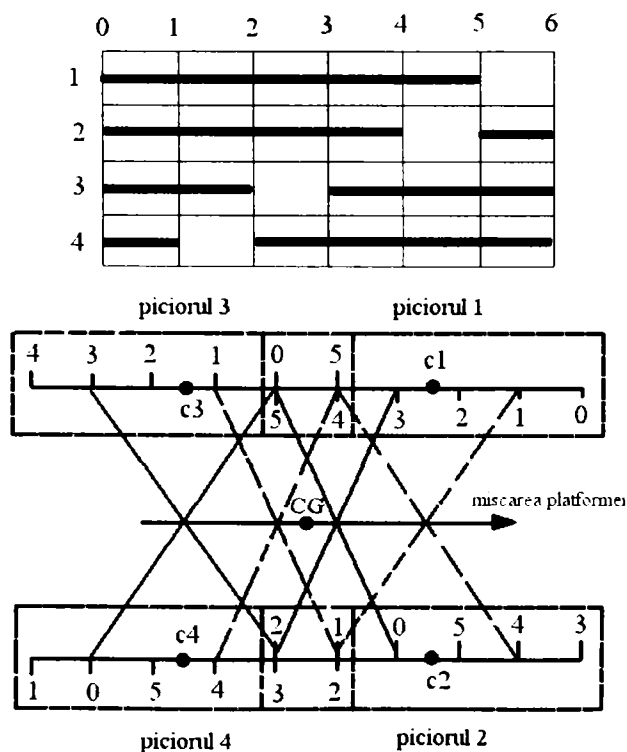


Figura 2.38: Analiza grafică a stabilității mersului

În figura 2.39 se prezintă ordinea de așezare a picioarelor robotului pășitor la mersul tip crab. Există șase moduri diferite de așezare a picioarelor pe sol, în funcție de direcția de mișcare [29]. Datorită sistemului de deplasare, robotul pășitor poate să execute mișcări înainte și înapoi pe cele două axe OX și OY . Diagrama mișcărilor este reprezentată în figura 2.38. Mersul unui robot este periodic dacă o aceeași configurație a piciorului, ce apare la două curse succesive, se repetă la toate picioarele după un interval de timp T , care este timpul unui ciclu. Timpul normalizat t este perioada de timp normalizată a unui ciclu $0 \leq t \leq 1$. Raportul dintre timpul în care piciorul i se găsește în faza de sprijin și timpul total al unui ciclu se numește coeficient de utilizare al piciorului i și se notează cu β_i .

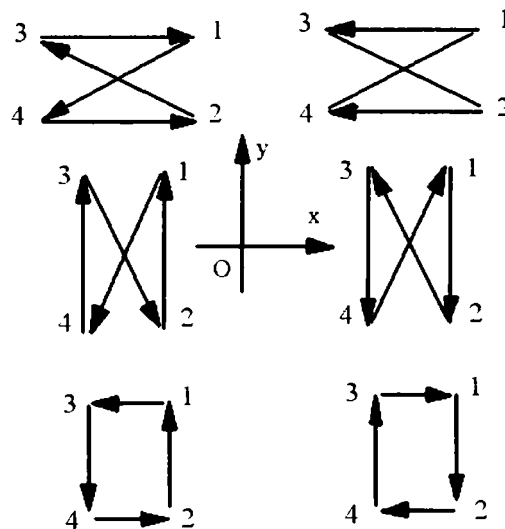


Figura 2.39: Ordinea de așezare a picioarelor unui robot patruped

2.6 Concluzii

Capitol 2 tratează problemele locomoției roboților pășitori, tipurile de mecanisme ce apar în configurațiile picioarelor roboților pășitori, parametrii de bază în studiul mersului roboților pășitori. Se trece apoi la problema stabilității roboților pășitori, tipul de mecanism și schema cinematică pe care autoarea a ales-o pentru construcția robotului mobil pășitor JQuadRobot este prezentată în figura 6.1.

Capitolul se constituie a fi prezentarea critică a modalităților de realizare ale unui

robot mobil pășitor, sintetizarea unor aspecte teoretice și practice legate de tipurile de mers disponibile în contextul asigurării stabilității robotului pășitor pe diferite suprafețe de mișcare, sintetizarea unor aspecte teoretice și practice legate de stabilitatea statică, respectiv de stabilitatea cvasistatică ce apare la robotul pășitor patruped, pentru a evidenția metodele și rezultatele care vor fi utilizate la abordarea strategiei de mișcare a robotului patruped JQuadRobot.

Modelarea geometrică a robotului pășitor JQuadRobot

Elaborarea algoritmilor de comandă a unui robot necesită modelarea geometrică corespunzătoare a structurii mecanice a acestuia. Structura mecanică a unui robot reprezintă un sistem de corpuri, considerate rigide. Pentru exprimarea situației relative sau absolute, respectiv pentru studiul cinematicii și dinamicii robotului, fiecărui element al robotului i se atașează unul sau mai multe sisteme de referință. Aceste sisteme de referință sunt definite astfel încât originile și axele corespund unor puncte și direcții care au rol funcțional în execuția sarcinii. De obicei, aceste sisteme de referință se aleg cu originea în centrul cuplelor cinematice ce conectează două elemente, sau în centrul de masă al elementului căruia îi este atașat respectivul sistem de referință. Axele sistemelor de referință se aleg, preferențial, pe direcțiile axelor cuplelor cinematice [69].

3.1 Sinteza piciorului robotului pășitor JQuadRobot

Sinteza mecanismului generator de traiectorie (piciorul platformei mobile pășitoare) comportă două faze: sinteza structurală și sinteza dimensională. Cele două faze urmăresc obiective distincte ale căror soluționare presupune o abordare etapizată (figura 3.1).

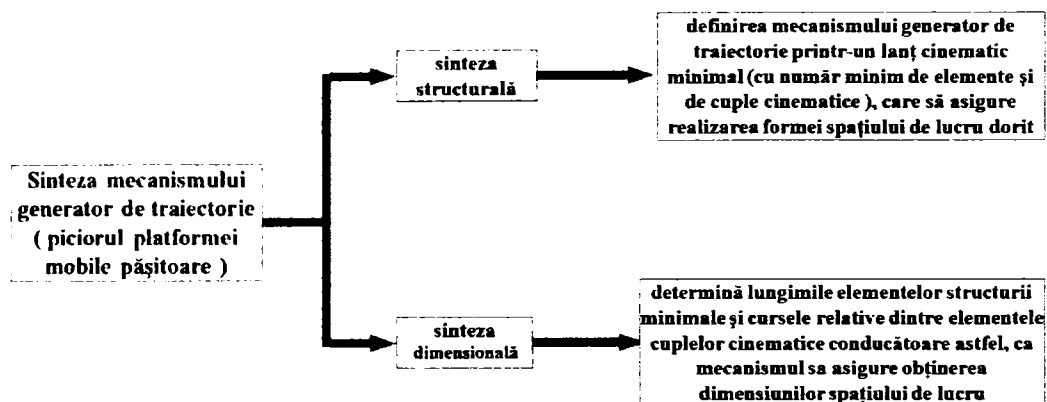


Figura 3.1: Fazele modelării geometrice a piciorului platformei mobile pășitoare

Sinteza structurală urmărește la început definirea mecanismului generator de traiectorie printr-un lanț cinematic minimal (cu număr minim de elemente și de cuple cinematice), care să asigure realizarea formei spațiului de lucru dorit. Prin sinteza dimensională se determină apoi lungimile elementelor structurii minimale și cursele relative dintre elementele cuplelor cinematice conducătoare astfel, ca mecanismul să asigure obținerea dimensiunilor spațiului de lucru.

Etape de sinteză a lanțului cinematic minimal, soluționează problemele geometrice propuse în legătura cu mecanismul generator de traiectorie, fără a satisface criteriile cinematice, cinetodinamice, sau cele legate de implementarea sistemului de comandă impus. Astfel, de exemplu, rezolvarea problemei transportului paralel, potrivirea caracteristicilor mecanice ale motoarelor cu caracteristicile mecanice rezistente reduse la cuplele, conducătoare, sau implementarea terminalelor input ale buclelor de reacție, conduc în general la suplimentarea structurii inițiale.

Se precizează, că dezvoltările structurale trebuie să asigure conservarea gradului de mobilitate al lanțului cinematic minimal. De aici decurge regula potrivit căreia structurile suplimentare trebuie alcătuite numai din conexiuni $K_{C(O)}$, respectiv $K_{B(O)}$. Numărul structurilor suplimentare este egal cu numărul obiectivelor urmărite, iar implementarea lor se realizează în etape succesive [81].

Conexiunile cinematice sunt constituite din elemente și cuple cinematice, ansamblate în lanțuri cinematice deschise [34]. Un mecanism poate fi sintetizat din punct de

vedere structural prin legarea între ele a unui număr de elemente "inițiale", dintre care unul fix, prin intermediul unor conexiuni cinematice.

Sistemele robotice mobile pășitoare se aseamănă din punct de vedere structural cu mecanismul unui dispozitiv de ghidare cu topologie paralelă, în care:

- șasiul robotului = platforma mobilă,
- solul = platforma fixă,
- picioarele = conexiunile de legatura între cele două platforme.

3.2 Sinteza structurală a lanțului cinematic minimal

Cele mai simple mecanisme generatoare de traiectorie sunt alcătuite numai dintr-un lanț cinematic minimal deschis. Sistemele de acționare utilizate sunt fie liniare, fie rotative. Cuplele cinematice conducătoare fiind adaptate sistemelor de acționare, au clase corespunzătoare:

$$i = 5 \quad (3.1)$$

Pornind de la formula structurală generală a mecanismelor [53]:

$$M = 6(n - 1) - \sum_{i=0}^5 i * c_i - \sum L_p - \sum L_{id} \quad (3.2)$$

unde: M este gradul de mobilitate, n - numărul de elemente, c_i - numărul cuplelor de clasa i , $\sum L_p$ - gradul de libertate al legăturilor pasive, iar $\sum L_{id}$ - gradul de libertate de prisos, și ținând seama de faptul ca într-un lanț cinematic deschis și desmodrom:

$$\begin{cases} \sum L_p = \sum L_{id} = 0 \\ c_5 = M \end{cases} \quad (3.3)$$

Înlocuind relațiile (3.1) și (3.3) în relația (3.2) se obține:

$$n = M + 1 \quad (3.4)$$

Ultima relație (3.3) împreună cu relația (3.4), definesc din punct de vedere struc-

tural lanțul minimal. Relațiile (3.5) reprezintă formulele structurale ale lanțului cinematic minimal.

$$\begin{cases} c_5 = M \\ n = M + 1 \end{cases} \quad (3.5)$$

Ele evidențiază proprietatea principală a acestui lanț și anume, ca oricare ar fi gradul lui de mobilitate, numărul cuplelor conținute este cu unul mai puțin decât numărul elementelor. Lanțul minimal deschis are la unul din capete elementul fix sau baza, iar la capătul mobil elementul condus final, de care aparține și punctul caracteristic al mecanismului generator de traiectorie.

3.3 Sinteza dimensională a lanțului cinematic minimal

Așadar, lanțul minimal optim rezultă sub forma cunoscutei structuri antropomorfe, cu schema cinematică redată în figura 3.2.

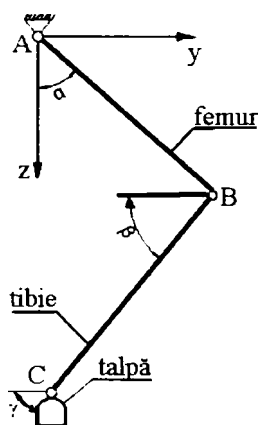


Figura 3.2: Structura cinematică a piciorului robotului pășitor

După pozițiile ocupate în această structură, elementele și cuplele cinematice se denumesc în continuare astfel:

- O_o - element fix
- A - articulația femurului
- l_{AB} - femur

- B - articulația tibiei
- l_{BC} - tibie
- C - articulația gleznei, reprezintă punctul caracteristic al lanțului minimal

Problema sintezei dimensionale a lanțului minimal introduce cinci necunoscute:

- r_1 - lungimea femur
- r_2 - lungimea tibiei
- α - cursa unghiulară necesară în articulația femurului
- β - cursa unghiulară necesară în articulația tibiei
- γ - cursa unghiulară necesară în articulația gleznei

Determinarea univocă a acestor necunoscute presupune poziționarea spațiului de lucru printr-un număr de cinci condiții. Piciorul trebuie să reproducă efectiv din spațiul sferic, numai sectorul inelar al unei zone sferice așa cum s-a reprezentat în figura 3.3.

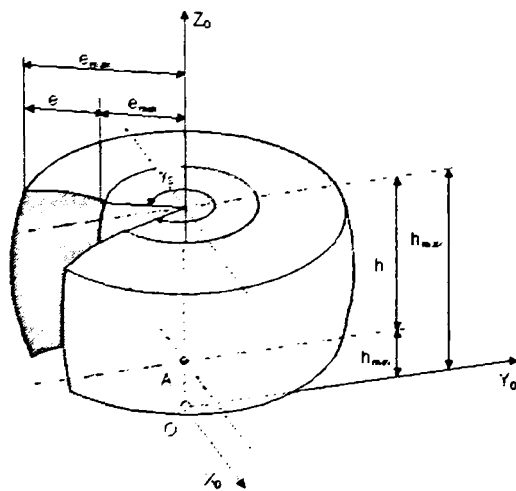


Figura 3.3: Spațiul sferic de lucru

Pentru poziționarea acestui spațiu trunchiat, pot fi aleși următorii parametri:

- γ_s - unghiul de serviciu
- e_{min} - distanța minimă a secțiunii meridiane

- e_{max} - distanța maximă a secțiunii meridiane
- h_{min} - înălțimea minimă a secțiunii meridiane
- h_{max} - înălțimea maximă a secțiunii meridiane

Parametri de poziționare se exprimă față de axele sistemului de referință fix $OX_oY_oZ_o$, considerat cu planul OX_oY_o așezat pe sol și cu axa OZ_o orientată de-a lungul axei de simetrie a inelului.

La generarea spațiului trunchiat, axa cuplei de pivotare a lanțului cinematic minimal este suprapusă cu axa de referință OZ_o , iar articulația femurului (punctul A) se găsește pe planul tangent inferior al spațiului. În situația relativă descrisă, generarea secțiunii meridiane se datorează în exclusivitate substructurii $0 \cup A \cup 1 \cup B \cup 2$ (partea plană a lanțului minimal). Efectul spațial se obține apoi, datorită substructurii $O_o \cup Q \cup O$ (figura 3.3). Așadar, în problema pozițiilor, cele două substructuri îndeplinesc roluri independente. Această proprietate permite descompunerea mecanismului generator de traiectorie în mecanism de urmărire (partea plană) și modul de pivotare (partea generatoare a efectului spațial) [35].

Adoptarea descompunerii prezentate mai sus conduce la următoarele avantaje:

- simplifică sinteza, permițând abordarea ei decuplată pe substructuri
- fundamentează concepția modulară a mecanismului generator de traiectorie și creează totodată premisele pentru modularizarea mecanismului de pivotare aferent

Pentru definirea sintezei dimensionale a lanțului minimal din substructura mecanismului de urmărire, se atașează planului meridian un sistem de referință Ayz , având originea fixată în cupla femurului și axa Az verticală. Situația relativă dintre lanțul considerat și secțiunea meridiană a spațiului de lucru este redată în figura 3.4.a.

Precizând direcția instantanee a femurului prin unghiul α și cea a tibiei prin unghiul β , presupuse pozitive dacă elementele sunt rotite în sens antiorar față de axa Az respectiv Ay (figura 3.4.b), se pot scrie relațiile (3.6).

$$\begin{cases} e = 2 * r_1 * \sin \alpha_{max} \\ h = 2 * r_2 * \sin \beta_{max} \end{cases} \quad (3.6)$$

Lățimea și înălțimea acestei secțiuni sunt determinate prin relațiile (3.7) în funcție de datele impuse prin temă.

$$\begin{cases} e = e_{max} - e_{min} \\ h = h_{max} - h_{min} \end{cases} \quad (3.7)$$

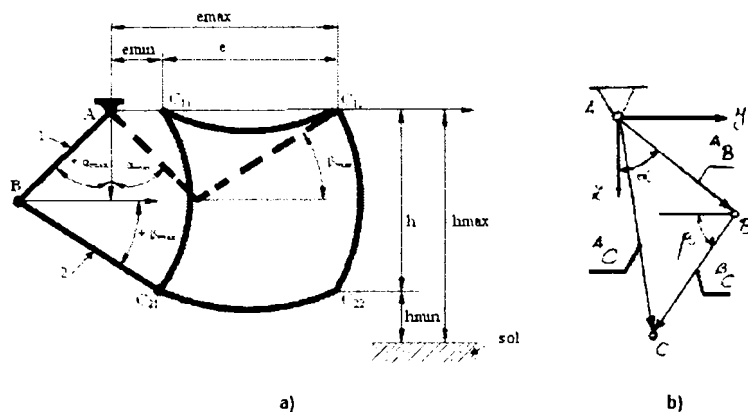


Figura 3.4: Situaarea relativă dintre lanțul considerat și secțiunea meridiană a spațiului de lucru

De aici rezultă direcțiile unghiulare maxime ale elementelor, necesare pentru ca mecanismul de urmărire să atingă punctele extreme ale secțiunii (relațiile (3.8)).

$$\begin{cases} \alpha_{max} = \arcsin \frac{e}{2 * r_1} \\ \beta_{max} = \arcsin \frac{h}{2 * r_2} \end{cases} \quad (3.8)$$

Aplicarea acestor relații presupune cunoașterea lungimii elementelor. Pentru determinarea lor, se asociază lanțului minimal un contur de vectori ca în figura 3.4.b. Condiția de închidere a conturului este următoarea:

$${}^A C = {}^A B + {}^B C \quad (3.9)$$

Legea de compunere (3.9) obligă, ca între modulele vectorilor:

$$r = |{}^A C| \quad r_1 = |{}^A B| \quad r_2 = |{}^B C| \quad (3.10)$$

să existe relația (3.11).

$$r = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + 2 * r_1 * r_2 * \sin(\alpha + \beta)} \quad (3.11)$$

Pentru r_1 și r_2 constanți, r variază cu argumentul $(\alpha + \beta)$. Notând:

$$\varphi = |\alpha + \beta|_{max} \quad (3.12)$$

extremele lui r pot fi exprimate în forma dată de relațiile (3.13).

$$\begin{cases} r_{max} = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 + 2 * r_1 * r_2 * \sin \varphi} \\ r_{min} = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2 * r_1 * r_2 * \sin \varphi} \end{cases} \quad (3.13)$$

Dacă $r = r_{min}$, atunci punctul C se suprapune cu C_{11} , iar dacă $r = r_{max}$ atunci se suprapune cu C_{22} (vezi figura 3.4.a). Conform figurii se pot scrie relațiile (3.14).

$$\begin{cases} r_{min} = e_{min} \\ r_{max} = \sqrt{h^2 + e_{max}^2} \end{cases} \quad (3.14)$$

Deci extremele sunt determinate prin datele inițiale. În aceste condiții, relațiile (3.13) alcătuiesc un sistem de două ecuații neliniare cu coeficienți constanți, în care necunoscutele sunt r_1 și r_2 . Cele două perechi de soluții ale sistemului sunt date de relațiile (3.15) și (3.16).

$$\begin{cases} r_{11} = \frac{1}{2} * \sqrt{(r_{max}^2 + r_{min}^2) * (1 - p)} \\ r_{21} = \frac{1}{2} * \sqrt{(r_{max}^2 + r_{min}^2) * (1 + p)} \end{cases} \quad (3.15)$$

și

$$\begin{cases} r_{12} = \frac{1}{2} * \sqrt{(r_{max}^2 + r_{min}^2) * (1 + p)} \\ r_{22} = \frac{1}{2} * \sqrt{(r_{max}^2 + r_{min}^2) * (1 - p)} \end{cases} \quad (3.16)$$

Pentru a le distinge în discuția care urmează, s-a introdus al doilea indice. Cu parametrul $0 \leq p \leq 1$ s-a notat:

$$p = \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \varphi_0}{\sin \varphi}\right)^2} \quad (3.17)$$

unde:

$$\sin \varphi_0 = \frac{r_{max}^2 - r_{min}^2}{r_{max}^2 + r_{min}^2} \quad (3.18)$$

Soluțiile (3.15) și (3.16) satisfac relația de ordine $r_{11} = r_{22} < r_{12} = r_{21}$. Există deci două lanțuri minimale plane distincte, care printr-un punct dat A permit generarea aceleiași secțiuni meridiane, cu aceleași puncte de discontinuitate $C_{11} - C_{12} - C_{22} - C_{21}$. În schema din figura 3.5, elementele acestor lanțuri alcătuiesc perechile alăturate ale unui paralelogram.

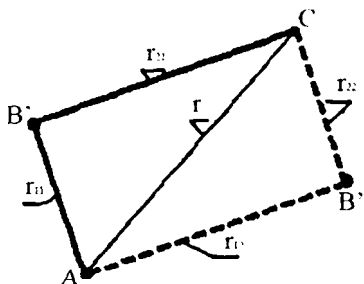


Figura 3.5: Elementele lanțurilor minimale plane distincte

Mai favorabil se comportă în sarcină lanțul pentru care $r_1 < r_2$, deoarece în această condiție femurul (care este elementul cel mai sollicitat), la aceeași secțiune, rezultă mai rigid. Pe aceste considerente convine alegerea primei soluții, care după omiterea celui de al doilea indice, se scrie conform relațiilor (3.19).

$$\begin{cases} r_1 = \frac{1}{2} * \sqrt{(r_{max}^2 + r_{min}^2) * (1 - p)} \\ r_2 = \frac{1}{2} * \sqrt{(r_{max}^2 + r_{min}^2) * (1 + p)} \end{cases} \quad (3.19)$$

Pentru aplicarea acestor relații în sinteza dimensională, convine exprimarea prealabilă a parametrului p în funcție de factorul de formă al secțiunii de generat, definit

prin relația (3.20).

$$f = \frac{h}{e} \quad (3.20)$$

Folosind relația (3.18), relația (3.20) devine:

$$f = \frac{r_2}{r_2} * \frac{\sin \beta_{max}}{\sin \alpha_{max}} \quad (3.21)$$

Pentru ușurarea tipizării cuplelor conducătoare se impune condiția (3.22).

$$\alpha_{max} = \beta_{max} \quad (3.22)$$

Combinând acum relațiile (3.19), (3.21) și (3.22), se deduce expresia (3.23).

$$f = \sqrt{\frac{1+p}{1-p}} \quad (3.23)$$

De unde rezultă apoi relația finală (3.24).

$$f = \frac{f^2 - 1}{f^2 + 1} \quad (3.24)$$

Se poate constata, că toate necunoscutele problemei de sinteza au fost exprimate în funcție de coordonatele de poziționare ale spațiului de lucru.

Cursele unghiulare ale elementelor fiind simetrice în raport cu dreptele de referință considerate (axele sistemului Ayz), ele pot fi determinate cu relațiile (3.25).

$$\begin{cases} \alpha_A = 2 * \alpha_{max} \\ \beta_B = 2 * \beta_{max} \end{cases} \quad (3.25)$$

3.4 Aplicația "DimLegJQuadRobot"

Metoda de sinteză propusă se abordează în următoarea ordine:

- cunoscând e_{min} , e_{max} , h_{min} și h_{max} din egalitățile (3.7) se determină e și h .
- factorul de forma f se determină din relația(3.20), iar parametrul p din relația(3.24)

- r_{min} și r_{max} se calculează folosind relațiile (3.14)
- lungimile, r_1 și r_2 , ale elementelor femur și tibie se determină cu relațiile (3.19), iar cursele unghiulare, α_A , β_B , cu relațiile (3.25)

Utilizând limbajul Java și API-ul Java3D, autoarea a dezvoltat pe baza algoritmului enunțat mai sus, aplicația "DimLegJRobo", cu ajutorul căreia se determină lungimile elementelor femur și tibie (r_1 , r_2), respectiv cursele unghiulare ale acestora (α_A , β_B).

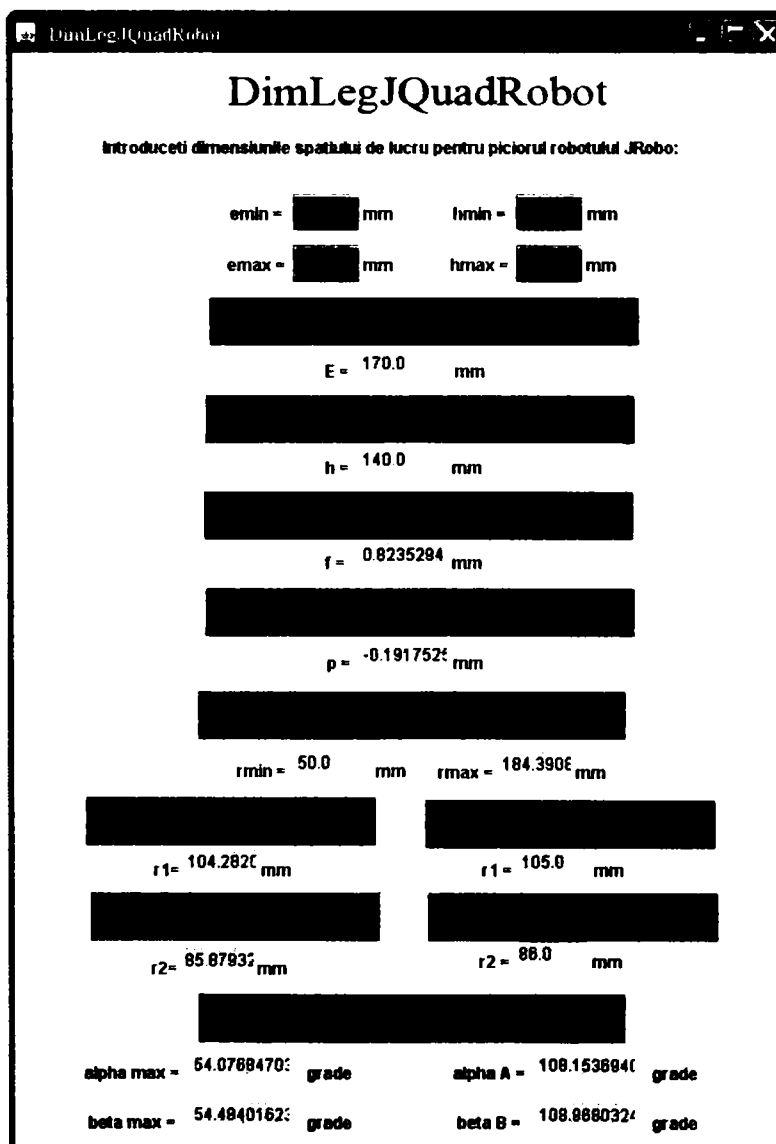


Figura 3.6: Screenshot - aplicația DimLegJQuadRobot

În figura 3.7 este prezentat spațiul de lucru al piciorului robotului mobil pășitor patruped JQuadRobot.

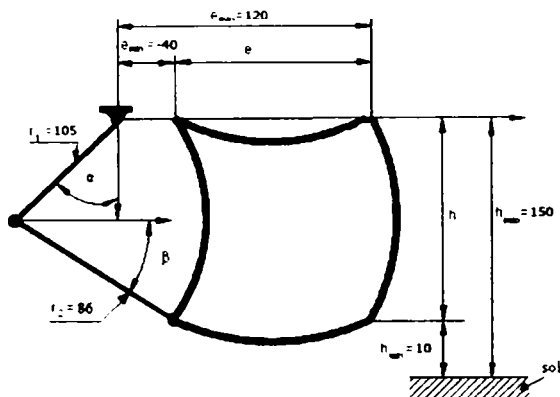


Figura 3.7: Spațiul de lucru al piciorului robotului pășitor patruped

3.5 Concluzii

Ținând cont de faptul că s-a urmărit conceperea unui robot pășitor de dimensiuni și greutate mici, s-a optat pentru un robot patruped cu o cât mai simplă structură. O schemă structurală prea complexă conduce la un cost ridicat al robotului (număr mare de motoare necesare), precum și la complicarea sistemului de control al deplasării acestuia. Pentru a se putea asigura o bună stabilitate robotului în timpul locomoției, numărul de grade de mobilitate al acestuia trebuie să fie minim 12. În cazul unui robot pășitor patruped, aceasta înseamnă că fiecare picior trebuie să aibă cel puțin 3 grade de mobilitate.

În acest capitol s-a realizat sinteza piciorului robotului patruped JQuadRobot. Aplicației "DimLegJQuadRobot", pe care autoarea a realizat-o utilizând limbajul Java și API-ul Java3D, are drept scop determinarea lungimile elementelor femur și tibie (r_1 , r_2), respectiv cursele unghiulare ale acestora (α_A , β_B), având ca date de intrare dimensiunile spațiului de lucru al piciorului.

Aplicația "DimLegJQuadRobot" este o contribuție originală a autoarei la îndeplinirea obiectivelor propuse.

Modelarea cinematică a piciorului robotului JQuadRobot

Prin modelare cinematică se soluționează două obiective (figura 4.1). Primul obiectiv este sinteza funcțiilor de comandă, despre care se admite că pot fi realizate tehnic cu o bună aproximație prin intermediul sistemelor de comandă. Al doilea obiectiv este sinteza legilor de mișcare ale centrelor de masă, cunoașterea acestora fiind impusă pentru determinarea torsesorilor forțelor masice în vederea analizei cinetostatice.

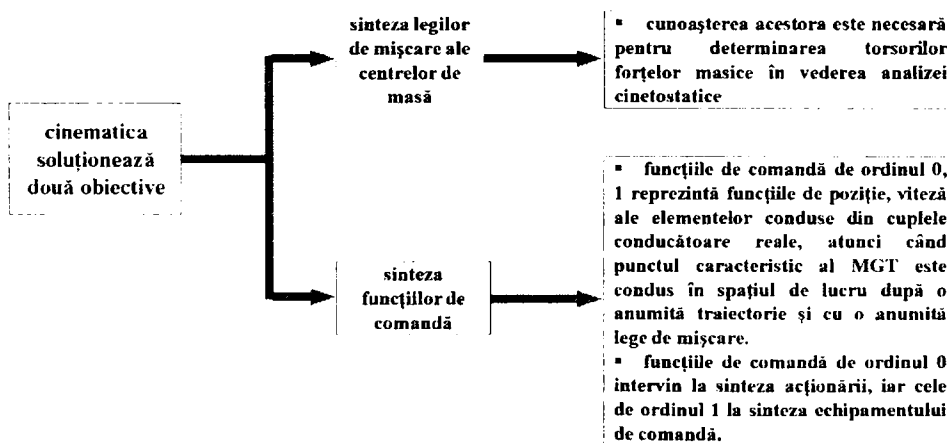


Figura 4.1: Obiectivele analizei cinematice

4.1 Analiza cinematică a piciorului robotului pășitor JQuadRobot

În acest caz vom considera piciorul drept mecanism generator de traiectorie (MGT). La mecanismul generator de traiectorie legile de mișcare nu sunt cunoscute inițial. Se poate impune însă legea de mișcare a punctului caracteristic, deoarece influențează asupra modului de pășire. Știind că punctul caracteristic aparține elementului condus și admitând legea sa de mișcare dată, rezultă că analiza cinematică a MGT trebuie efectuată în contrasens față de aceea cunoscută pentru mecanismele având elemente de intrare cu mișcare uniformă.

Analiza în contrasens este compatibilă datorită structurii MGT formată dintr-un lanț cinematic final (LCF) și un număr de conexiuni cu grad de libertate zero. Conexiunile $K_{C(0)}$ și transformările instantaneu izocinetice ale celor de tip $K_{B(0)}$ constituie grupe cinetice interpușe, prin cuplele exterioare, elementelor LCF. Acest fapt obligă abordarea direcționată a analizei cinetice, în contrasens, începând cu LCF și continuând cu conexiunile [35].

Pentru partea plană a MGT a unei structuri R II R II R (figura 4.2), cele stabilite mai sus se aplică în ordinea următoare:

- se identifică LCF, știind că acesta reprezintă lanțul cinematic deschis cel mai simplu care conține la o extremitate punctul caracteristic C și la cealaltă extremitate platforma
- elementele și cuplele neconținute în LFC se grupează în grupe cinematice pornind din C și până se includ toate
- exprimarea funcțiilor de poziție, de viteză și de accelerație ale punctului caracteristic printr-o lege de mișcare
- sinteza funcțiilor de pseudocomandă (corespunzătoare cuplelor A și B) de ordinul 0, 1, 2 prin analiza cinematică a LCF
- sinteza funcțiilor de comandă (corespunzătoare cuplelor motoare reale) de ordinul 0 și 1 prin analiză cinematică

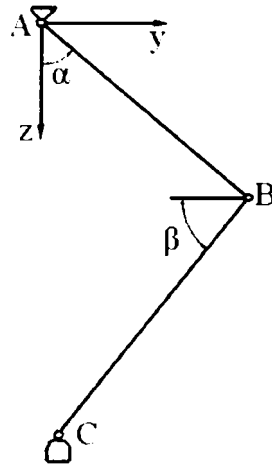
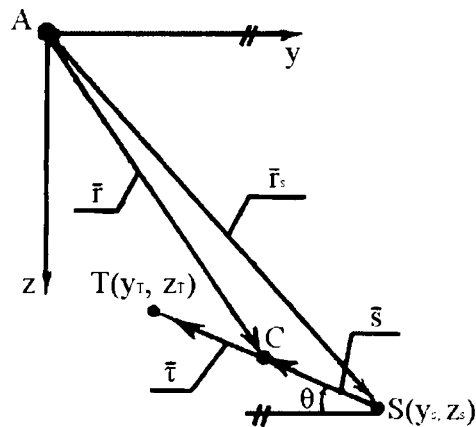


Figura 4.2: MGT cu structură R II R II R

4.2 Exprimarea funcțiilor de poziție, viteză și accelerație printr-o lege de mișcare

Se consideră deplasarea punctului caracteristic $C(y, z)$ în secțiunea mediană a spațiului de lucru (conținută în planul Ayz), după traiectoria rectiliniară delimitată de punctele start $S(y_S, z_S)$ și țintă $T(y_T, z_T)$ de coordonate cunoscute (figura 4.3) [81].

Figura 4.3: Secțiunea mediană a spațiului de lucru (conținută în planul Ayz)

Ecuția vectorială a traiectoriei este dată de relația (4.1).

$$\vec{r} = \vec{r}_s + \vec{s} \quad (4.1)$$

unde s este legea de mișcare intrinsecă pe direcția de versor τ exprimată prin relația (4.2).

$$\bar{s} = s(t) * \bar{\tau} \quad (4.2)$$

Din (4.1) rezultă funcțiile de poziție, de viteză și de accelerație (relațiile (4.3), (4.4), (4.5)).

$$\begin{cases} y = y_s + s * \cos \theta \\ z = z_s + s * \sin \theta \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\begin{cases} \dot{y} = \dot{s} * \cos \theta \\ \dot{z} = \dot{s} * \sin \theta \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\begin{cases} \ddot{y} = \ddot{s} * \cos \theta \\ \ddot{z} = \ddot{s} * \sin \theta \end{cases} \quad (4.5)$$

Unghiul θ este unghiul de pantă a traiectoriei exprimat prin relația (4.6) și se determină prin condiții de limită.

$$\theta = \operatorname{atan} \left[\frac{z_f - z_i}{y_i - y_f} \right] \quad (4.6)$$

Acceptând o lege de mișcare cu accelerație constantă, în intervalul de timp t_a :

$$t_a = (1 - k) * \frac{T_t}{2} \quad (4.7)$$

de la start și înainte de țintă are loc accelerarea, respectiv încetinirea mișcării pe o lungime egală de fiecare dată cu:

$$h_a = \frac{h}{2} * \frac{1 - k}{1 + k} \quad (4.8)$$

unde h este distanța start - țintă.

$$h = \sqrt{(y_f - y_i)^2 + (z_f - z_i)^2} \quad (4.9)$$

Durata totală a mișcării cu viteză medie v_m (care se impune) se calculează cu relația (4.10).

$$t_t = \frac{h}{v_m} \quad (4.10)$$

Ponderea duratei mișcării stabilizate din durata totală se calculează cu relația (4.11).

$$k = \frac{T_t - 2 * t_a}{T_t} \quad (4.11)$$

Cu notațiile de mai sus, legea spațiului, a vitezei și a accelerației au expresiile din tabelul de mai jos.

Faza	Durata	$s[mm]$	$\dot{s}[mm/s]$	$\ddot{s}[mm/s^2]$
Accelerată	$[0, t_a]$	$\left(\frac{h_a}{t_a^2}\right) * t^2$	$2 * \left(\frac{h_a}{t_a} * t\right)$	$\frac{h_a}{t_a^2}$
Stabilizată	$[t_a, T_t - t_a]$	$h_a + 2 * \frac{h_a}{t_a} * (t - t_a)$	$2 * \frac{h_a}{t_a}$	0
Încetinită	$[T_t - t_a, T_t]$	$h - \frac{h_a}{t_a^2} * (T_t - t)$	$2 * \frac{h_a}{t_a} * (T_t - t)$	$-2 * \frac{h_a}{t_a^2}$

4.3 Sinteza funcțiilor de pseudocomandă

Funcțiile de pseudocomandă de ordinul 0, 1, 2, reprezintă funcțiile de poziție, viteză, accelerație (în acest caz unghiulare) ale elementelor LCF atunci când punctul caracteristic al MGT este condus în spațiul de lucru după o anumită traiectorie și cu o anumită lege de mișcare (putând fi în particular și în repaus) [81].

Importanța cinematică a funcțiilor de pseudocomandă constă în aceea că prin

intermediul lor se determină starea de mișcare a oricărui element al MGT. Pentru sinteza acestor funcții se vor utiliza notațiile din figura 4.4.

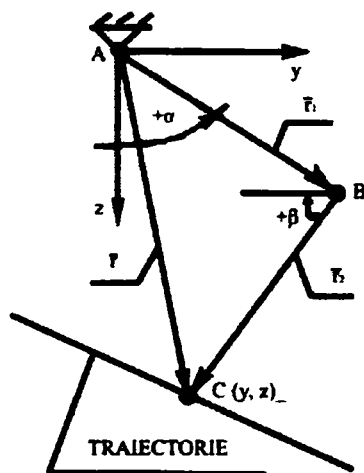


Figura 4.4: Mișcarea punctului caracteristic în spațiu după o traiectorie

Lungimile r_1 și r_2 ale elementelor LCF se consideră determinate din sinteza geometrică. Unghiurile α și β (care sunt funcțiile de pseudocomandă de ordin 0), se presupun pozitive dacă ele poziționează femurul 1, respectiv tibia 2, în sens antiorar față de axa Az , respectiv Ay .

Componentele ecuației de contur (relația 4.12) pe cele două axe sunt date de relația (4.13).

$$\bar{r} = \bar{r}_1 + \bar{r}_2 \quad (4.12)$$

$$\begin{cases} y = r_1 * \sin \alpha - r_2 * \cos \beta \\ z = r_1 * \cos \alpha + r_2 * \sin \beta \end{cases} \quad (4.13)$$

Acest sistem de două ecuații trigonometrice este compatibil în raport cu necunoscutele α și β . Pentru soluționarea sistemului (4.13) se algebrizează ecuațiile sale, substituind în ele $\cos \alpha$ și $\cos \beta$ (relația 4.14).

$$\begin{cases} \cos^2 \alpha = 1 - \sin^2 \alpha \\ \cos^2 \beta = 1 - \sin^2 \beta \end{cases} \quad (4.14)$$

Ridicându-le la pătrat și ordonându-le în forma dată de relația (4.15)

$$\begin{cases} r_1^2 * \sin^2 \alpha + r_2^2 * \sin^2 \beta = r_2^2 - y^2 - 2 * y * r_1 * \sin \alpha \\ r_1^2 * \sin^2 \alpha + r_2^2 * \sin^2 \beta = r_1^2 - z^2 - 2 * z * r_2 * \sin \alpha \end{cases} \quad (4.15)$$

iar apoi, făcând schimbarea de variabile (relația (4.16)) se obține relația (4.17).

$$\begin{cases} u = r_1 \sin \alpha \\ v = r_2 \sin \beta \end{cases} \quad (4.16)$$

$$\begin{cases} u^2 + v^2 = r_2^2 - y^2 - 2 * y * u \\ u^2 + v^2 = r_1^2 - z^2 - 2 * z * v \end{cases} \quad (4.17)$$

Sistemul (4.17) de două ecuații, fiecare de gradul doi în u și v , are două perechi de soluții prezentate în relațiile (4.18) și (4.32).

$$\begin{cases} v_1 = \frac{b}{a} - \sqrt{\left(\frac{b^2}{a^2}\right) - \frac{c}{a}} \\ u_1 = -\frac{z}{y} * v_1 + (z^2 - y^2 + r_2^2 - r_1^2) * \frac{1}{2 * y} \end{cases} \quad (4.18)$$

$$\begin{cases} v_2 = \frac{b}{a} + \sqrt{\left(\frac{b^2}{a^2}\right) - \frac{c}{a}} \\ u_2 = -\frac{z}{y} * v_2 + (z^2 - y^2 + r_2^2 - r_1^2) * \frac{1}{2 * y} \end{cases} \quad (4.19)$$

În relațiile (4.18) și (4.32) s-au făcut notațiile:

$$\begin{cases} a = 1 + \frac{z^2}{y^2} \\ b = z * \left[1 + \frac{z^2 - y^2 + r_2^2 - r_1^2}{2 * y^2} \right] \\ c = \left[\frac{z^2 - y^2 + r_2^2 - r_1^2}{2 * y^2} \right]^2 + z^2 - r_1^2 \end{cases} \quad (4.20)$$

Fiecărei perechi de valori (v_i, u_i) , $i = 1, 2$ îi corespunde după relația (4.16) câte un dublet de unghiuri, reprezentând soluțiile sistemului (4.13).

$$\begin{cases} \alpha_1 = \arcsin\left(\frac{u_1}{r_1}\right) \\ \beta_1 = \arcsin\left(\frac{v_1}{r_2}\right) \end{cases} \quad (4.21)$$

respectiv:

$$\begin{cases} \alpha_2 = \arcsin\left(\frac{u_2}{r_1}\right) \\ \beta_2 = \arcsin\left(\frac{v_2}{r_2}\right) \end{cases} \quad (4.22)$$

În planul Ayx, celor două dublete de unghiuri le corespund poziții simetrice ale elementelor LCF în raport cu linia AC. Se observă că:

$$\begin{cases} |\alpha_1| \leq |\alpha_2| \\ |\beta_1| \leq |\beta_2| \end{cases} \quad (4.23)$$

Soluțiile tehnic favorabile sunt cele corespunzătoare unghiurilor mai mici în valoare absolută. De aceea funcțiile de pseudocomandă de ordinul zero au expresiile (4.24).

$$\begin{cases} \alpha_1 = \arcsin\left(\frac{u_1}{r_1}\right) \\ \beta_1 = \arcsin\left(\frac{v_1}{r_2}\right) \end{cases} \quad (4.24)$$

Funcțiile de pseudocomandă de ordinul 1, $\dot{\alpha}$ și $\dot{\beta}$ se determină din derivatele în raport cu timpul ale ecuațiilor (4.13).

$$\begin{cases} \dot{y} = -r_1 * \dot{\alpha} * \cos \alpha - r_2 * \dot{\beta} * \sin \beta \\ \dot{z} = -r_1 * \dot{\alpha} * \sin \alpha + r_2 * \dot{\beta} * \cos \beta \end{cases} \quad (4.25)$$

Deoarece \dot{y} și \dot{z} , respectiv α și β sunt determinate prin (4.3) și (4.24), având valori constante la un moment dat, ecuațiile (4.25) constituie un sistem Cramer cu două necunoscute $\dot{\alpha}$ și $\dot{\beta}$, compatibil. Soluțiile acestui sistem sunt date de relațiile (4.26).

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = -\frac{\dot{y} * \cos \beta + \dot{z} * \sin \beta}{r_1 * \cos(\alpha - \beta)} \\ \dot{\beta} = \frac{\dot{y} * \sin \alpha + \dot{z} * \cos \alpha}{r_2 * \cos(\alpha - \beta)} \end{cases} \quad (4.26)$$

La fel pot fi determinate și accelerațiile unghiulare $\ddot{\alpha}$ și $\ddot{\beta}$, adică funcțiile de pseudocomandă de ordinul doi, derivând încă odată relația (4.25):

$$\begin{cases} \ddot{y} = r_1 * \ddot{\alpha} * \cos \alpha - r_2 * \ddot{\beta} * \sin \beta \\ \ddot{z} = r_1 * \ddot{\alpha} * \sin \alpha + r_2 * \ddot{\beta} * \cos \beta \end{cases} \quad (4.27)$$

și soluționând pentru noile necunoscute ecuațiile (4.28).

$$\begin{cases} \ddot{\alpha} = -\frac{\ddot{y} * \cos \beta + \ddot{z} * \sin \beta - r_1 * \dot{\alpha}^2 * \sin(\alpha - \beta) + r_2 * \dot{\beta}^2}{r_1 * \cos(\alpha - \beta)} \\ \ddot{\beta} = -\frac{-\ddot{y} * \sin \alpha + \ddot{z} * \cos \alpha - r_2 * \dot{\beta}^2 * \sin(\alpha - \beta) + r_1 * \dot{\alpha}^2}{r_2 * \cos(\alpha - \beta)} \end{cases} \quad (4.28)$$

Pe baza celor prezentate, calculul numeric al funcțiilor de pseudocomandă se abordează după următorul algoritm. Se impune timpul $t : [0, T_t]$ pentru care se calculează valorile funcțiilor amintite. Cu relațiile din tabelul 3.1 se determină s , \dot{s} și \ddot{s} , apoi din (4.6) se obține unghiul de pantă al traiectoriei θ . Pe baza acestor valori din (4.3) se stabilesc coordonatele y și z , componentele \dot{y} și \dot{z} ale vitezei, respectiv \ddot{y} și \ddot{z} ale accelerației

punctului caracteristic. În continuare folosind (4.20) se calculează coeficienții a, b, c , care înlocuiți în (4.18) determină valorile lui v_1 și u_1 . În final din (4.24) se stabilesc valorile pentru α și β , din (4.26) cele pentru $\dot{\alpha}$ și $\dot{\beta}$, iar din (4.28) acelea pentru $\ddot{\alpha}$ și $\ddot{\beta}$ [60].

Dacă este necesară cunoașterea funcțiilor de pseudocomandă pentru o succesiune de poziții prin care trec elementele LCF între două puncte start - țintă date, calculul de mai sus se repetă iterativ dând lui t creșteri de pas dorite pe intervalul de definiție.

4.4 Sinteza funcțiilor de comandă

Funcțiile de comandă de ordinul 0, 1 reprezintă funcțiile de poziție, viteză ale elementelor conduse din cuplele conducătoare reale, atunci când punctul caracteristic al MGT este condus în spațiul de lucru după o anumită traiectorie și cu o anumită lege de mișcare (putând fi în particular și în repaus).

Funcțiile de comandă de ordinul zero intervin la sinteza acționării, iar cele de ordinul unu la sinteza echipamentului de comandă.

Funcțiile de comandă se determină prin analiza cinematică a acelor conexiuni interpușe elementelor LCF în care se încadrează cuplele conducătoare reale. Datele de intrare la această fază sunt funcțiile de pseudocomandă și dimensiunile schemei cinematische.

4.5 Algoritm pentru configurarea sistemului de locomoție

După cum s-a arătat în capitolul 2, fiecărei secvențe de mișcare a robotului pășitor îi corespunde un anumit poligon de sprijin. Nu se poate trece la efectuarea unei secvențe de mișcare noi, fără a aduce în prealabil punctul de contact al tălpi unora dintre picioare cu solul în vârfurile poligonului de sprijin necesar. Formarea poligonului de sprijin dorit se numește configurarea sistemului de locomoție. În cele ce urmează se prezintă un algoritm pentru configurarea sistemului de locomoție la roboții pășitori preluat din [80].

La trecerea din configurația de staționare la cea de luarea unui viraj sau start pentru pășire și invers, mișcările picioarelor implicate în operația de configurare sunt similare acelor care efectuează un pas, dar picioarele lăsate ca suport se mențin blocate pentru a nu modifica situarea șasiului în timpul operației. Rutinele elaborate pentru implementarea în programul de conducere a operațiilor de configurare au la bază modelul

geometric invers al piciorului.

Sistemul de referință Ayz se alege cu originea în articulația de șold, cu axa Ay orientată în sensul deplasării șasiului (figura 4.5).

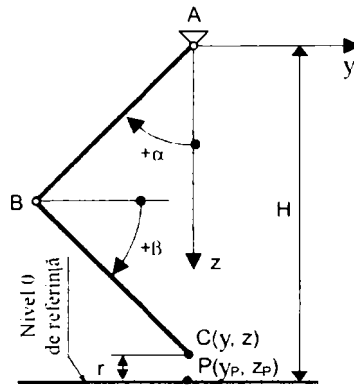


Figura 4.5: Configurarea piciorului prin modelul geometric invers

În modelul geometric invers vârfurile $P(y_P, z_P)$ ale poligoanelor de sprijin se presupun definite. Necunoscute sunt unghiurile de orientare α și β ale femurului și tibiei. Ele se determină pentru punctul caracteristic $C(y, z)$ al piciorului, poziționat pe verticala prin punctul de sprijin de realizat în P, la înălțimea r față de nivelul 0. Nivelul 0 este considerat unul de referință, care se alege convenabil sub articulația de șold la distanța H . Unghiurile α și β se determină cu relațiile (4.24), în care u și v se înlocuiesc cu expresiile (4.18), coeficienții a , b și c cu (4.20), iar coordonatele punctului C se determină cu relațiile (4.29).

$$\begin{cases} y = y_P \\ z = z_P - r = H - r \end{cases} \quad (4.29)$$

Pe durata configurării punctul caracteristic al piciorului parcurge o traiectorie fragmentată (figura 4.6). Traiectoria are punctul de start C_1 și punctul țintă C_2 în pozițiile succesive ale extremității piciorului înainte și după configurare. Traiectoria fragmentată conține un segment de ridicare C_1Q_1 , unul de deplasare orizontală Q_1Q_2 și unul de coborâre Q_2C_2 .

Coordonatele punctelor start-țintă se determină cu relațiile (4.18) pornind de la coordonatele cunoscute ale punctelor de sprijin P_1 și P_2 între care se propune tranziția, iar coordonatele punctelor Q_1 și Q_2 se obțin din primele, printr-o translație de axe cu

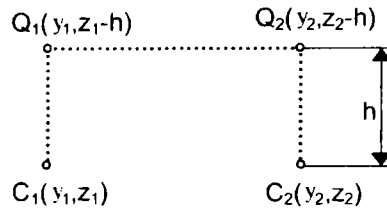


Figura 4.6: Traietorie de configurare fragmentată

înălțimea aleasă h , așa cum s-a redat în desen.

Algoritmul prezentat furnizează pentru fiecare pereche de coordonate, câte o pereche de unghiuri. Cu cele patru perechi $(\alpha_{C1}, \beta_{C1})$, $(\alpha_{C2}, \beta_{C2})$, $(\alpha_{Q1}, \beta_{Q1})$ și $(\alpha_{Q2}, \beta_{Q2})$ se definesc cursele unghiulare necesare de efectuat în articulațiile de șold și de genunchi (relațiile (4.30)) în scopul reconfigurării considerate a sistemului. Relații similare cu (4.30) stau la baza tuturor rutinelor de configurare, cu care operează programul la schimbarea regimului de mers.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\alpha_{C1Q1} = \alpha_{Q1} - \alpha_{C1} \\ \Delta\beta_{C1Q1} = \beta_{Q1} - \beta_{C1} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\alpha_{Q1Q2} = \alpha_{Q2} - \alpha_{Q1} \\ \Delta\beta_{Q1Q2} = \beta_{Q2} - \beta_{Q1} \end{array} \right. \quad (4.30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\alpha_{Q2C2} = \alpha_{C2} - \alpha_{Q2} \\ \Delta\beta_{Q2C2} = \beta_{C2} - \beta_{Q2} \end{array} \right.$$

În cazul deplasării prin pășire, sistemul se reconfigurează în mod continuu. Procesul depinde atât de mișcările executate de piciorul care pășește cât și de mișcările picioarelor de suport. Pentru formularea algoritmului, care să permită includerea acestor influențe în rutina de conducere, se descompune traiectoria extremității piciorului față de șasiu în două ramuri. În prima ramură se reține partea aferentă pășirii, iar în a doua, cea aferentă fazei de suport. Operația se denumește segmentare grosolană și este ilustrată în figura (4.7a).

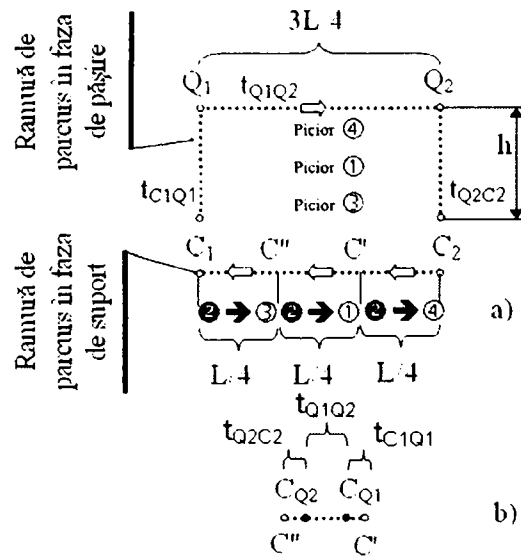


Figura 4.7: Descompunerea traiectoriei de mers în pas: a) - segmentare grosolană b) - segmentare fină

Ramura de traiectorie parcursă la pășire, conține aceleași segmente C_1Q_1 , Q_1Q_2 , Q_2C_2 , ca și traiectoria de configurare discutată pentru cazul suporturilor imobili. Ca urmare, mișcările aferente acestei ramuri pot fi comandate tot prin rutine bazate pe algoritmul descris anterior.

Ramura de traiectorie din faza de suport (segmentul C_2C_1), se parcurge în trei secvențe. În faza de suport a piciorului 2 prima secvență corespunde intervalului C_2C' - când pășește piciorul 4, a doua secvență corespunde intervalului $C'C''$ - când pășește piciorul 1, iar a treia secvență corespunde intervalului $C''C_1$ - când pășește piciorul 3.

Pentru a asigura o deplasare cât mai lină, după segmentarea grosolană se prevede o segmentare fină (figura (4.7b)). Prin această operație se urmărește divizarea fiecărui segment de suport component în subintervale, spre exemplu $C'C_{Q1}$, $C_{Q1}C_{Q2}$, $C_{Q2}C''$, având lungimile proporționale cu cele ale segmentelor C_1Q_1 , Q_1Q_2 , Q_2C_2 de pe ramura de pășire. În acord cu regula duratelor, pentru lungimile subintervalor se obțin relațiile (4.31).

$$\begin{cases} l_{C'C_{Q1}} = l_{C_{Q2}C''} = \frac{h * L}{8 * H + 3 * L} \\ l_{C_{Q1}C_{Q2}} = \frac{L}{4} - 2 * \frac{h * L}{8 * H + 3 * L} \end{cases} \quad (4.31)$$

Aceste relații permit calculul coordonatelor punctelor intermediare C_{Q1} și C_{Q2} , cu care intrând în algoritmul problemei geometrice inverse se deduc cursele articulare necesare corelării mișcărilor unui picior de suport cu mișcările altuia care pășește.

Faptul, că la deplasarea prin pășire mișcările se repetă ciclic, permite prede-terminarea curselor articulare pentru întreaga durată a ciclului, odată pentru totdeauna off-line și memorarea rezultatelor în baza de date. În acest caz, inițierea comenzilor pentru deplasarea prin pășire revine la citirea repetitivă a bazei de date și trimiterea informațiilor de mișcare la reglatoarele de axe spre execuție.

4.6 Determinarea variației centrului de masă al robo- tului JQuadRobot

La deplasarea roboților pășitori pe terenuri accidentate, presărate cu numeroase obstacole există pericolul ca poziția acestor roboți să nu fie stabilă. Pierderea stabilității unui robot pășitor poate să se producă în două situații:

1. proiecția verticală a centrului de masă al robotului în totalitate (corp, picioare, sistem de comandă, sistem de acționare, sarcină transportată, etc.) nu se găsește în interiorul poligonului de sprijin. În această situație robotul se răstoarnă, rotindu-se în jurul axei care unește două puncte de sprijin, cele mai apropiate de proiecția verticală a centrului de masă. Această situație este echivalentă cu situația în care proiecția verticală a centrului de masă al întregului picior nu se găsește în interiorul suprafeței de contact dintre talpă și teren.
2. componentele tangențiale ale forțelor de reacțiune din punctele de sprijin, care sunt cuprinse în plane tangente suprafețelor de sprijin, sunt mai mari decât forțele de frecare din aceste puncte, dintre teren și suprafețele picioarelor

Pentru evitarea pozițiilor instabile ale robotului JQuadRobot, este necesară de-terminarea în fiecare moment a poziției centrului de masă al piciorului robotului în raport cu un sistem de referință atașat corpului robotului, respectiv determinarea în fiecare mo-ment a poziției centrului de masă al robotului în raport cu un sistem de referință fix solidarizat cu terenul.

În figura 4.8 este prezentată schema cinematică a piciorului robotului JQuadRobot. În centrul cupei de rotație A s-a atașat sistemul de axe de referință Oyz, față de care s-a calculat poziția centrului de masă al piciorului.

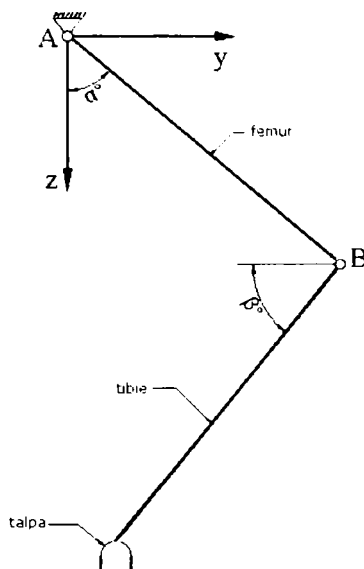


Figura 4.8: Schema cinematică a piciorului robotului JQuadRobot

Poziția, viteza și accelerația centrului de masă pentru femur se calculează cu ajutorul relațiilor 4.32.

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{m1}(t) = \frac{-r_1 \cdot \sin(\alpha(t))}{2} \\ z_{m1}(t) = \frac{r_1 \cdot \cos(\alpha(t))}{2} \\ y'_{m1}(t) = \frac{-r_1 \cdot \alpha'(t) \cdot \cos(\alpha(t))}{2} \\ z'_{m1}(t) = \frac{-r_1 \cdot \alpha'(t) \cdot \sin(\alpha(t))}{2} \\ y''_{m1}(t) = \frac{r_1 \cdot \left((\alpha'(t))^2 \cdot \sin(\alpha(t)) - (\alpha(t))^2 \cdot \cos(\alpha(t)) \right)}{2} \\ z''_{m1}(t) = \frac{r_1 \cdot \left((\alpha(t))^2 \cdot \sin(\alpha(t)) + (\alpha'(t))^2 \cdot \cos(\alpha(t)) \right)}{2} \end{array} \right. \quad (4.32)$$

Pozitia, viteza și accelerația centrului de masă pentru tibie se calculează cu ajutorul relațiilor 4.33.

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{m2}(t) = -r_1 \cdot \sin(\alpha(t)) + \frac{r_2 \cdot \cos(\beta(t))}{2} \\ z_{m2}(t) = r_1 \cdot \cos(\alpha(t)) + \frac{r_2 \cdot \sin(\beta(t))}{2} \\ y'_{m2}(t) = -r_1 \cdot \alpha'(t) \cdot \cos(\alpha(t)) - \frac{r_2 \cdot \beta'(t) \cdot \sin(\beta(t))}{2} \\ z'_{m2}(t) = -r_1 \cdot \alpha'(t) \cdot \sin(\alpha(t)) + \frac{r_2 \cdot \beta'(t) \cdot \cos(\beta(t))}{2} \\ y''_{m2}(t) = w_{y''} - \frac{r_2 \cdot \left((\beta''(t)) \cdot \sin(\beta(t)) + (\beta'(t))^2 \cdot \cos(\beta(t)) \right)}{2} \\ z''_{m2}(t) = w_{z''} + \frac{r_2 \cdot \left((\beta''(t)) \cdot \cos(\beta(t)) - (\beta'(t))^2 \cdot \sin(\beta(t)) \right)}{2} \end{array} \right. \quad (4.33)$$

unde $w_{y''}$ și $w_{z''}$ au expresiile 4.34.

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{y''} = r_1 \cdot \left[\alpha''(t) \cdot \cos(\alpha(t)) + (\alpha'(t))^2 \cdot \sin(\alpha(t)) \right] \\ w_{z''} = -r_1 \cdot \left[\alpha''(t) \cdot \sin(\alpha(t)) + (\alpha'(t))^2 \cdot \cos(\alpha(t)) \right] \end{array} \right. \quad (4.34)$$

Poziția, viteza și accelerația centrului de masă pentru talpă se calculează cu ajutorul relațiilor 4.35.

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{m3}(t) = y(t) + r_3 \cdot \cos(\gamma) \\ z_{m3}(t) = z(t) + r_1 \cdot \sin(\gamma) \\ y'_{m3}(t) = y'(t) \\ z'_{m3}(t) = z'(t) \\ y''_{m3}(t) = y''(t) \\ z''_{m3}(t) = z''(t) \end{array} \right. \quad (4.35)$$

Poziția, viteza și accelerația centrului de masa pentru picior se calculează cu ajutorul relațiilor 4.36.

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{Gp}(t) = \frac{m_1 \cdot y_{m1}(t) + m_2 \cdot y_{m2}(t) + m_3 \cdot y_{m3}(t)}{m_{Gp}} \\ z_{Gp}(t) = \frac{m_1 \cdot z_{m1}(t) + m_2 \cdot z_{m2}(t) + m_3 \cdot z_{m3}(t)}{m_{Gp}} \\ y'_{Gp}(t) = \frac{m_1 \cdot y'_{m1}(t) + m_2 \cdot y'_{m2}(t) + m_3 \cdot y'_{m3}(t)}{m_G} \\ z'_{Gp}(t) = \frac{m_1 \cdot z'_{m1}(t) + m_2 \cdot z'_{m2}(t) + m_3 \cdot z'_{m3}(t)}{m_{Gp}} \\ y''_{Gp}(t) = \frac{m_1 \cdot y''_{m1}(t) + m_2 \cdot y''_{m2}(t) + m_3 \cdot y''_{m3}(t)}{m_{Gp}} \\ z''_{Gp}(t) = \frac{m_1 \cdot z''_{m1}(t) + m_2 \cdot z''_{m2}(t) + m_3 \cdot z''_{m3}(t)}{m_{Gp}} \end{array} \right. \quad (4.36)$$

Poziția centrului de masa al robotului în totalitate, în raport cu sistemul de axe coordonate de referință $O_0x_0y_0z_0$ atașat corpului robotului (originea sistemul se consideră în mijlocul platformei) se calculează cu ajutorul relațiilor 4.37.

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{Gr}(t) = \frac{m_0 * x_{G0} + \sum_{i=1}^4 (m_{pi} * x_{Gpi})}{\sum_{i=1}^4 (m_{pi})} \\ y_{Gr}(t) = \frac{m_0 * y_{G0} + \sum_{i=1}^4 (m_i * y_{Gpi})}{\sum_{i=1}^4 (m_{pi})} \\ z_{Gr}(t) = \frac{m_0 * z_{G0} + \sum_{i=1}^4 (m_i * z_{Gpi})}{\sum_{i=1}^4 (m_{pi})} \end{array} \right. \quad (4.37)$$

4.7 Rezultate experimentale

Traectoria descrisă de punctul caracteristic de la nivelul gleznei este prezentată în figura (4.7). Pe intervalul C_1Q_1 și Q_2C_2 punctul caracteristic se deplasează pe verticală 30 mm și avem o lege de mișcare cu accelerație constantă, iar pe intervalul Q_1Q_2 punctul caracteristic se deplasează pe orizontală 100 mm avem o lege de mișcare cu accelerație constantă cu valoare diferită față de situația anterioară. Programul de calcul, realizat cu ajutorul softului MathCad se prezintă în cele ce urmează. Programul realizat în MathCad, a fost salvat în format "*htm" (*HTML/MathML File for IBM Techeplorer*) și convertit în Latex cu ajutorul softului gratis *MathParser056* [71], [95].

Modelarea cinematică a piciorului robotului JQuadRobot

Date inițiale:

$$e_{min} := -50 \cdot mm$$

$$e_{max} := 120 \cdot mm$$

$$h_{min} := 10 \cdot mm$$

$$h_{max} := 150 \cdot mm$$

$$r_1 := 105 \cdot mm$$

$$r_2 := 86 \cdot mm$$

$$r_3 := 30 \cdot mm$$

$$\beta_{max} := 54.48 \cdot deg$$

$$\alpha_{max} := 54.07 \cdot deg$$

- **Exprimarea funcțiilor de poziție, de viteză și de accelerație printr-o lege de mișcare cu accelerație constantă pentru deplasarea pe verticală (C_1Q_1 și Q_2C_2) a punctului caracteristic de la nivelul gleznei**

Coordonatele punctului caracteristic în poziția inițială sunt:

$$y_i := -40 \cdot mm$$

$$z_i := 30 \cdot mm$$

Coordonatele punctului caracteristic în poziția finală sunt:

$$y_f := 40 \cdot mm$$

$$z_f := 60 \cdot mm$$

Lungimea traiectoriei descrisă de punctul caracteristic este:

$$h := \sqrt{(y_f - y_i)^2 + (z_f - z_i)^2}$$

$$h = 30 \cdot mm$$

Determinarea vitezei medii de ridicare

Lungimea pasului de pășire

$$L_p := 0.1 \cdot m$$

Segmentul $C'C_{Q1}$ care apare în urma segmentării fine are următoarea lungime:

$$l_{C'C_{Q1}} := \frac{h \cdot L_p}{8 \cdot h + 3 \cdot L_p}$$

$$l_{C'C_{Q1}} = 5.55556 \cdot mm$$

Viteza de deplasare a platformei este:

$$v_p := 1 \cdot kph$$

Viteza medie de ridicare are următoarea valoare:

$$v_{mr} := \frac{h \cdot v_p}{l_{C'C_{Q1}}}$$

$$v_{mr} = 1.5 \cdot m \cdot s^{-1}$$

Determinarea intervalului de timp total pe care are loc mișcarea

$$T_t := \frac{h}{v_{mr}}$$

$$T_t = 0.02 \cdot s$$

Determinarea unghiului de pantă a traiectoriei

$$dy := y_f - y_i$$

$$dy = 0 \cdot mm$$

$$dz := z_f - z_i$$

$$dz = 30 \cdot mm$$

Deoarece $dy=0$ și $dz<0$ vom considera următoarea valoare pentru θ :

$$\theta := 270 \cdot deg$$

Determinarea lungimii de accelerare, respectiv de încetinire

$$h_a := 0.5 \cdot h$$

$$h_a = 0.015 \cdot m$$

Determinarea coeficientului de pondere a duratei mișcării stabilizate din durata totală

$$k := \frac{h - 2 \cdot h_a}{h + 2 \cdot h_a}$$

$$k = 0$$

Determinarea intervalului de timp pe care are loc accelerarea, respectiv încetinirea mișcării

$$t_a := (1 - k) \cdot \frac{T_t}{2}$$

$$t_a = 0.01 \cdot s$$

Determinarea intervalului de timp pe care avem viteză constantă

$$t_{vc} := T_t - 2 \cdot t_a$$

$$t_{vc} = 0$$

Acceptând o lege de variație cu accelerație constantă , vom avea următoarele expresii pentru legea spațiului, a vitezei și a accelerației.

$$s = \begin{cases} \left(\frac{h_a}{t_a^2}\right) t^2 & \text{if } 0 < t < t_a \\ h_a + 2 \left(\frac{h_a}{t_a}\right) (t - t_a) & \text{if } t_a < t < (T_t - t_a) \\ h - \left(\frac{h_a}{t_a^2}\right) (T_t - t)^2 & \text{if } (T_t - t_a) < t < T_t \end{cases}$$

$$v = \begin{cases} 2 \cdot \left(\frac{h_a}{t_a^2}\right) \cdot t & \text{if } 0 < t < t_a \\ 2 \cdot \frac{h_a}{t_a} & \text{if } t_a < t < (T_t - t_a) \\ 2 \cdot \left(\frac{h_a}{t_a^2}\right) \cdot (T_t - t) & \text{if } (T_t - t_a) < t < T_t \end{cases}$$

$$a = \begin{cases} 2 \cdot \left(\frac{h_a}{t_a^2}\right) & \text{if } 0 < t < t_a \\ 0 & \text{if } t_a < t < (T_t - t_a) \\ -2 \cdot \frac{h_a}{t_a^2} & \text{if } (T_t - t_a) < t < T_t \end{cases}$$

Considerăm pasul de ciclare ca fiind de 0.0005.

$$t := 0, 0.0005128..0.02$$

Valorile pentru spațiu, viteza și accelerație punctului caracteristic de la nivelul gleznei pentru deplasarea pe verticală sunt prezentate în tabela 4.1.

În figura 4.9 se prezintă dependența spațiului, vitezei și accelerației de timp pentru deplasarea pe verticală (C_1Q_1 și C_2Q_2) a punctului caracteristic de la nivelul gleznei [95].

t = [s]	s(t)=[m]	v(t) = [m/s]	a(t) = [m/s ²]
0	0	0	1100
0.00051	0.000145	0.56408	1100
0.00103	0.000579	1.12816	1100
0.00154	0.001302	1.69224	1100
0.00205	0.002314	2.25632	1100
0.00256	0.003616	2.8204	1100
0.00308	0.005207	3.38448	1100
0.00359	0.007087	3.94856	1100
0.0041	0.009256	4.51264	1100
0.00462	0.011715	5.07672	1100
0.00513	0.014463	5.6408	1100
0.00564	0.0175	6.20488	1100
0.00615	0.020827	6.76896	1100
0.00667	0.024442	7.33304	1100
0.00718	0.028348	7.89712	1100
0.00769	0.032542	8.4612	1100
0.0082	0.037025	9.02528	1100
0.00872	0.041798	9.58936	1100
0.00923	0.04686	10.15344	1100
0.00974	0.052211	10.71752	1100
0.01026	0.05778	10.7184	-1100
0.01077	0.063132	10.15432	-1100
0.01128	0.068194	9.59024	-1100
0.01179	0.072967	9.02616	-1100
0.01231	0.077451	8.46208	-1100
0.01282	0.081646	7.898	-1100
0.01333	0.085552	7.33392	-1100
0.01385	0.089168	6.76984	-1100
0.01436	0.092495	6.20576	-1100
0.01487	0.095532	5.64168	-1100
0.01538	0.098281	5.0776	-1100
0.0159	0.10074	4.51352	-1100
0.01641	0.10291	3.94944	-1100
0.01692	0.104791	3.38536	-1100
0.01744	0.106382	2.82128	-1100
0.01795	0.107684	2.2572	-1100
0.01846	0.108697	1.69312	-1100
0.01897	0.109421	1.12904	-1100
0.01949	0.109855	0.56496	-1100
0.02	0.11	0.00088	-1100

Tabela 4.1: Valorile pentru spațiu, viteza și accelerație punctului caracteristic de la nivelul gleznei pentru deplasarea pe verticală

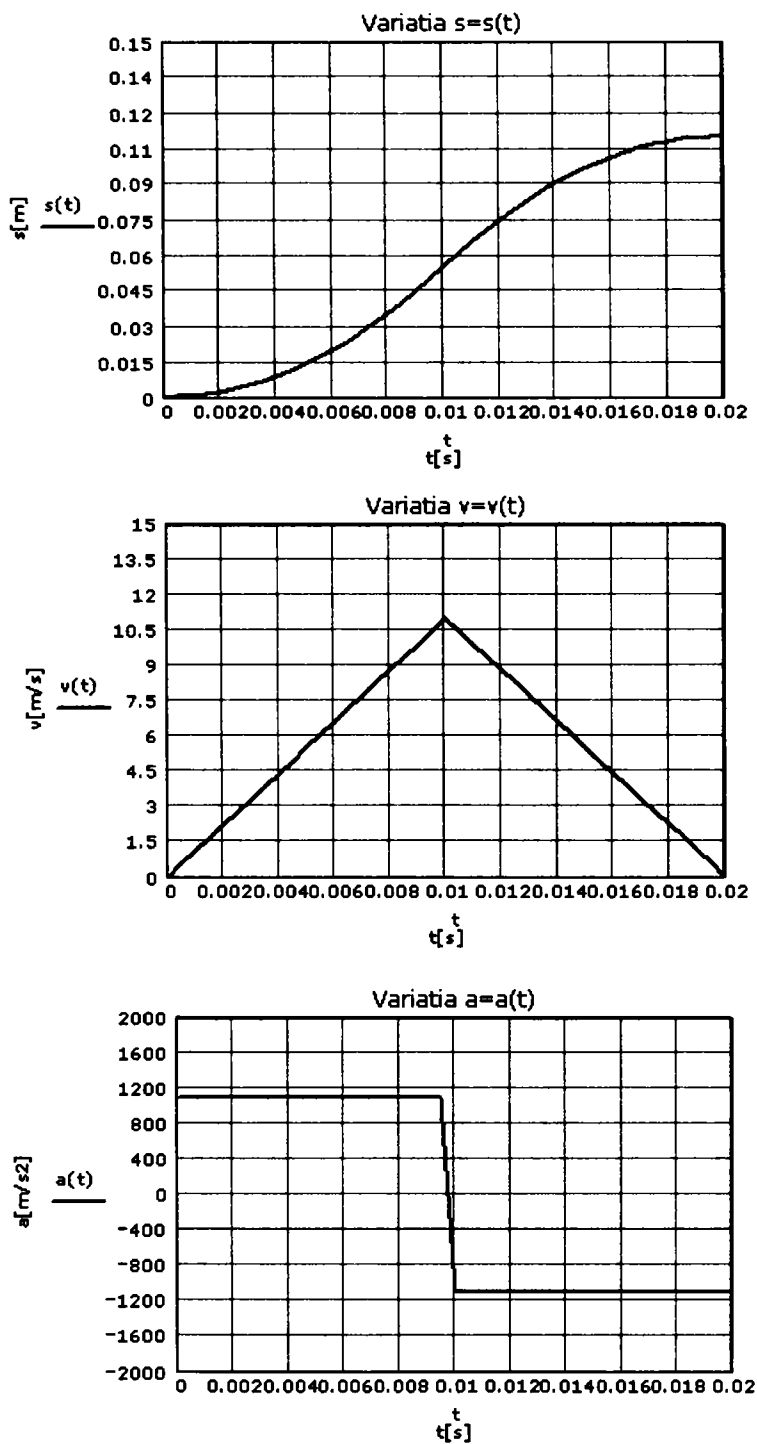


Figura 4.9: Dependența spațiului, vitezei și accelerației de timp pentru deplasarea pe verticală (C_1Q_1 și C_2Q_2) a punctului caracteristic de la nivelul gleznei

• **Sinteza funcțiilor de pseudocomandă pentru deplasarea pe verticală a punctului caracteristic de la nivelul gleznei**

Determinarea coordonatelor y și z ale punctului caracteristic, respectiv cele ale vitezei și accelerației

$$y(t) := y_i + s(t) \cdot \cos(\theta)$$

$$y'(t) := v(t) \cdot \cos(\theta)$$

$$y''(t) := a(t) \cdot \cos(\theta)$$

$$z(t) := z_i + s(t) \cdot \sin(\theta)$$

$$z'(t) := v(t) \cdot \sin(\theta)$$

$$z''(t) := a(t) \cdot \sin(\theta)$$

Valorile coordonatelor y și z ale punctului caracteristic, respectiv cele ale vitezei și accelerației rezultate sunt prezentate în tabela 4.2.

Determinarea coeficienților a , b și c

$$a_c(t) := 1 + \left[\frac{z(t)}{y(t)} \right]^2$$

$$b_c(t) := \left[1 + \frac{z(t)^2 - y(t)^2 + r_2^2 - r_1^2}{2 \cdot y(t)^2} \right] \cdot z(t)$$

$$c_c(t) := \left[\frac{z(t)^2 - y(t)^2 + r_2^2 - r_1^2}{2 \cdot y(t)} \right]^2 + z(t)^2 - r_1^2$$

Determinarea soluțiilor celor două ecuații de gradul doi în u și v

$$v_c(t) := \frac{b_c(t)}{a_c(t)} - \sqrt{\frac{b_c(t)^2}{a_c(t)^2} - \frac{c_c(t)}{a_c(t)}}$$

$$u_c(t) := \frac{z(t)}{y(t)} \cdot (-v_c(t)) + \frac{z(t)^2 - y(t)^2 + r_2^2 - r_1^2}{2 \cdot y(t)}$$

$y(t) = [m]$ $z(t) = [m]$ $y'(t) = [m/s]$ $z'(t) = [m/s]$ $y''(t) = [m/s^2]$ $z''(t) = [m/s^2]$

-0.04	0.03	0	0	0	-1100.000
-0.04	0.02986	0	-0.56408	0	-1100.000
-0.04	0.02942	0	-1.12816	0	-1100.000
-0.04	0.0287	0	-1.69224	0	-1100.000
-0.04	0.02769	0	-2.25632	0	-1100.000
-0.04	0.02638	0	-2.8204	0	-1100.000
-0.04	0.02479	0	-3.38448	0	-1100.000
-0.04	0.02291	0	-3.94856	0	-1100.000
-0.04	0.02074	0	-4.51264	0	-1100.000
-0.04	0.01828	0	-5.07672	0	-1100.000
-0.04	0.01554	0	-5.6408	0	-1100.000
-0.04	0.0125	0	-6.20488	0	-1100.000
-0.04	0.00917	0	-6.76896	0	-1100.000
-0.04	0.00556	0	-7.33304	0	-1100.000
-0.04	0.00165	0	-7.89712	0	-1100.000
-0.04	-0.00254	0	-8.4612	0	-1100.000
-0.04	-0.00703	0	-9.02528	0	-1100.000
-0.04	-0.0118	0	-9.58936	0	-1100.000
-0.04	-0.01686	0	-10.15344	0	-1100.000
-0.04	-0.02221	0	-10.71752	0	-1100.000
-0.04	-0.02778	0	-10.7184	-0	1100.000
-0.04	-0.03313	0	-10.15432	-0	1100.000
-0.04	-0.03819	0	-9.59024	-0	1100.000
-0.04	-0.04297	0	-9.02616	-0	1100.000
-0.04	-0.04746	0	-8.46208	-0	1100.000
-0.04	-0.05165	0	-7.898	-0	1100.000
-0.04	-0.05555	0	-7.33392	-0	1100.000
-0.04	-0.05917	0	-6.76984	-0	1100.000
-0.04	-0.06249	0	-6.20576	-0	1100.000
-0.04	-0.06553	0	-5.64168	-0	1100.000
-0.04	-0.06828	0	-5.0776	-0	1100.000
-0.04	-0.07074	0	-4.51352	-0	1100.000
-0.04	-0.07291	0	-3.94944	-0	1100.000
-0.04	-0.07479	0	-3.38536	-0	1100.000
-0.04	-0.07638	0	-2.82128	-0	1100.000
-0.04	-0.07768	0	-2.2572	-0	1100.000
-0.04	-0.0787	0	-1.69312	-0	1100.000
-0.04	-0.07942	0	-1.12904	-0	1100.000
-0.04	-0.07985	0	-0.56496	-0	1100.000
-0.04	-0.08	0	-0.00088	-0	1100.000

Tabela 4.2: Valorile coordonatelor y și z ale punctului caracteristic, respectiv cele ale vitezei și accelerației

Determinarea funcțiilor de pseudocomandă de ordinul zero

$$\alpha(t) := a \sin \left[\frac{u_c(t)}{r_1} \right]$$

$$\beta(t) := a \sin \left[\frac{v_c(t)}{r_2} \right]$$

Determinarea funcțiilor de pseudocomandă de ordinul unu

$$\alpha'(t) := -[y'(t) \cdot \cos(\beta(t)) + z'(t) \cdot \sin(\beta(t))] \cdot \frac{1}{r_1 \cdot \cos(\alpha(t) - \beta(t))}$$

$$\beta'(t) := [y'(t) \cdot \sin(\alpha(t)) + z'(t) \cdot \cos(\alpha(t))] \cdot \frac{1}{r_2 \cdot \cos(\alpha(t) - \beta(t))}$$

Determinarea funcțiilor de pseudocomandă de ordinul doi

$$\begin{aligned} \alpha''(t) = & (-1) * \frac{y''(t) \cdot \cos(\beta(t)) + z''(t) \cdot \sin(\beta(t))}{r_1 \cdot \cos(\alpha(t) - \beta(t))} \\ & + (-1) * \frac{(-r_1) \cdot (\alpha'(t))^2 \cdot \sin(\alpha(t) - \beta(t)) + r_2 \cdot (\beta'(t))^2}{r_1 \cdot \cos(\alpha(t) - \beta(t))} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta''(t) = & (-1) * \frac{-y''(t) \cdot \sin(\alpha(t)) + z''(t) \cdot \cos(\alpha(t))}{r_2 \cdot \cos(\alpha(t) - \beta(t))} \\ & + (-1) * \frac{(-r_2) \cdot (\beta'(t))^2 \cdot \sin(\alpha(t) - \beta(t)) + r_1 \cdot (\alpha'(t))^2}{r_2 \cdot \cos(\alpha(t) - \beta(t))} \end{aligned}$$

Valorile pentru funcțiile de pseudocomandă de ordin 0, 1, 2 sunt prezentate în tabelele 4.3, 4.4.

În figurile 4.10, 4.11, 4.12, se prezintă dependența funcțiilor de pseudocomandă de ordin 0, 1, 2 de timp pentru deplasarea pe verticală (C_1Q_1 și C_2Q_2) a punctului caracteristic de la nivelul gleznei [95].

$\alpha(t) = [\text{rad}]$	$\beta(t) = [\text{rad}]$	$\alpha'(t) = [\text{rad/s}]$	$\beta'(t) = [\text{rad/s}]$
-0.02021	-1.05895	0.000	0
-0.01778	-1.06234	-9.109	-12.73059
-0.01046	-1.07255	-18.894	-26.26023
0.00192	-1.08968	-30.214	-41.6129
0.01964	-1.11393	-44.408	-60.40319
0.04306	-1.14554	-63.969	-85.65847
0.07267	-1.18481	-94.468	-124.17021
0.10903	-1.23209	-151.908	-195.47377
0.15277	-1.28771	-309.648	-389.14327
0.20455	-1.35194	-3215.869	-3938.44689
0.26495	-1.42488	436.409	519.75533
0.3344	-1.50634	215.616	249.18723
0.41296	-1.54592	166.053	185.75419
0.50019	-1.45007	182.493	196.94827
0.59494	-1.34984	195.855	202.97362
0.69528	-1.24822	204.647	202.29457
0.79865	-1.1488	207.868	194.09037
0.9022	-1.05533	205.419	178.68628
1.00327	-0.97107	198.205	157.58248
1.09987	-0.89833	187.825	133.00068
1.19087	-0.83827	176.037	107.20788
1.272	-0.79299	149.489	75.41078
1.34124	-0.76152	128.264	51.64116
1.40096	-0.74033	111.222	34.02655
1.45299	-0.72673	97.355	21.02592
1.49871	-0.71873	85.863	11.46722
1.53915	-0.71483	76.147	4.48769
1.56651	-0.71392	68.434	0.54657
1.53451	-0.71513	65.642	4.4335
1.50601	-0.7178	62.374	7.49577
1.48067	-0.72143	58.617	9.75247
1.45824	-0.72562	54.371	11.2354
1.43854	-0.73004	49.655	11.98839
1.4214	-0.73443	44.498	12.06628
1.40672	-0.73859	38.936	11.53356
1.39442	-0.74236	33.017	10.463
1.38443	-0.74561	26.792	8.93424
1.3767	-0.74824	20.317	7.03251
1.3712	-0.75017	13.652	4.84739
1.36791	-0.75134	6.858	2.47162
1.36682	-0.75174	-0.000	-0

Tabela 4.3: Valori pentru funcțiile de pseudocomanda de ordin 0, 1

$\alpha''(t) = [\text{rad/s}^2]$	$\beta''(t) = [\text{rad/s}^2]$
-18004.382	25208.194
-18340.173	25538.478
-19413.956	26601.896
-21461.806	28657.289
-25042.090	32321.438
-31520.875	39121.586
-44916.742	53627.507
-82169.023	95523.933
-300290.498	351885.965
-165901833.704	202355917.846
358075.634	-404618.800
61895.770	-56873.090
34910.224	-26395.484
30330.471	-17794.716
22602.427	-5775.811
12217.262	8781.686
629.670	23928.162
-10112.793	37171.563
-18189.558	46478.448
-22727.941	51074.639
-59137.009	72936.919
-47391.990	54905.137
-37897.560	40806.874
-30607.666	30165.588
-25128.210	22225.311
-21035.627	16294.467
-17975.881	11831.014
-15980.619	8859.518
-16255.692	9093.075
-16350.915	9107.417
-16290.781	8928.106
-16104.940	8590.273
-15825.890	8134.876
-15486.890	7605.409
-15120.201	7045.150
-14755.696	6494.944
-14419.822	5991.507
-14134.880	5566.178
-13918.550	5244.046
-13783.608	5043.375
-13737.768	4975.246

Tabela 4.4: Valori pentru funcțiile de pseudocomanda de ordin 2

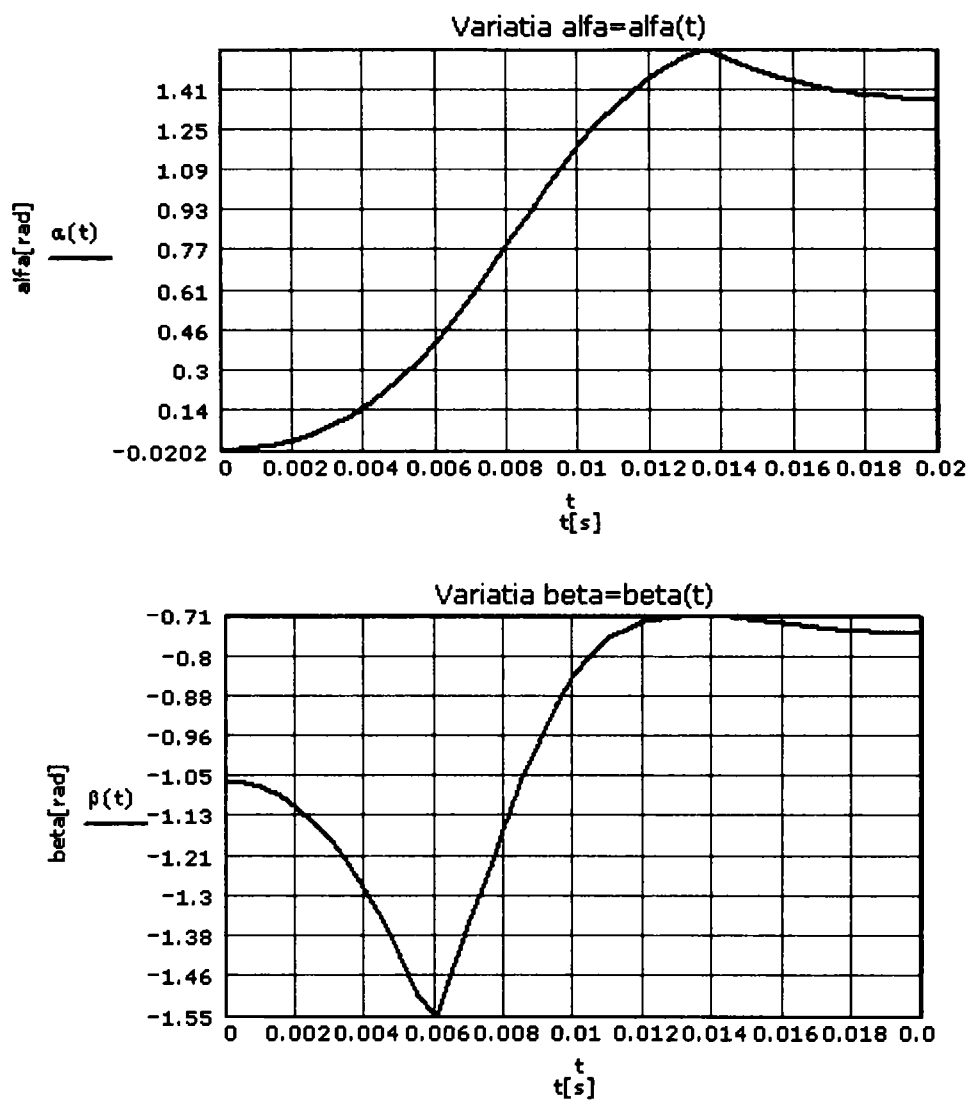


Figura 4.10: Dependența funcțiilor de pseudocomandă de ordin 0 la deplasarea punctului caracteristic al piciorului pe verticală

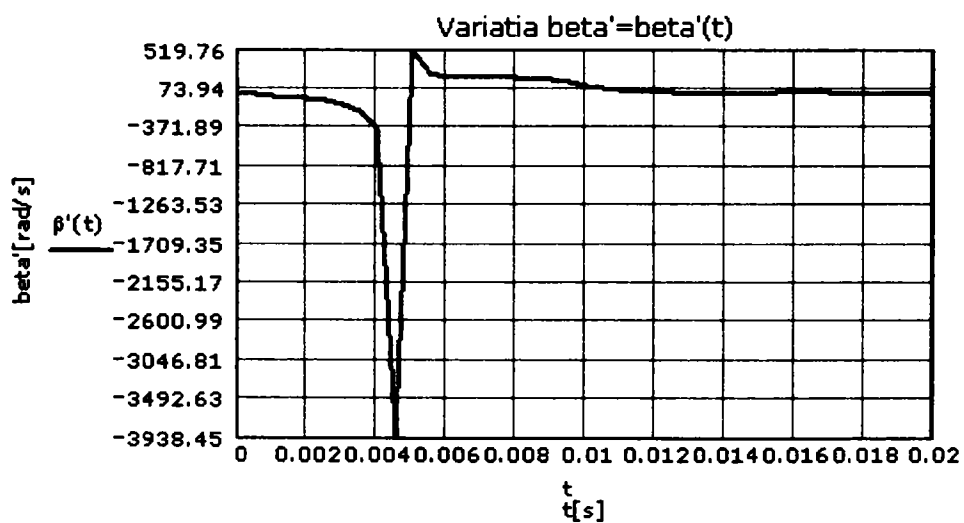
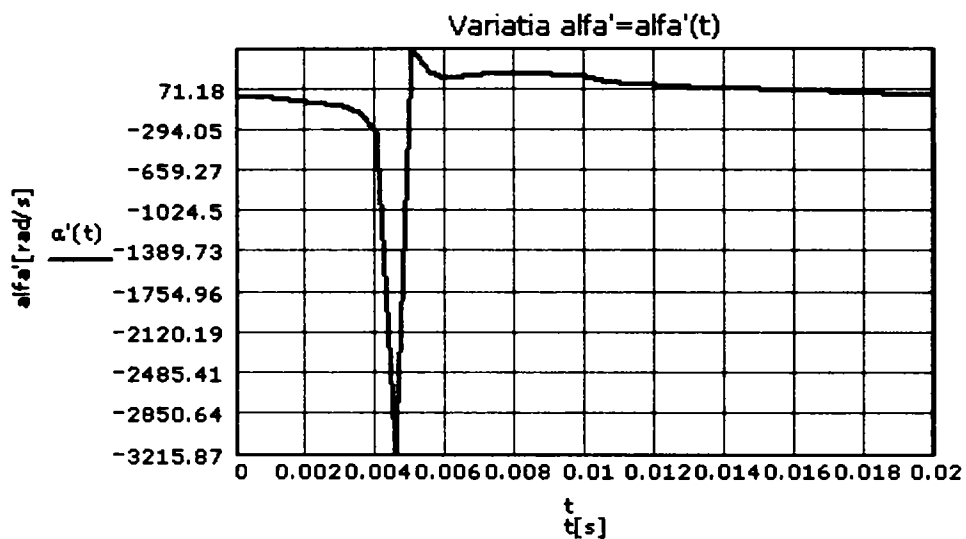


Figura 4.11: Dependența funcțiilor de pseudocomandă de ordin 1 la deplasarea punctului caracteristic al piciorului pe verticală

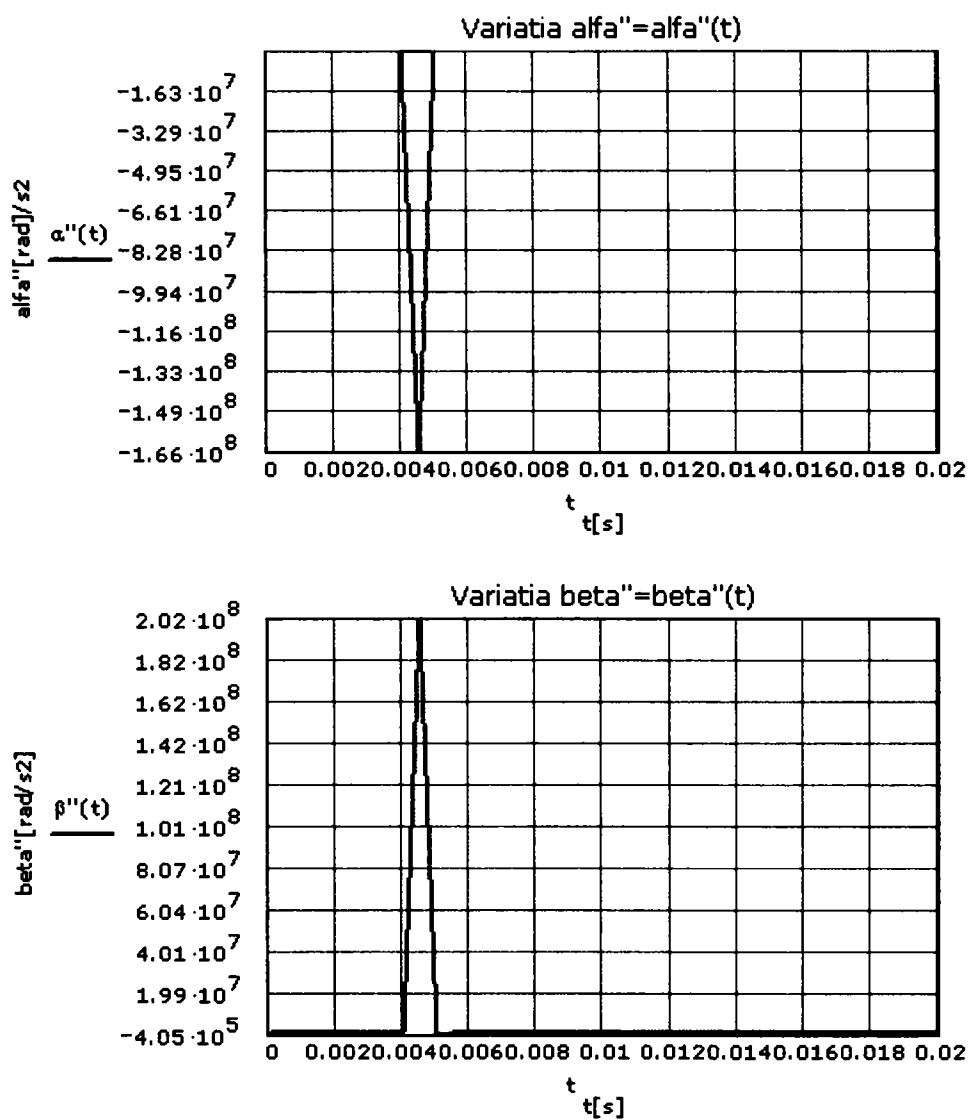


Figura 4.12: Dependența funcțiilor de pseudocomandă de ordin 2 la deplasarea punctului caracteristic al piciorului pe verticală

- **Exprimarea funcțiilor de poziție, de viteză și de accelerație printr-o lege de mișcare cu accelerație constantă pe orizontală (intervalul Q_1Q_2)**

Coordonatele punctului caracteristic în poziția inițială

$$y_i := -40 \cdot mm$$

$$z_i := 30 \cdot mm$$

Coordonatele punctului caracteristic în poziția finală

$$y_f := 60 \cdot mm$$

$$z_f := 30 \cdot mm$$

Lungimea traiectoriei descrisă de punctul caracteristic

$$h := \sqrt{(y_f - y_i)^2 + (z_f - z_i)^2}$$

$$h = 0.1 \cdot m$$

Determinarea vitezei medii de ridicare

Lungimea pasului de pășire

$$L_p := 0.1 \cdot m$$

Segmentul CQ_1CQ_2 care apare în urma segmentării fine are următoarea lungime

$$l_{CQ_1CQ_2} := \left(\frac{L_p}{4}\right) - \frac{h \cdot L_p}{8 \cdot h + 3 \cdot L_p}$$

$$l_{CQ_1CQ_2} = 15.90909 \cdot mm$$

Viteza de deplasare a platformei

$$v_p := 1 \cdot kph$$

Viteza medie de ridicare are următoarea valoare

$$v_{mr} := \frac{h \cdot v_p}{l_{CQ_1CQ_2}}$$

$$v_{mr} = 1.74603 \cdot m \cdot s^{-1}$$

Determinarea intervalului de timp total pe care are loc mișcarea

$$T_t := \frac{h}{v_{mr}}$$

$$T_t = 0.05727 \cdot s$$

Determinarea unghiului de pantă a traiectoriei

$$dy := y_f - y_i$$

$$dy = 100 \cdot mm$$

$$dz := z_f - z_i$$

$$dz = 0 \cdot mm$$

Deoarece $dy=0$ și $dz<0$ vom considera următoarea valoare pentru θ :

$$\theta := 270 \cdot deg$$

Determinarea lungimii de accelerare, respectiv de încetinire

$$h_a := 0.5 \cdot h$$

$$h_a = 0.05 \cdot m$$

Determinarea coeficientului de pondere a duratei mișcării stabilizate din durata totală

$$k := \frac{h - 2 \cdot h_a}{h + 2 \cdot h_a}$$

$$k = 0$$

Determinarea intervalului de timp pe care are loc accelerarea, respectiv încetinirea mișcării

$$t_a := (1 - k) \cdot \frac{T_t}{2}$$

$$t_a = 0.02864 \cdot s$$

Determinarea intervalului de timp pe care avem viteză constantă

$$t_{vc} := T_t - 2 \cdot t_a$$

$$t_{vc} = 0 \cdot s$$

Acceptând o lege de variație cu accelerație constantă , vom avea următoarele expresii pentru legea spațiului, a vitezei și a accelerației.

$$s = \begin{cases} \left(\frac{h_a}{t_a^2}\right) t^2 & \text{if } 0 < t < t_a \\ h_a + 2 \left(\frac{h_a}{t_a}\right) (t - t_a) & \text{if } t_a < t < (T_t - t_a) \\ h - \left(\frac{h_a}{t_a^2}\right) (T_t - t)^2 & \text{if } (T_t - t_a) < t < T_t \end{cases}$$

$$v = \begin{cases} 2 \cdot \left(\frac{h_a}{t_a^2}\right) \cdot t & \text{if } 0 < t < t_a \\ 2 \cdot \frac{h_a}{t_a} & \text{if } t_a < t < (T_t - t_a) \\ 2 \cdot \left(\frac{h_a}{t_a^2}\right) \cdot (T_t - t) & \text{if } (T_t - t_a) < t < T_t \end{cases}$$

$$a = \begin{cases} 2 \cdot \left(\frac{h_a}{t_a^2}\right) & \text{if } 0 < t < t_a \\ 0 & \text{if } t_a < t < (T_t - t_a) \\ -2 \cdot \frac{h_a}{t_a^2} & \text{if } (T_t - t_a) < t < T_t \end{cases}$$

Considerăm pasul de ciclare ca fiind de 0.00143175s.

$$t := 0, 0.00143175..0.05727$$

Valorile pentru spațiu, viteza și accelerație punctului caracteristic de la nivelul gleznei pentru deplasarea pe orizontală sunt prezentate în tabela 4.5.

În figura 4.13 se prezintă dependența spațiului, vitezei și accelerației de timp pentru deplasarea pe orizontală (Q_1Q_2) a punctului caracteristic de la nivelul gleznei.

t = [s]	s(t) = [m]	v(t) = [m/s]	a(t) = [m/s ²]
0	0	0	121.91411
0.00143	0.000125	0.174551	121.91411
0.00286	0.0005	0.349101	121.91411
0.0043	0.001125	0.523652	121.91411
0.00573	0.001999	0.698202	121.91411
0.00716	0.003124	0.872753	121.91411
0.00859	0.004498	1.047303	121.91411
0.01002	0.006123	1.221854	121.91411
0.01145	0.007997	1.396404	121.91411
0.01289	0.010121	1.570955	121.91411
0.01432	0.012496	1.745505	121.91411
0.01575	0.01512	1.920056	121.91411
0.01718	0.017994	2.094606	121.91411
0.01861	0.021118	2.269157	121.91411
0.02004	0.024491	2.443707	121.91411
0.02148	0.028115	2.618258	121.91411
0.02291	0.031989	2.792808	121.91411
0.02434	0.036112	2.967359	121.91411
0.02577	0.040486	3.141909	121.91411
0.0272	0.045109	3.31646	121.91411
0.02863	0.050017	3.491011	-121.91411
0.03007	0.054891	3.31646	-121.91411
0.0315	0.059514	3.141909	-121.91411
0.03293	0.063888	2.967359	-121.91411
0.03436	0.068011	2.792808	-121.91411
0.03579	0.071885	2.618258	-121.91411
0.03723	0.075509	2.443707	-121.91411
0.03866	0.078882	2.269157	-121.91411
0.04009	0.082006	2.094606	-121.91411
0.04152	0.08488	1.920056	-121.91411
0.04295	0.087504	1.745505	-121.91411
0.04438	0.089879	1.570955	-121.91411
0.04582	0.092003	1.396404	-121.91411
0.04725	0.093877	1.221854	-121.91411
0.04868	0.095502	1.047303	-121.91411
0.05011	0.096876	0.872753	-121.91411
0.05154	0.098001	0.698202	-121.91411
0.05297	0.098875	0.523652	-121.91411
0.05441	0.0995	0.349101	-121.91411
0.05584	0.099875	0.174551	-121.91411
0.05727	0.1	-0	-121.91411

Tabela 4.5: Valorile pentru spațiu, viteza și accelerație punctului caracteristic de la nivelul gleznei pentru deplasarea pe orizontală

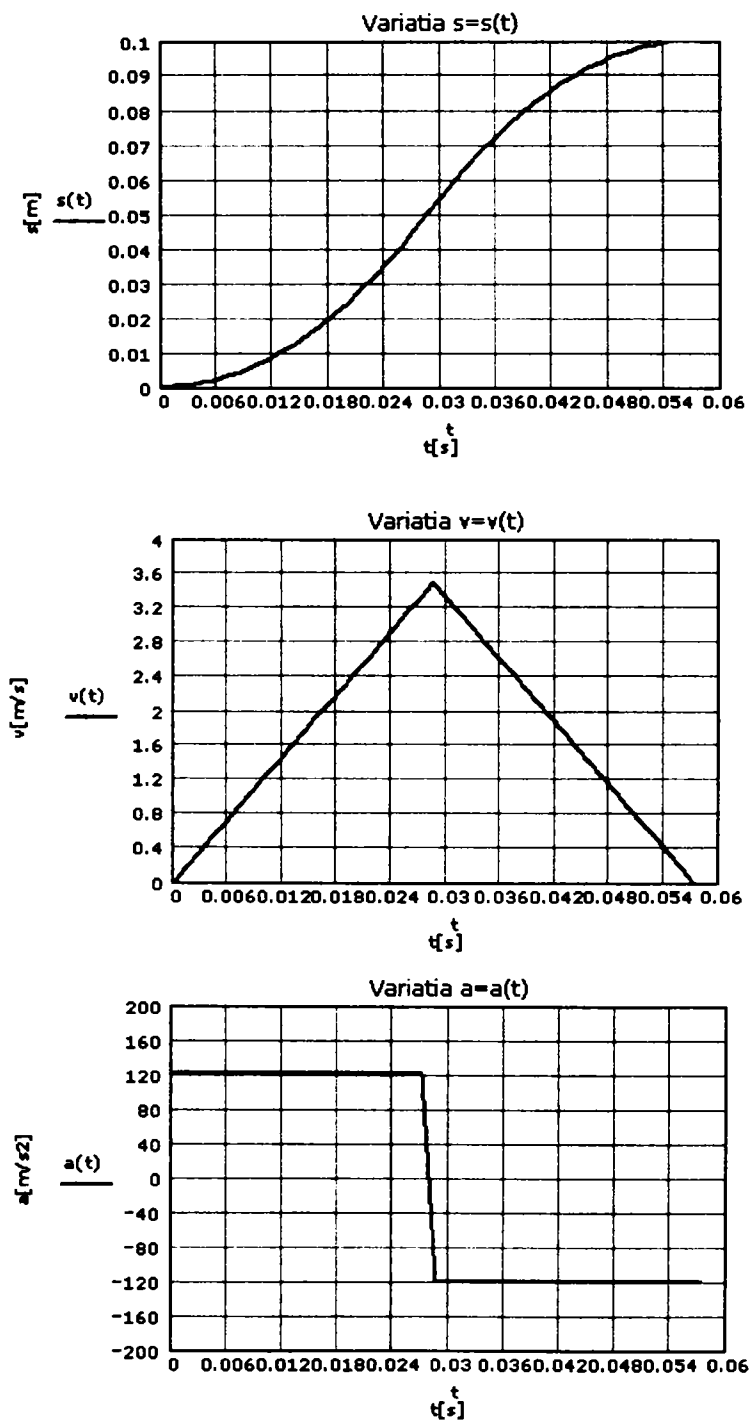


Figura 4.13: Dependența spațiului, vitezei și accelerației de timp pentru deplasarea pe orizontală (Q_1Q_2) a punctului caracteristic de la nivelul gleznei

• **Sinteza funcțiilor de pseudocomandă pentru deplasarea pe orizontala a punctului caracteristic de la nivelul gleznei**

Determinarea coordonatelor y și z ale punctului caracteristic, respectiv cele ale vitezei și accelerației

$$y(t) := y_i + s(t) \cdot \cos(\theta)$$

$$y'(t) := v(t) \cdot \cos(\theta)$$

$$y''(t) := a(t) \cdot \cos(\theta)$$

$$z(t) := z_i + s(t) \cdot \sin(\theta)$$

$$z'(t) := v(t) \cdot \sin(\theta)$$

$$z''(t) := a(t) \cdot \sin(\theta)$$

Valorile coordonatelor y și z ale punctului caracteristic, respectiv cele ale vitezei și accelerației rezultate sunt prezentate în tabela 4.6.

Determinarea coeficienților a , b și c

$$a_c(t) := 1 + \left[\frac{z(t)}{y(t)} \right]^2$$

$$b_c(t) := \left[1 + \frac{z(t)^2 - y(t)^2 + r_2^2 - r_1^2}{2 \cdot y(t)^2} \right] \cdot z(t)$$

$$c_c(t) := \left[\frac{z(t)^2 - y(t)^2 + r_2^2 - r_1^2}{2 \cdot y(t)} \right]^2 + z(t)^2 - r_1^2$$

Determinarea soluțiilor celor două ecuații de gradul doi în u și v

$$v_c(t) := \frac{b_c(t)}{a_c(t)} - \sqrt{\frac{b_c(t)^2}{a_c(t)^2} - \frac{c_c(t)}{a_c(t)}}$$

$$u_c(t) := \frac{z(t)}{y(t)} \cdot (-v_c(t)) + \frac{z(t)^2 - y(t)^2 + r_2^2 - r_1^2}{2 \cdot y(t)}$$

•

$y(t) = [m] \quad z(t) = [m] \quad y'(t) = [m/s] \quad z'(t) = [m/s] \quad y''(t) = [m/s^2] \quad z''(t) = [m/s^2]$

-0.04	0.03	0	0	0	-121.914
-0.04	0.02988	0	-0.17455	0	-121.914
-0.04	0.0295	0	-0.3491	0	-121.914
-0.04	0.02888	0	-0.52365	0	-121.914
-0.04	0.028	0	-0.6982	0	-121.914
-0.04	0.02688	0	-0.87275	0	-121.914
-0.04	0.0255	0	-1.0473	0	-121.914
-0.04	0.02388	0	-1.22185	0	-121.914
-0.04	0.022	0	-1.3964	0	-121.914
-0.04	0.01988	0	-1.57095	0	-121.914
-0.04	0.0175	0	-1.74551	0	-121.914
-0.04	0.01488	0	-1.92006	0	-121.914
-0.04	0.01201	0	-2.09461	0	-121.914
-0.04	0.00888	0	-2.26916	0	-121.914
-0.04	0.00551	0	-2.44371	0	-121.914
-0.04	0.00188	0	-2.61826	0	-121.914
-0.04	-0.00199	0	-2.79281	0	-121.914
-0.04	-0.00611	0	-2.96736	0	-121.914
-0.04	-0.01049	0	-3.14191	0	-121.914
-0.04	-0.01511	0	-3.31646	0	-121.914
-0.04	-0.02002	0	-3.49101	-0	121.914
-0.04	-0.02489	0	-3.31646	-0	121.914
-0.04	-0.02951	0	-3.14191	-0	121.914
-0.04	-0.03389	0	-2.96736	-0	121.914
-0.04	-0.03801	0	-2.79281	-0	121.914
-0.04	-0.04188	0	-2.61826	-0	121.914
-0.04	-0.04551	0	-2.44371	-0	121.914
-0.04	-0.04888	0	-2.26916	-0	121.914
-0.04	-0.05201	0	-2.09461	-0	121.914
-0.04	-0.05488	0	-1.92006	-0	121.914
-0.04	-0.0575	0	-1.74551	-0	121.914
-0.04	-0.05988	0	-1.57095	-0	121.914
-0.04	-0.062	0	-1.3964	-0	121.914
-0.04	-0.06388	0	-1.22185	-0	121.914
-0.04	-0.0655	0	-1.0473	-0	121.914
-0.04	-0.06688	0	-0.87275	-0	121.914
-0.04	-0.068	0	-0.6982	-0	121.914
-0.04	-0.06888	0	-0.52365	-0	121.914
-0.04	-0.0695	0	-0.3491	-0	121.914
-0.04	-0.06988	0	-0.17455	-0	121.914
-0.04	-0.07	0	0	-0	121.914

Tabela 4.6: Valorile coordonatelor y și z ale punctului caracteristic, respectiv cele ale vitezei și accelerației

Determinarea funcțiilor de pseudocomandă de ordinul zero

$$\alpha(t) := a \sin \left[\frac{u_c(t)}{r_1} \right]$$

$$\beta(t) := a \sin \left[\frac{v_c(t)}{r_2} \right]$$

Determinarea funcțiilor de pseudocomandă de ordinul unu

$$\alpha'(t) := -[y'(t) \cdot \cos(\beta(t)) + z'(t) \cdot \sin(\beta(t))] \cdot \frac{1}{r_1 \cdot \cos(\alpha(t) - \beta(t))}$$

$$\beta'(t) := [y'(t) \cdot \sin(\alpha(t)) + z'(t) \cdot \cos(\alpha(t))] \cdot \frac{1}{r_2 \cdot \cos(\alpha(t) - \beta(t))}$$

Determinarea funcțiilor de pseudocomandă de ordinul doi

$$\begin{aligned} \alpha''(t) = & (-1) * \frac{y''(t) \cdot \cos(\beta(t)) + z''(t) \cdot \sin(\beta(t))}{r_1 \cdot \cos(\alpha(t) - \beta(t))} \\ & + (-1) * \frac{(-r_1) \cdot (\alpha'(t))^2 \cdot \sin(\alpha(t) - \beta(t)) + r_2 \cdot (\beta'(t))^2}{r_1 \cdot \cos(\alpha(t) - \beta(t))} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta''(t) = & (-1) * \frac{-y''(t) \cdot \sin(\alpha(t)) + z''(t) \cdot \cos(\alpha(t))}{r_2 \cdot \cos(\alpha(t) - \beta(t))} \\ & + (-1) * \frac{(-r_2) \cdot (\beta'(t))^2 \cdot \sin(\alpha(t) - \beta(t)) + r_1 \cdot (\alpha'(t))^2}{r_2 \cdot \cos(\alpha(t) - \beta(t))} \end{aligned}$$

Valorile pentru funcțiile de pseudocomandă de ordin 0, 1, 2 sunt prezentate în tabelele 4.7, 4.8.

În figurile 4.14, 4.15, 4.16, se prezintă dependența funcțiilor de pseudocomandă de ordin 0, 1, 2 de timp pentru deplasarea pe verticală (C_1Q_1 și C_2Q_2) a punctului caracteristic de la nivelul gleznei [95].

$\alpha(t) = [\text{rad}]$	$\beta(t) = [\text{rad}]$	$\alpha'(t) = [\text{rad/s}]$	$\beta'(t) = [\text{rad/s}]$
-0.02021	-1.05895	0.000	0
-0.018	-1.06203	-2.888	-4.03653
-0.01135	-1.0713	-5.969	-8.30216
-0.00012	-1.08686	-9.486	-13.08393
0.01591	-1.10885	-13.798	-18.81713
0.03706	-1.13748	-19.545	-26.27512
0.06372	-1.17301	-28.045	-37.06557
0.09636	-1.21573	-42.650	-55.27882
0.13552	-1.26594	-75.274	-95.46312
0.18177	-1.32388	-222.840	-275.95927
0.23563	-1.38973	299.807	361.84355
0.29757	-1.46345	96.152	112.88466
0.36782	-1.5447	59.509	67.8193
0.44624	-1.50895	57.520	63.47217
0.53222	-1.41573	62.437	66.48458
0.62451	-1.3194	66.258	67.75758
0.72123	-1.22273	68.583	66.89573
0.82007	-1.12894	69.183	63.74345
0.91853	-1.04122	68.098	58.47723
1.01441	-0.96227	65.637	51.58274
1.10668	-0.89354	62.232	43.64437
1.18911	-0.83934	53.199	32.50939
1.25976	-0.79927	45.729	23.83668
1.3207	-0.77012	39.597	17.18603
1.37366	-0.7493	34.539	12.12627
1.42	-0.73481	30.321	8.29475
1.46079	-0.7251	26.749	5.40622
1.49683	-0.71898	23.674	3.24301
1.52876	-0.71555	20.981	1.64086
1.55706	-0.71408	18.583	0.47602
1.55951	-0.71402	16.844	0.35442
1.53746	-0.71494	15.568	0.96635
1.51816	-0.71648	14.175	1.38635
1.50145	-0.71837	12.672	1.62879
1.48718	-0.72039	11.066	1.71048
1.47526	-0.72236	9.369	1.65042
1.46559	-0.72415	7.593	1.46942
1.45813	-0.72564	5.753	1.18987
1.45284	-0.72676	3.863	0.83536
1.44967	-0.72746	1.940	0.43037
1.44861	-0.72769	-0.000	-0

Tabela 4.7: Valori pentru funcțiile de pseudocomanda de ordin 0, 1

$\alpha''(t) = [\text{rad/s}^2]$	$\beta''(t) = [\text{rad/s}^2]$
-1995.444	2793.850
-2029.216	2827.063
-2136.567	2933.294
-2338.590	3135.661
-2683.464	3487.311
-3282.216	4112.046
-4430.343	5344.388
-7165.046	8381.589
-17721.610	20586.997
-214227.609	257401.415
341574.935	-410177.533
13290.914	-13648.321
4748.763	-3976.788
3710.633	-2597.409
3104.046	-1551.653
2185.927	-178.788
1033.637	1402.014
-190.843	2980.575
-1287.240	4317.471
-2092.747	5234.730
-6883.470	8721.490
-5742.598	6869.641
-4719.592	5298.261
-3878.258	4042.761
-3214.451	3067.448
-2700.610	2317.842
-2305.727	1742.285
-2002.565	1298.463
-1769.334	953.845
-1589.311	684.141
-1511.320	560.600
-1505.649	543.499
-1491.856	516.733
-1472.391	483.374
-1449.702	446.596
-1426.111	409.484
-1403.723	374.875
-1384.344	345.239
-1369.432	322.583
-1360.052	308.387
-1356.853	303.553

Tabela 4.8: Valori pentru funcțiile de pseudocomanda de ordin 2

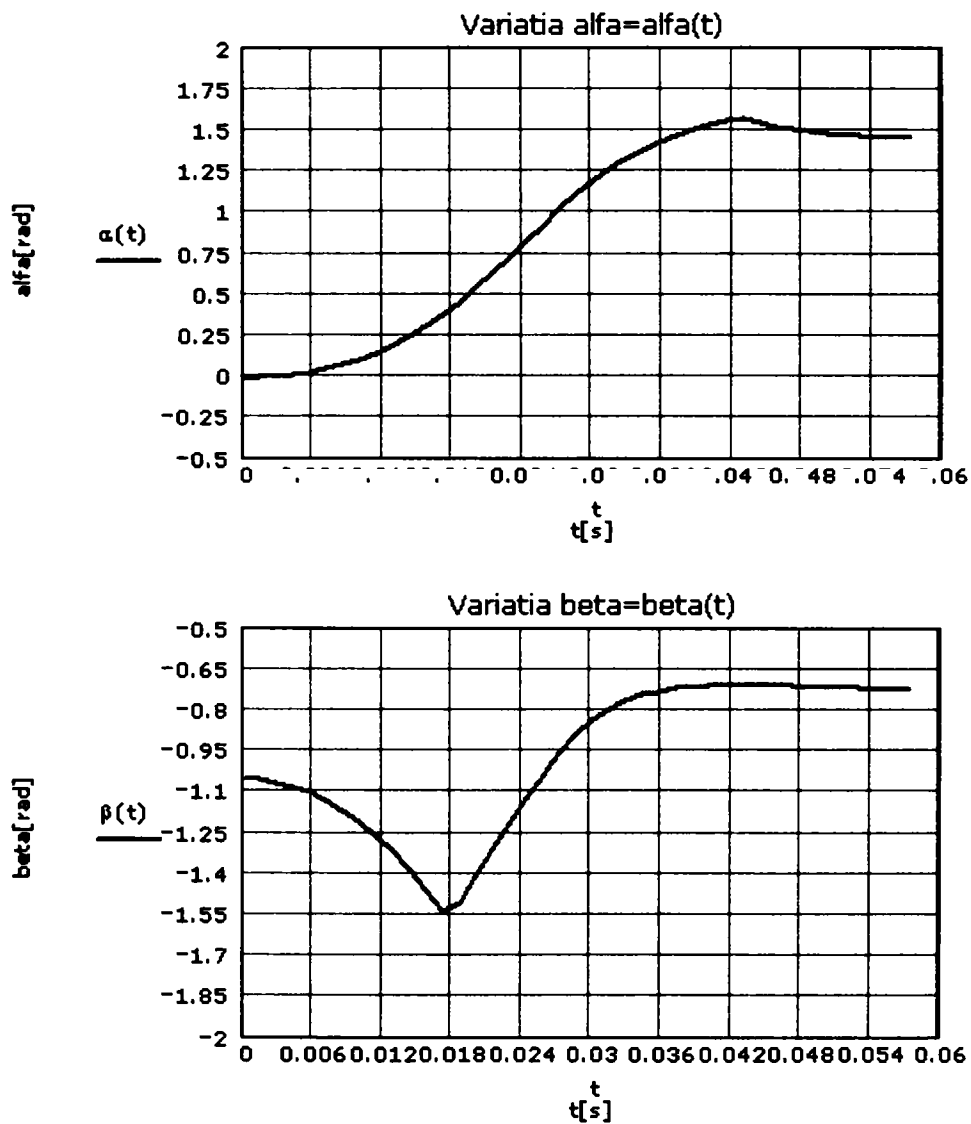


Figura 4.14: Dependența funcțiilor de pseudocomandă de ordin 0 la deplasarea punctului caracteristic al piciorului pe verticală

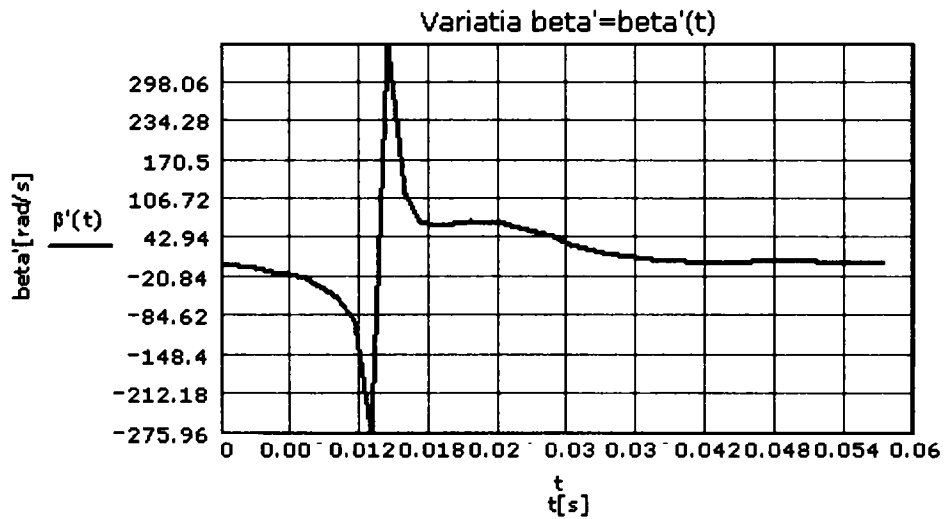
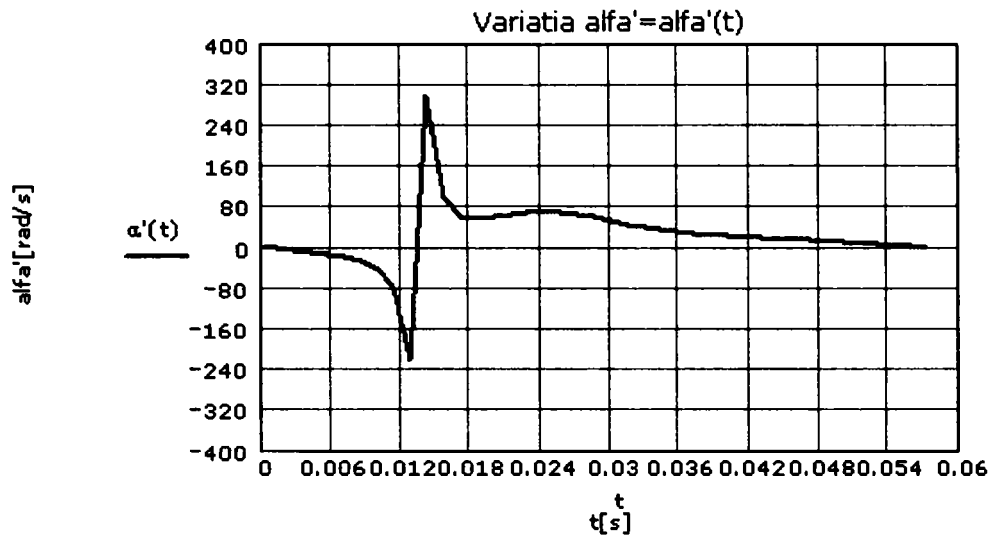


Figura 4.15: Dependența funcțiilor de pseudocomandă de ordin 1 la deplasarea punctului caracteristic al piciorului pe verticală

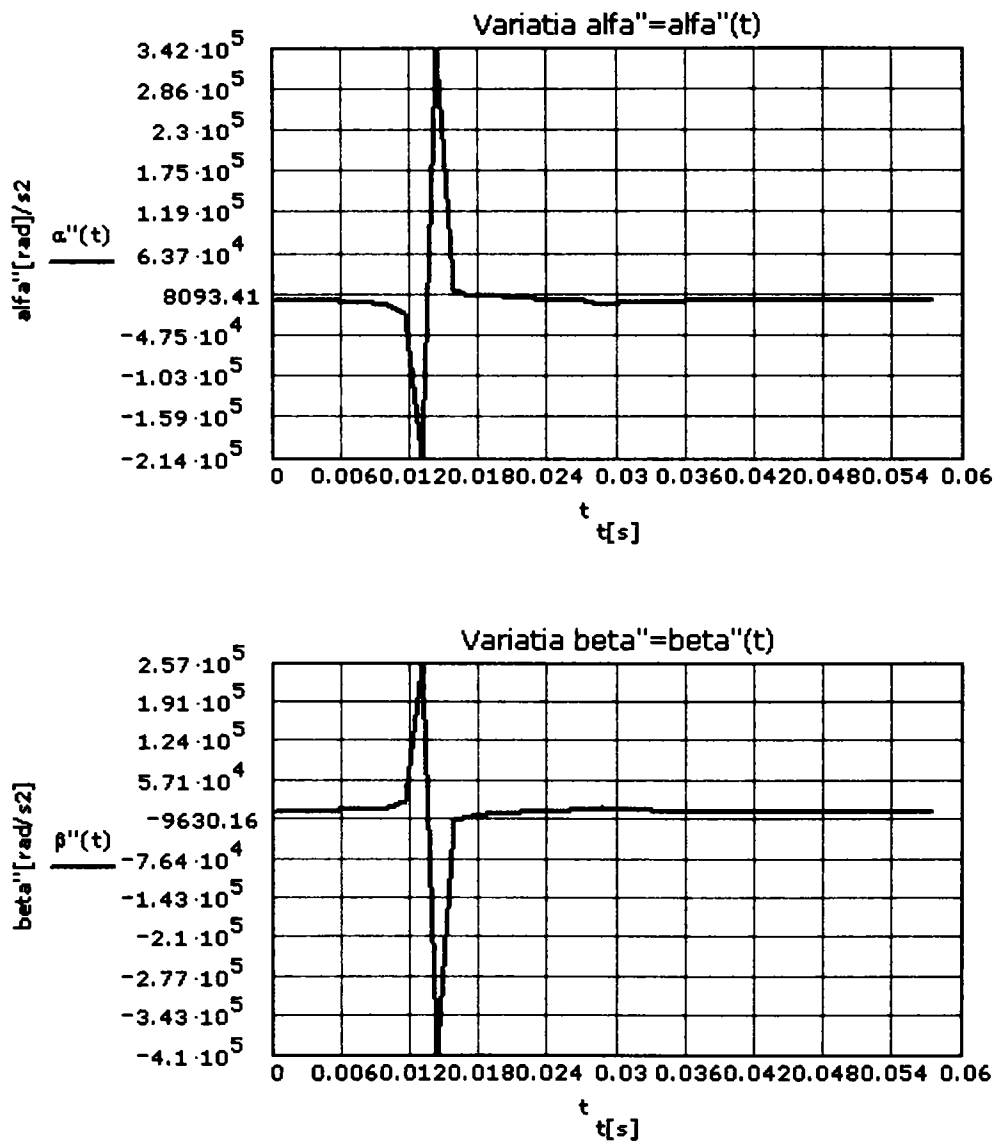


Figura 4.16: Dependența funcțiilor de pseudocomandă de ordin 2 la deplasarea punctului caracteristic al piciorului pe verticală

• **Determinarea variației centrului de masă al piciorului robotului JQuadRobot**

Valorile numerice pentru poziția, viteza și accelerația centrului de masă pentru femur se găsesc în tabela 4.9.

$y_{m1}(t) = m$	$z_{m1}(t) = m$	$y'_{m1}(t) = m/s$	$z'_{m1}(t) = m/s$	$y''_{m1}(t) = m/s^2$	$z''_{m1}(t) = m/s^2$
0.00106	0.05249	0	0	-0.00002	-0
0.00095	0.05249	0.15159	-0.00273	-0.0079	0.43776
0.0006	0.0525	0.31338	-0.00356	-0.02125	1.8707
0.00001	0.0525	0.498	-0.00006	-0.00059	4.72397
-0.00084	0.05249	0.72433	0.01152	0.15901	9.99461
-0.00195	0.05246	1.02541	0.03802	0.74298	20.04169
-0.00334	0.05239	1.46938	0.09375	2.62908	41.20885
-0.00505	0.05226	2.22872	0.21543	9.18752	95.05462
-0.00709	0.05202	3.91563	0.53393	40.18967	294.74416
-0.00949	0.05164	11.50636	2.1148	471.25896	2564.07416
-0.01226	0.05105	-15.30492	-3.67463	1101.67713	4588.52074
-0.01539	0.05019	-4.8261	-1.48007	142.30694	464.03867
-0.01888	0.04899	-2.91524	-1.1234	66.84533	173.4842
-0.02266	0.04736	-2.72408	-1.30328	74.95502	156.69366
-0.02664	0.04524	-2.82454	-1.66337	103.8429	176.36245
-0.0307	0.04259	-2.82199	-2.0339	134.74627	186.99227
-0.03467	0.03943	-2.70403	-2.37752	163.03669	185.46819
-0.03839	0.03581	-2.47773	-2.65576	183.70949	171.44237
-0.04172	0.03187	-2.17008	-2.84121	193.45469	147.81403
-0.04458	0.02773	-1.8199	-2.9262	192.03955	119.49944
-0.04695	0.0235	-1.46251	-2.92156	181.78559	91.07212
-0.04872	0.01956	-1.04032	-2.59197	137.8625	55.41302
-0.04998	0.01607	-0.73475	-2.2856	104.49376	33.67915
-0.05087	0.01299	-0.51451	-2.01415	79.73135	20.46149
-0.05148	0.01028	-0.35516	-1.77818	61.39711	12.36401
-0.0519	0.00789	-0.23913	-1.57377	47.70162	7.35524
-0.05218	0.00576	-0.15417	-1.39584	37.32521	4.23539
-0.05236	0.00388	-0.09184	-1.23951	29.33604	2.29166
-0.05245	0.00221	-0.04629	-1.10056	23.08613	1.09377
-0.0525	0.00072	-0.01341	-0.9755	18.12554	0.37638
-0.0525	0.00059	-0.00998	-0.88427	14.89348	0.29579
-0.05247	0.00175	-0.02724	-0.81686	12.71251	0.54811
-0.05243	0.00276	-0.03915	-0.74316	10.5279	0.67578
-0.05237	0.00364	-0.0461	-0.66366	8.40135	0.70218
-0.05232	0.00438	-0.04852	-0.57893	6.39665	0.65262
-0.05226	0.00501	-0.04692	-0.48962	4.57626	0.55333
-0.05221	0.00551	-0.04186	-0.39643	2.99827	0.42999
-0.05217	0.0059	-0.03395	-0.3001	1.71383	0.30624
-0.05214	0.00618	-0.02387	-0.20139	0.76493	0.20224
-0.05212	0.00634	-0.01231	-0.1011	0.18278	0.13339
-0.05211	0.0064	0	0	-0.01343	0.10935

Tabela 4.9: Poziția, viteza și accelerația centrului de masă pentru femur

Valorile numerice pentru poziția, viteza și accelerația centrului de masă pentru tibie se găsesc în tabela 4.10.

$y_{m2}(t) = m$	$z_{m2}(t) = m$	$y'_{m2}(t) = m/s$	$z'_{m2}(t) = m/s$	$y''_{m2}(t) = m/s^2$	$z''_{m2}(t) = m/s^2$
0.02318	0.06749	0	0	-104.73942	54.60728
0.02284	0.06743	0.15159	-0.09	-107.22279	55.11379
0.02179	0.06725	0.31338	-0.17811	-115.06546	56.72751
0.02002	0.06694	0.498	-0.26189	-129.62752	59.77107
0.01749	0.06649	0.72433	-0.33758	-153.95882	64.95667
0.01416	0.0659	1.02541	-0.39836	-194.89836	73.87051
0.00997	0.06514	1.46938	-0.4299	-270.00197	90.68817
0.00485	0.0642	2.22872	-0.3955	-438.21583	130.77056
-0.00128	0.06302	3.91563	-0.16428	-1036.52766	301.42771
-0.00847	0.06157	11.50636	1.32932	-11248.60163	4818.50337
-0.01677	0.0598	-15.30492	-4.54738	18714.49554	-15188.33435
-0.02618	0.05763	-4.8261	-2.4401	976.62999	-855.33527
-0.03663	0.05499	-2.91524	-2.1707	422.86897	-333.00993
-0.04266	0.0518	-2.72408	-2.43786	379.20968	-315.52823
-0.04664	0.04799	-2.82454	-2.88523	393.28043	-340.61561
-0.0507	0.04353	-2.82199	-3.34303	399.17117	-318.86259
-0.05467	0.03843	-2.70403	-3.77392	398.66027	-241.11484
-0.05839	0.03276	-2.47773	-4.13944	394.94069	-115.43698
-0.06172	0.02662	-2.17008	-4.41217	390.86197	32.54121
-0.06458	0.02017	-1.8199	-4.58443	387.36905	170.23902
-0.06695	0.01349	-1.46251	-4.66707	281.01894	763.12027
-0.06872	0.00711	-1.04032	-4.2502	240.66187	680.02497
-0.06998	0.00131	-0.73475	-3.85655	203.65682	580.93984
-0.07087	-0.00395	-0.51451	-3.49783	170.63585	487.4312
-0.07148	-0.00872	-0.35516	-3.17458	141.93685	407.32594
-0.0719	-0.01306	-0.23913	-2.8829	117.46334	341.77753
-0.07218	-0.01699	-0.15417	-2.61769	96.84172	289.29463
-0.07236	-0.02056	-0.09184	-2.37409	79.58474	247.65727
-0.07245	-0.0238	-0.04629	-2.14786	65.19574	214.70534
-0.0725	-0.02672	-0.01341	-1.93552	53.22062	188.60126
-0.0725	-0.02697	-0.00998	-1.75702	43.78114	176.56343
-0.07247	-0.02469	-0.02724	-1.60233	35.45468	174.83136
-0.07243	-0.02272	-0.03915	-1.44136	27.35782	172.12856
-0.07237	-0.02103	-0.0461	-1.27458	19.70069	168.78499
-0.07232	-0.0196	-0.04852	-1.10258	12.67353	165.12851
-0.07226	-0.01841	-0.04692	-0.926	6.44345	161.46722
-0.07221	-0.01746	-0.04186	-0.74553	1.15261	158.07647
-0.07217	-0.01673	-0.03395	-0.56193	-3.08266	155.18977
-0.07214	-0.01621	-0.02387	-0.37595	-6.17206	152.99297
-0.07212	-0.01591	-0.01231	-0.18837	-8.05134	151.62063
-0.07211	-0.0158	0	0	-8.68203	151.15412

Tabela 4.10: Poziția, viteza și accelerația centrului de masă pentru tibie

Valorile numerice pentru poziția, viteza și accelerația centrului de masă pentru talpa se găsesc în tabela 4.11.

$y_{m3}(t) = m$	$z_{m3}(t) = m$	$y'_{m3}(t) \text{ m/s}$	$z'_{m3}(t) = \text{m/s}$	$y''_{m3}(t) \text{ m/s}^2$	$z''_{m3}(t) = \text{m/s}^2$
-0.01	0.03	0	0	0	-121.91411
-0.01	0.02988	0	-0.17455	0	-121.91411
-0.01	0.0295	0	-0.3491	0	-121.91411
-0.01	0.02888	0	-0.52365	0	-121.91411
-0.01	0.028	0	-0.6982	0	-121.91411
-0.01	0.02688	0	-0.87275	0	-121.91411
-0.01	0.0255	0	-1.0473	0	-121.91411
-0.01	0.02388	0	-1.22185	0	-121.91411
-0.01	0.022	0	-1.3964	0	-121.91411
-0.01	0.01988	0	-1.57095	0	-121.91411
-0.01	0.0175	0	-1.74551	0	-121.91411
-0.01	0.01488	0	-1.92006	0	-121.91411
-0.01	0.01201	0	-2.09461	0	-121.91411
-0.01	0.00888	0	-2.26916	0	-121.91411
-0.01	0.00551	0	-2.44371	0	-121.91411
-0.01	0.00188	0	-2.61826	0	-121.91411
-0.01	-0.00199	0	-2.79281	0	-121.91411
-0.01	-0.00611	0	-2.96736	0	-121.91411
-0.01	-0.01049	0	-3.14191	0	-121.91411
-0.01	-0.01511	0	-3.31646	0	-121.91411
-0.01	-0.02002	0	-3.49101	-0	121.91411
-0.01	-0.02489	0	-3.31646	-0	121.91411
-0.01	-0.02951	0	-3.14191	-0	121.91411
-0.01	-0.03389	0	-2.96736	-0	121.91411
-0.01	-0.03801	0	-2.79281	-0	121.91411
-0.01	-0.04188	0	-2.61826	-0	121.91411
-0.01	-0.04551	0	-2.44371	-0	121.91411
-0.01	-0.04888	0	-2.26916	-0	121.91411
-0.01	-0.05201	0	-2.09461	-0	121.91411
-0.01	-0.05488	0	-1.92006	-0	121.91411
-0.01	-0.0575	0	-1.74551	-0	121.91411
-0.01	-0.05988	0	-1.57095	-0	121.91411
-0.01	-0.062	0	-1.3964	-0	121.91411
-0.01	-0.06388	0	-1.22185	-0	121.91411
-0.01	-0.0655	0	-1.0473	-0	121.91411
-0.01	-0.06688	0	-0.87275	-0	121.91411
-0.01	-0.068	0	-0.6982	-0	121.91411
-0.01	-0.06888	0	-0.52365	-0	121.91411
-0.01	-0.0695	0	-0.3491	-0	121.91411
-0.01	-0.06988	0	-0.17455	-0	121.91411
-0.01	-0.07	0	0	-0	121.91411

Tabela 4.11: Poziția, viteza și accelerația centrului de masă pentru talpa

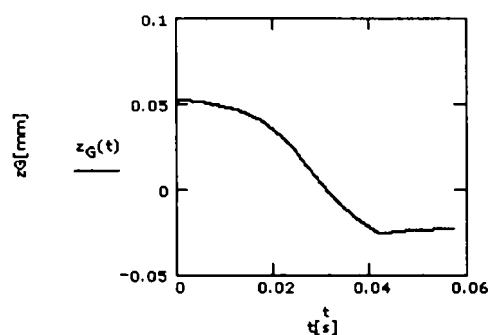
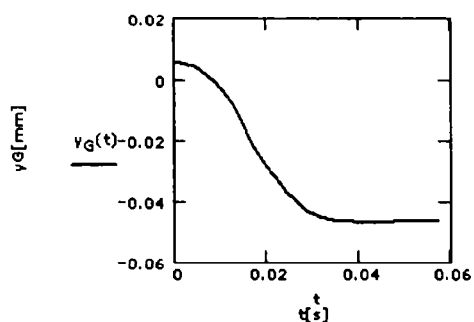
Valorile numerice pentru poziția, viteza și accelerația centrului de masă pentru picior se găsesc în tabela 4.12.

$y_G(t) = m$	$z_{m1}(t) = m$	$y'_{m1}(t) = m/s$	$z'_{m1}(t) = m/s$	$y''_{m1}(t) = m/s^2$	$z''_{m1}(t) = m/s^2$
0.00562	0.05249	0	0	-0.00002	-0
0.00545	0.05249	0.15159	-0.00273	-0.0079	0.43776
0.00496	0.0525	0.31338	-0.00356	-0.02125	1.8707
0.00413	0.0525	0.498	-0.00006	-0.00059	4.72397
0.00294	0.05249	0.72433	0.01152	0.15901	9.99461
0.00137	0.05246	1.02541	0.03802	0.74298	20.04169
-0.0006	0.05239	1.46938	0.09375	2.62908	41.20885
-0.00301	0.05226	2.22872	0.21543	9.18752	95.05462
-0.0059	0.05202	3.91563	0.53393	40.18967	294.74416
-0.00928	0.05164	11.50636	2.1148	471.25896	2564.07416
-0.01319	0.05105	-15.30492	-3.67463	1101.67713	4588.52074
-0.01761	0.05019	-4.8261	-1.48007	142.30694	464.03867
-0.02253	0.04899	-2.91524	-1.1234	66.84533	173.4842
-0.02599	0.04736	-2.72408	-1.30328	74.95502	156.69366
-0.02881	0.04524	-2.82454	-1.66337	103.8429	176.36245
-0.03167	0.04259	-2.82199	-2.0339	134.74627	186.99227
-0.03447	0.03943	-2.70403	-2.37752	163.03669	185.46819
-0.0371	0.03581	-2.47773	-2.65576	183.70949	171.44237
-0.03945	0.03187	-2.17008	-2.84121	193.45469	147.81403
-0.04147	0.02773	-1.8199	-2.9262	192.03955	119.49944
-0.04314	0.0235	-1.46251	-2.92156	181.78559	91.07212
-0.04439	0.01956	-1.04032	-2.59197	137.8625	55.41302
-0.04528	0.01607	-0.73475	-2.2856	104.49376	33.67915
-0.04591	0.01299	-0.51451	-2.01415	79.73135	20.46149
-0.04634	0.01028	-0.35516	-1.77818	61.39711	12.36401
-0.04664	0.00789	-0.23913	-1.57377	47.70162	7.35524
-0.04683	0.00576	-0.15417	-1.39584	37.32521	4.23539
-0.04696	0.00388	-0.09184	-1.23951	29.33604	2.29166
-0.04703	0.00221	-0.04629	-1.10056	23.08613	1.09377
-0.04706	0.00072	-0.01341	-0.9755	18.12554	0.37638
-0.04706	0.00059	-0.00998	-0.88427	14.89348	0.29579
-0.04704	0.00175	-0.02724	-0.81686	12.71251	0.54811
-0.04701	0.00276	-0.03915	-0.74316	10.5279	0.67578
-0.04697	0.00364	-0.0461	-0.66366	8.40135	0.70218
-0.04693	0.00438	-0.04852	-0.57893	6.39665	0.65262
-0.04689	0.00501	-0.04692	-0.48962	4.57626	0.55333
-0.04685	0.00551	-0.04186	-0.39643	2.99827	0.42999
-0.04682	0.0059	-0.03395	-0.3001	1.71383	0.30624
-0.0468	0.00618	-0.02387	-0.20139	0.76493	0.20224
-0.04679	0.00634	-0.01231	-0.1011	0.18278	0.13339
-0.04678	0.0064	0	0	-0.01343	0.10935

Tabela 4.12: Poziția, viteza și accelerația centrului de masă pentru picior

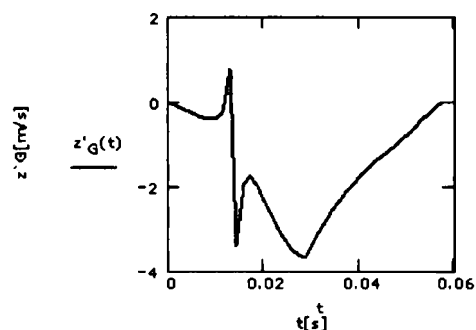
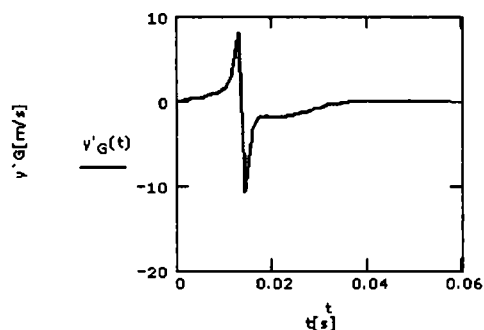
În figura 4.17 se prezintă dependența poziției, vitezei și accelerației centrului de masă al piciorului în planul yOz .

Variația poziției centrului de masă pentru picior pe axa oy Variația poziției centrului de masă pentru picior pe axa oz



Variația vitezei centrului de masă pentru picior pe axa oy

Variația vitezei centrului de masă pentru picior pe axa oz



Variația accelerației centrului de masă pentru picior pe axa oy

Variația accelerației centrului de masă pentru picior pe axa oz

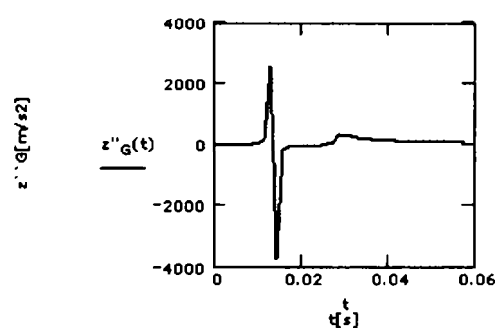
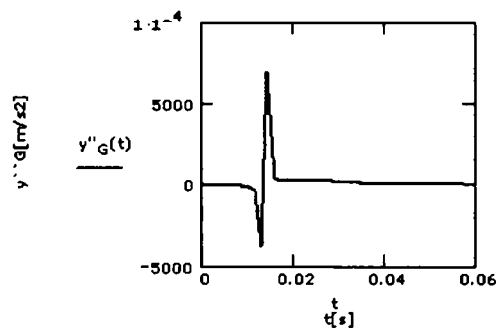


Figura 4.17: Dependența poziției, vitezei și accelerației centrului de masă al piciorului în planul yOz

4.8 Concluzii

Pentru obținerea unor performanțe superioare legate de posibilitatea deplasării roboților pășitori pe terenuri cu configurații cât mai diferite, și pentru creșterea mobilității și stabilității în aceste condiții de deplasare, este necesar un studiu foarte atent privind controlul traiectoriei, care implică atât determinarea coordonatelor punctelor de sprijin ale picioarelor în raport cu corpul robotului, cât și calcularea poziției platformei în timpul mersului în raport cu un sistem de coordonate fixat pe teren. Aceste performanțe sunt în strânsă legătură cu structura sistemului de deplasare și cu dimensiunile elementelor componente.

Studierea situațiilor reale ale deplasării prin pășire, analizarea diverselor tipuri de mers, ca și problemele legate de stabilitatea cvasistatică și dinamică a mersului, au făcut necesară proiectarea și exectarea modulară a robotului pășitor JQuadRobot. Soluțiile constructive adoptate pentru realizarea platformei și a mecanismelor sistemului de deplasare permit robotului să dispună de o adaptabilitate maximă la cele mai diverse modalități de deplasare. Este evident faptul că, din acest punct de vedere, componenta cea mai importantă a sistemului mecanic este mecanismul de deplasare (piciorul robotului).

Piciorul robotului JQuadRobot, realizat de autoare, care a fost analizat pe parcursul acestui capitol, este format dintr-un mecanism spațial cu structură RRR. Dimensiunile spațiului de lucru în care să funcționează acest mecanism au fost determinate din condiția ca robotul să poată depăși obstacole ale căror dimensiuni au fost fixate inițial.

În acest capitol autoare a realizat modelarea cinematică inversă a mecanismului piciorului robotului JQuadRobot, prin care s-au calculat marimile variabilelor cuplelor conducătoare și derivatele acestora în funcție de modul de deplasare impus. Totodată, s-a determinat poziția centrului de masă al piciorului aflat în faza de pășire. Determinarea în fiecare moment a poziției centrului de masă al piciorului robotului în raport cu un sistem de referință atașat corpului robotului, respectiv determinarea în fiecare moment a poziției centrului de masă al robotului în raport cu un sistem de referință fix solidarizat cu terenul, este necesară pentru evitarea pozițiilor instabile ale robotului JQuadRobot.

Metoda de modelare cinematică inversă propusă este originală, și se constituie a fi o una din contribuțiile importante ale autoarei la realizarea obiectivelor propuse în Capitolul 1.

Analiza cinetostatică a robotului pășitor JQuadRobot

Comanda roboților se realizează pe baza modelului dinamic al acestora. Modelul dinamic al unui robot permite determinarea ecuațiilor de mișcare, deci generarea mișcării robotului. De asemenea, modelul dinamic al unui robot oferă informații despre solicitările mecanice la care este supusă structura mecanică a robotului, despre forțele și momentele ce acționează în cuplele cinematice. Este foarte important să se determine tursorul de reducere în cuplele robotului în funcție de sistemul forțelor exterioare ce acționează asupra elementelor robotului.

Structura mecanică a robotului este de fapt un sistem de corpuri asupra cărora acționează un sistem de forțe. Pentru a cunoaște efectul acestor forțe în diferite puncte sau la nivelul cuplelor cinematice ale robotului trebuie determinați tursorii de reducere în punctele respective sau în cuplele robotului. A reduce un sistem de forțe într-un punct înseamnă a determina cele mai simple elemente mecanice care acționează în punctul respectiv și al căror efect este echivalent cu efectul sistemului de forțe considerat.

Sistemul format din robot (care are trei picioare în faza de suport) și terenul pe care trebuie să se deplaseze și să pășească este static nedeterminat. Problema determinării componentelor forțelor de reacțiune este rezolvată, și anume rigidizăm structura mecanică a robotului cu terenul pe care se deplasează.

5.1 Calculul forțelor de reacțiune ce acționează asupra picioarelor aflate în faza de suport

Determinarea masei corpului robotului pășitor

Pentru calculul reacțiunilor este necesar determinarea masei corpului robotului pășitor ce este susținută de picioare. Pentru aceasta vom folosi formula (5.1), unde V_c este volumul corpului robotului pășitor, ρ este densitatea materialului din care este confecționat robotul pășitor și k este factorul de folosire a materialului.

$$m_c = V_c \cdot \rho \cdot k \quad (5.1)$$

La valoarea obținută cu relația (5.1) se mai adaugă masa motoarelor amplasate în cuplele de rotație (m_m) și masa transportată de platformă (m_t). Deci în final greutatea întregii platforme va fi:

$$\begin{cases} m = m_c + m_m + m_t \\ G = m \cdot g \end{cases} \quad (5.2)$$

- Studiul forțelor de reacțiune ce acționează asupra picioarelor ce formează poligonul de sprijin

Cazul în care piciorul A este în faza de pășire

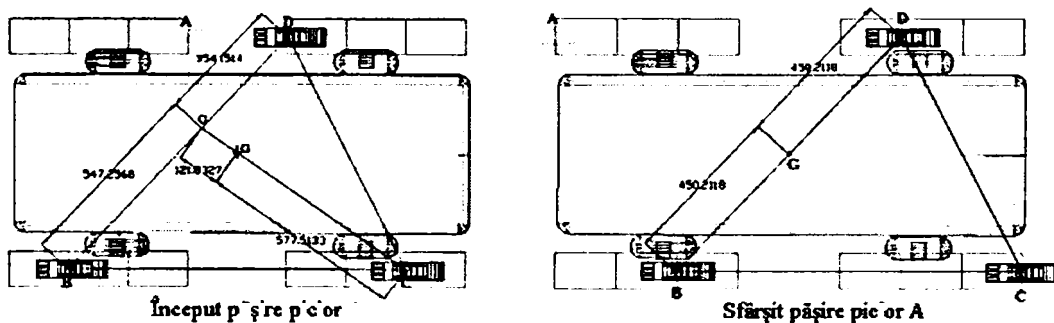


Figura 5.1: Piciorul A în faza de pășire

- Început pășire picior A

$$\begin{cases} (\sum M)_C = 0 \\ (\sum M)'_G = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} G \cdot l_{CG} - G' \cdot l_{CG'} = 0 \\ R_C \cdot l_{CG'} - G \cdot l_{G'C} = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} G' = G \cdot \frac{l_{CG}}{l_{CG'}} \\ R_C = G \cdot \frac{l_{G'C}}{l_{CG'}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} (\sum M)_B = 0 \\ (\sum M)_D = 0 \end{cases} \begin{cases} G' \cdot l_{BG'} - R_D \cdot l_{BD} = 0 \\ R_B \cdot l_{BD} - G' \cdot l_{G'D} = 0 \end{cases} \begin{cases} R_D = G' \cdot \frac{l_{BG'}}{l_{BD}} \\ R_B = G' \cdot \frac{l_{G'D}}{l_{BD}} \end{cases}$$

- Sfârșit pășire picior A

$$\begin{cases} (\sum M)_B = 0 \\ (\sum M)_D = 0 \end{cases} \begin{cases} G \cdot l_{BG} - R_D \cdot l_{BD} = 0 \\ R_B \cdot l_{BD} - G \cdot l_{GD} = 0 \end{cases} \begin{cases} R_D = G \cdot \frac{l_{BG}}{l_{BD}} \\ R_B = G \cdot \frac{l_{GD}}{l_{BD}} \end{cases}$$

Cazul în care piciorul C este în faza de pășire

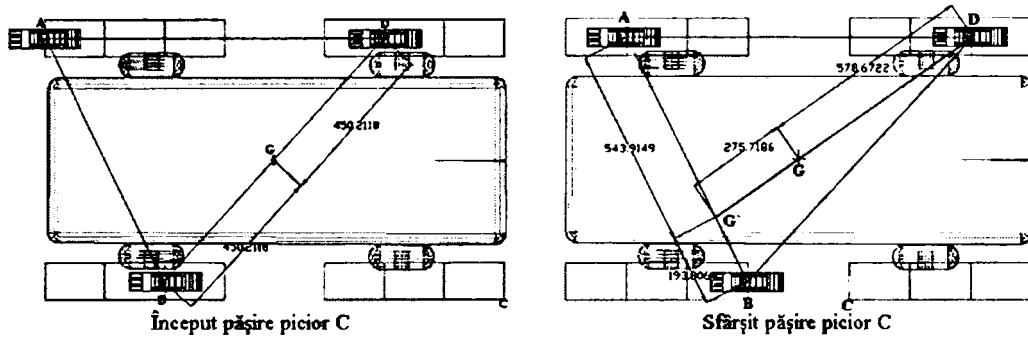


Figura 5.2: Piciorul C în faza de pășire

- Început pășire picior C

$$\begin{cases} (\sum M)_B = 0 \\ (\sum M)_D = 0 \end{cases} \begin{cases} G \cdot l_{BG} - R_D \cdot l_{BD} = 0 \\ R_B \cdot l_{BD} - G \cdot l_{GD} = 0 \end{cases} \begin{cases} R_D = G \cdot \frac{l_{BG}}{l_{BD}} \\ R_B = G \cdot \frac{l_{GD}}{l_{BD}} \end{cases}$$

- Sfârșit pășire picior C

$$\begin{cases} (\sum M)_D = 0 \\ (\sum M)'_G = 0 \end{cases} \begin{cases} G \cdot l_{DG} - G' \cdot l_{DG'} = 0 \\ R_D \cdot l_{DG'} - G \cdot l_{G'G} = 0 \end{cases} \begin{cases} G' = G \cdot \frac{l_{DG}}{l_{DG'}} \\ R_D = G \cdot \frac{l_{G'G}}{l_{DG'}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} (\sum M)_B = 0 \\ (\sum M)_A = 0 \end{cases} \begin{cases} G' \cdot l_{BG'} - R_A \cdot l_{AB} = 0 \\ R_B \cdot l_{AB} - G' \cdot l_{G'A} = 0 \end{cases} \begin{cases} R_A = G' \cdot \frac{l_{BG'}}{l_{AB}} \\ R_B = G' \cdot \frac{l_{G'A}}{l_{AB}} \end{cases}$$

Cazul în care piciorul B este în faza de pășire

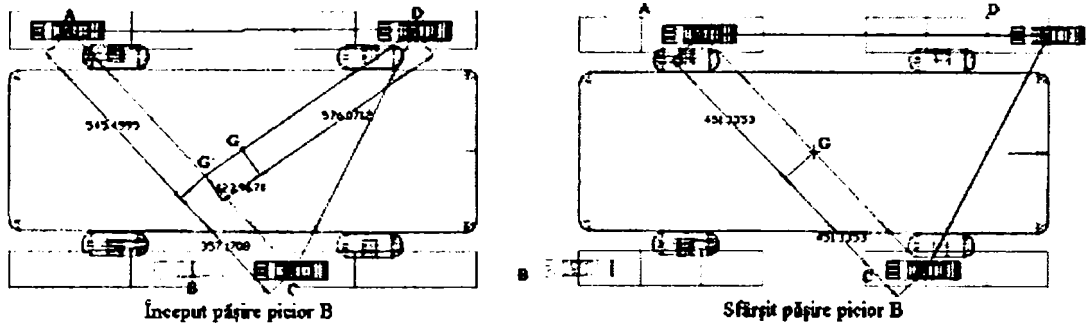


Figura 5.3: Piciorul B în faza de pășire

• Început pășire picior B

$$\begin{cases} (\sum M)_D = 0 \\ (\sum M)'_G = 0 \end{cases} \begin{cases} G \cdot l_{DG} - G' \cdot l_{DG'} = 0 \\ R_D \cdot l_{DG'} - G \cdot l_{G'G} = 0 \end{cases} \begin{cases} G' = G \cdot \frac{l_{DG}}{l_{DG'}} \\ R_D = G \cdot \frac{l_{G'G}}{l_{DG'}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} (\sum M)_A = 0 \\ (\sum M)_C = 0 \end{cases} \begin{cases} G' \cdot l_{AG'} - R_C \cdot l_{AC} = 0 \\ R_A \cdot l_{AC} - G' \cdot l_{G'C} = 0 \end{cases} \begin{cases} R_C = G' \cdot \frac{l_{AG'}}{l_{AC}} \\ R_A = G' \cdot \frac{l_{G'C}}{l_{AC}} \end{cases}$$

• Sfârșit pășire picior B

$$\begin{cases} (\sum M)_A = 0 \\ (\sum M)_C = 0 \end{cases} \begin{cases} G \cdot l_{AG} - R_C \cdot l_{AC} = 0 \\ R_A \cdot l_{AC} - G \cdot l_{GC} = 0 \end{cases} \begin{cases} R_C = G \cdot \frac{l_{AG}}{l_{AC}} \\ R_A = G \cdot \frac{l_{GC}}{l_{AC}} \end{cases}$$

Cazul în care piciorul D este în faza de pășire

• Început pășire picior D

$$\begin{cases} (\sum M)_A = 0 \\ (\sum M)_C = 0 \end{cases} \begin{cases} G \cdot l_{AG} - R_C \cdot l_{AC} = 0 \\ R_A \cdot l_{AC} - G \cdot l_{GC} = 0 \end{cases} \begin{cases} R_C = G \cdot \frac{l_{AG}}{l_{AC}} \\ R_A = G \cdot \frac{l_{GC}}{l_{AC}} \end{cases}$$

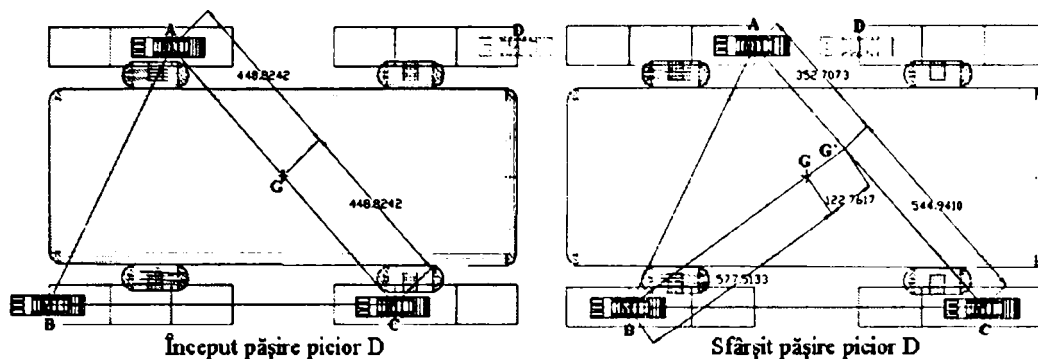


Figura 5.4: Piciorul D în faza de pășire

- Sfârșit pășire picior D

$$\begin{cases} (\sum M)_B = 0 \\ (\sum M)'_G = 0 \end{cases} \begin{cases} G \cdot l_{BG} - G' \cdot l_{BG'} = 0 \\ R_B \cdot l_{BG'} - G \cdot l_{G'C} = 0 \end{cases} \begin{cases} G' = G \cdot \frac{l_{BG}}{l_{BG'}} \\ R_B = G \cdot \frac{l_{G'C}}{l_{BG'}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} (\sum M)_A = 0 \\ (\sum M)_C = 0 \end{cases} \begin{cases} G' \cdot l_{AG'} - R_C \cdot l_{AC} = 0 \\ R_A \cdot l_{AC} - G' \cdot l_{G'C} = 0 \end{cases} \begin{cases} R_C = G' \cdot \frac{l_{AG'}}{l_{AC}} \\ R_A = G' \cdot \frac{l_{G'C}}{l_{AC}} \end{cases}$$

5.2 Studiul forțelor când punctul caracteristic urmărește o lege de mișcare

Metoda de analiză bazată pe înlocuirea mecanismului echilibrat cu ferma echivalentă static, permite determinarea rapidă a forțelor în funcție de poziția punctului caracteristic, dar nu ține seama de variația acestor forțe în timp, când punctul caracteristic se deplasează cu o lege de mișcare oarecare. Suprimarea acestui neajuns a impus includerea forțelor inerțiale în modelul de analiză a legilor de mișcare [79].

- **Includerea forțelor inerțiale în modelul de analiză cinetostatică**

Încărcarea structurii portante a mecanismului în mișcare se modifică în timp datorită forțelor și a momentelor inerțiale. Modificările pot fi descrise, prin reprezentarea forțelor și momentelor pe componente.

Considerând portante elementele lanțului minimal (figura 4.2), componentele forțelor și ale momentelor pe axele sistemului de referință (având planul Ayz suprapus cu planul meridian) se exprimă diferențiat pe elemente [35].

Pentru femur componentele sunt date de relațiile (5.3) iar modulele de relațiile (5.4).

$$\begin{cases} \bar{F}_{1y} = F_{1y} \cdot \bar{j} \\ \bar{F}_{1z} = F_{1z} \cdot \bar{k} \\ \bar{M}_{1x} = M_{1x} \cdot \bar{i} \end{cases} \quad (5.3)$$

$$\begin{cases} F_{1y} = -m_1 \cdot \ddot{y}_{m1} \\ F_{1z} = -m_1 \cdot (g + \ddot{z}_{m1}) \\ M_{1x} = -J_{1x} \cdot \ddot{\alpha} \end{cases} \quad (5.4)$$

Pentru tibie componentele sunt date de relațiile (5.5) iar modulele de relațiile (5.6).

$$\begin{cases} \bar{F}_{2y} = F_{2y} \cdot \bar{j} \\ \bar{F}_{2z} = F_{2z} \cdot \bar{k} \\ \bar{M}_{2x} = M_{2x} \cdot \bar{i} \end{cases} \quad (5.5)$$

$$\begin{cases} F_{2y} = -m_2 \cdot \ddot{y}_{m2} \\ F_{2z} = -m_2 \cdot (g + \ddot{z}_{m2}) \\ M_{2x} = -J_{2x} \cdot \ddot{\beta} \end{cases} \quad (5.6)$$

Pentru talpă componentele sunt date de relațiile (5.7) iar modulele de relațiile (5.8).

$$\begin{cases} \bar{F}_{3y} = F_{3y} \cdot \bar{j} \\ \bar{F}_{3z} = F_{3z} \cdot \bar{k} \\ \bar{M}_{3x} = M_{3x} \cdot \bar{i} \end{cases} \quad (5.7)$$

$$\begin{cases} F_{3y} = -m_3 \cdot \ddot{y}_{m3} \\ F_{3z} = -m_3 \cdot (g + \ddot{z}_{m3}) \\ M_{3x} = 0 \end{cases} \quad (5.8)$$

Se observă că modulele depind numai de accelerațiile \ddot{y}_{m_i} și \ddot{z}_{m_i} ale masei m_i , unde $i = 1, 2, 3$, respectiv de accelerațiile unghiulare $\ddot{\alpha}$ și $\ddot{\beta}$, momentele de inerție masice J_{1x} , J_{2x} . Deoarece talpa nu este accelerată unghiular momentul M_{3x} este nul.

În baza acestui sistem de forțe și momente exterioare (variabile în timp), reacțiunile în cuplele mecanismului rezultă din analiza cinetostatică a grupelor structurale.

• Cinetostatica grupelor structurale atașate lanțului minimal

Pentru tibie (elementul 2) (figura 5.5), din ecuațiile: sumei momentelor în raport cu B, sumei forțelor orizontale și sumei forțelor verticale, rezultă relațiile (5.9).

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{Bx} = \left[\left(R_{32y} + \frac{F_{2y}}{2} \right) \cdot \sin \beta - \left(R_{32z} + \frac{F_{2z}}{2} \right) \cdot \cos \beta \right] \cdot r_2 - M_{2x} \\ R_{12y} = \frac{M_{2x} \cdot \cos \beta}{r_2} \cdot \tan \beta \\ R_{12z} = \frac{M_{2x} \cdot \cos \beta}{r_2} \end{array} \right. \quad (5.9)$$

unde M_{Bx} este momentul de echilibrare al tibiei, care ar trebui aplicat în B dacă motorul de acționare ar fi amplasat periferic.

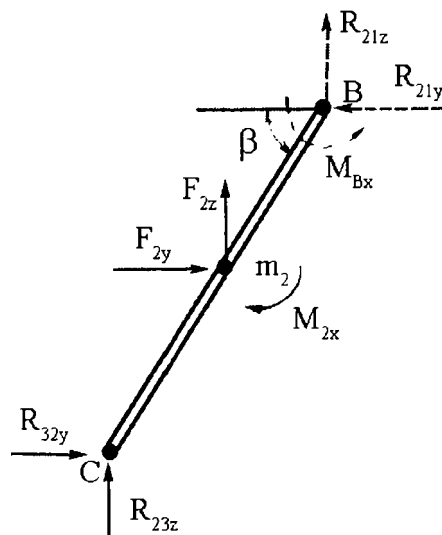


Figura 5.5: Forțele și momentele ce acționează asupra tibiei

Pentru femur (figura 5.6), forțele din extremitatea B a acestuia sunt date de relațiile (5.10).

$$\begin{cases} R_{12y} = -\frac{M_{2x} \cdot \cos \beta}{r_2} \cdot \tan \beta \\ R_{12z} = -\frac{M_{2x} \cdot \cos \beta}{r_2} \\ R_{51y} = (R_{23y} + F_{3y} + R_{15z}) \cdot \tan \alpha + R_{23y} + F_{3y} \\ R_{51z} = (-R_{23y} - F_{3y}) \cdot (1 - \tan \beta) \end{cases} \quad (5.10)$$

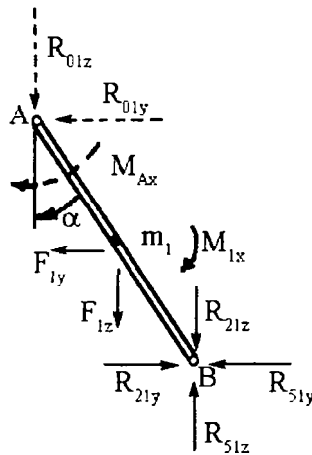


Figura 5.6: Forțele și momentele ce acționează asupra femurului

Din ecuația momentelor în raport cu A se obține momentul de echilibrare al femurului care ar trebui aplicat la antrenarea din cupla A (relația (5.11)).

$$M_{Ax} = \left[\left(R_{21z} - R_{51z} + \frac{f_{1z}}{2} \right) \cdot \cos \alpha - \left(R_{21y} - R_{51y} + \frac{f_{1y}}{2} \right) \cdot \sin \alpha \right] \cdot r_1 - M_{1x} \quad (5.11)$$

Reacțiunile rezultate în cuplele cinematice se calculează cu relațiile (5.12).

$$\begin{cases} R_{12} = \sqrt{R_{12y}^2 + R_{12z}^2} \\ R_{21} = \sqrt{R_{21y}^2 + R_{21z}^2} \\ R_{51} = \sqrt{R_{51y}^2 + R_{51z}^2} \end{cases} \quad (5.12)$$

5.3 Efectul dinamic al piciorului care se ridică asupra stabilității platformei

Pentru dimensionarea tălpi din condiția de stabilitate a platformei la începutul fazei de pășire facem următoarea ipoteză simplificatoare:

- platforma va fi solicitată în mod egal de către reacțiunea cea mai mare care apare în faza de suport și de forța de inerție ce acționează asupra piciorului care pășește la începutul mișcării
- cele două forțe sunt egale ca valoare și de semn contrar
- forța de inerție acționează în centrul de greutate al piciorului
- traiectoria descrisă de punctul caracteristic de la nivelul gleznei este prezentată în figura 4.7

În continuare se prezintă un algoritm de calcul pentru stabilirea dimensiunilor tălpii din condiția de stabilitate a platformei la începutul fazei de pășire [86].

- **Determinarea forței de inerție ce apare în centrul de masă al piciorului**

Forțele de inerție ce apar în centrul de masă al piciorului robotului se determină cu relațiile (5.13). Metoda de calculul pentru centrul de masă al piciorului robotului JQuadRobot a fost prezentată în capitolul 4.

$$\begin{cases} F_{Iy}(t) = -m_G \cdot \ddot{y}_G(t) \\ F_{Iz}(t) = -m_G \cdot (\ddot{z}_G(t) + g) \end{cases} \quad (5.13)$$

- **Determinarea momentului dat de forța de inerție F_{Gz} și de forța de greutate în raport cu dreapta BD**

Momentul de inerție dat de forța de inerție F_{Iz} și de forța de greutate G_t în raport cu dreapta BD se determină cu relația (5.14).

$$M_{Iz}(t) = (F_{Iz}(t) + G_t) \cdot d_z \quad (5.14)$$

unde d_z este distanța de la suportul forței de inerție la dreapta BD , iar G_t este forța de greutate și se calculează cu relația $G_t = m_G \cdot g$

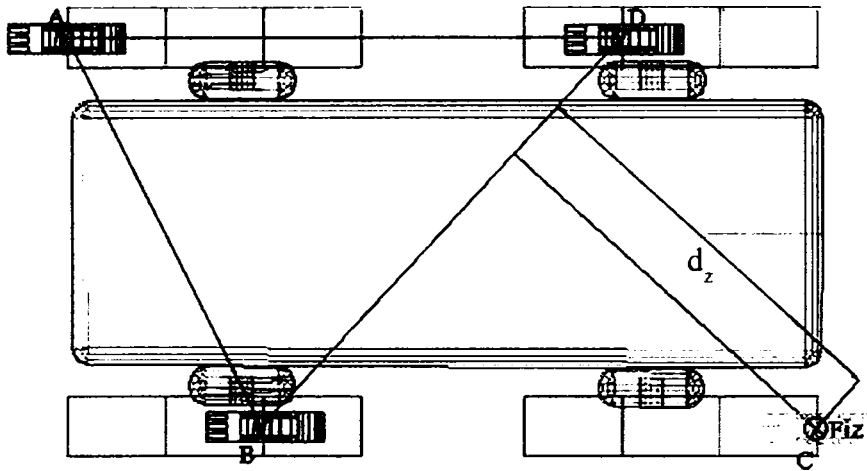


Figura 5.7: Momentul de inerție dat de forța de inerție F_{Iz} și de forța de greutate G_t în raport cu dreapta BD

- **Determinarea momentului dat de forța de inerție F_{Iy} în raport cu dreapta BD**

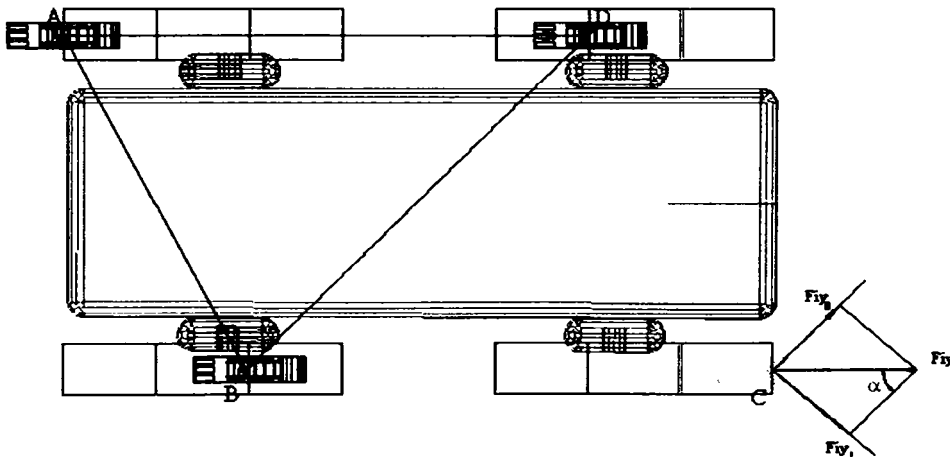


Figura 5.8: Momentul de inerție dat de forța de inerție F_{Iy} în raport cu dreapta BD

Componenta forței F_{Iy} după direcția perpendiculară pe dreapta BD se calculează cu relația (5.15).

$$F_{Iyp}(t) = F_{Iy}(t) \cdot \sin(\alpha_i) \quad (5.15)$$

Componenta forței F_{Iy} după direcția paralelă cu dreapta BD nu dă moment de răsturnare.

Momentul de inerție dat de forța de inerție F_{Iy} în raport cu dreapta BD se determină cu relația (5.16).

$$M_{Iy}(t) = F_{Iyp}(t) \cdot d_y(t) \quad (5.16)$$

unde $d_y(t)$ este distanța de la suportul forței de inerție la dreapta BD și se calculează cu relația $d_y(t) = h - z(t)$

În concluzie, momentul de inerție total ce apare în centrul de masă al piciorului este dat de relația (5.17).

$$M_I(t) = \sqrt{(M_{Iz}(t))^2 + M_{Iy}(t)^2} \quad (5.17)$$

• Dimensionare tălpii

Din condiția de stabilitate a platformei în faza de început de pășire se determină distanța de la dreapta BD până la vârful tălpii (relația (5.18)).

$$x = \frac{M_{I_{max}}}{R_t} \quad (5.18)$$

unde $M_{I_{max}}$ este valoarea maximă a momentului de inerție total ce apare în centrul de masă al piciorului, iar R_t este reacțiunea totală ce apare în acest moment.

În funcție de presiunea de contact (relația 5.19) pentru diferite tipuri de sol se va dimensiona talpa robotului pășitor patruped pentru obținerea unei stabilități statice a acestuia indiferent de terenul pe care evoluează.

$$A_{talpa} = \frac{R_t}{p} \quad (5.19)$$

unde A_{talpa} este suprafața tălpii (talpa poate fi rotundă, dreptunghiulară, etc.)

5.4 Rezultate experimentale

Pentru calculul reacțiunilor este necesar determinarea masei totale a corpului robotului (s-a luat în calcul masa corpului, masa componentelor aflate pe acesta, sarcina maximă - 3 kg, etc.).

$$\begin{cases} m_t = 4 \cdot kg \\ G_t = m_t \cdot g \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} G_t = 40 \cdot N \end{cases}$$

- **Calculul forțelor de reacțiune ce acționează asupra picioarelor ce formează poligonul de sprijin**

Piciorul A în faza de pășire

Început pășire picior A

$$\begin{cases} l_{CG'} = 69.934 \cdot mm \\ l_{GG'} = 12.183 \cdot mm \\ l_{CG} = 57.751 \cdot mm \\ l_{BD} = 69.934 \cdot mm \\ l_{BG'} = 12.183 \cdot mm \\ l_{GD} = 57.751 \cdot mm \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} G' = 33.03 \cdot N \\ R_C = 6.96 \cdot N \\ R_D = 20.05 \cdot N \\ R_B = 12.97 \cdot N \end{cases}$$

Sfârșit pășire picior A

$$\begin{cases} l_{BG} = l_{GD} = \frac{l_{BD}}{2} = 34.967 \cdot mm \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_D = 20 \cdot N \\ R_B = 20 \cdot N \end{cases}$$

Piciorul C în faza de pășire

Început pășire picior C

$$\begin{cases} l_{BG} = l_{GD} = \frac{l_{BD}}{2} = 34.967 \cdot mm \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_D = 20 \cdot N \\ R_B = 20 \cdot N \end{cases}$$

Sfârșit pășire picior C

$$\begin{cases} l_{DG} = 57.867 \cdot mm \\ l_{GG'} = 27.571 \cdot mm \\ l_{DG'} = 85.439 \cdot mm \\ l_{AB} = 73.772 \cdot mm \\ l_{BG'} = 19.380 \cdot mm \\ l_{G'A} = 54,391 \cdot mm \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} G' = 59.05 \cdot N \\ R_D = 19.05 \cdot N \\ R_A = 15.51 \cdot N \\ R_B = 43.54 \cdot N \end{cases}$$

Piciorul B în faza de pășire

Început pășire picior B

$$\left\{ \begin{array}{l} l_{DG'} = 70.003 \cdot mm \\ l_{GG'} = 12.396 \cdot mm \\ l_{DG} = 57.607 \cdot mm \\ l_{AC} = 90.267 \cdot mm \\ l_{AG'} = 54.549 \cdot mm \\ l_{G'C} = 35.71708 \cdot mm \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} G' = 32.91 \cdot N \\ R_D = 7.08 \cdot N \\ R_C = 19.89 \cdot N \\ R_A = 13.02 \cdot N \end{array} \right.$$

Sfârșit pășire picior B

$$\left\{ \begin{array}{l} l_{AG} = l_{GC} = \frac{l_{AC}}{2} \cdot mm \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} R_C = 20 \cdot N \\ R_A = 20 \cdot N \end{array} \right.$$

Piciorul D în faza de pășire

Început pășire picior D

$$\left\{ \begin{array}{l} l_{AG} = l_{GC} = \frac{l_{AC}}{2} \cdot mm \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} R_C = 20 \cdot N \\ R_A = 20 \cdot N \end{array} \right.$$

Sfârșit pășire picior D

$$\left\{ \begin{array}{l} l_{CG'} = 70.027 \cdot mm \\ l_{GG'} = 12.276 \cdot mm \\ l_{BG} = 57.751 \cdot mm \\ l_{AC} = 89.764 \cdot mm \\ l_{CG'} = 54.494 \cdot mm \\ l_{G'A} = 35.270 \cdot mm \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} G' = 32.98 \cdot N \\ R_B = 7.01 \cdot N \\ R_A = 20.02 \cdot N \\ R_C = 12.96 \cdot N \end{array} \right.$$

• **Torsorul forțelor masice**

Determinarea momentului de inerție masic se face pe baza relațiilor de mai jos.

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{1x} := m_1 \cdot \frac{r_1^2}{12} \\ J_{1x} := 0.87 \cdot kg \cdot m^2 \\ J_{2x} := m_2 \cdot \frac{r_2^2}{12} \\ J_{2x} := 1.096 \cdot kg \cdot m^2 \end{array} \right.$$

•^

Pentru femur componentele sunt determinate cu relațiile următoare, iar valorile numerice se regăsesc în tabela 5.1.

$$\begin{cases} F_{1y}(t) := -m_1 \cdot y_m''(t) \\ F_{1z}(t) := -m_1 \cdot (g + z_m''(t)) \\ M_{1x}(t) := -J_{1x} \cdot \alpha''(t) \end{cases}$$

Pentru tibie componentele sunt determinate cu relațiile următoare, iar valorile numerice se regăsesc în tabela 5.2.

$$\begin{cases} F_{2y}(t) := -m_2 \cdot y_m''(t) \\ F_{2z}(t) := -m_2 \cdot (g + z_m''(t)) \\ M_{2x}(t) := J_{2x} \cdot \beta''(t) \end{cases}$$

Pentru talpă componentele sunt determinate cu relațiile următoare, iar valorile numerice se regăsesc în tabela 5.3.

$$\begin{cases} F_{3y}(t) := -m_3 \cdot y_m''(t) \\ F_{3z}(t) := -m_3 \cdot (g + z_m''(t)) \\ M_{3x}(t) := 0 \end{cases}$$

Determinarea forței de inerție ce apare în centrul de masă al piciorului se face pe baza relațiilor de mai jos, iar valorile numerice se regăsesc în tabela 5.4.

$$\begin{cases} F_{Gy}(t) := -m_G \cdot y_G''(t) \\ F_{Gz}(t) := -m_G \cdot (z_G''(t) + g) \end{cases}$$

$F_{1y}(t) = N$	$F_{1z}(t) = N$	$M_{1x}(t) = N \cdot m$
0.00001	-2.943	1736.03614
0.00237	-3.07433	1765.4183
0.00637	-3.50421	1858.81306
0.00018	-4.36019	2034.573
-0.0477	-5.94138	2334.61327
-0.22289	-8.95551	2855.52777
-0.78873	-15.30565	3854.39802
-2.75626	-31.45939	6233.59044
-12.0569	-91.36625	15417.801
-141.37769	-772.16525	186378.01949
-330.50314	-1379.49922	-297170.19325
-42.69208	-142.1546	-11563.0953
-20.0536	-54.98826	-4131.42379
-22.48651	-49.9511	-3228.25106
-31.15287	-55.85174	-2700.51996
-40.42388	-59.04068	-1901.75606
-48.91101	-58.58346	-899.26446
-55.11285	-54.37571	166.03315
-58.03641	-47.28721	1119.89894
-57.61186	-38.79283	1820.68963
-54.53568	-30.26464	5988.61872
-41.35875	-19.56691	4996.06023
-31.34813	-13.04675	4106.04516
-23.91941	-9.08145	3374.08456
-18.41913	-6.6522	2796.57256
-14.31049	-5.14957	2349.53074
-11.19756	-4.21362	2005.98213
-8.80081	-3.6305	1742.23155
-6.92584	-3.27113	1539.32101
-5.43766	-3.05591	1382.70071
-4.46804	-3.03174	1314.84843
-3.81375	-3.10743	1309.91485
-3.15837	-3.14574	1297.91446
-2.52041	-3.15365	1280.98012
-1.919	-3.13879	1261.24046
-1.37288	-3.109	1240.71676
-0.89948	-3.072	1221.23888
-0.51415	-3.03487	1204.37966
-0.22948	-3.00367	1191.40621
-0.05483	-2.98302	1183.24552
0.00403	-2.9758	1180.46212

Tabela 5.1: Torsorul forțelor masice - femur

$F_{2y}(t) = N$	$F_{2z}(t) = N$	$M_{2x}(t) = N \cdot m$
31.42183	-19.32518	3062.0591
32.16684	-19.47714	3098.46119
34.51964	-19.96125	3214.8906
38.88825	-20.87432	3436.68417
46.18764	-22.43	3822.0929
58.46951	-25.10415	4506.80212
81.00059	-30.14945	5857.44919
131.46475	-42.17417	9186.22167
310.9583	-93.37131	22563.34871
3374.58049	-1448.49401	282111.9508
-5614.34866	4553.5573	-449554.57649
-292.989	253.65758	-14958.5597
-126.86069	96.95998	-4358.55963
-113.76291	91.71547	-2846.76048
-117.98413	99.24168	-1700.6122
-119.75135	92.71578	-195.95124
-119.59808	69.39145	1536.60753
-118.48221	31.68809	3266.71057
-117.25859	-12.70536	4731.94809
-116.21072	-54.0147	5737.26423
-84.30568	-231.87908	9558.75343
-72.19856	-206.95049	7529.12652
-61.09705	-177.22495	5806.89412
-51.19076	-149.17236	4430.86611
-42.58106	-125.14078	3361.92262
-35.239	-105.47626	2540.35537
-29.05251	-89.73139	1909.54389
-23.87542	-77.24018	1423.11521
-19.55872	-67.3546	1045.41405
-15.96618	-59.52338	749.81802
-13.13434	-55.91203	614.41736
-10.6364	-55.39241	595.67469
-8.20735	-54.58157	566.33884
-5.91021	-53.5785	529.77761
-3.80206	-52.48155	489.4694
-1.93303	-51.38317	448.79423
-0.34578	-50.36594	410.86279
0.9248	-49.49993	378.3817
1.85162	-48.84089	353.55129
2.4154	-48.42919	337.99184
2.60461	-48.28924	332.69424

Tabela 5.2: Torsorul forțelor masice - tibie

$F_{Gy}(t) = N$	$F_{Gz}(t) = N$
31.42183	5.75784
32.16921	5.47456
34.52601	4.56057
38.88843	2.79152
46.13994	-0.34536
58.24661	-6.03363
80.21187	-17.42908
128.70849	-45.60753
298.9014	-156.71153
3233.2028	-2192.63323
-5944.8518	3202.08411
-335.68108	139.52901
-146.91429	69.99775
-136.24941	69.7904
-149.137	71.41598
-160.17523	61.70112
-168.50909	38.83402
-173.59505	5.33841
-175.295	-31.96654
-173.82258	-64.78151
-138.84136	-295.07474
-113.55731	-259.44843
-92.44517	-223.20273
-75.11016	-191.18483
-61.00019	-164.72401
-49.54949	-143.55686
-40.25008	-126.87604
-32.67624	-113.80171
-26.48456	-103.55676
-21.40385	-95.51032
-17.60239	-91.87479
-14.45016	-91.43087
-11.36572	-90.65833
-8.43061	-89.66318
-5.72105	-88.55137
-3.30591	-87.42319
-1.24526	-86.36896
0.41065	-85.46583
1.62214	-84.77559
2.36057	-84.34324
2.60864	-84.19607

Tabela 5.4: Valorile pentru componentele forței de inerție ce apare în centrul de masă al piciorului aflat în faza de pășire

- Stabilirea dimensiunii tălpii din condiția de stabilitate a platformei la începutul fazei de pășire

Determinarea momentului dat de forța de inerție F_{Gz} și de forța de greutate G_t în raport cu dreapta BD (figura 5.9)

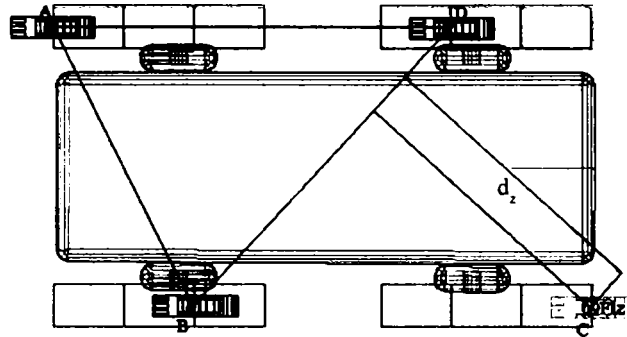


Figura 5.9: Momentul de inerție dat de forța de inerție F_{Iz} și de forța de greutate G_t în raport cu dreapta BD

Forța de greutate G_t are următoarea valoare:

$$\begin{cases} G_t := m_G \cdot g \\ G_t = 8.3385 \cdot N \end{cases}$$

Distanța de la suportul forței de inerție la dreapta BD este:

$$d_z := 231.19 \cdot mm$$

Momentul dat de forța de inerție F_{Gz} și de forța de greutate în raport cu dreapta BD se calculează cu expresia de mai jos, iar valorile numerice se găsesc în tabela 5.5.

$$M_{iz}(t) := (F_{Gz}(t) + G_t) \cdot d_z$$

Determinarea momentului dat de forța de inerție F_{Gy} și de forța de greutate G_t în raport cu dreapta BD (figura 5.10)

Componenta după direcția perpendiculară pe BD are valoarea:

$$\begin{cases} \alpha_i := 47 \cdot deg \\ F_{Gyp}(t) := F_{Gy}(t) \cdot \sin(\alpha_i) \end{cases}$$

Componenta după direcția paralelă cu dreapta BD nu dă moment de răsturnare.

Distanța de la suportul forței de inerție F_{iy} la dreapta BD are valoarea:

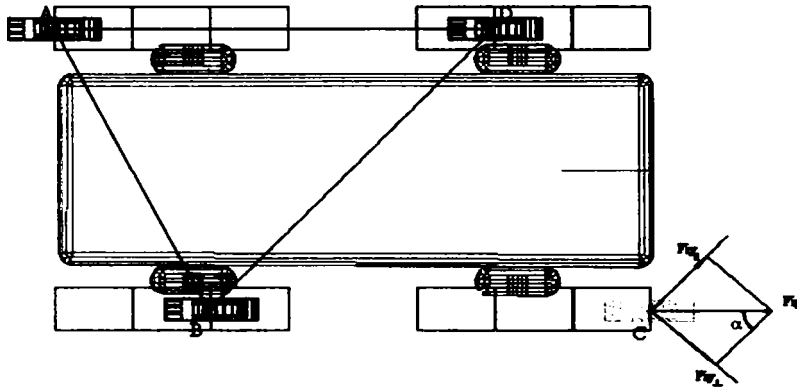


Figura 5.10: Momentul de inerție dat de forța de inerție F_{Iy} în raport cu dreapta BD

$$d_y(t) := h - z(t)$$

Momentul dat de forța de inerție F_{Gy} și de forța de greutate în raport cu dreapta BD se calculează cu expresia de mai jos, iar valorile numerice se găsesc în tabela 5.5.

$$M_{iy}(t) := F_{Gyp}(t) \cdot d_y(t)$$

Momentul de inerție total ce apare în centrul de masă al piciorului este calculat cu relația de mai jos, iar valorile numerice se găsesc în tabela 5.5.

$$M_i(t) := \sqrt{(M \cdot iz(t)^2 + M \cdot iy(t)^2)}$$

Variația momentului de inerție total ce apare în centrul de masă al piciorului pe durata unui ciclu de pășire este prezentată în figura 5.11.

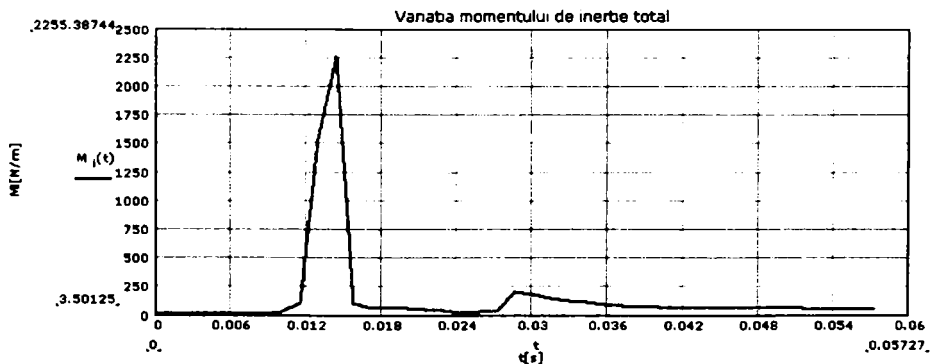


Figura 5.11: Variația momentului de inerție total ce apare în centrul de masă al piciorului în timpul fazei de pășire

$M_{iy}(t) = N \cdot m$	$M_{iz}(t) = N \cdot m$	$M_i(t) = N \cdot m$
1.60863	9.77694	9.9084
1.64983	9.58046	9.72148
1.78017	8.94653	9.12192
2.02287	7.71956	7.9802
2.42959	5.54388	6.0529
3.115	1.59861	3.50125
4.37032	-6.30504	7.67159
7.16555	-25.84905	26.82384
17.0504	-102.90857	104.3115
189.45641	-1514.98314	1526.78343
-358.67365	2226.68491	2255.38744
-20.89703	102.55795	104.66527
-9.4546	54.33245	55.14894
-9.07955	54.18864	54.94404
-10.30636	55.31611	56.26805
-11.49368	48.57808	49.91928
-12.56908	32.71792	35.04916
-13.47196	9.48603	16.47661
-14.16458	-16.38794	21.66102
-14.63335	-39.14774	41.79331
-12.18683	-198.87452	199.24757
-10.37225	-174.16482	174.4734
-8.75647	-149.02553	149.28257
-7.35473	-126.81856	127.03165
-6.15705	-108.46586	108.64048
-5.14165	-93.78475	93.92559
-4.28334	-82.21526	82.32677
-3.55797	-73.14717	73.23365
-2.9443	-66.04148	66.10708
-2.42446	-60.46063	60.50922
-2.02764	-57.9391	57.97457
-1.68962	-57.6312	57.65597
-1.34663	-57.09539	57.11127
-1.01043	-56.40517	56.41422
-0.69248	-55.63404	55.63835
-0.40347	-54.85156	54.85305
-0.153	-54.12037	54.12059
0.05072	-53.49397	53.494
0.20109	-53.01524	53.01562
0.29327	-52.71536	52.71618
0.32433	-52.61329	52.61429

Tabela 5.5: Valorile pentru momentul de inerție total ce apare în centrul de masă al piciorului în timpul fazei de pășire

Din tabela 5.5 se alege valoarea maximă pentru momentul total de inerție.

$$M_{imax} := 2255.38744 \cdot N \cdot m$$

Din condiția de stabilitate a platformei în faza de început de pășire se determină distanța de la dreapta BD până la vârful tălpii.

Reacțiunea totală ce apare în acest moment este:

$$R_t := 40 \cdot N$$

Distanța de la dreapta BD până la dreapta ce unește vârfurile tălpii este:

$$\begin{cases} x_{BD} := \frac{M_{imax}}{R_t} \\ x_{BD} = 56.38 \cdot mm \end{cases}$$

5.5 Concluzii

Distribuția forțelor de reacțiune din punctele de sprijin ale picioarelor este una din probleme importante care trebuie să fie rezolvată în vederea organizării picioarelor robotului pășitor pe un teren cu relief accidentat.

Pentru o configurație dată a picioarelor, forțele de reacțiune din punctele de sprijin sunt determinate univoc. La conducerea roboților pășitori cu un număr mare de picioare, o distribuție optimă a forțelor de reacțiune din punctele de sprijin poate fi luată în considerare la stabilirea strategiei de pășire. Mai mult, această strategie poate fi stabilită astfel încât forțele sau momentele motoare să fie minime, consumul de energie să fie minim, etc. Aceste criterii de optimizare a modului de deplasare a roboților pășitori pot fi luate în considerare separat sau mai multe simultan.

În cadrul acestui capitol, autoarea, a prezentat modelarea cinetostatică a piciorului robotului pășitor JQuadRobot. Se prezintă calculul forțelor de reacțiune ce acționează asupra picioarelor în faza de suport, studiul forțelor când punctul caracteristic urmărește o lege de mișcare, precum și efectul dinamic al piciorului care se ridică asupra stabilității platformei pășitoare.

Modelarea cinetostatică prezentată este originală, și se constituie a fi una din contribuțiile importante ale autoarei la realizarea obiectivelor propuse în Capitolul 1.

Capitolul 6

Contribuții la proiectarea și realizarea robotului mobil pășitor JQuadRobot

În acest capitol se prezintă componenta hardware folosită pentru aceste cercetări. Robotul mobil pășitor JQuadRobot realizat de autoare, este un sistem mecatronic multifuncțional, proiectat pentru a efectua mișcări planificate în scopul îndeplinirii unor obiective stabilite prin programul de lucru. Anvergura și complexitatea lucrărilor de realizare a unui astfel de sistem tehnic face necesară existența unui mediu integrat de dezvoltare a sistemelor mecatronice. Acesta necesită studii și cercetări interdisciplinare, pentru modelarea și simularea sistemelor mecanice de acționare, în vederea testării sistemului de comandă. Prezenta teză de doctorat abordează domeniul mai sus menționat dând răspunsuri și soluții, dar și generând probleme ce își așteaptă în continuare rezolvarea. În capitolele anterioare s-au determinat o serie de relații analitice referitoare la construcția de deplasare a roboților pășitori, modelarea cinematică a piciorului robotului pășitor și analiza mersului, analiza stabilității roboților în timpul deplasării, determinarea forțelor de contact ale picioarelor cu solul. În scopul verificării rezultatelor teoretice s-a conceput și realizat prototipul pășitor JQuadRobot. JQuadRobot este un robot de dimensiuni relativ reduse, realizat special pentru a identifica și rezolva problemele majore ce apar în

cazul locomoției roboților patrupezi, urmând ca în viitor să se realizeze un model de dimensiuni mari. Majoritatea cercetărilor în domeniul roboților pășitori au avut ca subiect de cercetare roboții hexapodi, deoarece aceștia prezintă o stabilitate mare în timpul deplasării. Roboții patrupezi necesită studii complexe în ceea ce privește stabilitatea în timpul pășirii.

6.1 Robotul pășitor patrupez JQuadRobot

Robotul pășitor JQuadRobot face parte din categoria roboților pășitori patrupezi cu o cinematică relativ simplă. Piciorul robotului JQuadRobot are o structura cinematică de tip RRR spațială, și este prezentată în figura 6.1.

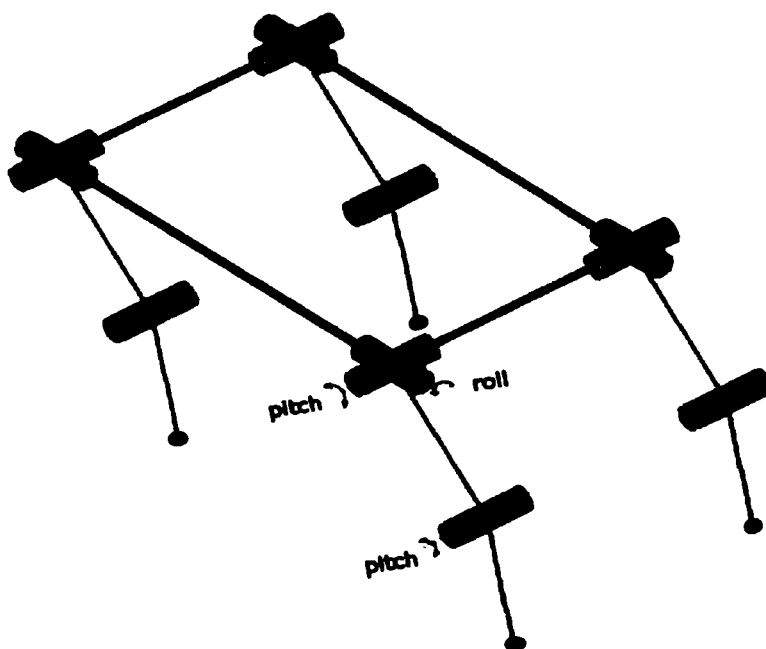


Figura 6.1: Robotul pășitor patrupez JQuadRobot - structura cinematică

Piciorul robotului JQuadRobot prezintă trei cuple de rotație active (două la nivelul șoldului și una la nivelul genunchiului) și o cupla de translație pasivă (la nivelul gleznei). Prezența cuplei pasive de la nivelul gleznei constituie un element de noutate adus de autoare în construcția robotului pășitor. Cupla pasivă este formată dintr-un switch și copită. Copita execută o mișcare de translație ducând la închiderea, respectiv

deschiderea switch-ului, în funcție de faza în care se găsește piciorul la un moment dat. Rolul cuplei pasive de translație este de a semnaliza dacă piciorul este sau nu în contact cu solul. În momentul în care piciorul pierde contactul cu solul, switch-ul trimite semnal circuit deschis către microcontroler. În acest moment se știe că piciorul respectiv este în faza de mișcare. La contactul cu solul se primește semnal circuit închis, ceea ce semnifică faptul că piciorul este în faza de suport. În figura 6.2 este prezentat modelul CAD, respectiv modelul real al cuplei pasive de la nivelul gleznei în figura 6.3.

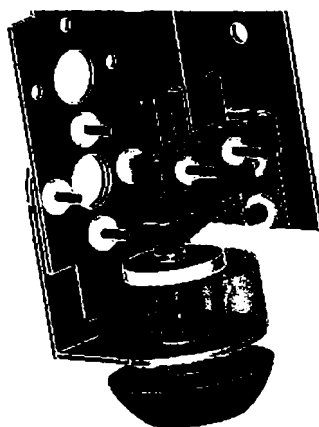


Figura 6.2: Cupla pasivă de la nivelul gleznei - modelul CAD

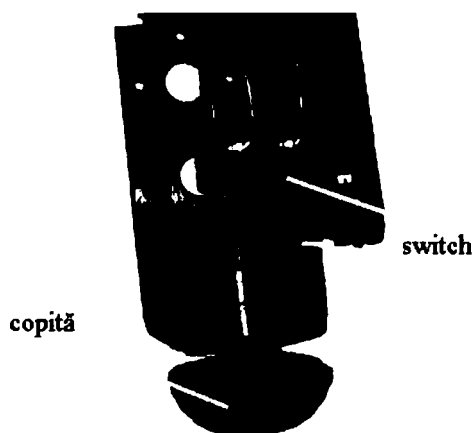


Figura 6.3: Cupla pasivă de la nivelul gleznei - modelul real

În figura 6.4 este prezentat modelul CAD al robotului JQuadRobot, iar prototipul realizat din aluminiu anodizat este prezentat în figura 6.5.

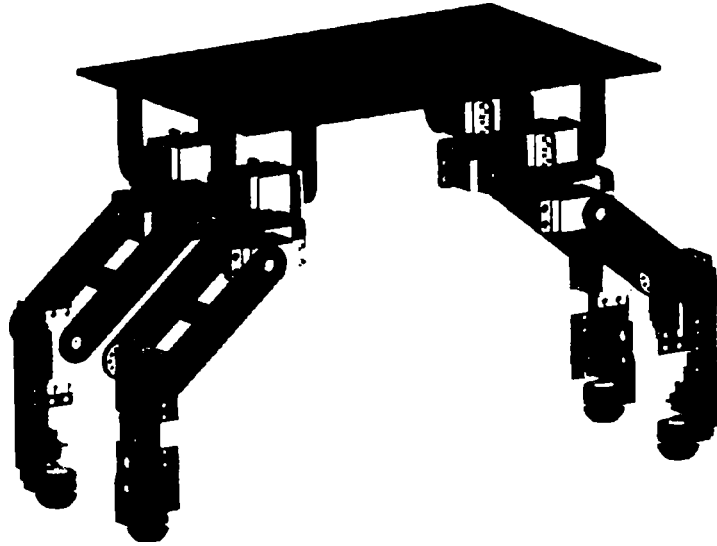


Figura 6.4: Robotul pășitor patruiped JQuadRobot - modelul CAD

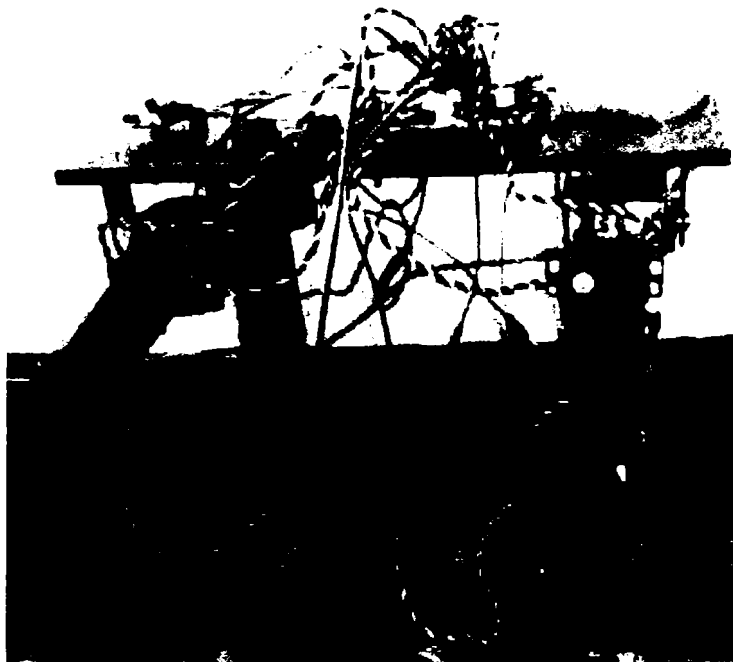


Figura 6.5: Robotul pășitor patruiped JQuadRobot - modelul real

Caracteristicile tehnice ale robotului pășitor patruiped JQuadRobot sunt: lungime - 300 mm; lățime - 200 mm; înălțime - 280 mm; masă - 3 kg; acționare - electrică.

6.2 Servomotoare de curent continuu

În robotică se folosesc 3 tipuri de motoare: motoare de curent continuu, motoare pas cu pas și servomotoare. Cât de mare, de puternic, ce tip trebuie să folosim?

Ce tip de motor e mai potrivit pentru un anumit fel de robot?

Dacă alegem varianta de deplasare a robotului cu roți, avem mai multe posibilități:

- 2 roți motoare conectate la un singur motor realizează propulsia și alte 2 roți pentru direcție, ca o mașină
- 2 roți motoare conectate la un singur motor și o roată pentru direcție
- 2 roți motoare conectate fiecare la câte un motor și una sau 2 roți pivotante pentru echilibrare (cea mai comună variantă, ca un tanc pe roți)

Șenilele sunt asemănătoare cu ultima variantă, dar mai dificil de construit.

Dacă ne hotărâm pentru picioare, mai întâi trebuie să alegem numărul acestora, de la 2 (cel mai greu) la 6 sau mai multe. Apoi trebuie să alegem gradele de libertate, acest număr determinând numărul de motoare de care avem nevoie.

Dacă clasificăm motoarele după putere, avem:

- motoare de curent continuu cu reductor sunt puternice, se folosesc la aproape orice tip de robot
- servomotoarele se folosesc la roboți sub 2,5 kg și la roboți cu picioare.
- motoare pas cu pas sunt slabe, se folosesc la roboți mici și ușori.

În tabela 6.1 se prezintă principalele avantaje și dezavantaje ale motoarelor de curent continuu, servomotoarelor și motoarelor pas cu pas.

Autoarea a optat pentru folosirea servomotoarelor în construcția robotului pa-truped JQuadRobot. Un servomotor constă într-o cutie din plastic sau metal, cu urechiuse de prindere pe laterale și un ax canelat pe care este montată o roată (sau un braț) cu gauri pentru a putea prinde parghiile de acționare. În interiorul acestei cutii se află un motor de curent continuu, o serie de roți dințate care creează un reductor de turație (și creșterea cuplului de forță) și o placă electronică de control cu bucla închisă (figura 6.6). Pe axul de ieșire este montat un potentiometru, al cărui poziție este identică cu a roții

tipul motorului	avantaje	dezavantaje	utilizare
motoare de c.c.	se găsesc ușor o mare varietate sunt puternice ușor de interfața	prea rapide au nevoie de reduc- tor de turație consumă mult difil de montat mai scumpe comandă de control complexă (PWM)	roboți mari
servomotoare	reductor de turație inclus mare varietate viteză bună pentru interior mai puțin scump putere bună pt roboți mici ușor de montat ușor de interfațat consum mediu	nu sunt bune pen- tru greutate mare controlul de viteză, destul de redus	roboți mici roboți cu picioare
motoare p.p.	control precis mare varietate viteză bună pentru interior ușor de interfațat ieftine	grele pentru pute- rea dezvoltată consumă mult masive ca mărime greu de montat nu sunt bune pen- tru greutate mare nu sunt prea puter- nice comandă de control complicată	se folosesc cu precădere la roboții ce au drept scop ur- mărire de linie, re- zolvare de labirint, etc.

Tabela 6.1: Avantajele și dezavantajele diferitelor tipuri de motoare

montate pe ax. Axul are limitator de cursă de circa 180 de grade. Din cutie iese un cablu cu 3 fire, negru - masa, roșu - plus și alb (sau galben) - semnal. Alimentarea se face între 5 și 6V, iar semnalul este un tren de pulsuri cu distanța între ele de la 1 la 2 ms (comandă PWM - pulse modulation wave) [70].

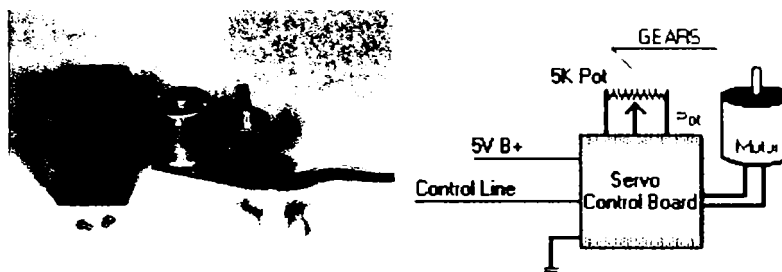


Figura 6.6: Componentele unui servomotor

Servomotorul funcționează astfel: pe placa electronică este un generator de semnal al cărui puls este controlat de valoarea potentiometrului. Acest semnal este introdus într-un comparator, împreună cu semnalul de comanda primit din exterior. Comparatorul comandă motorul să se învârtă în așa fel încat semnalele să devină identice. Pentru un semnal de 1 ms roata se poziționează complet la stânga, pentru 1,5 ms se poziționează la mijloc iar pentru 2 ms se poziționează complet la dreapta (figura 6.7). În programare, semnalul este generat digital, cu valorile între 100 și 200. Acest semnal de comanda trebuie reînviat la fiecare 20 ms pentru ca roata să-și păstreze poziția. Se menționează că timpii sunt relativi, ei depind de fiecare servomotor în parte [70].

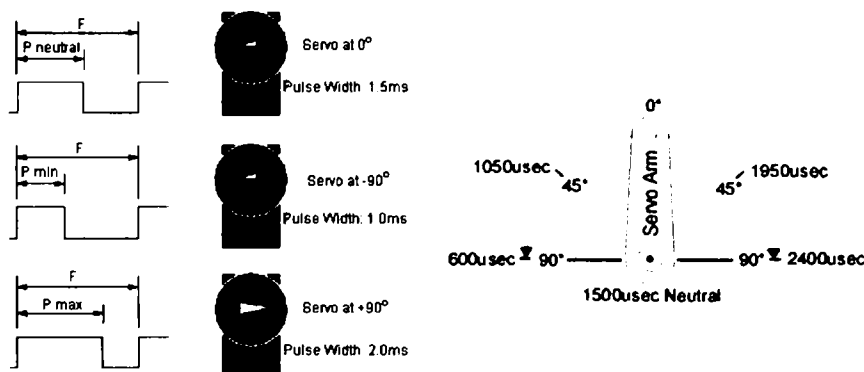


Figura 6.7: Poziționare servomotor

Robotul pășitor patruped JQuadRobot este echipat cu servomotoare digitale Hitec HS-5955TG (figura 6.8).

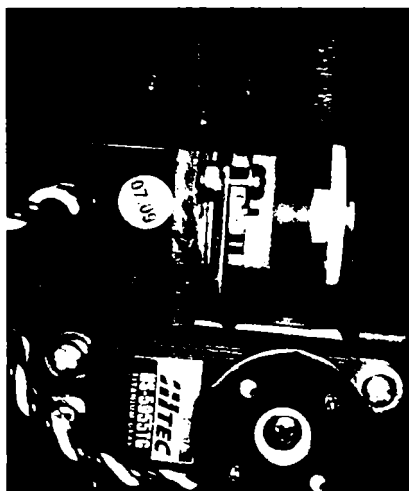


Figura 6.8: Motorul Hitec HS-5955TG

Servomotorul Hitec HS-5955TG prezintă următoarele caracteristici tehnice care au dus la alegerea sa [24]:

- Tip control = PWM (pulse modulation wave), poziția de zero la 1500uS
- Raza de acțiune = 180° (360° capabil după programare cu programatorul DSP-01)
- Tensiunea de alimentare = 4.8 - 6.0 V
- Cuplu motor = 24 kg-cm
- Viteza de rotație = 0.15s /60deg la 6V sau 0.19s /60deg la 4.8V
- Curent de lucru cu încărcare = 4200mA la 6V sau 3400mA la 4.8V
- Curent de lucru fără încărcare = 300mA la 6V sau 220mA la 4.8V
- Curent reactiv = 3mA
- Tipul amplificatorului = Amplificator Digital cu MOSFET DRIVE
- Reductor din aliaj de titan cu doi rulmenți cu bile
- Greutate = 62g
- Dimensiuni = 40mm x 20mm x 37mm

6.3 Sistemul de comandă și control

Controlul robotului pășitor JQuadRobot este realizat cu ajutorul plăcii de control pentru servomotoare SSC-32 Servo Controller, respectiv cu ajutorul plăcii de control Mini ABB II (Atom Bot Board II) pe care este montat microcontrolul Basic Atom Pro 28 Pin. Întregul montaj este prezentat în figura 6.9.

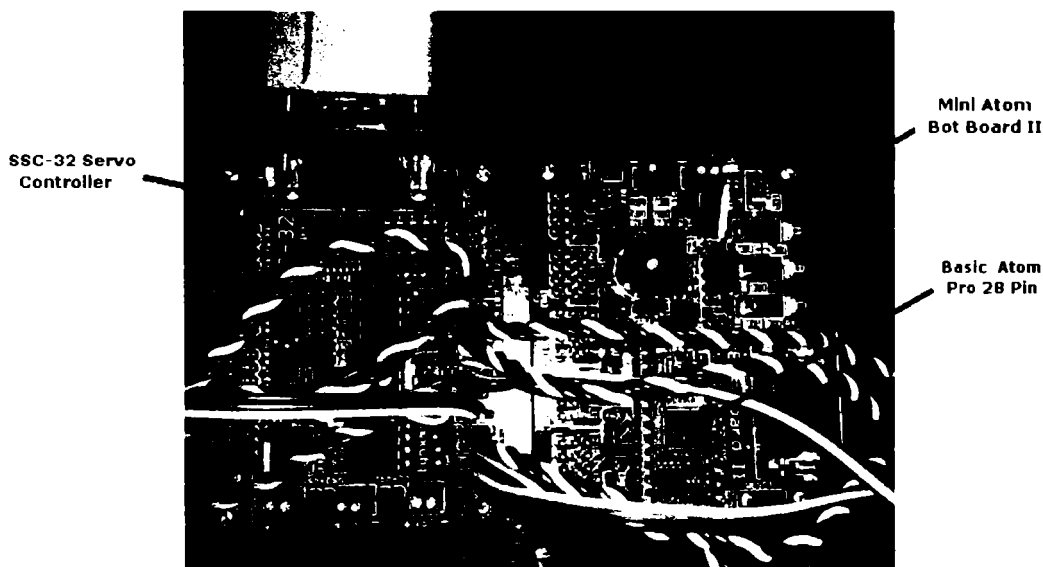


Figura 6.9: Montaj SSC-32 cu ABB II

SSC-32 Servo Controller

Specificațiile tehnice ale plăcii de control SSC-32 Servo Controller sunt [40]:

- Microcontroler = Atmel ATMEGA168-20PU
- EEPROM = 24LC32P (Required for 2.01GP)
- Frecvență de operare = 14.75 MHz
- Număr de ieșiri = 32 (Servo or TTL)
- Număr de intrări = 4 (Static or Latching, Analog or Digital)
- Curent de lucru = 31mA
- Interfața cu calculatorul = DB9F (serială)

- Servomotoare comandate = Până la 32 de servomotoare conectate direct
- Tipul servomotorului suportat = Futaba or Hitec
- Raza de acțiune a servomotorului = 180°
- Servo resolution = 1uS, 0.09°
- Servo speed resolution = 1uS/Second
- Controlul mișcării servomotoarelor = Immediate, Timed, Speed or Synchronized.
- Dimensiuni = 3.0" x 2.3"

Linia de comandă trimisă spre execuție are următoare formă:

```
# <ch> P <pw> S <spd> ... # <ch> P <pw> S <spd> T <time> <cr>
```

unde:

<ch> - numărul canalului (de la 0 la 31)

<pw> - valoarea în microsecunde (pulse width) între 500 - 2500

<spd> - viteza de mișcare în microsecunde pentru un canal

<time> - timpul în milisecunde pentru întreaga mișcare , maxim 65535

<cr> - returnează caracterul ASCII 13 (incepe execuția comenzii)

<esc> - returnează caracterul ASCII 27 (anulează execuția comenzii)

Exemplul de comandă pentru mișcarea unui servomotor:

```
# 5 P1600 S750 <cr>
```

Comanda de mai sus mișcă servomotorul de pe canalul 5 la poziția 1600. El va fi mișcat din poziția curentă cu o viteză de mișcare de 750uS/secunde până ajunge în poziția dorită.

Se precizează faptul că pot fi trimise comenzi către mai multe servomotoare odată, combinându-se viteza de execuție cu timpul de execuție. Viteza pentru fiecare servomotor va fi calculată în conformitate cu următoarele reguli:

- toate canalele vor porni și vor termina simultan mișcarea
- dacă viteza este specificată, mișcarea nu se va executa decât cu viteza specificată, nici mai repede, nici mai încet

- dacă timpul în care are loc mișcarea este specificat, atunci mișcarea va dura atât cât este specificat, nici mai mult, nici mai puțin

Diagrama de conectare dintre SCC-32 și Mini ABB II, respectiv conectarea servomotoarelor pe SCC-32 este prezentată în figura 6.10.

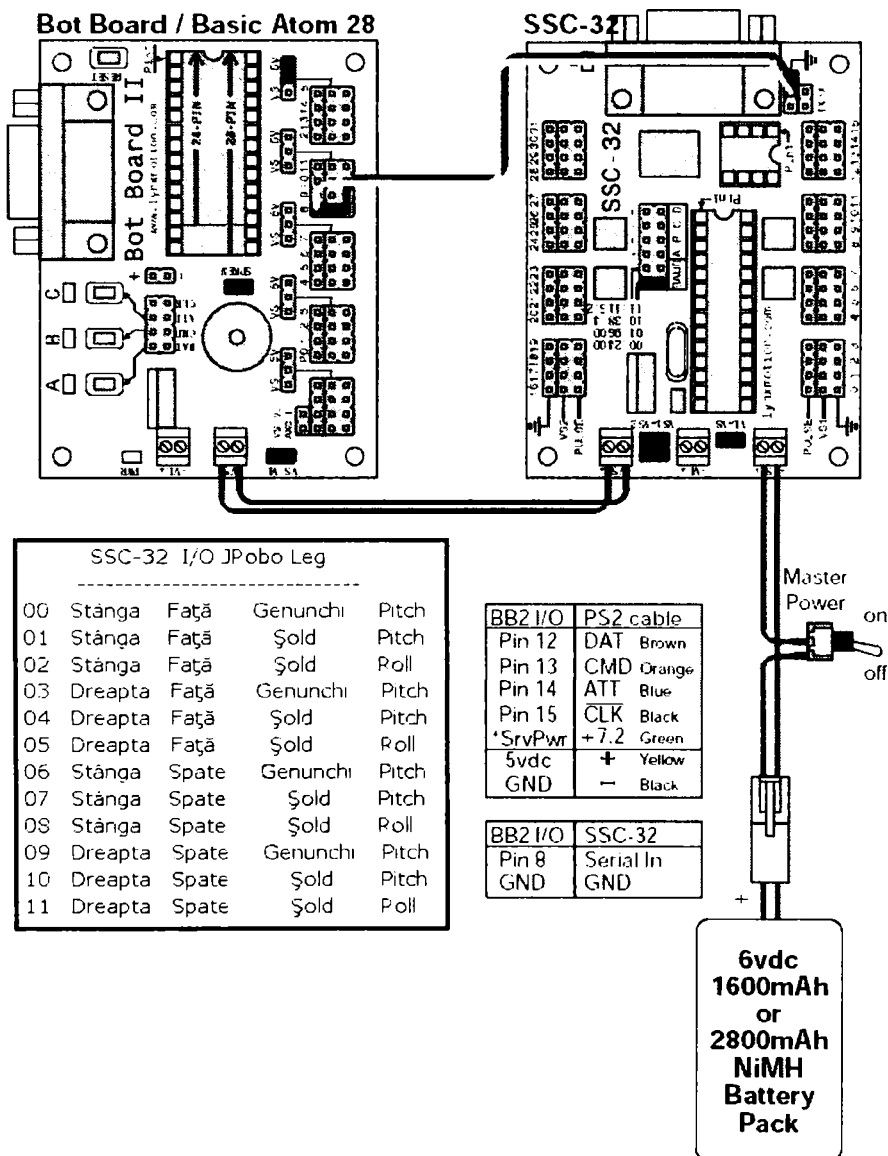


Figura 6.10: Diagrama de conectare SSC-32 cu ABB II

Portul serial

Comunicarea dintre SSC-32, Mini ABB II și calculator de face prin portul serial. Portul serial al calculatorului este compatibil cu standardul RS-232C. Acest standard a fost proiectat în anul 1960 pentru a realiza comunicația dintre un echipament terminal de date sau DTE (calculatorul în acest caz) și un echipament de comunicare de date ori DCE (în mod normal un modem). Standardul presupune prezența a 25 de pini, conectorul DTE trebuind să fie tată, iar conectorul DCE mamă. Cei mai des utilizați conectori sunt DB-25 tata, dar nu sunt utilizați toți cei 25 de pini. Din această cauză multe calculatoare moderne utilizează conector DB-9 tată. Nivelul tensiunilor pentru semnalele din conector sunt cuprinse între -3V și +15V. Valorile de tensiune cel mai des folosite sunt +12V și -12V [7].

Semnalele cele mai utilizate sunt prezentate în continuare, convențiile sunt diferite după cum liniile sunt de intrare sau de ieșire, de date sau de control.

TD - Transmitted Data (emisie de date); acest semnal este emis de la calculator către modem.

RD - Received Data (recepție de date; semnal emis de la modem către calculator.

RTS - Request To Send (cerere de emisie); calculatorul setează acest semnal când are pregătit un caracter pentru a-l transmite.

CTS - Clear To Send (gata de emisie); Modemul este pregătit pentru a transmite datele. Computerul va începe să transmită date spre modem.

DSR - Data Set Ready (modem pregătit); Modemul comunica calculatorului că este în funcțiune și este pregătit să transmită sau să primească date.

DTR - Data Terminal Ready (terminal pregătit); calculatorul comunică modemului că este în funcțiune și este pregătit să transmită date.

DCD - Data Carrier Detect (detectie purtătoare); Modemul setează acest semnal când detectează computerul.

RI - Ring Indicator (indicator de apel); semnal emis de modem semnalând faptul ca sună telefonul.

Pe lângă aplicația de bază pentru care inițial a fost proiectat, aceea de comunicație a calculatorului cu un modem, în general se poate dezvolta orice altă aplicație care presupune comunicație serială. Astfel, la calculator se poate cupla prin conectorul COM (1

sau 2) un mouse serial, un zip, o imprimantă serială, un router hardware, un sistem de achiziție de date care să fie compatibil cu norma RS232, sau se poate realiza pe distanțe scurte (zeci de metri) legături între doua calculatoare, și lista poate continua. În figura 6.11 se prezintă conectorul serial cu 9 pini DB-9, iar în figura 6.12 se prezintă asignarea semnalelor portului serial la pinii conectorului DB-9.

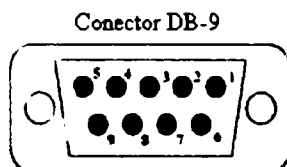


Figura 6.11: Conectorul DB-9 utilizat pentru porturile seriale ale calculatoarelor

Pin	Semnal	Semnificație	← In → Out
1	CD	Carrier Detect	←
2	RD	Receive Data	←
3	TD	Transmit Data	→
4	DTR	Data Terminal Ready	→
5	SG	Signal Ground	
6	DSR	Data Set Ready	←
7	RTS	Request To Send	→
8	CTS	Clear To Send	←
9	RI	Ring Indicator	←

Figura 6.12: Asignarea semnalelor la pinii conectorului DB-9 al portului serial.

Senzori

Robotul JQuadRobot prezintă un senzor de proximitate pentru detectare obstacole, tip IRPD (figura 6.13). Acest tip de senzor detectează obiectele care au nuanțe de culoare deschisă (albă) de la o distanță mai mare decât cele de nuanțe de culoarea închisă (neagră), deci în momentul calibrării lui trebuie ținut cont de acest lucru. Senzorul se utilizează pentru a detecta obiecte pe o arie mică de lucru.

În figura 6.14 este prezentat principiul de detectare a obstacolelor pe o rază de 8 inch. Raza de acțiune a senzorului poate fi setată între 6 și 24 inch.

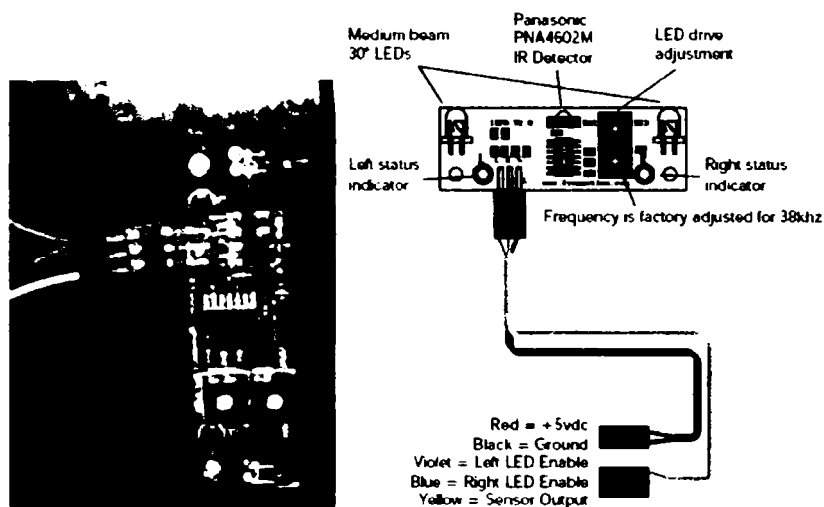


Figura 6.13: Senzorul de proximitate IRPD

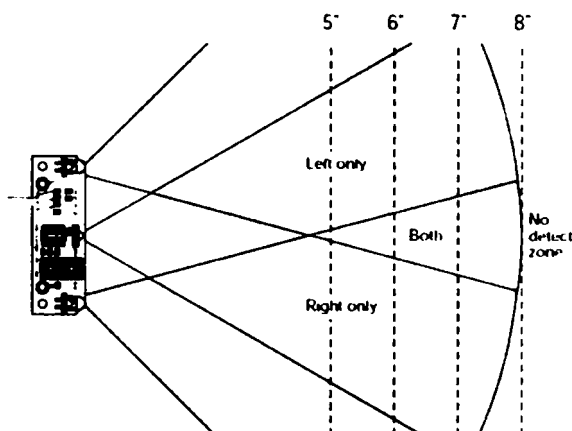


Figura 6.14: Detectare obstacole pe o rază de 8 inch [37]

Robotul JQuadRobot prezintă câte un switch de tipul celui prezentat în figura 6.15 la nivelul gleznei, pentru a semnală dacă piciorul se află în faza de pășire sau în faza de suport.

Sistemul de alimentare

Sursa de alimentare este formată din doi acumulatori reîncărcabil de tip 6V Ni-MH 2800mAh pentru alimentarea servomotoarelor când robotul este în regim de mișcare autonom și din patru acumulatori tip A1 pentru alimentarea plăcii de control SSC-32. Pentru teste și încercări alimentarea motoarelor se face cu ajutorul unei surse AC-DC în

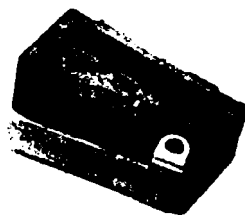


Figura 6.15: Switch

comutație tip S-240 5V/40A. S-a ales folosirea acestei surse de alimentare în regim neautonom pentru comanda motoarelor din cauză că un singur motor necesită la o tensiune de 5V o intensitate a curentului de 3.4A, ceea ce face ca 12 motoare să necesite 40.8A la 5V. Se menționează faptul că sursa în comutație s-a folosit strict pentru alimentarea motoarelor, pentru alimentarea plăcii de control sursa în comutație nu este folosită, deoarece placa de control necesită tensiuni între 6V-9V, fapt ce duce la alimentarea separată a acesteia.

În figura 6.16 este prezentată sursa AC-DC în comutație tip S-240 5V/40A folosită, iar în figura 6.17 acumulatorul reîncărcabil de tip 6V Ni-MH 2800mAh.



Figura 6.16: Sursa AC-DC în comutație tip S-240 5V/40A



Figura 6.17: Acumulatorul reîncărcabil de tip 6V Ni-MH 2800mAh

6.4 Funcționarea robotului pășitor patruped JQuadRobot

Algoritmul de pășire constă în repetarea ciclică a unor secvențe de mișcări ale articulațiilor, care au ca rezultat mișcarea pe rând a picioarelor în față. Deplasarea piciorului în faza de pășire se face prin modificarea valorilor coordonatelor generalizate conform algoritmului de calcul stabilit. Când toate picioarele se află în faza de suport, are loc împingerea corpului în față.

O problemă particulară, care apare numai în timpul deplasării robotului pășitor patruped, este aceea a menținerii stabilității în timpul fazei de pășire a unui picior. Prin ridicarea unui picior, poligonul de sprijin își modifică forma, din patrulater devine triunghi, iar proiecția centrului de greutate se află - la limită - într-o zonă din apropierea unei laturi a triunghiului de sprijin. Rezolvarea acestei probleme se face prin translația corpului în cazul mersului ondulat sau rotirea corpului în cazul mersului legănat, în partea opusă laturii de pe care urmează ca un picior să se afle în faza de pășire, astfel încât proiecția verticală a centrului de greutate să se deplaseze în interiorul triunghiului de sprijin. Deplasarea piciorului în faza de pășire se face prin modificarea valorilor coordonatelor generalizate conform algoritmului de calcul.

Datorită condițiilor specifice de deplasare pe care trebuie să le îndeplinească robotul pășitor, problema asigurării stabilității mersului apare exclusiv în legătură cu deplasarea robotului cu patru picioare. Stabilitatea robotului pășitor cu șase picioare se realizează prin alegerea tipului corespunzător de mers. Pentru asigurarea stabilității statice, la deplasarea robotului patruped, s-a realizat menținerea proiecției verticale a centrului de greutate în interiorul poligonului de sprijin.

Pentru menținerea proiecției centrului de greutate în interiorul poligonului (triunghiului) de sprijin, se pot folosi mai multe metode. În cursul încercărilor s-a experimentat pe modelul realizat mersul ondulat static stabil (prima metodă) la deplasarea robotului pășitor patruped pe o suprafață orizontală. Rezolvarea problemei stabilității s-a făcut prin rototranslația corpului în partea opusă laturii de pe care urmează ca un picior să se afle în faza de pășire, astfel încât proiecția verticală a centrului de greutate să se deplaseze în interiorul triunghiului de sprijin. Algoritmul de pășire constă în repetarea ciclică a unor secvențe de mișcări ale elementelor, care au ca rezultat mișcarea pe rând a picioarelor conform algoritmului din programul de pășire. Cea de a doua metodă de

deplasare, corespunzătoare mersului legănat, implică rotirea corpului robotului în jurul unei laturi a triunghiului de sprijin, care trece prin extremitățile a două picioare diagonal opuse (figura 6.18). Mișcarea de rotație se realizează prin acționarea picioarelor care se sprijină în extremitățile celeilalte diagonale.

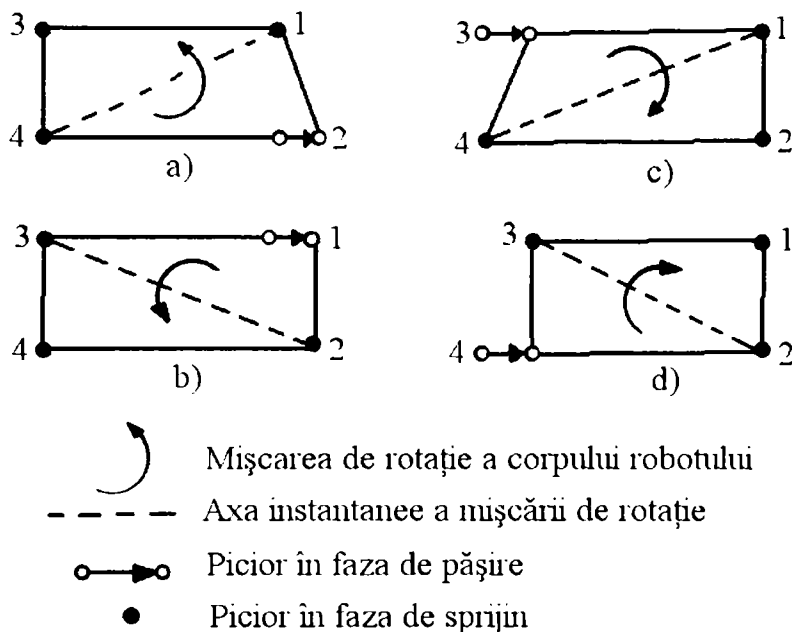


Figura 6.18: Mersul legănat la robotul patruped

În cazul deplasării cu un mers legănat, pentru menținerea proiecției centrului de greutate în interiorul triunghiului creat de suprafețele de sprijin ale picioarelor 1, 3, 4, înainte de ridicarea piciorului 2, se flexează piciorul 3 prin micșorarea valorii unghiului Φ_B , concomitent cu extinderea piciorului 2, prin mărirea valorii unghiului Φ_B . În felul acesta, corpul robotului se rotește în jurul unei drepte care trece prin suprafețele de sprijin ale picioarelor 1 și 4. Extinderea piciorului 2 și flexarea piciorului 3 se face cu o valoare h . Mărirea distanței h este limitată de configurație terenului și de dimensiunile poligonului de sprijin, și corelată cu informațiile furnizate de un inclinometru, astfel încât proiecția verticală a centrului de greutate a sistemului să rămână totdeauna în interiorul acestui poligon. După efectuarea mișcării de pașire a piciorului 2, piciorul 3 revine la configurația inițială. Modificarea configurației unui picior al robotului de face prin variația unghiului Φ_B , dintre femur și tibie (figura 6.19).

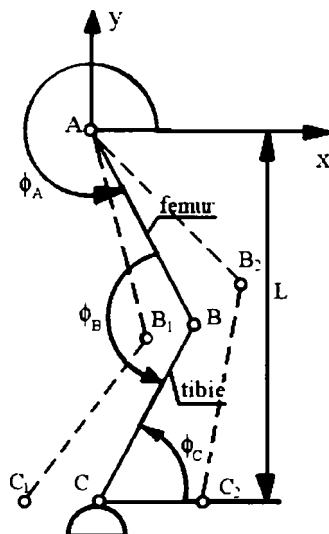


Figura 6.19: Variația configurației piciorului în timpul mersului legănat

Pentru ridicarea și deplasarea piciorului 1 în condiții de menținere a stabilității statice, este necesară rotirea corpului robotului în jurul dreptei care trece prin suprafețele de sprijin ale picioarelor 2 și 3 (figura 6.18). În acest scop, se flexează piciorului 4 și se extinde piciorul 1. Modificările configurațiilor picioarelor 1 și 4 trebuie să se facă astfel încât picioarele cu numere 2 și 3 să nu se ridice de pe sol. În continuare, procedeul se repetă în conformitate cu algoritmul ales pentru mers.

O altă posibilitate de realizare a mersului legănat se face prin rotirea corpului în jurul unei drepte care trece printr-unul din vârfurile patrulaterului de sprijin și este paralelă (aproximativ) cu diagonala opusă. Astfel, înainte de ridicarea piciorului 2, se flexează picioarelor 1, 3 și 4 (figura 6.20). După ce suprafața de sprijin a piciorului 2 s-a deplasat în direcția de mers, din 2 până în 2', configurațiile celorlalte picioare revin la formele inițiale.

În mersul static stabil experimentat, robotul pășitor JQuadRobot se deplasează cu viteză constantă, pe o suprafață plană, menținând stabilitatea prin rotirea corpului și repetând algoritmul prezentat.

Parametrii mersului static stabil sunt:

p_t = pasul;

Δ_x = distanța cu care se deplasează platforma în intervalul de eșantionare;

H_p = înălțimea maximă a traiectoriei descrisă de punctul caracteristic C situat la

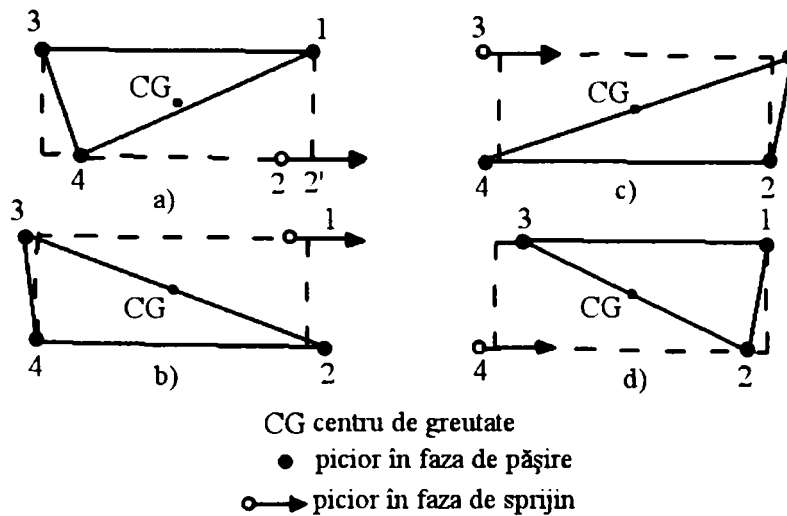


Figura 6.20: Mersul legănat static stabil la robotul patruped

extremitatea piciorului în timpul fazei de pășire;

L = distanța măsurată pe direcția axei Oy de la extremitatea C a piciorului până la axa cuplei A ;

h = distanța cu care se modifică lungimea L atunci când corpul se rotește datorită modificării unghiului Φ_B

În cazul experimentului, s-au folosit următoarele valori pentru parametrilor mersului:

$$p_t = 0.030\text{m};$$

$$\Delta_x = 0.005\text{m};$$

$$H_p = 0.060\text{m};$$

$$L = 0.250\text{m};$$

$$h = 0.020\text{m}$$

Pentru ca robotul pășitor să poată realiza o viteză de deplasare mai mare, este necesară o mișcare minimă a centrului de greutate, care este posibil de realizat prin mersul în diagonală, mult mai apropiat de mersul natural al patrupedelor. Soluțiile tehnice adoptate în faza din proiectare a robotului pășitor JQuadRobot au urmărit realizarea unei simetrii în amplasarea componentelor, astfel încât centrul, de greutate la robotului să se afle la intersecția planelor diagonale ale corpului (respectând ipotezele adoptate), când toate picioarele robotului se află în faza de suport. Pentru menținerea stabilității

robotului în timpul deplasării cu un mers semidinamic, proiecția centrului de greutate trebuie să se afle pe diagonala perechii picioarelor opuse aflate la un moment dat în faza de suport (de exemplu, picioarele 1 și 4), în timp ce în faza de pășire se află cealaltă pereche de picioare (perechea 2-3).

În figura 6.21 se prezintă o secvență din deplasarea robotului pășitor patruped JQuadRobot.

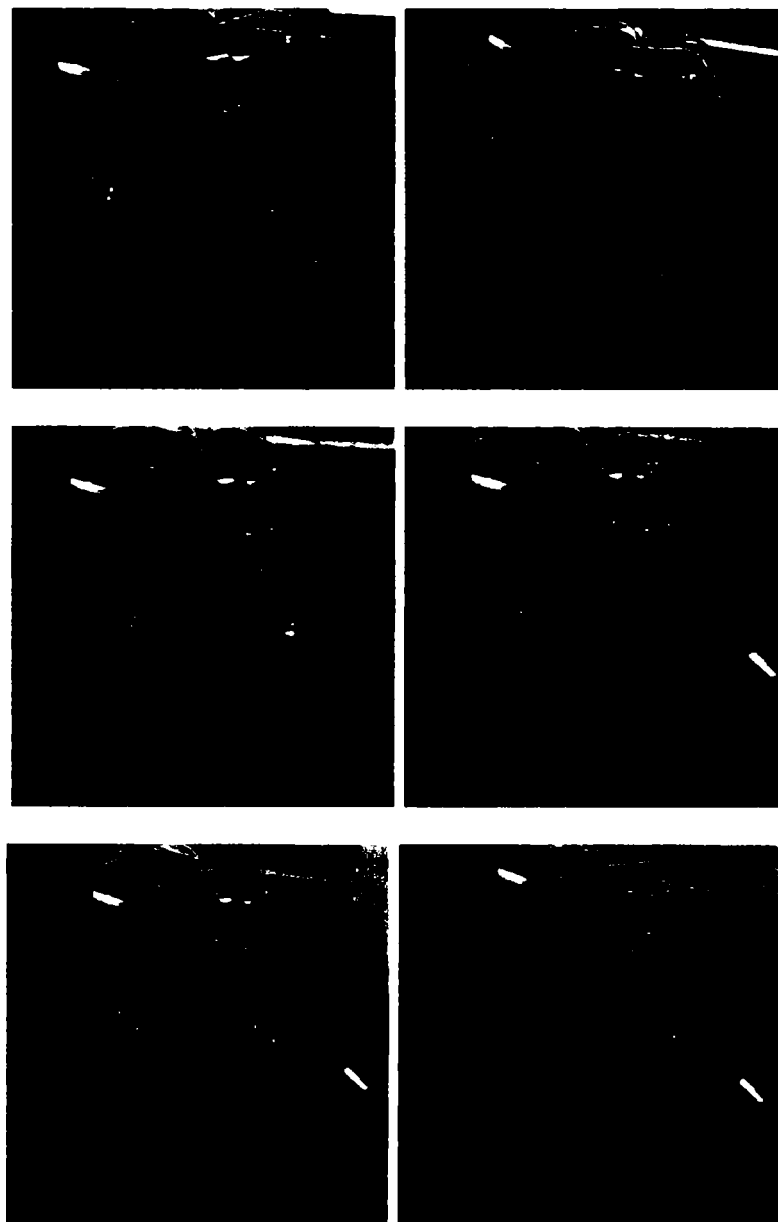


Figura 6.21: Deplasarea robotului pășitor JQuadRobot

6.5 Concluzii

Acest capitol, original în totalitate, prezintă contribuțiile autoarei la proiectarea și realizarea robotului pășitor JQuadRobot. Astfel pe parcursul capitolului sunt prezentate detalii constructive, principiul de funcționare din punct de vedere electronic, respectiv avantajele și dezavantajele acestui robot.

Construcția robotului a fost posibilă datorită granturilor TD 46GR / 11.05.2007 și TD 98GR / 11.06.2008 la care autoarea a fost director de proiect.

Robotul construit s-a dorit a fi unul pentru cercetări experimentale, urmând ca pe baza rezultatelor obținute să se realizeze unul la scară mare, cu o senzorică mai complexă în scopul obținerii unei stabilități sporite în timpul deplasării pe terenuri accidentate, respectiv se dorește implementarea unui *embedded computer* pentru obținerea unei autonomii de mișcare (aplicațiile rulează direct pe robot, comunicarea realizându-se prin *wireless*).

Pentru planificarea mișcării robotului pășitor JQuadRobot, pe lângă aspectele legate de cinematica mișcării picioarelor, a fost necesar să fie rezolvate un ansamblu de probleme, care uneori sunt foarte complicate. Complexitatea mediului în care evoluează un robot pășitor și varietatea misiunilor pe care trebuie să le îndeplinească, impun - printre altele - și achiziționarea unor informații complexe din lumea robotului și prelucrarea unor date neomogene, de natură diferită. Îndeplinirea misiunii, concretizată prin atingerea obiectivului, implică existența unui sistem multisenzorial pentru a localiza și modela - în reprezentarea internă, a calculatorului - obiecte necunoscute din spațiul robotului. Localizarea obstacolelor trebuie făcută cu suficientă precizie, pentru a garanta ocolirea sau utilizarea lor în scopurile precizate și în timp real, deoarece robotul pășitor trebuie să poată instrumenta o gamă variată de senzori, cu și fără interacțiune, și să dispună de algoritmi sofisticăți de planificare a mișcărilor. Pentru implementarea acestui sistem se pot folosi două căi:

- dotarea robotului pășitor cu senzori de proximitate sau cu camere de luat vederi;
- echiparea robotului pășitor cu senzori de poziție, de contact, de forță și cu senzori de înclinație, care îi permit adaptarea la deplasarea pe un teren neamenajat.

Controlul mișcării robotului pășitor, care se deplasează pe un teren oarecare, neamenajat, se poate face în două moduri:

- control cinematic, când sistemul este dotat numai cu senzori de poziție și de înclinație, senzori de proximitate și întrerupătoare, și eventual camere de luat vederi;

- control prin forțe, când se folosește atât traductoare de poziție cât și traductoare de forță, amplasate în extremitățile picioarelor și în cuplele cinematice ale mecanismelor sistemului de deplasare.

Prin folosirea robotului pășitor ca mijloc de transport, câțiva parametri ce caracterizează însușirile lui dinamice pot fi supuși unor modificări, într-o gamă suficient de largă. De exemplu, prezența pe platformă a unei sarcini suplimentare modifică greutatea, poziția centrului de greutate și momentele de inerție ale corpului. Asupra robotului pășitor pot fi aplicate diferite forțe, cum este, de exemplu, rezultanta acțiunii vântului, ale căror influențe cu greu pot fi anticipate. Acțiunile lor pot cauza perturbații, care determină abateri ale mișcărilor robotului pășitor în raport cu cele planificate. Evitarea greșelilor de comandă, fără evidențierea cauzelor apariției lor, este legată de consumul suplimentar de energie. Elaborarea și folosirea metodelor de determinare operativă a cauzelor abaterilor de la mișcarea planificată și evidențierea acestor cauze, reprezintă un mijloc oportun de creștere a eficienței comenzilor și a economiei de resurse energetice la deplasarea robotului pășitor. Amortizarea mișcărilor este una din problemele cu care se confruntă robotul pășitor la deplasarea cu viteză mare pe terenuri neamenajate, la trecerea peste obstacole sau în cazul săriturilor.

Majoritatea cercetărilor în domeniul roboților pășitori au avut ca subiect de cercetare roboții hexapozi, deoarece aceștia prezintă o stabilitate mare în timpul deplasării. Roboții patrupezi necesită studii complexe în ceea ce privește stabilitatea în timpul pășirii, motiv pentru care puțin cercetători se ocupă cu studiul lor.

Capitolul 7

Contribuții la dezvoltarea și testarea unui software pentru conducerea robotului mobil pășitor JQuadRobot

În acest capitol sunt prezentate contribuțiile autoarei acestei teze în domeniul *software*, contribuții concretizate prin dezvoltarea aplicației "JQuadRobot". Pe parcursul capitolului, sunt prezentate secvențe de cod și algoritmi din structura aplicației.

Deoarece aplicația se încadrează în domeniul *Open Source*, la început de capitol se face o scurtă prezentare a conceptului *Open Source*, respectiv a limbajului Java în care este dezvoltată aplicația "JQuadRobot".

7.1 Open Source

Open source [101, 14] descrie practica de a produce sau dezvolta anumite produse finite, permițând accesul utilizatorilor să acționeze liber asupra procesului de producție sau dezvoltare. Unii specialiști definesc "*open source*" ca un concept filozofic iar alții

consideră că este o metodologie pragmatică.

Open source reprezintă dezvoltarea de programe software de către o comunitate, de către o companie sau de către o persoană și oferirea lor spre folosire sau îmbunătățire sub licență GPL.

Exemple de programe *open-source*: Azureus (client bit-torrent), Blender (graficp 3D), Gaim (client pentru mesagerie instant), o serie de distribuții Linux, Mozilla Firefox (browser), OpenOffice.org (suita office), Apache (cel mai utilizat server web), Joomla, distribuții Latex, MySQL (motor de baze de date foarte popular), etc.

Software-ul liber e caracterizat de libertatea acordată utilizatorilor săi de a-l utiliza, copia, distribui, studia, modifica și îmbunătăți. Mai exact, e vorba de patru forme de libertate a utilizatorilor săi:

- Libertatea de a utiliza programul, în orice scop (libertatea 0).
- Libertatea de a studia modul de funcționare a programului, și de a-l adapta nevoilor proprii (libertatea 1). Accesul la codul-sursă este o precondiție pentru aceasta.
- Libertatea de a redistribui copii, în scopul ajutorării aproapelui tău (libertatea 2).
- Libertatea de a îmbunătăți programul, și de a pune îmbunătățirile la dispoziția publicului, în folosul întregii societăți (libertatea 3). Accesul la codul-sursă este o precondiție pentru aceasta.

Un program este *software liber* dacă întrunește toate aceste libertăți.

"*Software liber*" nu înseamnă "*non-comercial*". Un program liber trebuie să fie utilizabil în scop comercial, și disponibil pentru dezvoltare și distribuție comercială. Dezvoltarea comercială a software-ului liber nu mai este ceva neobișnuit; iar software-ul comercial liber este foarte important.

Discutând despre software-ul liber, este indicat a se evita termeni de genul "gratuit" sau "pe gratis", întrucât acești termeni pot conduce la ideea că principala caracteristică a softului liber ar fi prețul, și nu libertatea sa.

7.2 Java3D

Java 3D oferă programatorilor Java posibilitatea de a scrie applet-uri și aplicații Java cu conținut grafic 3D interactiv.

Java 3D reprezintă o interfață de programare (API) de nivel înalt, orientată spre obiecte. Comparativ, API-urile 3D procedurale, DirectX sau OpenGL, au fost proiectate pentru a optimiza la maximum performanțele, oferind programatorilor un control total asupra aplicațiilor; în schimb, Java 3D reprezintă o cale prin care un programator Java experimentat poate crea grafică 3D suficient de performantă, fără să fie necesar să cunoască toate detaliile implementărilor de nivel scăzut.

Aplicațiile Java 3D sunt performante deoarece codul Java al acestor aplicații nu este interpretat de mașina virtuală Java (asemenea aplicațiilor Java standard), ci se realizează o compilare *Just-In-Time*; adică în momentul în care clasa este descărcată de browserul de web, codul Java este tradus în codul mașinii gazdă.

Biblioteca Java 3D este foarte complexă, conținând peste 100 de clase, care permit crearea celor mai variate aplicații de grafică tridimensională sau realitate virtuală cu sunet, animație și interacțiuni. Totuși, un univers simplu poate fi creat doar cu puține clase și funcții.

Toate resursele necesare compilării și execuției apleturilor / aplicațiilor Java 3D sunt disponibile gratuit pe site-ul firmei Sun, <http://java.sun.com>.

Resurse pentru scrierea aplicațiilor: J2SE SDK (include și JRE); Java 3D SDK (include și Java 3D for Windows Runtime for JRE)

Resurse (doar) pentru rularea aplicațiilor: Java Runtime Environment (JRE); Java 3D for Windows Runtime for JRE.

7.3 IDE

Un mediu de dezvoltare (*engl. development environment*, sau *integrated development environment* - "mediu integrat de dezvoltare") este un set de programe care ajută programatorul în scrierea de alte programe. Un mediu de dezvoltare combină toți pașii necesari creării unui program (exemplu: editarea codului sursă, compilarea, depanarea, testarea, generarea de documentație) într-un singur soft, care, de regulă, oferă o interfață

cu utilizatorul grafică, prietenoasă.

Principalele componente ale unui mediu de dezvoltare sunt editorul de cod sursă și depanatorul. Mediile de dezvoltare apelează compilatoare sau interpretoare, care pot veni în același pachet cu mediul însuși, sau pot fi instalate separat de către programator. Printre facilitățile prezente în mediile de dezvoltare mai sofisticate se numără: exploratoare de cod sursă, sisteme de control al versiunilor, designere de interfețe grafice, sau unelte de ingineria programării (exemplu: generarea de diagrame UML) [100].

De obicei un mediu de dezvoltare este specific unui anumit limbaj de programare, însă există la ora actuală și medii de dezvoltare care pot lucra cu mai multe limbaje, de exemplu Eclipse sau Microsoft Visual Studio.

Eclipse este un mediu de dezvoltare *open-source* scris în Java, fapt ce îl face disponibil pentru majoritatea sistemelor de operare. Aplicația "JQuadRobot" a fost dezvoltată utilizând Eclipse pe sistemul de operare Windows XP, iar pentru partea de *User Interface* a aplicațiilor s-a folosit *Eclipse Visual Editor*.

7.4 Aplicația "JQuadRobot"

Aplicația "JQuadRobot" dezvoltată de autoarea acestei teze de doctorat, în limbajul Java și API-ul JAVA3D, reprezintă partea software a respectivei teze.

Aplicația "JQuadRobot" permite utilizatorului să controleze modul de mișcare al robotului prin configurarea acestuia pentru o anumită ordine de pășire. Ideea principală a aplicației este aceea de a obține valorile curselor unghiulare necesare pentru realizarea unui pas și apoi configurarea ordinii de pășire pentru mersul dorit.

Aplicația "JQuadRobot" a fost concepută modular ca în figura 7.1. Modulele, editor și simulator, au fost concepute în scopul extinderii sau reducerii numărului de picioare în conformitate cu tipul de robot (biped, patruped, hexapod, etc.) ce se dorește a se comanda, declararea aplicației sub licență GPL permițând dezvoltatorilor ce dispun de alte tipuri de roboți să adauge cod în scopul implementării respectivilor roboți.

S-a ales limbajul de programare Java cu Java3D API din următoarele motive: un program Java compilat, corect scris, poate fi rulat fără modificări pe orice mașină (PC, PDA etc.) pe care e instalată o mașină virtuală Java (JVM- mediu în care se execută programele Java). Acest nivel de portabilitate (inexistent pentru limbaje mai vechi cum

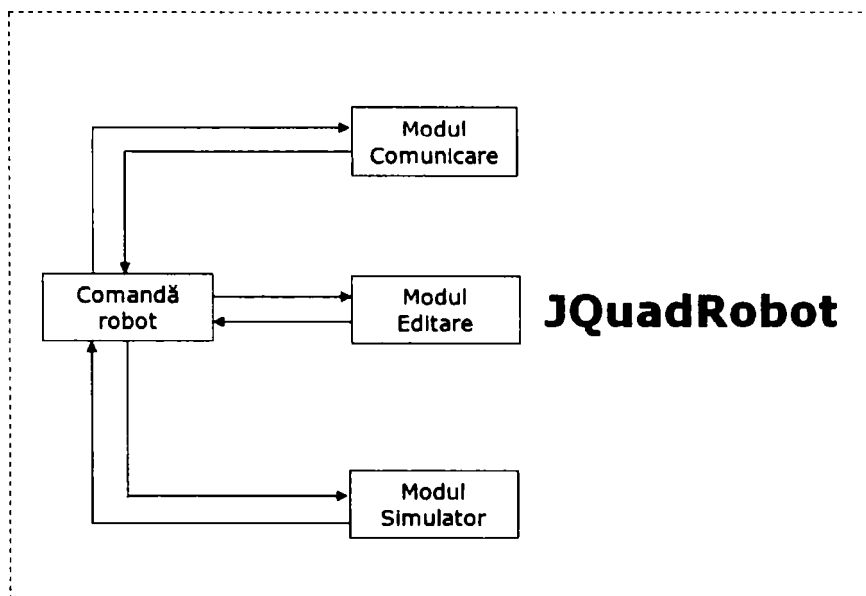


Figura 7.1: Schema modulară a aplicației "JQuadRobot"

ar fi C) este posibil deoarece sursele Java sunt compilate într-un format standard numit cod de octeți (*byte-code*) care este intermediar între codul mașină (dependent de tipul computerului) și codul sursă.

Java 3D reprezintă o interfață de programare (API) de nivel înalt, orientată pe obiecte. Comparativ, API-urile 3D procedurale, DirectX sau OpenGL, au fost proiectate pentru a optimiza la maxim performanțele, oferind programatorilor un control total asupra aplicațiilor.

7.5 Aplicația "JQuadRobot" - Communication

Modulul Communication al aplicației JQuadRobot realizează comunicare prin portul serial bidirecțională între calculator și robot. Modulul este format din trei clase: HomePosition, MotorController și MotorRotLimit.

Clasa HomePosition realizează aducerea robotului în poziția de acasă atunci când nu execută nici o secvență de mișcare. În momentul în care este pornit robotul, și aplicația JQuadRobot rulează, toate motoarele își fac inițializarea la zero, apoi merg în poziția de acasă. În această clasă sunt definite valorile de *home position* pentru fiecare motor.

Clasa MotorController este cea mai importantă, prin intermediul acesteia se realizează comunicarea prin portul serial, respectiv controlul motoarelor. Diagrama de clasă pentru clasa MotorController este prezentată în figura 7.2.

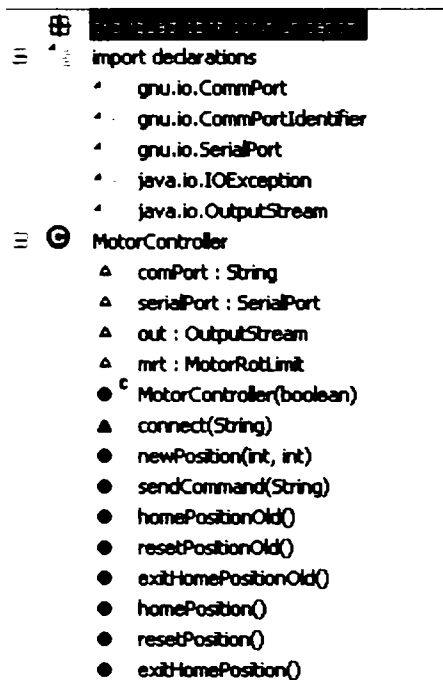


Figura 7.2: MotorController - diagrama de clasă

În continuare este prezentată o secvență de cod din clasa MotorController, prin care se arată cum se face comunicare prin portul serial, cum se realizează aducerea robotului în poziția de acasă (*home position*) și cum se realizează aducerea robotului în poziția de zero în momentul închiderii aplicației.

```
/*
 * File      : MotorController.java
 *
 * Copyright (C) 2008 Steliana Vatau <steliana.vatau@jquadrobot.org>
 *
 *          www.jquadrobot.org
 * This file is part of JQuadRobot.
 *
 * JQuadRobot is free software: you can redistribute it and/or modify
 * it under the terms of the GNU General Public License as published by
 * the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or
 * (at your option) any later version.
 *
 * JQuadRobot is distributed in the hope that it will be useful,
```

```

* but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
* MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
* GNU General Public License for more details.
*
* You should have received a copy of the GNU General Public License
* along with JQuadRobot. If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.
*
*/

```

```

package org.jquadrobot.communication;

import gnu.io.CommPort;
import gnu.io.CommPortIdentifier;
import gnu.io.SerialPort;

import java.io.IOException;
import java.io.OutputStream;
/**
 * This class command a motor using serial port.
 *
 * @version 1.3
 * @author Steliana Vatau <steliana.vatau@jquadrobot.org>
 */
public class MotorController implements HomePosition{

    String comPort = "COM1";
    SerialPort serialPort;
    OutputStream out;
    MotorRotLimit mrt = new MotorRotLimit();

    public MotorController(boolean debug){
        if(!debug){
            try {
                connect(comPort);
            } catch (Exception e) {
                e.printStackTrace();
            }
        }
    }

    void connect ( String portName ) throws Exception
    {
        CommPortIdentifier portIdentifier =
        CommPortIdentifier.getPortIdentifier(portName);

        if ( portIdentifier.isCurrentlyOwned() )
        {
            System.out.println("Error: Port is currently in use");
        }
        else
        {

```

```
CommPort commPort = portIdentifier.open(this.getClass().getName(),2000);

    if ( commPort instanceof SerialPort )
    {
serialPort = (SerialPort) commPort;
serialPort.setSerialPortParams(115200,SerialPort.DATABITS_8,
SerialPort.STOPBITS_1,SerialPort.PARITY_NONE);

//  InputStream in = serialPort.getInputStream();
out = serialPort.getOutputStream();
    }
    else
    {
System.out.println("No serial port detected.");
    }
}
}
...

public void homePosition(){
String command0 = "#0 P600 #1 P600 #2 P600 #3 P600 #4 P600 #5 P600
#6 P600 #7 P600 #8 P600 #9 P600 #10 P600 #11 P600 \r";

byte[] commandInBytes0 = command0.getBytes();
    try {
        out.write(commandInBytes0);
    } catch (IOException e) {
        e.printStackTrace();
    }

String command = "#0 P"+HPM_1+" #1 P"+HPM_2+" #2 P"+HPM_3+" #3 P"+HPM_4
+" #4 P"+HPM_5+" #5 P"+HPM_6+" #6 P"+HPM_7+" #7 P"+HPM_8+" #8 P"+HPM_9
+" #9 P"+HPM_10+" #10 P"+HPM_11+" #11 P"+HPM_12+" T4000 "+" \r";
// perform home position in 2s;

    byte[] commandInBytes = command.getBytes();
    try {
        out.write(commandInBytes);
    } catch (IOException e) {
        e.printStackTrace();
    }
}

public void exitHomePosition(){
String command0 = "#0 P600 #1 P600 #2 P600 #3 P600 #4 P600 #5 P600
#6 P600 #7 P600 #8 P600 #9 P600 #10 P600 #11 P600 T4000 \r";

    byte[] commandInBytes0 = command0.getBytes();
    try {
        out.write(commandInBytes0);
    } catch (IOException e) {
```

```
        e.printStackTrace();  
    }  
}
```

În figura 7.3 este prezentat robotul în poziția de zero, poziție în care se află la închiderea aplicației, iar în figura 7.4 este prezentat robotul în poziția de acasă, poziție în care se află la pornirea aplicației.



Figura 7.3: Robotul JQuadRobot în poziția de zero

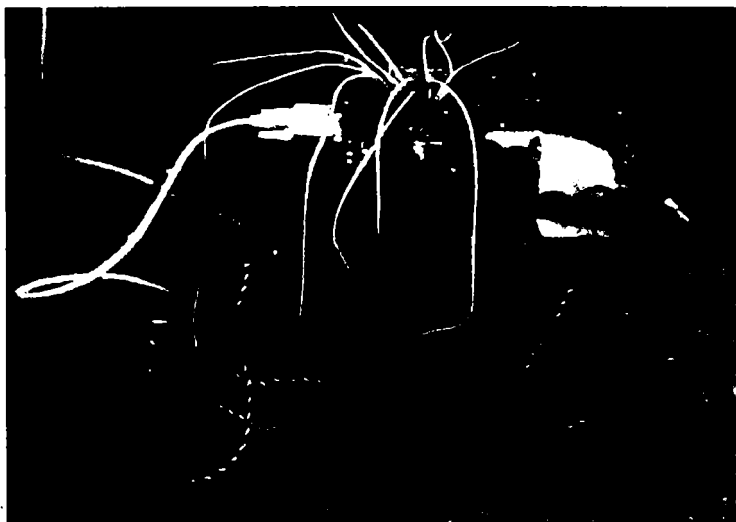


Figura 7.4: Robotul JQuadRobot în *home position*

În clasa MotorRotLimit sunt definite limitele minime și maxime între care se poate roti un motor. Se precizează faptul ca toate cele 12 motoare folosite în construcția robotului sunt identice.

7.6 Aplicația "JQuadRobot" - Editor

Figura 7.5 prezintă un *screenshot* al aplicației "JQuadRobot" - Editor.

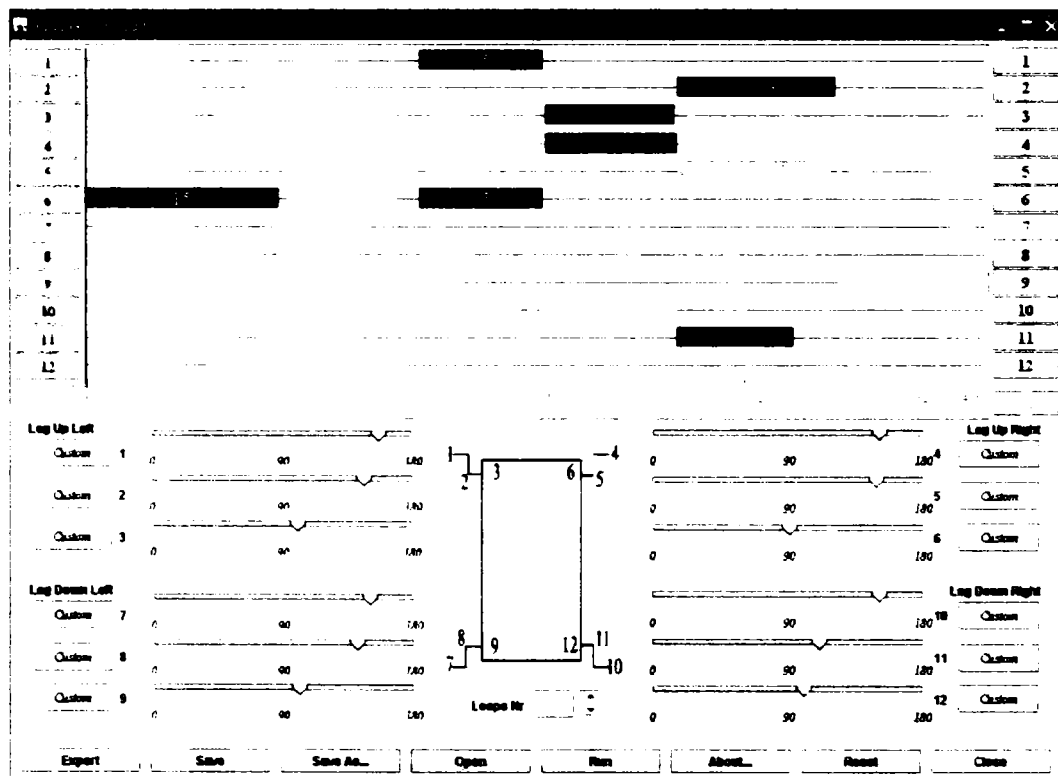


Figura 7.5: Screenshot aplicație "JQuadRobot" - Editor

Prin intermediul modului Editor al aplicației JQuadRobot se realizează programarea mersului robotului patruped. Modul Editor este format din opt clase, dintre care se vor detalia doar două.

Clasa EGmove implementează graficul de mișcare pentru o anumită ordine de pășire definită de utilizator. Graficul de mișcare se găsește în partea de sus a interfeței modului Editor cu utilizatorul (figura 7.6). Modul de utilizare este următorul:

- se poziționează cursorul mouse-ului în dreptul motorului pentru care se dorește

definirea unei mișcări

- cu ajutorul combinației tasta Shift+click stânga mouse se deschide fereastra de dialog corespunzătoare motorului ales

- se introduce timpul de start al mișcării, unghiul de rotație în grade, respectiv timpul cât să dureze mișcare sau viteza de mișcare (se precizează faptul că nu se poate introduce concomitent și timp de mișcare și viteză)

- se apasă butonul OK dacă totul este în regulă, sau Cancel dacă se dorește anularea comenzii

- după închiderea ferestrei de dialog, dacă s-a apasat butonul OK, se observă că în dreptul motorului dorit apare un bloc numit bloc de mișcare în care se afișează valoare rotației motorului în momentul specificat în grade

- prin poziționarea cursorului pe unul din blocurile din graficul de mișcare și combinația tasta X+click dreapta mouse se șterge mișcarea respectivă

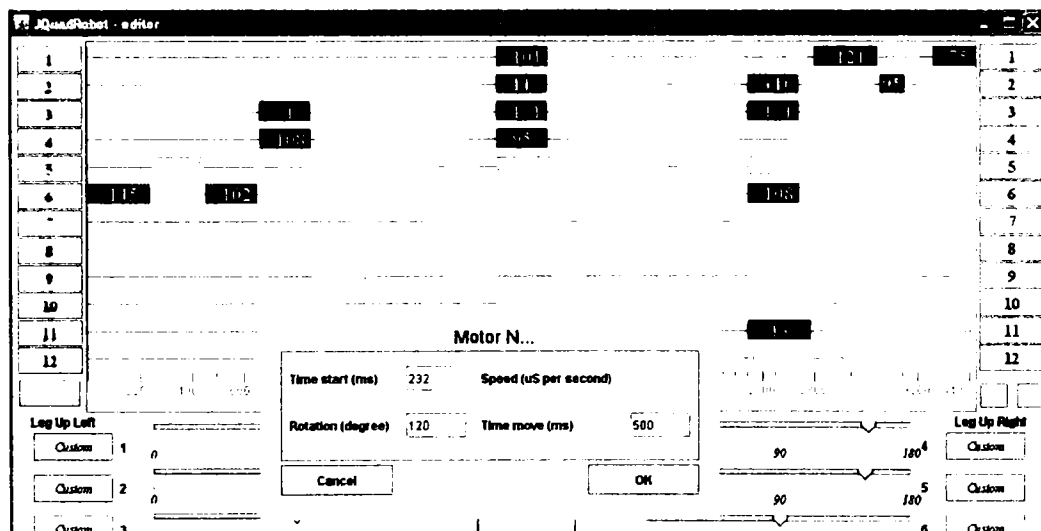


Figura 7.6: JQuadRobot Editor - graficul mișcării

Diagrama de clasă pentru clasa EGMove este prezentată în figura 7.7.

În continuare este prezentată o secvență de cod din clasa EGMove, prin care se arată cum se implementează mișcarea prin definirea blocurilor de mișcare corespunzătoare pentru fiecare motor, și obținerea ordinii de pașire dorite. Blocurile de mișcare se pot aduga în timp real (mod on-line de lucru) cu vizualizarea imediată a rezultatului, sau graficul mișcării se poate construi și în mod off-line de lucru, apoi salvarea graficului de

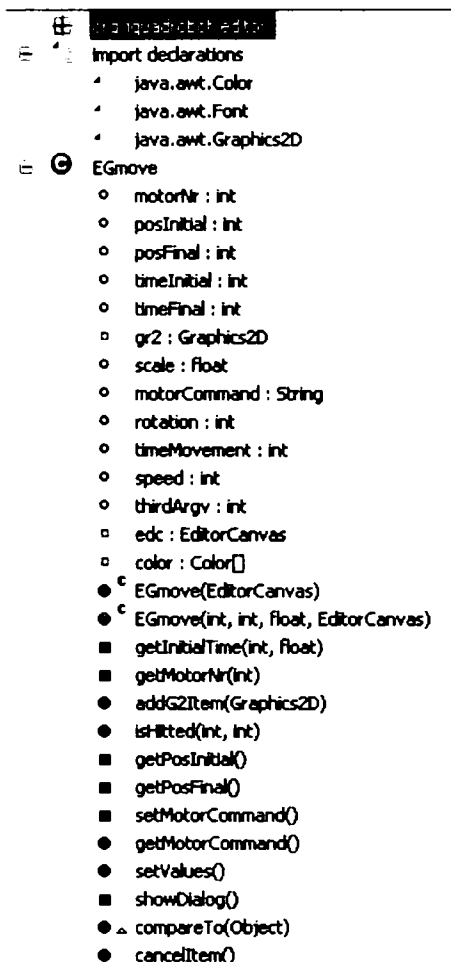


Figura 7.7: EGMove - diagrama de clasă

mișcare într-un fișier de tip XML, iar la pornirea robotului încărcarea respectivului fișier și rularea acestuia (operațiile de salvare, încărcare, respectiv rulare a fișierelor XML sunt prezentate în acest capitol la secțiunea "JQuadRobot Editor - salvare, deschidere și rulare fișiere de tip XML").

```
public class EGMove implements Comparable{

    public int motorNr;
    public int posInitial;
    public int posFinal;
    public int timeInitial;
    public int timeFinal;
    private Graphics2D gr2;
    public float scale;
    public String motorCommand;
```

```

public int rotation;
public int timeMovement;
public int speed;
public int thirdArgv = 0;
// 0 without third parametter on motorCommand;
// 1 with speed;
// 2 with time;
private EditorCanvas edc;
private Color[] color = {Color.blue, Color.cyan, Color.green,
Color.magenta, Color.orange, Color.red, Color.yellow, Color.pink,
Color.lightGray, Color.pink, Color.green, Color.orange};
/*
* default constructor for Open Graph;
*/
public EGmove(EditorCanvas edcs){
edc = edcs;
}
/*
* constructor
*/
public EGmove(int x, int y, float scale, EditorCanvas edc){
timeInitial = getInitialTime(x, scale);
this.scale = scale;
this.edc = edc;
getMotorNr(y);
showDialog();
}
private int getInitialTime(int xx, float s){
return (int)(xx*s);
}
private void getMotorNr(int yp){
motorNr = Math.round(yp/27)+1;
//System.out.println("motor="+motorNr);
}
public void addG2Item(Graphics2D g2){
gr2 = g2;
g2.setColor(color[motorNr-1]);
gr2.fillRect(posInitial, (motorNr)*27-22, posFinal-posInitial, 19);
g2.setColor(Color.white);
String rot = ""+rotation;
Font font = new Font("TimesRoman", Font.PLAIN, 20);
g2.setFont(font);
g2.drawString(rot, posInitial+(posFinal-posInitial)/2-10,
(motorNr)*27-5);
}
public boolean isHitted(int x, int y){
//System.out.println("in hitted " + "posInitial="
"+posInitial+" posFinal"+posFinal);

if (x >= posInitial && x < posFinal && y >= (motorNr)*27-22
& y < (motorNr)*27-22+19)

```

```
        return true;
    else
        return false;
    }
    private void getPosInitial(){
    posInitial = (int)(timeInitial/scale);
    }
    private void getPosFinal(){
    posFinal = (int)(timeFinal/scale);
    }
    private void setMotorCommand(){
    int value = 600+rotation*10;
    int mn = motorNr-1;
    if(thirdArgv == 0){
    motorCommand = "#"+mn+" P"+value+"\r";
    }
    else if(thirdArgv == 1){
    motorCommand = "#"+mn+" P"+value+" S"+speed+"\r";
    }
    else if(thirdArgv == 2){
    motorCommand = "#"+mn+" P"+value+" T"+timeMovement+"\r";
    }
    }
    public String getMotorCommand(){
    return motorCommand;
    }
    public void setValues(){
    getPosInitial();
    getPosFinal();
    setMotorCommand();
    edc.updateCanvas2d();
    }
    private void showDialog(){
    EGitemDialog egitem = new EGitemDialog(this);
    egitem.setLocationRelativeTo(null);
    //egitem.setFocusable(true);
    egitem.setVisible(true);
    }
    public int compareTo(Object ob) {
    EGmove egmc = (EGmove)ob;
    //System.out.println("timeInitial="+timeInitial+"
    egmc.timeInitial="+egmc.timeInitial);
    if(timeInitial < egmc.timeInitial){
    return -1;
    }
    if(timeInitial > egmc.timeInitial){
    return 1;
    }
    else{
    return 0;
    }
    }
```

```

    }
  }
  public void cancelItem(){
    edc.cancelG2item();
  }
}

```

Clasa Teachpad implementează modul de mișcare al motoarelor cu ajutorul slider-elor ce se găsesc în partea de jos a interfeței modului Editor cu utilizatorul (figura 7.8). Această metodă de setare a mișcării pentru fiecare motor în parte este real-time.

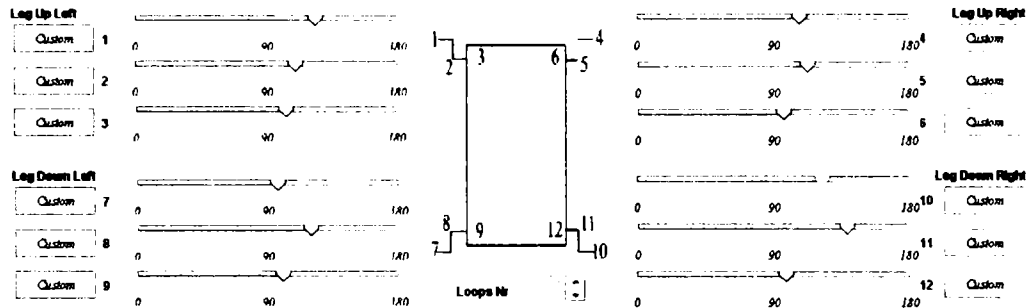


Figura 7.8: JQuadRobot Editor - slider-ele de mișcare

Clasa Teachpad are un număr foarte mare de linii, motiv pentru care nu se prezintă decât o mică secvență de cod, prin care se arată cum se realizează obținerea valorilor de la slider-ele de mișcare.

```

...
/**
 * This method initializes jSlider1
 *
 * @return javax.swing.JSlider
 */
private JSlider getJSlider1() {
  if (jSlider1 == null) {
    jSlider1 = new JSlider();
    jSlider1.setBounds(new Rectangle(118, 10, 272, 34));
    jSlider1.setMinimum(0);
    jSlider1.setPaintLabels(true);
    jSlider1.setPaintTicks(true);
    jSlider1.setMajorTickSpacing(90);
    jSlider1.setMinorTickSpacing(10);
    //jSlider1.setSnapToTicks(true);
    jSlider1.setMaximum(180);
    jSlider1.setValue((HPM_1-600)/10);
    Font font = new Font("Serif", Font.ITALIC, 12);

```

```
        jSlider1.setFont(font);
jSlider1.addChangeListener(new javax.swing.event.ChangeListener() {
public void stateChanged(javax.swing.event.ChangeEvent e) {
//System.out.println("stateChanged()"+" value="+jSlider1.getValue());
        int value = (int)(jSlider1.getValue()*10)+600;
        motor.newPosition(0, value);
    }
});
    }
    return jSlider1;
}
```

7.7 JQuadRobot Editor - salvare, deschidere și rulare fișiere

După ce este definită secvența de mișcare dorită, aplicația permite salvarea datelor într-un format de fișier, structura datelor fiind de tip XML. În continuare este prezentată o scurtă descriere a ceea ce înseamnă XML [99].

Extensible Markup Language, abreviat XML, descrie o clasă de obiecte numite documente XML și descrie parțial comportamentul unor programe de computer care le procesează. XML este o aplicație profil sau o formă restrictivă a SGML-ului, *Standard Generalized Markup Language [ISO8879]*. Prin construcție, documentele XML se conformează documentelor SGML.

Documentele XML sunt realizate din unități de stocare numite entități, ce conțin date parsate sau neparsate. Datele parsate sunt realizate din caractere, unele dintre ele formând date caracter iar altele ca marcaje. Marcajele codifică o descriere a schemei de stocare a documentului și structura logică. XML furnizează un mecanism pentru a impune constrângeri asupra schemei de stocare și a structurii logice.

Un modul software numit procesor XML este utilizat pentru a citi documente XML și pentru a da acces la structura și conținutul lor.

O secvență dintr-un astfel de fișier este prezentată în cele ce urmează:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no"?>
<root>
<!-- JQuadRobot http://www.jquadrobot.org -->
<General Scale="4.0"/>
```

```

<E Motor="6" PosF="200" PosI="0" Rot="150" Speed="0" TimeF="800"
TimeI="0" TimeM="800" argv3="2" com="#5 P2100 T800&#13;"/>
<E Motor="5" PosF="327" PosI="202" Rot="105" Speed="0" TimeF="1310"
TimeI="810" TimeM="500" argv3="2" com="#4 P1650 T500&#13;"/>
<E Motor="6" PosF="455" PosI="330" Rot="95" Speed="0" TimeF="1820"
TimeI="1320" TimeM="500" argv3="2" com="#5 P1550 T500&#13;"/>
<E Motor="1" PosF="430" PosI="330" Rot="95" Speed="0" TimeF="1720"
TimeI="1320" TimeM="400" argv3="2" com="#0 P1550 T400&#13;"/>
</root>

```

Butoanele asociate funcțiilor de salvare, încărcare și rulare fișiere de date cu structură XML se găsesc în partea de jos a interfeței grafice a aplicației JQuadRobot - Editor (figura 7.9)

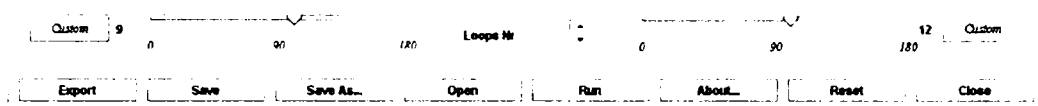


Figura 7.9: JQuadRobot Editor - butoane

După ce este configurat graficul mișcării, datele obținute sunt salvate într-un fișier de date cu structură XML cu ajutorul funcției atașată butonului "Save" sau se poate rescrie un fișier deja existent cu noile date cu ajutorul funcției atașată butonului "Save As". În acest mod se poate defini mersul înainte, înapoi, întoarcere spre stânga, întoarcere spre dreapta, pentru fiecare ordine de pășire implementată.

Funcția "Open" atașat butonului cu același nume, permite deschiderea unor fișiere existente.

Funcția "Run" permite rularea graficului de mișcarea definit, ceea ce duce la mișcarea robotului în concordanță cu setările existente.

Cu funcția "Reset" atașată butonului cu același nume, se poate reveni la setările inițiale, adică robotul se poziționează în *home position*.

Funcția "Close" permite utilizatorului închiderea aplicației, moment în care robotul se duce în poziția de zero. Închiderea aplicației nu înseamnă că motoarele sunt oprite, ele sunt încă alimentate, până când sunt decuplate fizic de la sursa de alimentare.

Funcția "About" asociată butonului "About", prezintă utilizatorului detalii despre autorul soft-ului și o scurtă descriere a programului.

Autoarea precizează faptul că se definește doar ordinea de pășire (galop, mers normal, etc.), pentru deplasarea robotului cu ordinea de pășire definită, utilizatorul are

la dispoziție funcția "Loops Nr.", în căsuța asociată acestei funcții se introduce numărul de cicluri (prin ciclu se înțelege execuția a patru pași în concordanță cu ordinea de pășire dorită) ce se doresc a se executa de către robot.

Funcția "Export" asociată butonului "Export", are rolul de a salva în format pentru microcontoller fișierul de configurare a mișcării. Astfel, în urma accesării butonului "Export", se deschide o fereastră de dialog (figura 7.10) în care utilizatorul poate configura mișcări combinate, și apoi salvarea în format pentru microcontroller.

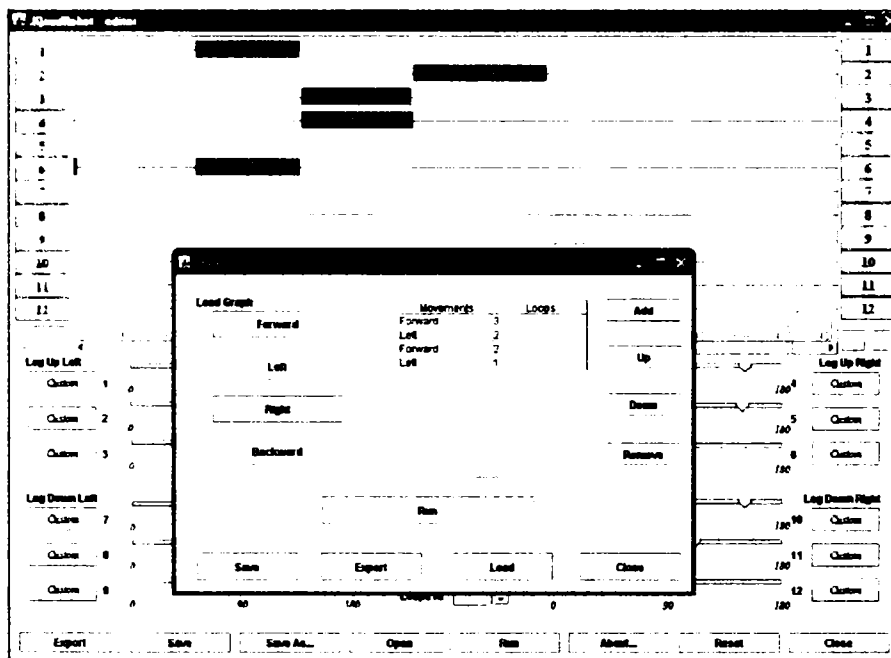


Figura 7.10: Fereastra de dialog ce apare în urma accesării butonului "Export"

Dacă se consideră că s-a salvat graficul mișcării pentru mișcare înainte (forward), stânga (left), dreapta (right) și spate (backward), atunci cu ajutorul butoanelor "Forward", "Left", "Right" și "Backward" se încarcă fișierele corespunzătoare acestor mișcări, apoi cu ajutorul butoanelor "Add", "Up", "Down", și "Remove" se setează ordinea de mișcare și câte cicluri trebuie să execute robotul o anumită mișcare.

Funcția "Run" asociată butonului "Run", rulează secvența de mișcare configurată. Butoanele "Save" și "Load" permite salvarea schemei de mișcare configurată, respectiv încărcarea unei astfel de mișcări definite anterior. Funcția "Export" permite utilizatorului exportul secvenței de mișcare către microcontroller.

Modul de funcționare în conformitate cu cele prezentate în figura 7.10 este următorul:

- se încarcă graficele de mișcare (definite anterior) pentru deplasare înainte (forward), stânga (left), dreapta (right) și spate (backward)
- se configurează secvența de mișcare dorită, conform figurii 7.10 avem următoarea mișcare: Forward, Left, Forward, Left
- se setează câte cicluri din același tip de mișcare să facă (loop) robotul în timpul deplasării. Se observă în figura 7.10 setările corespunzătoare fiecărei mișcări. De exemplu, dacă la definirea graficului mișcării Left, robotul se rotește spre stânga cu aproximativ 5 grade, atunci pentru o rotire spre stânga cu aproximativ 20 grade avem nevoie de 4 cicluri (loop-uri) de mișcare
- cu ajutorul butoanelor "Add", "Up", "Down", și "Remove" se definește ordinea în care se va deplasarea robotul
- cu butonul "Run" se rulează secvența combinată de mișcare, iar cu butoanele "Save" și "Load" se salvează schema de mișcare configurată, respectiv se încarcă o astfel de mișcare definită anterior

7.8 Aplicația "JQuadRobot" - Simulator

Simularea prezintă un important și eficace mijloc de analiză pentru aprecierea comportării reale a sistemelor dinamice. În analiza și sinteza sistemului de deplasare al robotului pășitor este necesară descrierea și modelarea matematică a elementelor mecanice, hidraulice și electronice, sub forma unor ecuații care să exprime cât mai fidel caracteristicile funcționale și constructive, pentru a se obține o formalizare matematică corespunzătoare în vederea proiectării optimizate.

Sistemul real și modelul matematic al acestuia se deosebesc prin faptul că, în timp ce pentru primul, modul de generare a datelor comportamentale poate fi complet necunoscut, pentru al doilea, acesta se concretizează printr-un ansamblu de reguli sau instrucțiuni, prin aplicarea cărora sunt generate datele de comportament, instrucțiuni ce operează asupra variabilelor de descriere a modelului.

Folosirea calculatoarelor pentru proiectarea sistemelor a lărgit considerabil posibilitatea de studiere a unui număr mare de variante complexe într-un timp redus, după

care - prin simulare - se poate urmări răspunsul la aplicarea unui anumit tip de semnal la intrare. Algoritmul de pășire constă în repetarea ciclică a unor secvențe de mișcare a elementelor mecanismului sistemului de deplasare care au ca rezultat deplasarea robotului pășitor pe o suprafață plană. O problemă deosebită în timpul deplasării robotului este aceea a păstrării stabilității, când unul sau mai multe picioare se află în faza pășire, deoarece:

- când toate picioarele sunt în faza de suport, este evident că proiecția centrului de greutate se află în interiorul poligonului de sprijin;

- când unul sau mai multe picioare se află în faza de pășire, geometria poligonului de sprijin se modifică și apare riscul ca proiecția verticală a centrului de greutate al robotului să se găsească în afara acestuia.

Asigurarea condițiilor de stabilitate statică a mersului se face în funcție de modul cum este configurat robotul pășitor cu șase sau patru picioare. Dacă în primul caz, numai în situații deosebite există posibilitatea ca proiecția verticală a centrului de greutate să se găsească în afara poligonului de sprijin, la robotul patruped, această proiecție poate să fie - la limită - pe una din laturile triunghiului de sprijin sau în apropiere. Menținerea stabilității se face prin rotirea corpului robotului înainte de ridicarea fiecărui picior. Rotirea se face în jurul unei axe verticale în cazul mersului ondulat, sau în jurul unei axe orizontale în cazul mersului legănat. Pentru simularea mersului robotului pășitor patruped s-a realizat un program care funcționează în următoarele ipoteze:

- robotul pășitor se deplasează în linie dreaptă pe un plan orizontal, folosind un mers cvasi-static, în care există totdeauna cel puțin trei picioare în faza de suport;

- centrul de greutate al robotului se află la intersecția diagonalelor platformei (corpului);

- masele picioarelor sunt suficient de mici în raport cu masa platformei (corpului), astfel încât poziția centrului de greutate al robotului nu este influențată de mișcările picioarelor.

Modulul Simulator permite utilizatorului verificare corectitudinii mișcării motoarelor înainte de a fi transmisă efectiv comanda la motoare, acest lucru duce la evitarea coliziunilor între picioare, la evitarea depășirii limitelor de rotație ale motoarelor, la implementarea unei strategii de trecere peste obstacole, etc.

În figura 7.11 se prezintă schema bloc a modului Simulator.

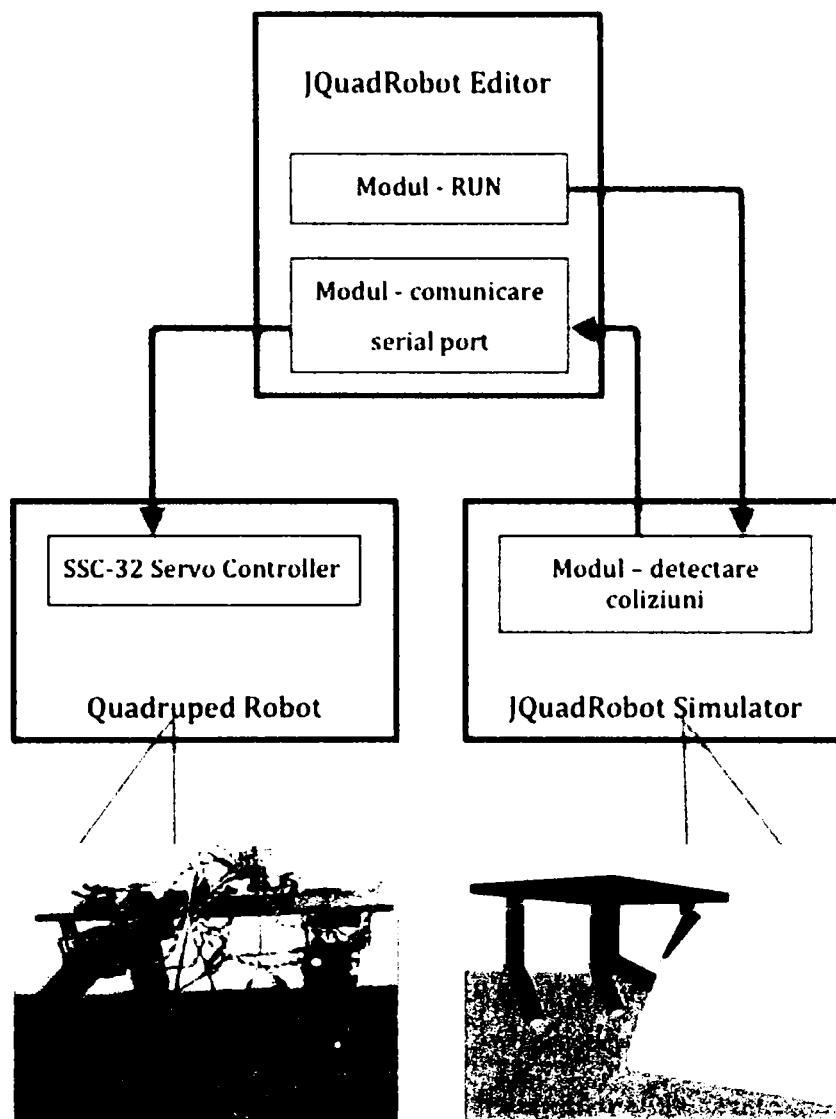


Figura 7.11: JQuadRobot Simulator - schema bloc

Dezvoltarea acestui modul s-a realizat cu scopul comandării real-time a robotului într-un mediu incert. De exemplu, dacă robotul se deplasează printr-o conductă, cu Java 3D se poate modela conducta cu robotul înăuntru și se poate simula deplasarea acestuia și transmiterea comenzilor de mișcare în timp real cu un delay de câteva secunde.

Figura 7.12 prezintă un *screenshot* al aplicației "JQuadRobot" - Simulator.

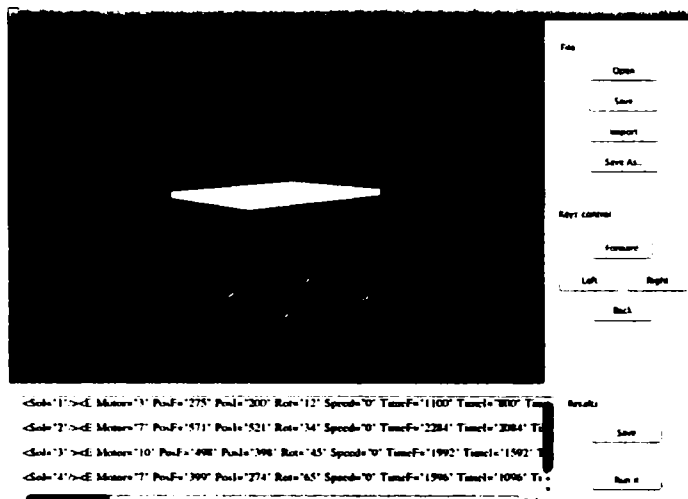


Figura 7.12: JQuadRobot - Simulator

În cele ce urmează se face o descriere a acestui modul. Astfel, în partea de jos a interfeței grafice a acestuia sunt afișate combinațiile optime ale valorilor de poziție, care pot fi folosite pentru implementarea unui anumit mers. În acest mod se poate alege varianta optimă a valorilor pozițiilor ce definesc mersul dorit.

În partea dreaptă a interfeței se observă panoul *Keys Control* (figura 7.13), format din patru butoane ce au asociate funcțiile *Forward*, *Left*, *Right*, *Back*. Cu aceste funcții robotul poate fi controlat manual.

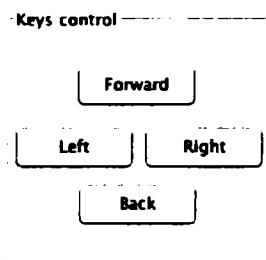


Figura 7.13: Keys Control Panel

În panoul *Results* (figura 7.14) sunt două butoane ce au asociate funcțiile "Save" și "Run it". Funcția "Save" permite salvarea combinației optime alese pentru motoare corespunzătoare unui anumit mers. Activarea butonului "Run it" duce la deplasarea robotului în concordanță cu tipul de mers dorit.

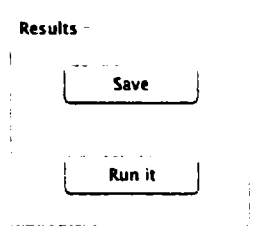


Figura 7.14: Results Panel

În panoul *File* (figura 7.15) se găsesc funcțiile "Open", "Save" și "Import" asociate butoanelor cu aceleași nume. Activarea butonului "Open" duce la deschiderea unor fișiere existente de date cu structură de tip XML, "Save" la salvarea rezultatului dorit într-un fișier de date cu structură de tip XML, respectiv "Import" permite importarea unor fișiere compatibile.

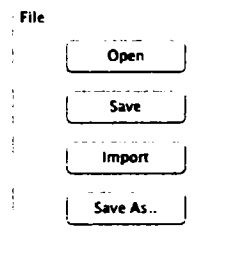


Figura 7.15: File Panel

În figura 7.16 se observă cum robotul trece peste obstacole de înălțimi mici.

Strategia de deplasare peste obstacole este simplă: dacă robotul întâmpină rezistență înseamnă că are un obstacol. În acel moment el ridică piciorul mai mult și încearcă din nou să pășească, acest lucru este repetat până când nu mai întâmpină rezistență și atunci trece peste obstacol în conformitate cu strategia de deplasare implementată.

7.9 Concluzii

Acest capitol, original în totalitate, prezintă aplicația "JQuadRobot" dezvoltată de autoarea tezei în Java și Java3D. Se evidențiază originalitatea aplicației "JQuadRobot" prin portabilitatea (independența platformei pe care rulează) asigurată de programarea în limbajul Java și API-ul Java3D ("*write once, compile it once, and run it anywhere*").

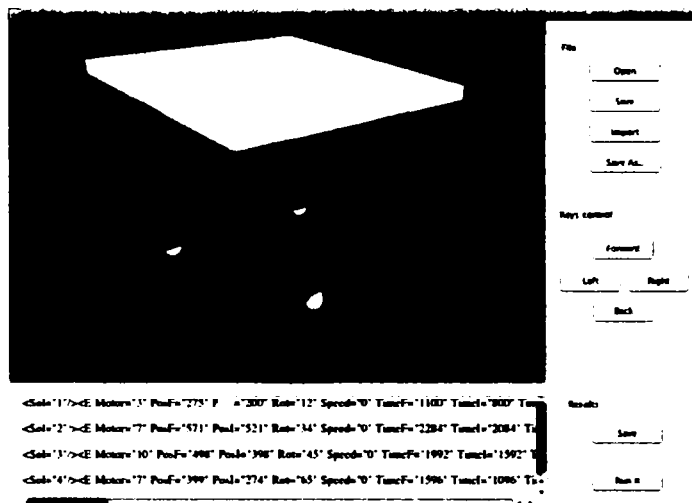


Figura 7.16: Strategia de trecere peste obstacole de înălțimi mici

De asemenea, faptul că prețul de dezvoltare este zero (IDE (*Integrated Development Environment*) *Freeware*), reprezintă un alt avantaj al programării în Java.

Aplicația "JQuadRobot" a fost dezvoltată în scopul realizării programării și conducerii robotului pășitor patruped JQuadRobot. Aplicația are o structură modulară, fiecare modul în parte fiind detaliat pe parcursul acestui capitol.

Modulul Communication al aplicației JQuadRobot realizează comunicare prin portul serial bidirecțională între calculator și robot.

Prin intermediul modulului Editor al aplicației JQuadRobot se realizează programarea mersului robotului patruped.

Modulul Simulator permite utilizatorului verificare corectitudinii mișcării motoarelor înainte de a fi transmisă efectiv comanda la motoare, acest lucru duce la evitarea coliziunilor, la depășirea limitelor de rotație ale motoarelor, etc. Dezvoltarea acestui modul s-a realizat cu scopul comandării real-time a robotului într-un mediu incert.

Interfața grafică cu utilizatorul a aplicației "JQuadRobot" a fost proiectată sub o formă "prietenoasă", ușor de înțeles de către utilizator. Aplicația "JQuadRobot" este înregistrată sub licență GPL în scopul disponibilității pentru o continuă dezvoltare, codurile sursă ale aplicației pot fi obținute de la adresa <http://sourceforge.net/projects/jquadrobot/>.

Capitolul 8

Deplasarea roboților pășitori pe suprafețe accidentate

O caracteristică importantă a roboților pășitori o constituie faptul că deplasarea acestora nu este afectată într-o măsură foarte mare de configurația terenului. Această caracteristică face ca locomoția prin pășire să devină o soluție atractivă pentru multe aplicații ce necesită deplasare pe terenuri neamenajate, cu configurație neregulată. Varietatea suprafețelor accidentate pe care poate evolua un robot pășitor este extrem de mare. Pentru realizarea unui studiu teoretic concludent asupra modalităților de deplasare posibile se impune o simplificare și o sistematizare a tipurilor de obstacole, bazată pe asignarea fiecărui obstacol a unei forme geometrice simple. Acestea forme geometrice trebuie alese astfel încât să asigure, fie individual fie prin combinații reciproce, acoperirea unui număr cât mai mare al cazurilor practice reale. Formele geometrice reprezentative pentru obstacolele unui teren accidentat sunt prezentate în figura 8.1, respectiv o pantă (figura 8.1.a), un șanț (figura 8.1.b), o treaptă (figura 8.1.c) și un prag (figura 8.1.d). Fiecare dintre aceste sunt caracterizate printr-unul sau doi parametri asociați, așa cum rezultă din figură. Definirea obstacolelor fundamentale va permite stabilirea strategiilor adecvate de deplasare pentru un robot pășitor în fiecare situație specifică.

În cele ce urmează se vor folosi câteva din rezultatele prezentate în [64], [29], [49], [54]. Pentru studiul deplasării peste obstacole este necesar să se prezinte principalele

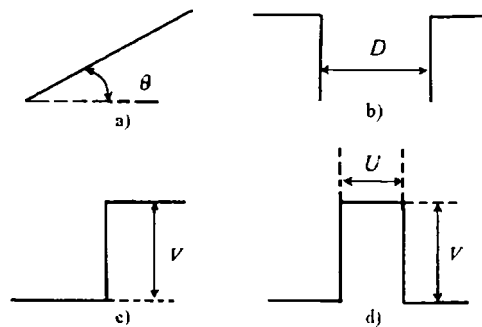


Figura 8.1: Cele patru tipuri de obstacole fundamentale

caracteristici tehnice ale modelului geometric al robotului pășitor (figura 8.2).

Notățiile din figura 8.2 au următoarele semnificații:

- L - lungimea corpului robotului
- W - lățimea corpului robotului
- P - distanța dintre punctele de suspendare a două picioare adiacente
- O - originea sistemului de axe de coordonate $Oxyz$ și coincide cu centrul de greutate al robotului CG
- R_x, R_y, R_z - dimensiunile spațiului de lucru al extremității piciorului
- H - înălțimea față de sol a centrului de greutate al robotului

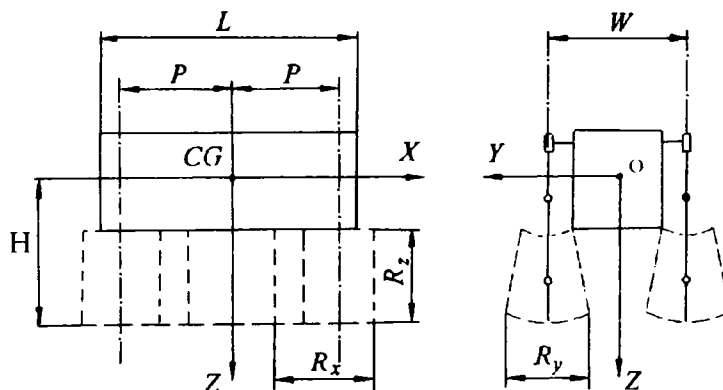


Figura 8.2: Caracteristicile geometrice robotului pășitor

Pentru a simplifica analiza comportării robotului, vom accepta următoarele ipoteze:

- contactul fiecărui picior al robotului pe sol este punctiform
- fiecare punct de sprijin se găsește în zona permisă, în mod evident, nu există astfel de puncte pe suprafețe verticale
- nu există alunecare a unui picior față de sol în timpul deplasării
- masa picioarelor este neglijabilă în raport cu masa corpului robot sau aproximativ simetric repartizată în spațiu, astfel încât centrul de greutate al întregii structuri coincide cu centrul de simetrie al corpului robot.

8.1 Deplasare robotului pășitor pe o pantă

Diferența esențială între mersul pe o pantă și cel pe o suprafață orizontală este legată de faptul că proiecția centrului de greutate pe suprafața de sprijin se modifică. Distanța acestei proiecții în raport cu marginile suprafeței de sprijin definește ceea ce denumim rezerva de stabilitate statică a oricărui corp sprijinit. În mersul pe o suprafață plană, dacă deplasarea este simetrică în raport cu axa longitudinală și transversală a robotului, atunci rezerva de stabilitate longitudinală anterioară și posterioară coincid. La deplasarea pe o pantă, deplasarea proiecției centrului de greutate reduce stabilitatea longitudinală și implicit pe cea globală în timpul deplasării. Pentru evidențierea ținutei de mers a robotului se utilizează un senzor care măsoară înclinarea platformei în două plane: sagital și frontal.

Există două strategii la deplasarea pe o pantă pentru a îmbunătăți stabilitatea robotului:

- micșorarea înălțimii corpului și ajustarea înclinării acestuia
- micșorarea lungimii pasului
- **Deplasarea robotului pășitor pe o suprafață plană prin reglarea înălțimii de pășire și a poziției corpului**

Robotul se deplasează liniar, astfel încât axa sa longitudinală este paralelă cu linia pantei maxime. Dacă unghiul de înclinare al pantei este θ (figura 8.3), deviația proiecției centrului de greutate pe suprafața de sprijin este $H * \tan \theta$.

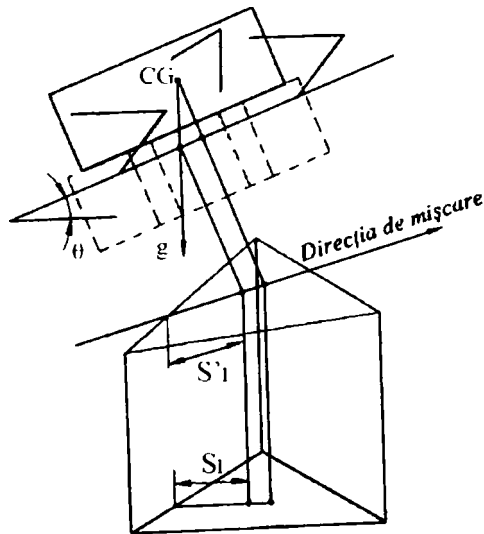


Figura 8.3: Unghiul de înclinare al pantei

Limita stabilității longitudinale se poate calcula cu relația (8.1).

$$S_l = S_l' * \cos \theta \quad (8.1)$$

Instabilitatea robotului poate apărea oricând pe parcursul deplasării sale dacă se îndeplinește condiția $S_l < 0$. De aceea trebuie luată în considerație doar limita minimă a stabilității longitudinale. Fie S_0 rezerva de stabilitate pe plan orizontal ($\theta = 0^\circ$), atunci rezerva de stabilitate pe planul înclinat este exprimată prin relația (8.2).

$$S = (S_0 - H * \tan \theta) * \cos \theta \quad (8.2)$$

Din relația (8.2), punând condiția $S = 0$, se poate determina fie înălțimea maximă la care se poate situa centrul de greutate al robotului pentru un plan înclinat dat (relația (8.3)), fie unghiul maxim al planului înclinat ce poate fi urcat de un robot caracterizat printr-o anumită înălțimea a centrului său de greutate (relația (8.4)).

$$H_{max} = S_0 * \tan \theta \quad (8.3)$$

$$\theta_{max} = \arctan \frac{S_0}{H} \quad (8.4)$$

Dat fiind faptul că înălțimea minimă a corpului robotului în timpul pășirii este $H_0 - R_{z0}$, rezultă că unghiul maxim de înclinare pentru robot se determină cu relația (8.5).

$$\theta_{max} = \arctan \frac{S_0}{H - R_{z0}} \quad (8.5)$$

Rezerva maximă de stabilitate corespunde cazului în care picioarele robotului ce sunt în contact cu planul înclinat ocupă poziția de extensie extremă în sens contrar deplasării, în acest caz rezerva de stabilitate pe plan orizontal se calculează cu relația (8.6).

$$S_0 = P_0 + \frac{R_{x0}}{2} \quad (8.6)$$

Dacă se iau în considerare coeficienții de utilizare cu mărimile cuprinse între $\beta = 3/4$ și $\beta = 11/12$, limita stabilității mersului ondulat este determinată de relația (8.7) [65].

$$S = \left(\frac{n}{2} - 1\right) * \left(\frac{P}{R}\right) * \beta + \beta - \frac{3}{4} \quad (8.7)$$

Creșterea lungimii pasului duce la creșterea stabilității mersului, de aceea pentru un robot pășitor, limita stabilității mersului este dată de relația (8.8).

$$S_0 = \frac{P}{2} + \left(1 - \frac{3}{4 * \beta}\right) * R \quad (8.8)$$

Prin înlocuirea relației (8.6) în (8.5) obținem valoarea maximă a unghiului de înclinare dată de relația (8.9).

$$\theta_{max} = \arctan \frac{2 * P_0 + R_{x0}}{2 * (H_0 - R_{z0})} \quad (8.9)$$

Se consideră strategia bazată pe ajustarea înclinării corpului robot în raport cu suprafața planului înclinat, strategie ilustrată în figura 8.4.

Prin reglarea poziției platformei, proiecția centrului de greutate nu se deplasează, dacă poziția platformei se menține orizontală și la același nivel. Rezerva de stabilitate a robotului coincide în acest caz cu cea de pe un teren plan și orizontal. Robotul poate fi poziționat orizontal pe suprafața planului înclinat numai dacă unghiul acestuia este mai

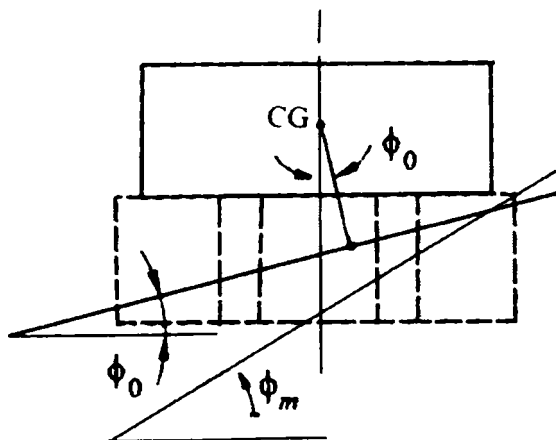


Figura 8.4: Deplasarea robotului pe pantă cu menținerea orizontală a corpului față de aceasta

mic decât o valoare ϕ_{max} , valoare ce poate fi determinată din figura 8.4 astfel:

$$\phi_{max} = \arctan \frac{2 * R_{z0}}{L} \quad (8.10)$$

Dacă funcționarea celor șase picioare este identică, acest tip de deplasare poate fi asigurată numai dacă unghiul maxim al planului înclinat are o valoare 0 astfel încât punctele A, B să se găsească chiar pe suprafața acestuia, adică:

$$\phi_0 = \arctan \frac{R_{z0}}{2 * P_0 + R_{x0}} \quad (8.11)$$

Rezerva de stabilitate a robotului în acest este dată de relația (8.12), iar distanța OC dintre centrul său de greutate și ipotenuza planului înclinat de relația (8.13).

$$S'_0 = \frac{S_0}{\cos \phi_0} \quad (8.12)$$

$$OC = \left(H_0 - \frac{R_{z0}}{2} \right) * \cos \phi_0 \quad (8.13)$$

Dacă unghiul θ al pantei este mai mare decât unghiul ϕ_0 , corpul robotului nu poate fi perfect orizontal (figura 8.5).

Unghiul corpului este $\theta = \theta' - \phi_0$. Punctul E de intersecție a axei OZ cu suprafața pantei se numește centrul geometric al suprafeței de sprijin. Deoarece suporturile sunt

•

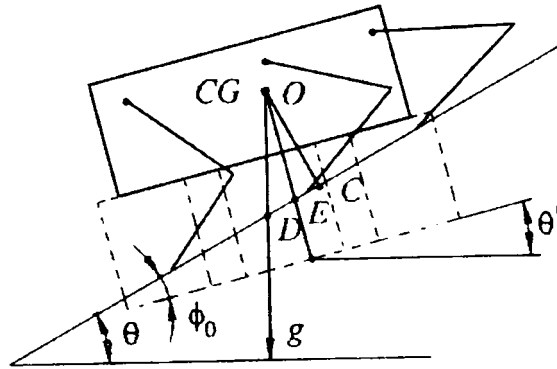


Figura 8.5: Deplasarea robotului pe pantă prin reducerea înclinării corpului

simetrice în raport cu axa laterală a corpului, care trece prin punctul E, orice deviație a centrului de greutate trebuie măsurată în funcție de poziția punctului E. Proiecția verticală a centrului de greutate pe suprafața înclinată a terenului se afla în punctul D. Deviația proiectiei pe panta este DE și se calculează cu relația (8.14) sau relația (8.15).

$$DE = DC - EC \quad (8.14)$$

$$DE = OC * (\tan \theta - \tan \phi_0) \quad (8.15)$$

Limita stabilității mersului pe pantă este în această situație dată de relația (8.16), iar limita stabilității mersului de relația (8.17).

$$S' = S'_0 - DE \quad (8.16)$$

$$S' = S' * \cos \theta \quad (8.17)$$

Înlocuind relațiile (8.12), (8.14) și (8.16) în relația (8.17) rezultă:

$$S = \left[\left(\frac{S_0}{\cos \phi_0} \right) - OC * (\tan \theta - \tan \phi_0) \right] * \cos \theta \quad (8.18)$$

Unghiul maxim al pantei este atins atunci când S devine zero. Aceasta se calculează cu relația (8.19).

$$\theta_m = \arctan \left[\left(\frac{S_0}{\cos \phi_0} \right) + OC * \tan \phi_0 \right] * \frac{1}{OC} \quad (8.19)$$

Uneori se pot combina cele două metode specifice mersului pe pantă. Mai întâi se reglează poziția corpului astfel încât să se obțină unghiul θ' dorit. Astfel, înălțimea corpului este redusă până când muchia frontală superioară a spațiului de lucru atinge solul (figura 8.6).

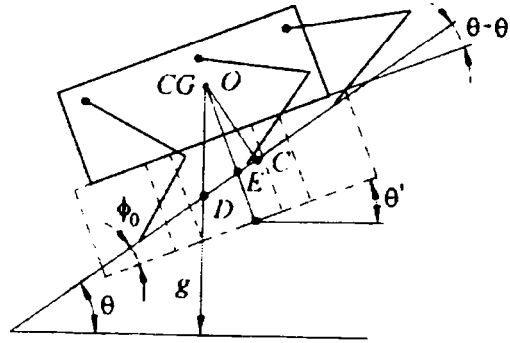


Figura 8.6: Deplasarea mixtă a robotului pe pantă cu reducerea înclinării și înălțimii corpului

Noua înălțime OC a corpului este în acest caz dată de relația (8.20).

$$\begin{aligned} OC &= OE * \cos(\theta - \theta') \\ &= \left\{ H_0 * \left[R_{z0} - \left(P_0 + \frac{R_{x0}}{2} \right) * \tan(\theta - \theta') \right] \right\} * \cos(\theta - \theta') \end{aligned} \quad (8.20)$$

Centrul geometric al mersului este în punctul E , iar dreapta OE intersectează dreapta OC sub unghiul $\theta - \theta'$. Limita de stabilitate a mersului în această situație este dată de relația (8.21).

$$S = \left\{ \frac{S_0}{\cos(\theta - \theta')} - OC * [\tan \theta - \tan(\theta - \theta')] \right\} * \cos \theta \quad (8.21)$$

• Deplasarea transversală pe o pantă

Dacă un robot pășitor parcurge transversal o suprafață în pantă cu unghiul de înclinare θ și dacă deplasarea se face de-a lungul unei linii cu înclinație zero a pantei, iar corpul robotului pășitor se menține paralel cu suprafața pantei, proiecția centrului de greutate este deplasată lateral spre partea coborâtoare, cu o distanță $H * \tan \theta$ dacă picioarele se mențin într-o poziție normală în raport cu solul. În figura 8.7 este prezentat un astfel de caz.

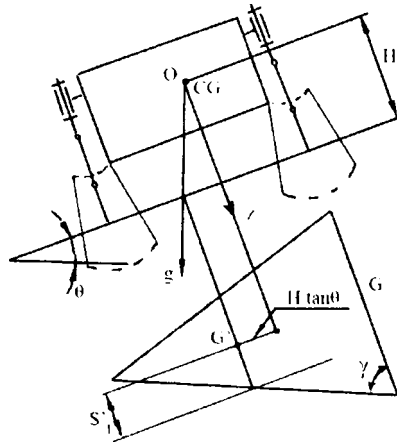


Figura 8.7: Deplasarea transversală pe o pantă prin reducerea înălțimii corpului robotului

Pentru un mers precis, panta maxima ce poate fi reglată printr-o astfel de strategie apare atunci cand deviația proiecției centrului de greutate este egală cu $W/2$ și astfel:

$$H * \tan \theta = \frac{W}{2} \quad (8.22)$$

Dacă se micșorează înălțimea corpului la minim, relația (8.22) devine:

$$\theta_m = \arctan \frac{W}{2 * H} \quad (8.23)$$

Dacă picioarele de pe pantă descendentă sunt complet întinse, înclinația maximă este:

$$\theta_m = \arctan \frac{W + R_{yT}}{2} \quad (8.24)$$

unde R_{yT} este cursa unui pas lateral, pentru o valoare maximă a spațiului de lucru.

În acest caz de mișcare a robotului pășitor, limita stabilității la deplasarea pe suprafața pantei se calculează cu relația (8.25).

$$S' = S'_0 - H * \frac{\tan \theta}{\tan \gamma} \quad (8.25)$$

pentru $H * \tan \theta \leq \frac{W}{2}$, unde unghiul γ delimitează limita stabilității minime de-a lungul axei longitudinale a corpului.

Deoarece axa longitudinală a corpului este paralelă cu planul orizontal, $S' = S$, atunci este îndeplinită relația (8.26), pentru $H * \tan \theta \leq \frac{W}{2}$.

$$S = S_0 - H * \frac{\tan \theta}{\tan \gamma} \quad (8.26)$$

Pentru o înclinare cu un unghi dat θ , înălțimea maximă a corpului H_m este :

$$H_m = S_0 * \frac{\tan \gamma}{\tan \theta} \quad (8.27)$$

Deoarece înălțimea minimă a corpului este $H_0 - R_{z0}$, unghiul maxim de înclinare în acest caz este cel mai mic dintre cel care rezultă din relația (8.25) și din relația (8.27).

$$\theta_m = \arctan S_0 * \frac{\tan \gamma}{H_0 - R_{z0}} \quad (8.28)$$

Cea de-a doua strategie posibilă constă în modificarea înclinării corpului robotului. În figura 8.8 acest lucru se obține prin extensia picioarelor situate pe o parte a robotului în paralel cu flectarea celor de pe partea opusă acestuia.

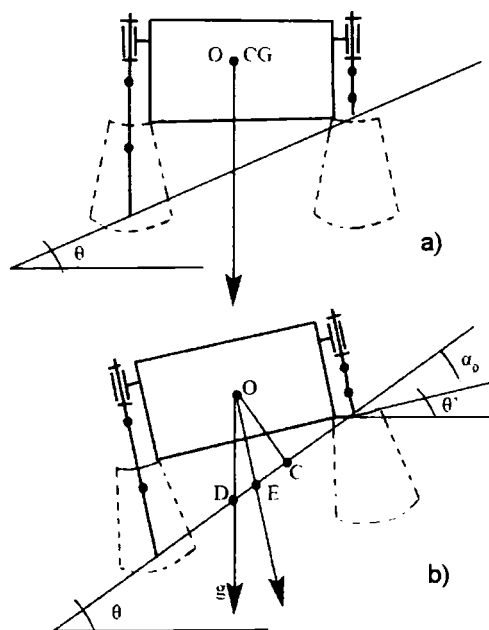


Figura 8.8: Deplasarea robotului pe o pantă prin ajustarea lungimii picioarelor

Proiecția centrului de greutate este menținută pe linia centrală, astfel încât să nu se modifice limita stabilității corpului. Înclinația maximă a pantei cand corpul poate fi complet adus la nivel este dată de relația (8.29).

$$\alpha_0 = \arctan \frac{R_z0}{W} \quad (8.29)$$

Dacă unghiul pantei este mai mare decât α_0 , corpul nu poate fi adus complet la nivel (figura 8.8.b), în acest caz centrul geometric al poligonului de sprijin este punctul E. Distanța dintre pozițiile extremităților, măsurate paralel cu suprafața pantei, este dată de relația (8.30).

$$W' = \frac{W}{\cos \alpha_0} \quad (8.30)$$

• Deplasarea pe pantă a robotului pășitor într-o direcție arbitrară

În realitate, un robot pășitor nu se deplasează pe o pantă - în sus sau în jos - de-a lungul unei direcții care face cu orizontala un unghi maxim, egal cu unghiul pantei. În timpul mersului, proiecția verticală a centrului de greutate are deviații atât în plan longitudinal cât și în lateral.

În figura 8.9 este prezentat modul de deplasare al robotului într-o direcție arbitrară, pe o suprafață plană înclinată cu unghiul θ . Corpul robotului este menținut paralel cu suprafața pantei. Originea sistemului mobil $OXYZ$ se găsește în centrul de greutate al sistemului mecanic. Proiecția originii O pe suprafața înclinată a pantei este notată cu G' . Punctul de intersecție a axei OZ cu suprafața pantei este notat cu O' . Dacă nu există nici o întindere sau îndoire a picioarelor, punctul O' este centrul geometric. Axele de coordonate $O'X'$, $O'Y'$, ale sistemului cu originea în O' sunt paralele cu axele OX și OY ale sistemului cadrului de referință al corpului. Unghiurile θ_x și θ_y sunt măsurate între planul orizontal și axele $O'X'$ și respectiv $O'Y'$. Unghiul ψ este format între linia înclinației maxime a planului și axa $O'X'$, iar α_x , α_y , și α_z sunt unghiurile dintre direcția verticală și axele OX , OY și OZ .

Din cele analizate, limita stabilității deplasării longitudinale pe o suprafață înclinată este dată de relația (8.31), iar limita stabilității mersului de relația (8.32).

$$S' = \frac{S_0}{\cos \theta_x} - E_x - \frac{E_y}{\tan \gamma} \quad (8.31)$$

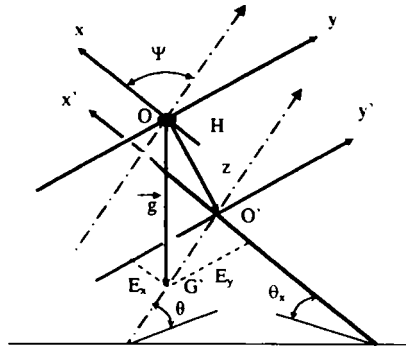


Figura 8.9: Deplasarea robotului pe o pantă de-a lungul unei direcții aleatoare

$$S = S' * \cos \theta_x \quad (8.32)$$

unde E_x și E_y , sunt cele două componente ale deviației proiecției centrului de greutate față de centrul geometric în sistemul de coordonate $O'X'Y'Z$. Astfel:

$$\begin{cases} E_x = S_{Gx} * H * \tan \alpha_z * \cos \psi \\ E_y = S_{Gy} * H * \tan \alpha_z * \cos \psi \end{cases} \quad (8.33)$$

unde:

$$\begin{cases} S_{Gx} = 1 & \text{dacă } \alpha_x \leq \pi/2 \\ S_{Gx} = -1 & \text{dacă } \alpha_x \geq \pi/2 \\ S_{Gy} = 1 & \text{dacă } \alpha_y \leq \pi/2 \\ S_{Gy} = -1 & \text{dacă } \alpha_y \geq \pi/2 \end{cases} \quad (8.34)$$

Dacă se cunosc mărimile unghiurilor α_x , α_y , și α_z , se pot calcula valorile E_x și E_y . Substituind aceste valori în relațiile (8.31) și (8.32), se poate calcula limita de stabilitate a mersului. Una dintre posibilitățile de calcul a acestor unghiuri este analizată în cele ce urmează.

Pentru unghiul α_x între direcția forței de greutate și axa OX și unghiul α_y între direcția forței de greutate și axa OY , cunoscute se poate calcula cel de-al treilea unghi α_z utilizând relația dintre cosinusurile directoare:

$$\cos^2 \alpha_x + \cos^2 \alpha_y + \cos^2 \alpha_z = 1 \quad (8.35)$$

Se presupune ca robotul are un pendul vertical sau un alt instrument ce permite ca cel puțin două dintre unghiurile α_x , α_y , și α_z , să poată fi măsurate. De aici rezultă că:

$$\alpha_z = \arccos \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_x - \cos^2 \alpha_y} \quad (8.36)$$

În figura 8.10 se prezintă legătura dintre aceste unghiuri. Punctul O este centrul de greutate al robotului.

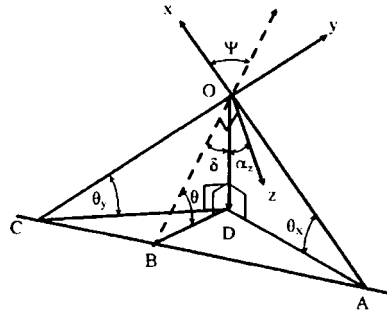


Figura 8.10: Relațiile dintre unghiuri la deplasarea pe o pantă

În punctele A și C se intersectează axele OX și OY cu o linie cu înclinarea zero. Proiecția centrului de greutate O pe planul orizontal este notată cu D , ce conține linia AC . Linia pantei maxime este BO . Dacă planul XOY este paralel cu suprafața pantei iar axa OZ este perpendiculară pe suprafața pantei, rezultă că:

$$\alpha_z + \delta = \frac{\pi}{2} = \delta + \theta \quad \implies \quad \alpha_z = \theta \quad (8.37)$$

Aceasta înseamnă ca unghiul α_z este egal cu unghiul de înclinare a pantei (θ) ori de câte ori corpul se menține paralel cu suprafața de sprijin. Tot astfel:

$$\begin{cases} \theta_x = \alpha_x - \frac{\pi}{2} \\ \theta_y = \alpha_y - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (8.38)$$

și

$$\begin{cases} \sin \theta_x = \frac{OD}{AO} \\ \sin \theta_y = \frac{OD}{BO} \end{cases} \quad (8.39)$$

În urma calculelor aferente din (8.38) și (8.39) obținem valoarea unghiului ψ .

$$\psi = \arccos \frac{\sin\left(\alpha_x - \frac{\pi}{2}\right)}{\sin \alpha_z} \quad (8.40)$$

8.2 Modalități de deplasare peste un obstacol de tip șanț

Un obstacol de tip șanț este caracterizat prin parametrul D ce marchează lățimea sa. Se presupune că solul se află la același nivel de-o parte și de alta a șanțului, iar fundul șanțului și pereții verticali ai acestuia sunt considerate zone interzise. Există două modalități ca un robot pășitor să traverseze un șanț. Dacă șanțul este relativ îngust, un robot pășitor îl poate depăși cu un singur pas, în așa numitul mers periodic. O exemplificare a acestei metode este prezentată în figura 8.11.

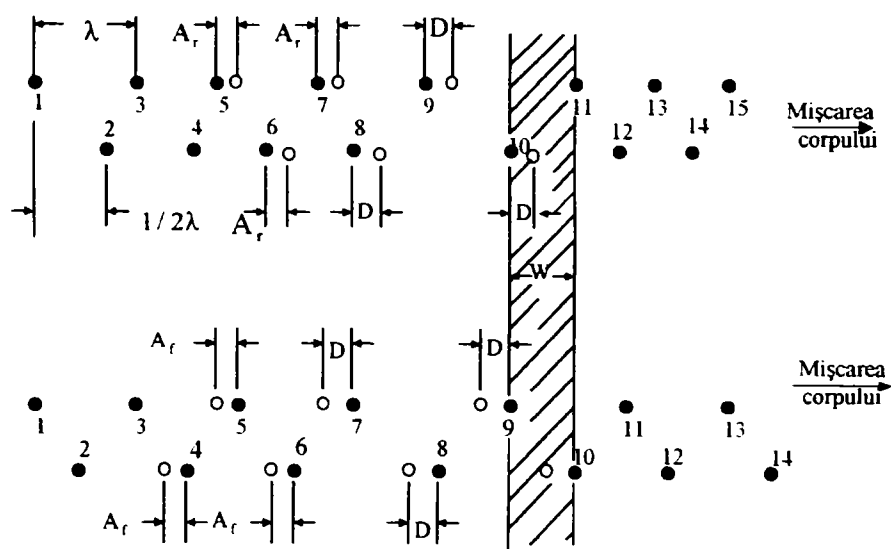


Figura 8.11: Urmele pașilor în mersul periodic de tip *follow the leader*

În acest exemplu robotul își reglează pașii puțin înainte de marginea șanțului astfel încât unul dintre picioarele din față să pășească pe marginea șanțului. Celălalt picior din față este apoi întins pentru a păși pe marginea de vis a vis a șanțului. Deoarece cele două picioare din față nu cad în șanț nici celelalte picioare nu cad în șanț, deoarece ele calcă pe urmele primelor.

Lățimea maximă a șanțului ce poate fi traversată prin această metoda este de $0.5 * \lambda + A_f$, unde A_f este reglajul picioarelor din față. Dacă $\beta = 2/3$ și $P/R = 1.2$, atunci $A_f = 0.25R$. Deoarece $\lambda = R/\beta$, lățimea maximă a șanțului peste care un robot poate păși în acest caz particular este R . Dacă lățimea șanțului d este mai mică decât $0.5 * \lambda$, robotul îl poate traversa fără să-și întindă picioarele din față.

În caz contrar, trebuie folosită o nouă strategie de deplasare. Aplicarea unei strategii adecvate de locomoție în depășirea unui șanț de mici dimensiuni vizează realizarea unei tehnici de tip "urmărește piciorul din față conducător". De îndată ce acest tip de obstacol este detectat prin sistemul senzorial, robotul își ajustează procesul de locomoție cu câțiva pași înainte de șanț, astfel încât unul dintre picioarele sale frontale să pășească cât mai aproape de marginea anterioară a acestuia. Celălalt picior frontal este apoi condus să realizeze o pășire peste lățimea D a șanțului. Se folosește astfel abilitatea individuală a perechii de picioare frontale bazată pe posibilitatea ajustării procesului lor de pășire. Dacă cele două picioare frontale realizează contactul cu solul, ceea ce denotă posibilitatea depășirii șanțului, celelalte patru picioare vor putea și ele să-l depășească succesiv, întrucât vor păși pe urma celor frontale. În mersul regulat, numit uneori și pendular, fiecare pereche de picioare realizează o deplasare viitoare în proximitatea pozițiilor ocupate anterior de perechea de picioare din fața lor, așa încât urmele pașilor apar ca în figura 8.12 [15], [49].

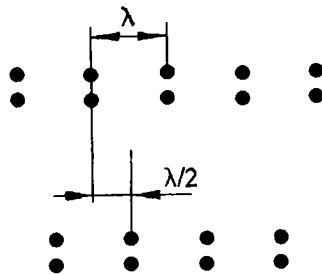


Figura 8.12: Urmele pașilor în mersul pendular al robotului pășitor

Aceasta seamănă foarte mult cu strategia de urmărire a piciorului din față conducător, cu excepția faptului că fiecare urmă de pășire este dublată. Distanța longitudinală dintre urmele pașilor consecutivi are tot valoarea $0.5 * \lambda$. Dacă mersul pendular regulat este comutat într-un mers ce folosește abilitatea individuală a picioarelor se poate deci realiza depășirea unui obstacol de tip șanț.

Pentru traversarea șanțului se poate utiliza și un alt mers periodic abil - de dexteritate. Algoritmul de control este în acest caz mult mai complicat, deoarece toate picioarele au urme diferite. Lățimea maximă a șanțului ce poate fi traversată va fi, mai mică decât cea permisă de cele două tipuri de mers mai sus menționate.

Pentru depășirea unor obstacole de tip șanț cu lățimi relativ mari trebuie adoptate strategii diferite de mișcare. Uneori, o strategie poate fi folositoare pentru mai multe tipuri de obstacole ce implică aceleași caracteristici de mișcare din partea robotului. În această situație strategia poate fi materializată într-un program funcțional preinstalat pe robotul pășitor. Programul va face apel la câteva informații suplimentare oferite de sistemul senzorial exteroceptiv al robotului, cum ar fi: lățimea șanțului, poziționarea marginilor sale, etc. Aceste informații pot fi obținute automat cu un sistem de vedere artificială sau pot fi furnizate de un operator plasat în apropierea obstacolului. Un exemplu al caracteristicilor de mișcare necesare robotului pășitor pentru a depăși un obstacol de acest tip este prezentat în figura 8.13 [64], [29].

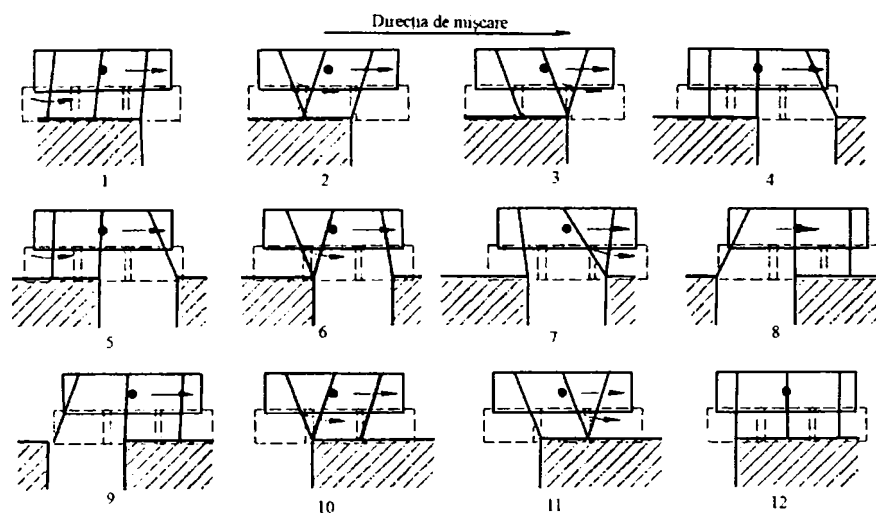


Figura 8.13: Trecerea robotului pășitor hexapod peste un obstacol de tip șanț cu lățime mare

Se poate observa că mișcările efectuate pentru depășirea obstacolului pot fi grupate în trei faze distincte, în fiecare robotul hexapod repetând succesiv următoarele patru elemente:

- mișcarea corpului pentru a aduce centrul de greutate în fața picioarelor din mijloc

- mișcarea picioarelor posterioare ale robotului în paralel cu continuarea deplasării corpului acestuia
- mișcarea picioarelor plasate în poziție mediană
- mișcarea picioarelor frontale ale robotului în paralel cu continuarea deplasării corpului acestuia

Este de subliniat că această strategie de mișcare poate fi folosită și pentru depășirea altor tipuri de obstacole, cum ar fi spre exemplu cazul unui prag de înălțime mică. Faptul că ea nu diferă foarte mult de o strategie normală de deplasare prin pendulare creează posibilitatea implementării într-un singur program de conducere, care urmează a fi adaptat corespunzător scopului urmărit printr-o soluție automată sau manuală.

O strategie destinată depășirii acestui tip de obstacol trebuie deci să asigure completa deplasare a robotului de pe un plan suport inițial pe un alt plan suport final. Planul inițial este definit prin suprafața orizontală pe care este plasat poligonul de sustentare al robotului, iar cel final va conține același poligon de sustentare după depășirea șanțului. În timpul evoluției, picioarele robotului pot și trebuie distribuite între cele două planuri.

Neregularitățile terenului din ambele planuri suport pot fi și ele luate în considerare. Astfel, planul suport inițial poate fi definit ca proiecție a poligonului inițial al sustentării pe nivelul orizontal corespunzător piciorului cu înălțimea cea mai mică. Similare, planul suport destinație poate fi definit ca proiecție a poligonului final al sustentării pe nivelul orizontal corespunzător piciorului cu înălțimea cea mai mare.

Pentru sistematizarea strategiei de deplasare, depășirea completă a obstacolului este împărțită în trei faze succesive. În fiecare fază, câte o singură pereche de picioare este deplasată de pe planul suport inițial pe cel final. Prima fază începe cu poziționarea inițială a robotului și se încheie odată cu plasarea perechii de picioare frontale pe planul suport final. A doua fază se finalizează cu plasarea perechii mediane de picioare ale robotului hexapod pe planul suport final, iar cea de-a treia cuprinde transferarea ultimei perechi de picioare pe același plan suport final.

Revenind la cazul analizat în figura 8.13, poziția inițială a robotului hexapod este cea în care toate cele șase picioare ale sale ocupă o poziție mijlocie în spațiul lor de operare, în timp ce perechea din față este plasată chiar la marginea anterioară a șanțului.

Prima fază de mișcare include mișcările figurate în secvențele 1-4, a doua secvențele 5-8 iar ultima secvențele 9-12. În secvența 10 șanțul a fost deja depășit, ultimele două secvențe asigurând aducerea sistemului de locomoție a robotului în starea inițială dinaintea abordării obstacolului, respectiv cu fiecare picior plasat într-o poziție mijlocie a spațiului său de operare.

Ca principiu de locomoție, picioarele sunt grupate în trei perechi: frontală, mijlocie și posterioară, și în fiecare fază aceste perechi sunt activate corespunzător scopului urmărit. Picioarele din fiecare pereche sunt deplasate în principiu simultan deși este posibil să fie deplasate și secvențial. Acest tip de locomoție bazat pe activarea perechilor de picioare corespondente este nu numai simplu de analizat, ci și destul de eficace prin comparație cu cel în care picioarele sunt activate individual. El este folosit spre exemplu de numeroase tipuri de insecte atunci când acestea depășesc obstacolele întâlnite în cale [9], [18], [36].

La efectuarea pășirii peste un șanț intervin de asemenea două aspecte importante. Primul este distanța maximă cu care o pereche de picioare pot fi extinse în timp ce celelalte picioare rămân pe sol și asigură stabilitatea statică a robotului. Această valoare este măsurată față de marginea planului suport inițial al robotului și depinde de poziția ocupată de picioarele ce staționează pe sol, un optim al plasamentului acestora asigurând valoarea maximă dorită. A doua mărime importantă este distanța relativă dintre poziția pe sol a unui picior și o muchie a obstacolului, margine a planului suport inițial sau final.

În general, studiul mobilității robotului pășitor peste un obstacol de tip șanț presupune determinarea valorilor pentru aceste două distanțe. Trebuie deci determinată extensia maxim posibilă a unei perechi de picioare în condițiile menținerii stabilității statice generale a robotului, precum și condițiile ce trebuie îndeplinite de toate picioarele acestuia la sfârșitul fiecărei faze de mișcare. Dacă pe parcursul depășirii obstacolului de tip șanț corpul robotului rămâne orizontal, cele trei faze ale strategiei de pășire sunt detaliate în figura 8.14.

În figura 8.14.a sunt prezentate pozițiile punctelor de sprijin ale picioarelor din față. Picioarele din mijloc se sprijină pe marginea șanțului, iar picioarele din spate se așează la o distanță aproximativ egală cu P_0 în spatele picioarelor din mijloc. Centrul de greutate este apoi plasat chiar în spatele picioarelor din mijloc, la distanța $P_0 + \frac{R_{x0}}{2}$.

Distanța dintre punctele de sprijin ale picioarelor din spate este $R_0 + \frac{R_{x0}}{2}$. Aceasta se poate vizualiza inversând mișcarea corpului prezentată în figura 8.14.a.

În figura 8.14.b sunt arătate pozițiile punctelor de sprijin ale picioarelor din mijloc. Picioarele din față și cele din spate pășesc separat, pe cele două margini ale șanțului. Distanța dintre ele este $2 * P_0$. Deschiderea picioarelor din mijloc este $P_0 + R_{x0}$, prin urmare, lățimea maximă a șanțului ce poate fi traversat de robotului pășitor hexapod este egală cu cea mai mică distanță dintre punctele de sprijin ale picioarelor, dacă distanțele dintre punctele de sprijin ale picioarelor din față și ale celor din spate pot fi realizate. În consecință, lățimea maximă a șanțului ce poate fi depășită de robot este $D_{max} = P_0 + \frac{R_{x0}}{2}$.

În continuare se analizează cum poate robotul pășitor să-și plaseze picioarele astfel

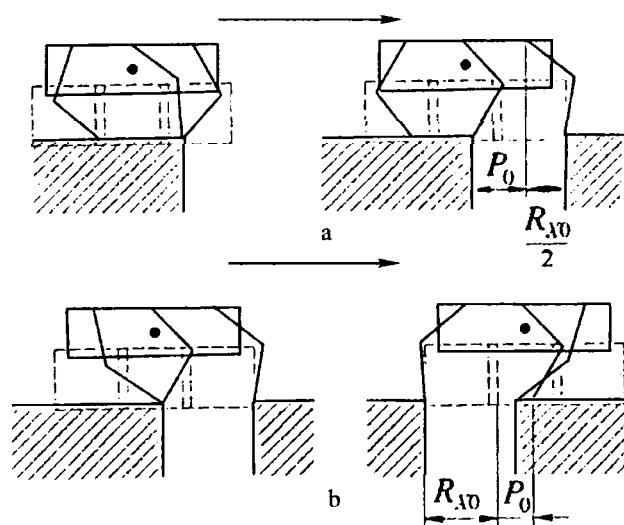


Figura 8.14: Mișcările unui robot pășitor hexapod peste un obstacol de tip șanț

încât să satisfacă condițiile impuse punctelor de sprijin în cele trei faze. În fiecare fază picioarele sunt plasate astfel încât să satisfacă în primul rând distanțele dintre punctele de sprijin și apoi una dintre perechile de picioare se întinde astfel ca punctele de sprijin să fie plasate pe cealaltă margine a șanțului, cu o mișcare simultană a corpului.

În prima fază, corpul se deplasează înainte, astfel încât centrul de greutate să fie adus într-o poziție anterioară punctelor de sprijin ale picioarelor din mijloc, iar picioarele din spate se ridică și se plasează în prelungirea celor din față. Astfel, se îndeplinesc condițiile pentru ca picioarele din față să poată traversa șanțul. Apoi corpul se

deplasează înainte, iar picioarele din față se întind și se plasează pe cealaltă margine a șanțului - realizându-se astfel traversarea șanțului.

În cea de-a doua fază se continuă deplasarea înainte a corpului robotului, iar centrul său de greutate este adus din nou într-o poziție situată deasupra picioarelor mijlocii. Picioarele posterioare sunt apoi deplasate și aduse alături de cele mijlocii. În acest moment sunt îndeplinite condițiile de pășire. Corpul robotului este împins în față și picioarele mijlocii sunt extinse și plasate pe cealaltă margine a șanțului. Picioarele frontale și cele posterioare nu sunt plasate cu respectarea exactă a condițiilor de pășire, deoarece lungimea maximă de pășire a celor din mijloc este mai mare decât cea necesară.

În faza a treia, picioarele din față sunt ridicate și așezate la o distanță P_0 în fața picioarelor din mijloc. Corpul este deplasat în față și centrul de greutate este adus înaintea picioarelor din mijloc. Apoi, picioarele din spate sunt deplasate și aduse lângă cele mijlocii. În paralel cu mișcarea picioarelor din spate se realizează și deplasarea corpului robotului.

Dacă toate aceste condiții de pășire sunt îndeplinite, valoarea maximă a lățimii șanțului ce poate fi depășit este $D_{max} = P_0 + \frac{R_{z0}}{2}$, respectiv minimul dintre cele trei distanțe de pășire ale perechilor de picioare, minim dictat, așa cum am văzut, de picioarele din față și de cele din spate.

Se poate obține o creștere a lățimii șanțului ce poate fi depășit în cazul când corpul robotului este manevrat astfel încât să fie înclinat înainte de pășirea peste obstacolul de tip șanț. Considerăm pentru aceasta situația limită prezentată în figura 8.15.

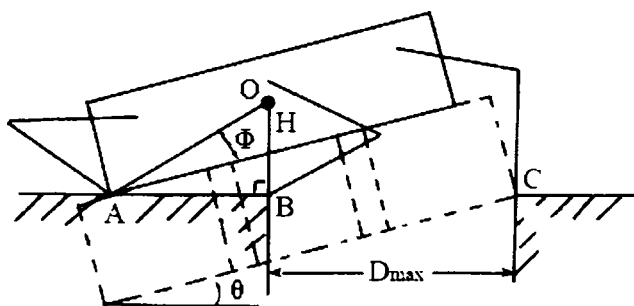


Figura 8.15: Trecerea unui șanț prin înclinarea corpului robotului

În timp ce distanța de pășire a picioarelor mijlocii rămâne la valoarea stabilită

anterior, respectiv $P_0 + \frac{R_{x0}}{2}$, cele două valori egale ale distanței de pășire pentru picioarele din față și cele din spate se majorează ca în relația (8.41), unde unghiul θ are valoarea dată de relația (8.42).

$$BC = \left(P_0 + \frac{R_{x0}}{2} \right) * \frac{1}{\cos \theta} + \left[H_0 - \left(P_0 + \frac{R_{x0}}{2} \right) * \tan \theta \right] * \sin \theta \quad (8.41)$$

$$\theta = \arctan \frac{R_{z0}}{\frac{L}{2} + P_0 + \frac{R_{x0}}{2}} \quad (8.42)$$

Minimul dintre cele trei distanțe de pășire crește acum la valoarea dată de relația (8.41). În consecință, lățimea maximă D_{max} a șanțului ce poate fi depășit de robotul hexapod prin această nouă strategie bazată pe modificarea înclinării corpului său crește și ea la această valoare.

8.3 Modalități de deplasare peste un obstacol de tip treaptă

Obstacolul de tip treaptă a fost prezentat în figura 8.1 și este definit prin înălțimea V a treptei ce trebuie urcată de către robotul pășitor. În general se poate aprecia că depășirea unui trepte este mai dificilă decât depășirea unui șanț. Figurile 8.16 și 8.17 prezintă cele două condiții ce determină distanța maximă de pășire a picioarelor din față peste un astfel de obstacol. Corpul robotului este înclinat cu un unghi θ , iar γ reprezintă unghiul dintre axa Z a sistemului de referință atașat corpului robotului și linia ce unește centrul de greutate O și colțul de jos al spațiului de operare al picioarelor din mijloc. Valoarea acestui unghi este dată de relația (8.43).

$$\gamma = \arctan \frac{R_{x0}}{2 * H_0} \quad (8.43)$$

Figura 8.16 ilustrează cazul în care $\theta \geq \gamma$, iar centrul de greutate este în spatele picioarelor din mijloc. Înălțimea treptei este notată cu V_1 . Pentru ca această valoare să fie maximă, picioarele mijlocii sunt extinse la maximum posibil și sunt plasate la o distanță C_{m1} de colțul C .

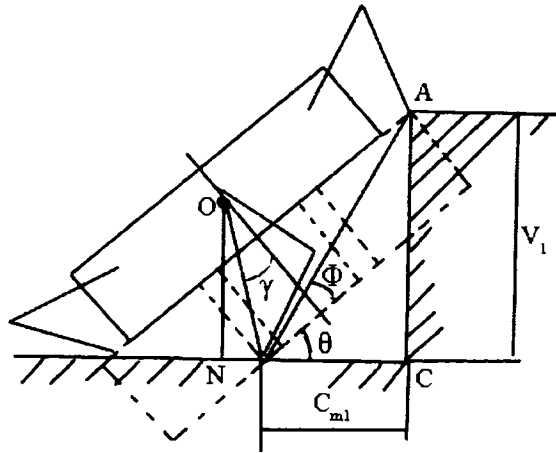


Figura 8.16: Distanța maximă de pășire a picioarelor frontale în cazul $\theta \geq \gamma$

Indicele $m1$ arată faptul ca este vorba de poziționarea picioarelor din mijloc, în prima fază. Picioarele din spate pot fi plasate oriunde după punctul N , proiecție a centrului de greutate al robotului. Dacă acestea sunt plasate chiar în punctul N , atunci distanța lor până la punctul C va fi $C_{p1} = C_N$. Calculele geometrice conduc la relațiile (8.44) și (8.45).

$$V_1 = AF * \sin(\theta + \phi) \quad (8.44)$$

$$C_{m1} = AF * \cos(\theta + \phi) \quad (8.45)$$

unde unghiul ϕ și lungimea segmentului AF sunt date de relațiile (8.46).

$$\begin{cases} \phi = \arctan \frac{R_{z0}}{P_0 + R_{x0}} \\ AF = \frac{R_{z0}}{\sin \phi} \end{cases} \quad (8.46)$$

Folosind convenția de notare introdusă anterior, poziționarea picioarelor din spate în această primă fază se poate determina din figura 8.16 cu relația (8.47), iar înclinarea maximă a robotului θ_{max} se produce atunci când colțul din stânga jos al corpului acestuia atinge solul (relația (8.48)).

$$\begin{aligned} C_{p1} &= CN \\ &= C_{m1} + OF * \sin(\theta - \gamma) \\ &= C_{m1} + \frac{H_0}{\cos \gamma} * \sin(\theta - \gamma) \end{aligned} \quad (8.47)$$

$$\theta_{max} = \arctan \frac{2 * R_{z0}}{L - R_{x0}} \quad (8.48)$$

Figura 8.17 prezintă aceeași fază de mișcare, dar în situația în care raportul celor două unghiuri este inversat, respectiv $\theta \leq \gamma$. Centrul de greutate al robotului se găsește chiar în N, în spatele picioarelor din mijloc.

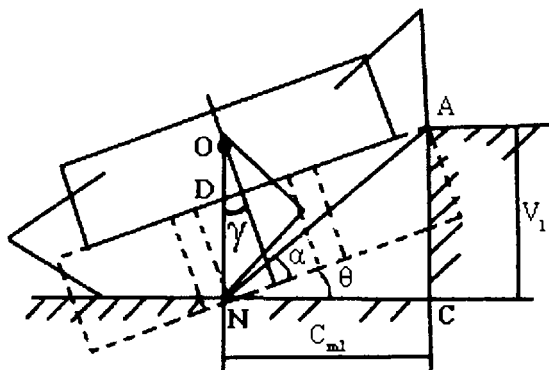


Figura 8.17: Distanța maximă de pășire a picioarelor frontale în cazul $\theta \leq \gamma$

Calculule geometrice conduc la relațiile (8.49), (8.50), (8.51).

$$V_1 = AN * \sin(\theta + \alpha) \quad (8.49)$$

$$C_{m1} = AN * \cos(\theta + \alpha) \quad (8.50)$$

$$C_{p1} = AN * \cos(\theta + \alpha) \quad (8.51)$$

Unghiul α și lungimea segmentului AN sunt date de relațiile (8.52).

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{R_{z0}}{P_0 + \frac{R_{x0}}{2} + H_0 * \tan \theta} \\ AN = \frac{R_{z0}}{\sin \alpha} \end{cases} \quad (8.52)$$

Analiza relațiilor (8.49), (8.50), (8.51) arată că în paralel cu creșterea înclinării θ a robotului, crește V_1 și descrește C_{m1} . Pentru o treaptă cu înălțimea V_1 dată, dacă picioarele mijlocii sunt plasate la o distanță mai mare decât C_{m1} atunci picioarele din față pot să nu atingă niciodată vârful treptei, iar dacă picioarele mijlocii sunt plasate

la o distanță mai mică decât C_{m1} acestea mai pot încă atinge vârful treptei. Înclinarea robotului va fi însă mai mare decât valoarea θ ce ar corespunde valorii impuse de V_1 .

Figura 8.18 arată condițiile de pășire ale picioarelor mijlocii ale robotului.

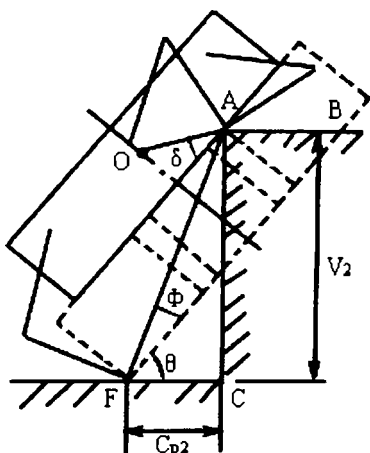


Figura 8.18: Distanța maximă de pășire a picioarelor mijlocii

Picioarele din față sunt plasate în vârful treptei A , în timp ce picioarele mijlocii sunt deplasate către această poziție. Centrul de greutate se găsește între vârful treptei A și picioarele din spate. Calculele geometrice conduc în final la relațiile (8.53) și (8.54).

$$V_2 = AF * \sin(\theta + \phi) \quad (8.53)$$

$$C_{p2} = AN * \cos(\theta + \phi) \quad (8.54)$$

În relațiile (8.53) și (8.54) valorile pentru unghiul ϕ și segmentul AF sunt date de relația (8.46). Picioarele din spate trebuie să rămână poziționate după proiecția centrului de greutate pentru ca stabilitatea robotului să fie asigurată:

$$C_{p2} \geq OA * \cos(\theta - \delta) \quad (8.55)$$

unde unghiul δ și lungimea segmentului OA se calculează cu relația (8.56)

$$\begin{cases} \delta = \arctan \frac{2 * (H_0 - R_{x0})}{R_{x0}} \\ OA = \frac{R_{x0}}{2 * \cos \delta} \end{cases} \quad (8.56)$$

Analiza relațiilor (8.53) și (8.54) arată că odată cu creșterea înclinării θ a robotului, crește V_2 și descrește C_{p2} . Dacă picioarele posterioare sunt plasate la o distanță mai mică decât C_{p2} , picioarele din mijloc pot atinge vârful treptei cu o înclinare θ a corpului robotului mai mare decât cea care ar corespunde valorii impuse de V_2 . Atunci când centrul de greutate al robotului trece de punctul A , picioarele din spate pot fi deplasate în acest punct prin ridicarea și împingerea simultană a corpului robotului. Distanța maximă de pășire pe verticală a picioarelor posterioare V_3 corespunde deci cazului în care centrul de greutate este deasupra punctului A și picioarele posterioare sunt extinse la maximum, așa cum se indică în figura 8.19.

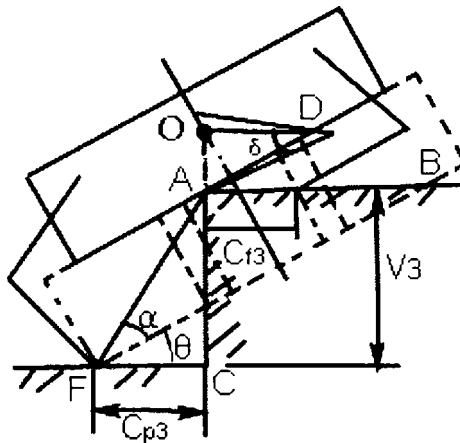


Figura 8.19: Distanța maximă de pășire a picioarelor din spate

Calculule geometrice conduc la relațiile (8.57) și (8.58):

$$V_3 = AF * \sin(\theta + \alpha) \quad (8.57)$$

$$C_{p3} = AF * \cos(\theta + \alpha) \quad (8.58)$$

unde unghiul α și lungimea segmentului AF sunt date de expresiile (8.59), iar înclinarea maximă a robotului θ_{max} se produce atunci când $C_{p3} = 0$.

$$\begin{cases} \alpha = \arctan \frac{R_{z0}}{P_0 + \frac{R_{x0}}{2} - (H_0 - R_{z0}) * \tan \theta} \\ AF = \frac{R_{z0}}{\sin \alpha} \end{cases} \quad (8.59)$$

Pentru a rămâne în interiorul spațiului lor de operare, picioarele frontale trebuie deplasate la o distanță C_{f3} de vârful treptei. Valoarea acestei distanțe se calculează cu relația (8.60).

$$C_{f3} = \left[(H_0 - R_{z0}) * \tan \theta + P_0 - \frac{R_{x0}}{2} \right] * \frac{1}{\cos \theta} \quad (8.60)$$

Dacă se compară figura 8.19 cu figurile 8.18 și 8.16 se constată că, pentru aceeași înclinare θ a robotului, distanța maximă de pășire verticală în faza a treia este cea mai mică, având o valoare $DA * \sin \theta$, unde lungimea segmentului DA se calculează cu relația (8.61).

$$DA = (H_0 - R_{z0}) * \tan \theta + \frac{R_{x0}}{2} \quad (8.61)$$

De asemenea, analiza relațiilor obținute indică faptul că pentru o treaptă cu înălțimea dată V_3 , dacă picioarele din spate sunt plasate la o distanță mai mare decât C_{p3} , centrul de greutate al robotului nu va putea depăși vârful treptei.

Deoarece faza a treia (fază ce corespunde procesului de pășire a picioarelor din spate) necesită o înălțime minimă a obstacolului de tip treaptă, rezultă că limitele globale ale robotului hexapod pentru abordarea acestui tip de obstacol vor fi dictate de valoarea stabilită pentru V_3 .

Figura 8.20 prezintă în vedere laterală mișcările reprezentative ale robotului la depășirea unui obstacol de tip treaptă prin coordonarea mișcării picioarelor și a corpului său. Prima fază include secvențele 1-4, cea de-a doua secvențele 4-7, iar ultima fază secvențele 7-12. După secvența 12, picioarele posterioare pot fi deplasate în vârful treptei prin ridicarea și deplasarea în față a corpului robotului, terminându-se practic procesul de depășire a acestui tip de obstacol. Ca și în cazul obstacolului de tip șanț, după secvența 12 sunt indicate un grup de manevre asupra tuturor picioarelor, astfel încât acestea să fie aduse într-o poziție mediană în raport cu propriul lor spațiu de operare.

În fiecare din cele trei faze picioarele robotului sunt deplasate în perechi corespundente, astfel încât să fie menținută stabilitatea statică a robotului. Dacă se operează aproape de condițiile limită și deplasarea unei perechi de picioare poate provoca instabilitatea robotului, se poate folosi o strategie care să includă pășiri scurte intermediare.

Prima poziție ocupată de robot este cea în care toate picioarele sale sunt plasate într-o poziție mediană a spațiului lor de operare, iar robotul menține o distanță față de

obstacolul treaptă pentru a preveni coliziunea cu aceasta atunci când va începe înclinarea corpului său. Picioarele din spate sunt aduse la o distanță mai mare decât C_{p1} .

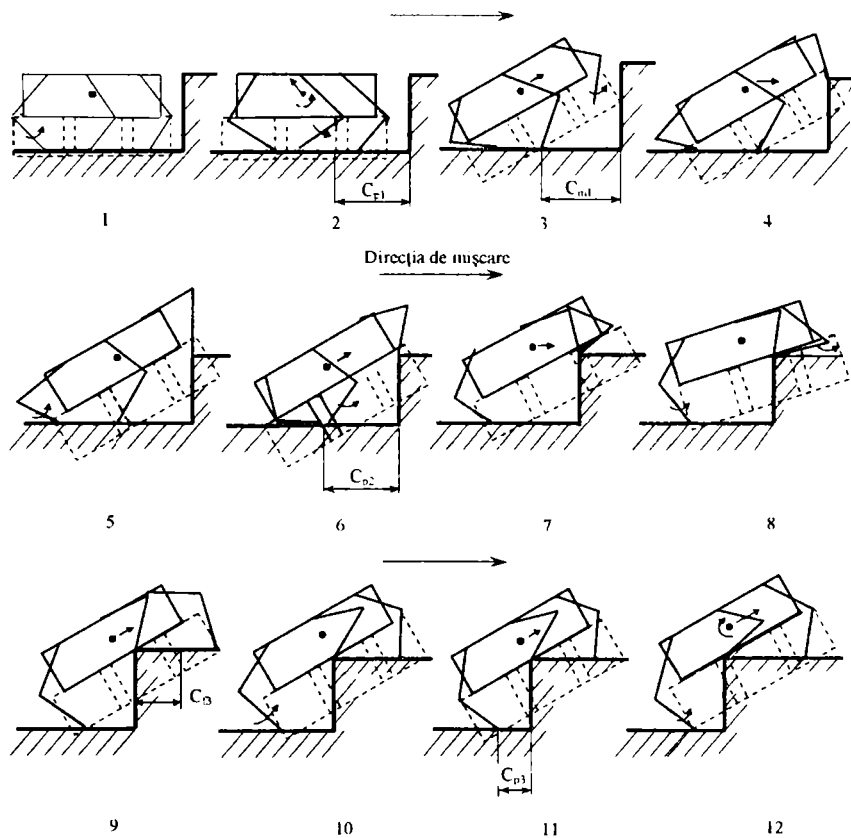


Figura 8.20: Secvență completă de pășire (în vedere laterală) pentru trecerea robotului pășitor peste un obstacol de tip treaptă [54]

Secvența a doua arată deplasarea picioarelor mijlocii până la o distanță C_{m1} față de treaptă. Urmează înclinarea corpului, care presupune o serie de manevre prin care spatele robotului este adus cât mai aproape de sol, fără a exista însă contact direct cu acesta.

Secvența a treia arată faptul că în timp ce robotul își menține înclinarea, picioarele frontale sunt deplasate pentru a fi poziționate pe vârful treptei, ceea ce se finalizează în secvența a patra. De notat că picioarele frontale nu sunt complet ridicate, iar corpul robotului nu a atins încă poziția sa limită întrucât înălțimea pășirii este mai mică decât valoarea V_1 corespunzătoare înclinării corpului. În acest moment se încheie

prima fază, iar picioarele trebuie deplasate pentru a satisface condițiile de pășire necesare pentru derularea celei de-a doua faze. Deoarece există o distanță mică între picioarele posterioare și cele mijlocii, corpul robotului este deplasat înainte prin ridicarea centrului său de greutate deasupra picioarelor mijlocii, așa cum indică secvența a cincea. Apoi, picioarele posterioare sunt deplasate lângă cele mijlocii, astfel încât $C_{p2} = C_{m1}$.

Secvența a șasea indică urcarea corpului robotului cu menținerea înclinării sale, precum și ridicarea picioarelor mijlocii ce vor fi plasate lângă cele frontale. Secvența a șaptea marchează finalizarea celei de-a doua faze a mișcării. Corpul robotului este deplasat înainte pentru a pregăti condițiile de pășire necesare în faza a treia a strategiei.

În secvența a opta, cele două picioare posterioare nu pot fi ridicate sau deplasate simultan, întrucât există posibilitatea pierderii stabilității. Poziția lor este ajustată prin deplasări alternative, în final fiind aduse la o distanță C_{p3} de treaptă. Dacă celelalte picioare nu sunt la limitele lor de pășire, corpul robotului poate fi și el deplasat pentru a obține avansarea centrului de greutate. Apoi, picioarele frontale sunt ridicate și deplasate la o distanță C_{f3} de marginea treptei.

Figura 8.21 prezintă detaliile manevrelor de ajustare succesivă a poziției picioarelor din spate ce sunt realizate în secvențele 7-12. Se poate renunța la aceste mici ajustări succesive numai dacă există posibilitatea ca picioarele din mijloc să poată fi plasate la o distanță orizontală față de treaptă $C_{p3} + \frac{R_{x0} - P_0}{\theta}$, iar centrul său de greutate să fie poziționat la o distanță mai mică decât C_{p3} . În această situație picioarele din spate ale robotului pot fi plasate direct în poziția situată la distanța C_{p3} . În principiu, această posibilitate există întotdeauna atunci când înclinarea θ a robotului este mică și valoarea C_{p3} este relativ mare [54].

Secvența a noua arată deplasarea înclinată a robotului până când picioarele posterioare ating limitele lor de manevrabilitate. În secvența a zecea, picioarele posterioare sunt poziționate alternativ la distanța C_{p3} de treaptă. În secvența următoare, picioarele posterioare sunt într-o poziție corespunzătoare începerii procesului de pășire, iar corpul robotului își continuă deplasarea înclinată până când centrul său de greutate trece de marginea treptei, așa cum se poate observa în ultima secvență. Acum corpul robotului este adus în poziție orizontală și deplasat înainte, timp în care picioarele posterioare sunt ridicate și apoi plasate pe marginea treptei. În acest moment, se încheie astfel a treia

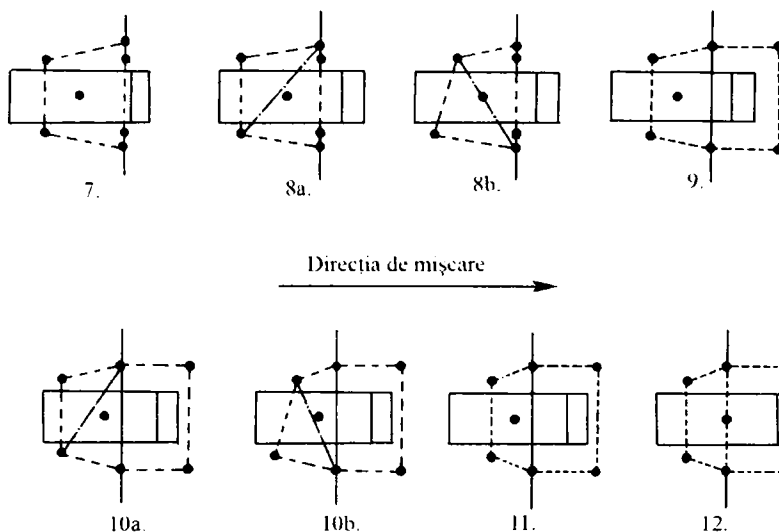


Figura 8.21: Detalierea pășirii între pozițiile 7-12 în vedere laterală

etapă a pășirii peste treaptă și totodată întregul proces de locomoție.

Așa cum a rezultat din analiza anterioară, există momente în care robotul hexapod are numai patru picioare în contact cu solul, în timp ce altele două din aceeași pereche sunt ridicate în vederea realizării procesului de pășire. Cele patru picioare asigură echilibrul static al robotului printr-o soluție de sustentație de tip tetrapod, dar pot fi și ele manevrate suplimentar pentru realizarea locomoției dorite, ca în figura 8.21. În aceasta figura sunt reprezentate cu linie punctată poligoanele de sprijin din fiecare secvență de mișcare. Între secvențele 7-12 de mișcare, robotul hexapod folosește pășirea tetrapodă, proces ce poate fi bine înțeles dacă se compară figura 8.20 cu figura 8.21.

Dacă înălțimea treptei este mai mare decât domeniul maxim de pășire verticală a picioarelor posterioare, robotul nu poate urca un astfel de obstacol, dar poate în schimb să-l coboare. Figura 8.22 prezintă o strategie de coborâre a robotului peste o astfel de treaptă.

În prima secvență robotul avansează pe planul superior al treptei până când centrul său de greutate este poziționat chiar deasupra marginii treptei. Apoi, corpul este coborât până la completa sa sprijinire pe plan, iar picioarele frontale sunt extinse la distanța maxim permisă de spațiul lor de operare.

În secvența a doua, corpul robotului este rotit în jurul punctelor de sprijin ale pi-

cioarelor mijlocii până când centrul său de greutate depășește marginea treptei. Din acest moment rotația robotului este asigurată automat de momentul creat de propria sa forță de greutate până când picioarele frontale întâlnesc planul suport inferior al treptei. Apoi robotul își poate ajusta poziția picioarelor frontale prin deplasări alternative pe planul de sprijin.

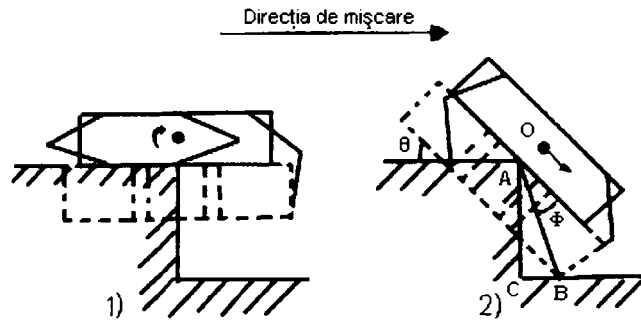


Figura 8.22: Coborârea unei trepte de înălțime mare

Folosind notațiile din figura 8.22, înălțimea treptei poate fi determinată prin relația (8.62), unde unghiul θ și lungimea segmentului AB sunt determinate cu relațiile (8.63).

$$V = AB * \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi - \theta\right) \quad (8.62)$$

$$\begin{cases} \theta = \arctan\left(\frac{R_{z0}}{P_0 + \frac{R_{z0}}{2}}\right) \\ AB = \frac{R_{z0}}{\sin\phi} \end{cases} \quad (8.63)$$

Pentru ca mișcările de ajustare ale picioarelor din față sa se realizeze cu ușurință, proiecția centrului de greutate al robotului trebuie să cadă la mijlocul segmentului CB , ceea ce introduce o condiție (relația (8.64)) privind înclinarea maximă longitudinală a corpului robotului și implicit a înălțimii maxime a obstacolului de tip treaptă ce poate fi depășit prin această strategie.

$$AB * \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi - \theta\right) = 2 * (H_0 - R_{z0}) * \sin\theta \quad (8.64)$$

•

Din strategiile prezentate anterior și referitoare la depășirea unui obstacol de tip treaptă în sens ascendent sau descendent, pot fi formulate câteva concluzii:

- La urcarea unei trepte, distanța maximă de pășire verticală a robotului (deci înălțimea treptei) este dictată de picioarele posterioare, întrucât acestea introduc o valoare minimă prin comparație cu picioarele mijlocii și cele frontale.
- Pentru cazul urcării unei trepte, datorită valorii mici a distanței C_{p3} , faza a treia este cea mai dificilă dintre toate cele descrise anterior. Picioarele din spate sunt în general plasate în domeniul C_{p3} folosind mișcări alternative de ajustare a poziției lor.
- Ajustarea picioarelor prin mișcări alternative poate fi folosită pentru urcarea unei trepte. Scopul urmărit este aducerea centrului de greutate al robotului peste picioarele mijlocii (în faza a doua a locomoției), dacă condiția $L_2 > L_1$, nu poate fi îndeplinită prin reducerea înălțimii sau a înclinării longitudinale a corpului acestuia.
- Nu este necesară menținerea unei înclinări longitudinale constante pentru corpul robotului în cele trei faze ale locomoției. În cazul urcării unei trepte, înclinarea longitudinală în primele două faze este mai mică decât în ultima.
- Prin inversarea secvențelor de mișcare, strategia urcării unei trepte poate fi aplicată și în cazul coborârii.
- Este posibilă utilizarea deliberată a unei strategii instabile de locomoție în cazul coborârii unei trepte. Aceasta se bazează pe utilizarea gravitației și face posibilă depășirea unor trepte cu înălțimi mai mari decât cele ce pot fi abordate în cazul urcării
- În fiecare fază, atât la urcare cât și la coborâre, plasarea picioarelor pe planul suport de înălțime minimă trebuie să fie cât mai apropiată de colțul treptei. Aceasta ușurează procesul de pășire ulterior al celorlalte picioare.
- Existența posibilităților de deplasare transversală a picioarelor în raport cu corpul robotului favorizează stabilitatea în locomoția peste acest tip de obstacol. Aceste facilități sunt utile mai ales în cadrul manevrelor de ajustare a poziției de sprijin prin deplasări alternative ale picioarelor frontale sau posterioare.

Așa cum rezultă din aceste observații, depășirea unor obstacole de tip treaptă poate fi îmbunătățită prin modificarea spațiului de operare al picioarelor robotului hexapod. Deoarece înălțimea unei trepte ce poate fi urcată depinde de lungimea longitudinală a spațiului de operare al picioarelor posterioare, creșterea acesteia determină majorarea valorilor parametrilor V_3 și C_{p3} . Majorarea distanței cu care picioarele posterioare pot fi deplasate longitudinal spre spatele robotului este semnificativă în creșterea valorii parametrului C_{p3} , în timp ce majorarea distanței cu care picioarele posterioare pot fi deplasate longitudinal spre mijlocul robotului îmbunătățește semnificativ parametrul V_3 .

De asemenea, perechea picioarelor posterioare trebuie să dispună de mai multă putere în acționările proprii, întrucât asigură majoritatea forței de propulsie necesară împingerii corpului robotului în urcarea sa peste un obstacol treaptă. De fapt, aceste caracteristici sunt comune și multor insecte hexapode, la care picioarele posterioare sunt mai lungi și mai puternice decât restul.

O îmbunătățire a locomoției la coborârea unui obstacol-treaptă poate fi obținută prin creșterea distanței de pășire a picioarelor frontale. Totuși, așa cum am văzut anterior, utilizarea gravitației și acceptarea unei deplasări controlate dar temporar instabile pot să asigure o îmbunătățire a comportării robotului. Rezultă deci că lungimea mai mare a picioarelor frontale nu este atât de importantă ca și cea a picioarelor posterioare.

Pe de altă parte, pentru efectuarea unor mișcări alternative de ajustare a poziției de sprijin este foarte utilă posibilitatea de deplasare a picioarelor pe o direcție transversală în raport cu corpul robotului. În unele strategii discutate anterior aceste posibilități permit manevre suplimentare pentru stabilitatea robotului. Dacă se optează pentru ele sunt de dorit deci spații de operare ale picioarelor caracterizate prin valori R_y cât mai mari, în care limitele de deplasare transversală a unui picior către corpul robotului și către exteriorul acestuia să fie de valori egale.

8.4 Modalități de deplasare peste un obstacol de tip prag

Forma generală a obstacolului de tip prag a fost prezentată în figura 8.1. Ea este caracterizată prin doi parametri: lățimea pragului U și înălțimea acestuia V . Din punct

de vedere principal, abordarea acestui tip de obstacol poate fi privită ca o înlănțuire a două strategii distincte: mai întâi o strategie de urcare a unei trepte de înălțime V , apoi o strategie de coborâre a unei trepte cu aceeași înălțime V .

Dacă lățimea U a pragului este suficientă pentru a suporta poziționarea simultană a două dintre perechile de picioare ale robotului hexapod, atunci situația se rezumă chiar la o simplă înlănțuire a celor două strategii (în diversele variante discutate în subiectele precedente). Dacă însă lățimea U a pragului este mică, o strategie distinctă este necesară pentru depășirea acestui tip de obstacol.

Figura 8.23 prezintă detaliile acestei strategii, în care mișcările robotului premergătoare primei secvențe sunt identice cu cele din cazul urcării unei trepte, iar cele succesoare secvenței a cincea sunt identice cu cele din cazul coborârii treptei. Astfel, figura 8.23 prezintă numai setul de cinci secvențe proprii acestei strategii distincte.

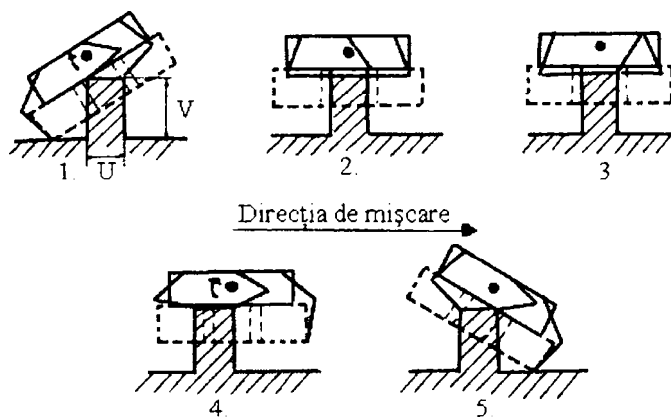


Figura 8.23: Deplasarea robotului peste un obstacol de tip prag

În prima secvență se realizează condițiile specifice pentru transferul picioarelor posterioare, condiții identice cu cele din faza a treia de urcare a unei trepte. Pentru ca picioarele frontale să poată fi plasate pe prag, grosimea minimă a acestuia trebuie să satisfacă condiția (8.65).

$$U_1 = C_{f3} \quad (8.65)$$

Corpul robotului este deplasat în față și este adus pe orizontală prin rotația sa în jurul picioarelor mijlocii. Picioarele posterioare sunt ridicate și plasate lângă picioarele mijlocii, respectiv pe marginea anterioară a pragului.

Secvența a doua indică ridicarea picioarelor mijlocii și plasarea lor lângă picioarele frontale, adică pe marginea posterioară a pragului. Deoarece atât perechea de picioare frontale cât și cea a picioarelor posterioare sunt plasate simultan pe prag, lățimea minimă a acestuia trebuie să satisfacă condiția (8.66).

$$U_2 = 2 * P_0 - R_{x0} \quad (8.66)$$

În secvența a treia, centrul de greutate este deplasat înainte până când depășește marginea posterioară a pragului. Picioarele din față sunt apoi ridicate și extinse până la limita maxim posibilă.

În secvența a patra, corpul se rotește în jurul centrului său de greutate pentru a obține înclinarea longitudinală inversă față de prima secvență. Apoi, menținând înclinarea, corpul robotului este coborât până când atinge marginea posterioară a pragului, moment în care, datorită simetriei spațiilor de operare, picioarele din față trebuie să atingă solul.

A cincea secvență indică poziționarea picioarelor frontale în poziția corespunzătoare primei faze din strategia de coborâre a unei trepte, strategie dezvoltată anterior. Corpul robotului este împins de-a lungul axei sale longitudinale.

Datorită aceleiaș geometrii a spațiilor de operare, lățimea minim necesară pragului pentru ca picioarele mijlocii și posterioare să rămână poziționate pe el în această fază este dată de relația (8.67).

$$U_3 = C_{f3} \quad (8.67)$$

Prin reunirea relațiilor dimensionale (8.65), (8.66), (8.67), rezultă că obstacolul de tip prag trebuie să aibă o lățime minimă care să satisfacă în final condiția (8.68), iar înălțimea sa maximă V_{max} este egală cu distanța maximă de pășire a picioarelor posterioare.

$$U_{min} = \max \{U_1, U_2, U_3\} \quad (8.68)$$

Acestea vor constitui limitele necesare aplicării acestei strategii de deplasare peste obstacolul de tip prag. În situația în care lățimea pragului este mai mică decât valoarea U_{min} dată de relația (8.68), această strategie nu mai poate fi utilizată. O nouă strategie bazată pe exploatarea unor avantaje introduse de contactul dintre corpul robotului și

prag poate fi însă folosită. Figura 8.24 prezintă detaliile acestei noi strategii, ce implică un set de patru secvențe proprii. Mișcările robotului premergătoare primei secvențe sunt identice cu cele în cazul urcării unei trepte, iar cele succesoare secvenței a patra sunt identice cu cele în cazul coborârii treptei.

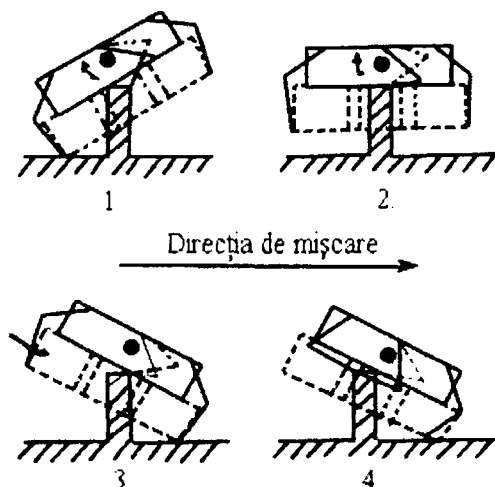


Figura 8.24: Strategia de deplasare peste un obstacol de tip prag cu lățime mică

Prima secvență indică poziționarea picioarelor posterioare pentru a îndeplini condițiile de transfer. Picioarele mijlocii sunt poziționate pe prag astfel: unul pe muchia anterioară (desenat cu linie continuă) iar celălalt pe muchia posterioară (cel mascat de corpul robotului și desenat cu linie punctată). Corpul robotului este inițial coborât astfel încât atinge muchia anterioară a pragului, după care, folosind piciorul mijlociu plasat pe muchia posterioară a pragului, el este adus treptat într-o poziție orizontală printr-o rotație în jurul muchiei frontale a pragului.

Secvența a doua arată corpul robotului dispus complet orizontal. Greutatea sa nu este susținută de prag prin intermediul picioarelor mijlocii, ci prin sprijinirea corpului său pe acesta. Corpul robotului este rotit apoi în jurul muchiei posterioare a pragului cu ajutorul piciorului mijlociu poziționat pe muchia anterioară. Picioarele frontale vor atinge planul suport atunci când centrul de greutate este chiar deasupra muchiei posterioare a pragului, așa cum se poate observa din secvența a treia. Acum picioarele posterioare sunt aduse pe marginea anterioară a pragului, ca în secvența a patra. Urmează deplasarea alternativă a picioarelor frontale printr-un proces de ajustare a poziției lor, iar apoi cele

mijlocii sunt ridicate în vederea transferului pe planul suport final.

Această strategie nu impune o lățime minimă U_{min} pentru obstacolul de tip prag. La limită, dacă $U = 0$, corpul robotului va suferi o rotație peste vârful pragului până când picioarele frontale vor întrerupe rotația printr-un șoc provocat de atingerea planului suport final. Șocul apare ca urmare a mișcării lipsite de stabilitate între secvențele 1-3. Dacă centrul de greutate al robotului nu deviază mult în raport cu vârful pragului, atunci amplitudinea acestui șoc va fi relativ modestă.

Abilitatea robotului hexapod în depășirea acestui tip de obstacol depinde foarte mult de gradul de manevrabilitate al picioarelor. Relațiile dimensionale sunt asemănătoare cu cele stabilite în cazul unui obstacol de tip treaptă. Grosimea minimă a pragului ce poate fi depășit depinde de cei doi parametri ce caracterizează acest obstacol, respectiv U_2 și C_{f3} . Valorile acestor parametri pot fi reduse prin creșterea distanței longitudinale cu care spațiile de operare ale picioarelor adiacente se intersectează.

De asemenea, ambele strategii propuse pentru depășirea acestui tip de obstacole necesită o construcție mecanică robustă, care să permită suportarea greutății robotului de către partea exterioară a corpului său pentru toate secvențele în care picioarele nu-i asigură sustentarea normală.

8.5 Concluzii

O caracteristică importantă a roboților pășitori o constituie faptul că deplasarea acestora nu este afectată într-o măsură foarte mare de configurația terenului. Această caracteristică face ca locomoția prin pășire să devină o soluție atractivă pentru multe aplicații ce necesită deplasare pe terenuri neamenajate, cu configurație neregulată. Varietatea suprafețelor accidentate pe care poate evolua un robot pășitor este extrem de mare.

În acest capitol, s-a prezentat un studiu teoretic concludent asupra modalităților de deplasare posibile a roboților mobili pășitori și o sistematizare a tipurilor de obstacole, bazată pe abordarea unei forme geometrice simple.

Aplicații ale roboților pășitori

Accesul omului în zone dificile, unde siguranța vieții este în pericol, a făcut ca cercetarea științifică să abordeze teme cu diferite destinații, realizând dispozitive care, prin performanțele lor, să acopere diferite domenii. Arhitectura acestor sisteme este foarte variată și depinde de destinația lor.

9.1 Aplicații ale roboților pășitori în medii cu risc maxim

Datorită condițiilor tehnice și de securitate limitate, ca și a consecințelor greșelilor umane, se consideră medii cu risc maxim:

- industria nucleară
- industria de apărare
- activități submarine

Utilizarea roboților pășitori în industria nucleară prezintă un interes deosebit. Ei contribuie la asigurarea securității personalului și la rentabilizarea unor activități din domeniul nuclear și de apărare, cum sunt: întreținere, dezamorsarea unor încărcături periculoase, intervenții în caz de accident, deplasarea unor containere ce conțin anumite substanțe periculoase, deplasarea în zonele accidentate sau periculoase, cu scop de patrulare și colectare a informațiilor de natură civilă sau militară, etc.

În acest context, Comunitatea Europeană a finanțat un vast program de cercetare în telerobotică pentru industria nucleară, program numit Telemat (1989-1996) [5]. Scopul a fost de a încuraja dezvoltarea de roboți telecomandați, care să asigure:

- reducerea expunerii la radiații a personalului
- creșterea securității instalațiilor datorită sistemelor teleoperate de inspecție, întreținere reparare și înlocuire
- asigurarea unei asistențe în timpul și după accidente, aceasta în scopul asigurării unei mai bune protecții a personalului și mediului înconjurător.

Dintre proiectele finanțate prin programul Telemat se disting cele referitoare la roboții pășitori Sherpa și Robug III (figura 9.1) [5].

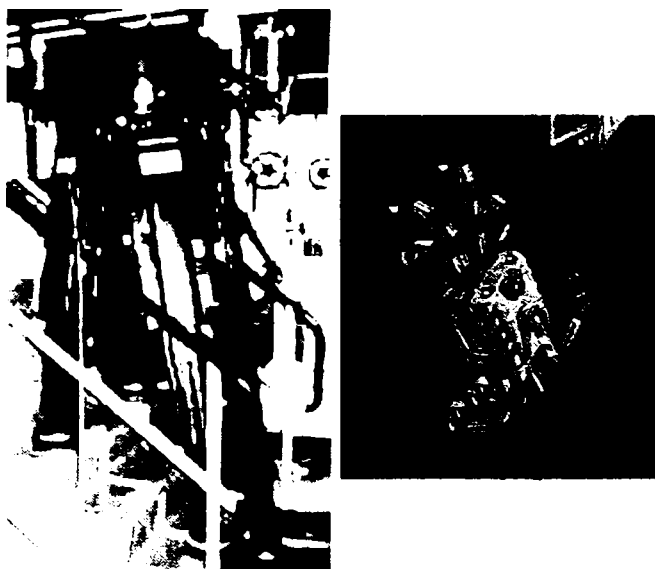


Figura 9.1: Robotul Sherpa și robotul Robug III

9.2 Aplicații ale roboților pășitori în explorări planetare

Europa și SUA au manifestat în ultimii ani un interes deosebit pentru explorarea corpurilor cerești (planeta Marte, Luna), utilizând roboți mobili. Misiunile umane americane, care au permis explorarea Lunii în anii '70, sunt considerate în prezent prea riscante

și prea costisitoare în comparație cu misiunile robotizate. Unul din avantajele importante ale misiunilor robotizate îl constituie întoarcere facultativă pe Pământ, ceea ce reduce considerabil costul expedițiilor.

Condițiile impuse de o misiune spațială sunt severe în comparație cu cele obișnuite din industrie. Acestea se datorează următoarelor motive:

- o serie de condiții extreme impuse de spațiu, cum ar fi: vidul, variațiile foarte mari de temperatură, forța de gravitație redusă, praful și necunoașterea mediului
- o serie de condiții tehnice impuse de un voiaj spațial: condițiile mecanice impuse de decolare și aterizare, masa limitată și înghesuiala din timpul transportului, puterea limitată, durata transmisiei prin teleoperare, posibilitățile de calcul limitate și perioade lungi de hibernare (stagnare) cât durează transferul interplanetar.

Misiunile americane și rusești au folosit diferite vehicule pentru explorarea Lunii, care la ora actuală sunt depășite. Noile misiuni spre planeta Marte concentrează importante forțe în cercetare pentru realizarea de roboți autonomi care să facă față condițiilor impuse de viitoare misiuni planetare [5], [98].

În figura 9.2 sunt prezentați doi astfel de roboți.

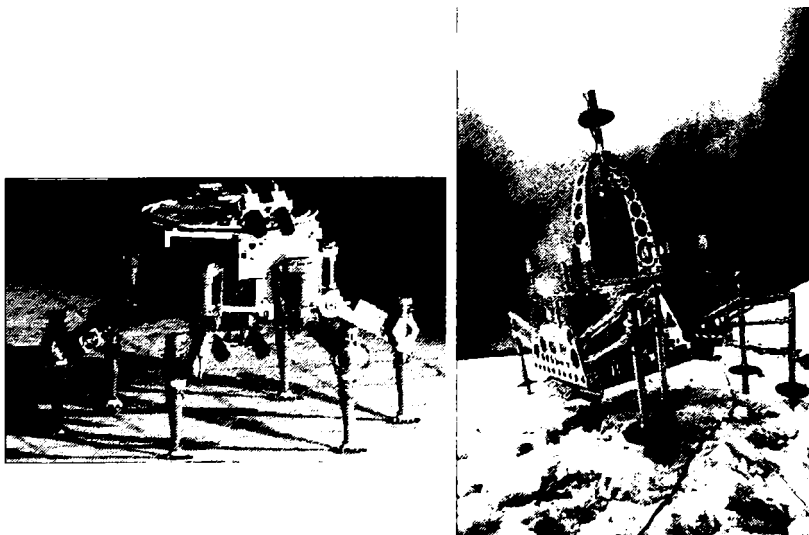


Figura 9.2: Robotul Awimr [77] și robotul Dante [78]

9.3 Aplicații ale roboților pășitori în medii subacvatice

Construirea podurilor și barajelor, precum și instalarea platformelor de foraj necesită un studiu prealabil al fundurilor marine. Pentru această activitate au fost realizați câțiva roboți pășitori în Japonia [31] și în Europa.

Picioarele sunt preferate șenilelor, deoarece este necesară dispunerea unei platforme orizontale pe o suprafață care poate avea neregularități de până la 2 m, precum și datorită existenței curenților marini importanți. Gabaritul vehiculelor cu șenile, ca și poziționare pentru obținerea orizontalității platformei, avantajează roboții pășitori. În figura 9.3 se prezintă doi roboți pășitori folosiți în acest scop.



Figura 9.3: Robotul Robolobster [50] și robotul Aqua [12]

9.4 Aplicații ale roboților pășitori în medii agricole și forestiere

Exploatarea și întreținerea pădurilor este o altă aplicație a roboților pășitori. Mașinile cu roți sau șenile destinate acestui tip de operații au, pe de o parte, o mobilitate limitată, iar pe de altă parte, distrug considerabil mediul forestier, vegetația și în particular arborii tineri sunt distruse în zonele de trecere.

Mașina pășitoare Plustech Forestry (figura 9.4) este un robot cu șase picioare, cântărind 3500 kg, proiectat pentru tăierea arborilor [85].

Roboții pășitori protejează mai bine acest mediu, deoarece: contactul cu solul este discret, ceea ce limitează mult suprafața supusă strivirii, greutatea robotului poate



Figura 9.4: Robotul PlustechForestry

fi distribuită optim punctelor de sprijin, printr-un control al forțelor; garda la sol ridicată permite robotului să treacă peste arborii tineri și alte vegetații ce apar în zona de trecere a acestuia. În plus, mobilitatea superioară evită manevrele necesare altor vehicule cu două grade de libertate. Evitarea obstacolelor, cum ar fi buștenii sau trunchiurile de copaci, constituie în aceeași măsură un avantaj apreciabil.

9.5 Aplicații ale roboților pășitori în domeniul prestărilor de servicii

Acest domeniu devine foarte atractiv pentru roboții pășitori, odată cu creșterea ponderii senzorialilor și "inteligentei" acestora. Se pot folosi roboți pășitori pentru: asistență medicală (roboți îngrijitori), asistența persoanelor cu handicap, pentru divertisment.

Cunoscuta companie Sony, a lansat pe piață robotul pășitor inteligent pentru divertisment - AIBO (Artificial Intelligent Robot). Robotul are aspectul general și comportamentul unui "cățeluș de companie", așa cum se poate observa și din figura 9.5, unde sunt prezentate câteva dintre variantele constructive disponibile în prezent.

Există un număr mare de situații care necesită roboți mobili capabili de a se cățăra înlocuind omul pentru operații de inspecție sau de curățire a unor suprafețe greu accesibile. Intervenția umană ar necesita construirea unor schele sau utilizarea unor ascensoare. Dintre aceste aplicații pot fi amintite: spălarea geamurilor de zgârienori,



AIBO ERS 210



AIBO ERS 220



AIBO ERS 311



AIBO ERS 312



AIBO ERS 7

Figura 9.5: Robotul AIBO

inspecția unor recipiente în industria chimică și petrochimică, inspecția lucrărilor de artă și inspecția corpului navelor pe șantierele navale.

În aceste condiții, aderența picioarelor la suprafața de sprijin nu este asigurată de forța de gravitate, fiind necesare sisteme speciale de fixare: ventuze montate în extremitățile picioarelor, montarea unor magneți pe aceste extremități sau realizarea unei rețele de puncte de fixare de care picioarele se pot agăța cu ajutorul unor dispozitive mecanice. Problema controlului mersului pentru roboții cățărători este diferită, datorită condițiilor speciale necesare pentru menținerea stabilității robotului.

Robotul cățărător Roma 2 (figura 9.6) se deplasează prin comprimarea brațelor/picioarelor, ceea ce îi conferă posibilitatea de a se susține singur, asigurându-i totodată și stabilitate [73].

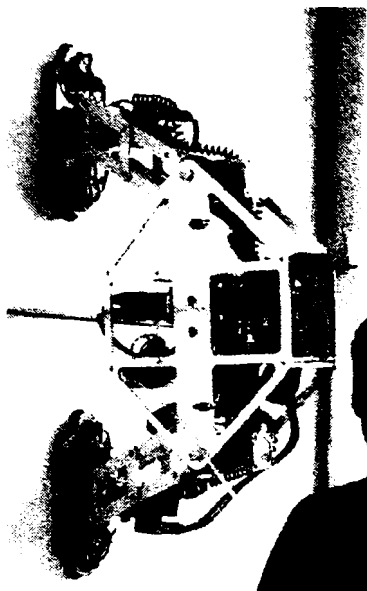


Figura 9.6: Robotul Roma 2

9.6 Aplicații ale roboților pășitori în domeniul educațional și didactic

Există la ora actuală, numeroase firme care s-au specializat în proiectarea și realizarea unor modele de roboți pășitori cu scop educațional și didactic. Acești roboți sunt realizați într-o mare varietate structurală și tehnologică, materializând multe din principiile ce stau la baza adevăraților roboți pășitori cu destinație industrială sau științifică.

Robotul pășitor hexapod EH2 Geekbot, prezentat în figura 9.7, este un produs al Firmei Lynxmotion [38]. Fiecare picior este realizat într-o variantă mecanică ce introduce două grade de libertate. Structura mecanică adoptată pentru locomotie permite demonstrarea mai multor strategii de pășire, atât pentru evoluția pe suprafețe plane de operare, cât și pentru depășirea unor obstacole, prin urcare sau coborâre.

Robotul pășitor hexapod III, prezentat în figura 9.8, este un alt produs al Firmei

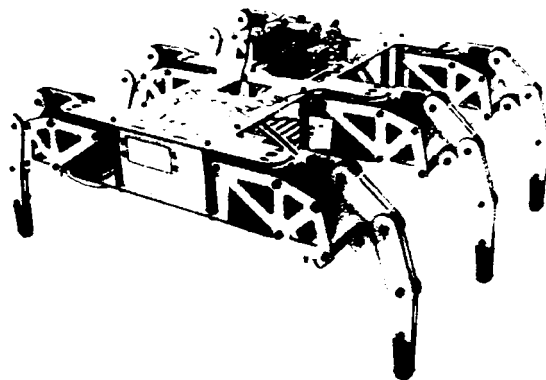


Figura 9.7: Robotul EH2 Geekbot

Lynxmotion [39]. El dispune de o structură mecanică mai evoluată pentru fiecare picior, structură care introduce 3 grade de libertate comandate independent. Prezența unui grad de libertate suplimentar la fiecare picior creează în mod evident facilități deosebite pentru dezvoltarea unor strategii de locomoție mai performante.

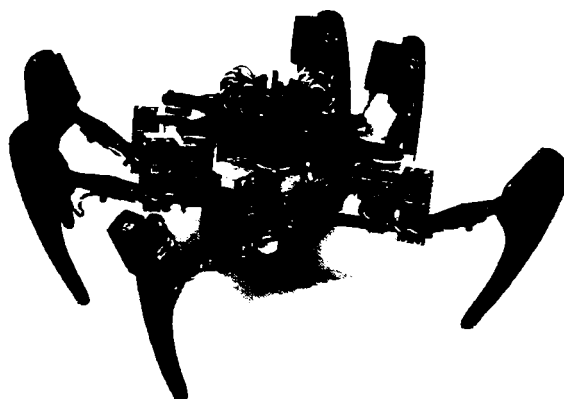


Figura 9.8: Robotul Hexapod Phoenix

Capitolul 10

Concluzii finale

În cele ce urmează se prezintă concluziile finale care se pot trage din precedentele capitole ale acestei teze. De asemenea se prezintă un rezumat sistematizat al capitolelor anterioare. În acest sens este expus din diferite abordări conținutul prezentei teze, precum și activitatea autoarei.

Tratarea corespunzătoare a subiectului tezei "Optimizarea constructiv-funcțională a roboților mobili patruzezi" solicită acoperirea unui domeniu vast de cunoștințe. Contribuțiile și aplicațiile autoarei sunt rezultatul unei activități de cercetare focalizate pe tema tezei în ultimii patru ani în cadrul colectivului Departamentului de Mecatronică al Facultății de Mecanică din Timișoara.

Din parcurgerea lucrării se desprind următoarele:

- după cum rezultă din dispunerea în timp a publicațiilor, la tema prezentată s-a lucrat pe parcursul a mai multor ani. Studiind temele se poate observa că informațiile din atâtea domenii au necesitat parcurgerea bazelor de cunoștințe din diferite puncte de vedere pentru a reuși sistematizarea și structurarea lor
- autorul s-a familiarizat cu domenii foarte diverse ce țin de robotică în general, roboți mobili pășitori, proiectarea asistată de calculator și limbaje de programare
- pe parcursul tezei sunt prezentate o serie de contribuții teoretice și aplicative;
- lucrarea are o structură coerentă ce servește scopului propus, de a prezenta contribuțiile

autoarei la optimizarea constructiv-funcțională a roboților patrupezi

10.1 Structura tezei

Capitolul 1, "Introducere", prezintă pentru început o comparație între roboții mobili pe roți, pe de o parte și roboții pășitori pe de altă parte cu avantajele și dezavantajele aferente. După un scurt istoric al roboților mobili pășitori, se prezintă obiectivele prezentei teze. Astfel, în conformitate cu obiectivele formulate, în următoarele capitole sunt prezentate contribuțiile teoretice și practice ce au dus la realizare lor.

Capitolul 2, "Locomoția roboților pășitori", tratează problemele locomoției roboților pășitori, tipuri de mecanisme pentru picioarele roboților pășitori, parametrii de bază în studiul roboților pășitori. Se trece apoi la problema stabilității roboților pășitori, iar în final se prezintă tipul de mecanism și schema cinematică pe care autoarea a ales-o pentru construcția robotului mobil pășitor JQuadRobot.

În capitolul 3, "Modelarea geometrică a robotului pășitor JQuadRobot", se prezintă sinteza piciorului platformei mobile pășitoare. Capitolul se încheie cu prezentarea aplicației "DimLegJQuadRobot", pe care autoarea a realizat-o utilizând limbajul Java și API-ul Java3D pentru determinarea lungimilor elementelor piciorului robotului pășitor patrupezi JQuadRobot, respectiv a curselor unghiulare ale acestora, având ca date de intrare dimensiunile spațiului de lucru al piciorului.

Capitolul 4, "Modelarea cinematică a piciorului robotului pășitor JQuadRobot" abordează analiza cinematică a piciorului platformei mobile pășitoare. Capitolul se încheie cu prezentarea unui algoritm de configurare a sistemului de locomoție.

Capitolul 5, "Analiza cinetostatică a robotului pășitor JQuadRobot", tratează modelarea cinetostatică a roboților pășitori quadrupezi. Se prezintă calculul forțelor de reacțiune ce acționează asupra picioarelor în faza de suport, studiul forțelor când punctul caracteristic urmărește o lege de mișcare, precum și efectul dinamic al piciorului care se ridică asupra stabilității platformei pășitoare.

Capitolul 6, "Contribuții la proiectarea și realizarea robotului mobil pășitor JQuadRobot", prezintă detaliat robotul mobil pășitor JQuadRobot, proiectat și realizat fizic de către autoarea prezentei teze, reprezentând componenta hardware a sistemului mobil pășitor JQuadRobot. Sunt prezentate problemele și soluțiile ce rezolvă aceste probleme,

apărute pe parcursul realizării robotului. Autoarea tezei prezintă detaliile constructive, principiul de funcționare din punct de vedere electronic, respectiv avantajele și dezavantajele acestui robot. Astfel sunt prezentate servomotoarele de curent continuu utilizate în implementare, modul de realizare al comenzii acestora, circuitele utilizate și plăcile de comandă. Un subcapitol este dedicat exclusiv de către autoare prezentării funcționării robotului pășitor patruped JQuadRobot. În final autoarea precizează faptul că a dorit să realizeze un robot pășitor patruped pentru cercetări experimentale cu o mare flexibilitate în utilizare, urmând ca pe baza rezultatelor obținute să se realizeze unul la scară mare, cu o senzorică mai complexă în scopul obținerii unei stabilități sporite în timpul deplasării în medii incerte. În ansamblul său, capitolul 6 este unul original, el evidențiind contribuțiile autoarei referitoare la proiectarea și implementarea unui sistem robotic pășitor care materializează concepția autoarei.

Capitolul 7, "Contribuții la dezvoltarea și testarea unui software pentru robotul JQuadRobot", prezintă detaliat aplicația intitulată "JQuadRobot" dezvoltată în limbajul Java și API-ul Java3D de către autoarea prezentei teze, reprezentând componenta software a sistemului mobil pășitor JQuadRobot. La început se prezintă conceptul "Open source", apoi autoarea argumentează originalitatea aplicației realizate prin portabilitatea asigurată de programarea în limbajul Java, evidențiind faptul că prețul de dezvoltare este zero din punctul de vedere al uneltelor utilizate prin utilizarea produsului freeware IDE (Integrated Development Environment). Aplicația "JQuadRobot" a fost dezvoltată în scopul realizării programării și conducerii robotului pășitor patruped JQuadRobot. Aplicația are o structură modulară, fiecare modul în parte fiind detaliat pe parcursul capitolului. Modulul Communication al aplicației JQuadRobot realizează comunicare prin portul serial bidirecțională între calculator și robot. Prin intermediul modulului Editor al aplicației JQuadRobot se realizează programarea mersului robotului patruped. Modulul Simulator permite utilizatorului verificare corectitudinii mișcării motoarelor înainte de a fi transmisă efectiv comanda la motoare, acest lucru duce la evitarea coliziunilor, la depășirea limitelor de rotație ale motoarelor, etc. Autoarea precizează faptul că dezvoltarea acestui modul s-a realizat cu scopul comandării real-time a robotului într-un mediu incert. Interfața grafică cu utilizatorul a aplicației "JQuadRobot" a fost proiectată sub o formă "prietenosă", ușor de înțeles de către utilizator. Aplicația "JQuadRobot" este înregistrată sub licență

GPL în scopul disponibilității pentru o continuă dezvoltare. În ansamblul său, capitolul 7 este unul original, el evidențiind contribuțiile autoarei referitoare la proiectarea și implementarea unei aplicații software care materializează concepția autoarei.

Capitolul 8, "Deplasarea roboților pășitori pe suprafețe accidentate", abordează modalități de pășire pe terenuri care prezintă neregularități.

Capitolul 9, "Aplicații ale roboților pășitori", prezintă aplicații ale roboților pășitori în diverse medii de lucru.

Ultimul capitol al lucrării, prezintă concluziile finale, precum și un rezumat al problemelor abordate în prezenta teză.

10.2 Contribuții teoretice și aplicative

- realizarea unui studiu original cu privire la realizările până în acest moment în domeniul roboticii pășitoare
- analiza critică a modalităților de realizare a mecanismelor pentru picioarele roboților pășitori urmărește din perspectiva subiectului abordat, realizarea unei fundamentări a mecanismului selectat pentru proiectarea și construirea robotului patruped JQuadRobot
- prezentarea critică a modalităților de realizare ale unui robot mobil pășitor
- sintetizarea unor aspecte teoretice și practice legate de tipurile de mers disponibile în contextul asigurării stabilității robotului pășitor pe diferite suprafețe de mișcare
- sintetizarea unor aspecte teoretice și practice legate de stabilitatea statică, respectiv de stabilitatea cvasistatică ce apare la robotul pășitor patruped, pentru a evidenția metodele și rezultatele care vor fi utilizate la abordarea strategiei de mișcare a robotului patruped JQuadRobot
- elaborarea unui algoritm de sinteză dimensională pentru robotul pășitor folosind noțiunea de conexiune, și dezvoltarea pe baza acestuia în limbajul Java a aplicației "DimLegJQuadRobot"
- elaborarea unei metode de modelare cinematică pentru robotul pășitor

- elaborarea unei metode de modelare cinetostatică pentru robotul pășitor
- proiectarea și realizarea unui robot mobil pășitor patruped
- concepția unei arhitecturi *software* a interfeței care combină robotul mobil pășitor și modulul *software* corespunzătoare modalităților de conducere considerate
- dezvoltarea aplicației "JQuadRobot" care cuprinde următoarele module:
 - modulul Communication prin intermediul căruia se realizează comunicare prin portul serial bidirecțională între calculator și robot
 - modulul Editor prin intermediul căruia se realizează programarea mersului robotului patruped, definându-se graficul de mișcare al picioarelor robotului în concordanță cu o ordine de pășire prestabilită
 - modulul Simulator ce permite utilizatorului verificare corectitudinii mișcării motoarelor înainte de a fi transmisă efectiv comanda la motoare, acest lucru duce la evitarea coliziunilor, la depășirea limitelor de rotație ale motoarelor, etc. Dezvoltarea acestui modul s-a realizat cu scopul comandării real-time a robotului într-un mediu incert
- realizarea de cercetări experimentale privind diferitele tipuri de ordine de pășire existente.
- o parte a rezultatelor cercetării prezentate în această teză se găsesc și la adresa <http://www.jquadrobot.org>.
- codul sursă al aplicației "JQuadRobot" este înregistrat sub licență *GPL - General Public License Version 3* și poate fi obținut de la adresa <http://www.jquadrobot.org> sau de la adresa <http://sourceforge.net/projects/jquadrobot/>

Se remarcă interesul științific al robotului patruped JQuadRobot realizat, identificându-se domenii de cercetare și soluții personale.

Pentru realizarea acestei teze s-au folosit următoarele softuri open source: MikTex și TeXnicCenter pentru tehnoredactarea tezei; Gimp pentru prelucrarea imaginilor; limbajul de programare Java și API-ul Java3D, Eclipse (IDE) pentru dezvoltarea aplicațiilor "DimLegJQuadRobot", "JQuadRobot - Editor" și "JQuadRobot - Simulator". Pentru

modelare 2D și 3D s-a folosit softul cu licență ViaCAD.

Activitatea de cercetare în acest domeniu a autoarei tezei nu se oprește aici, urmând ca în viitor:

- aplicația "JQuadRobot - Simulator" să conțină noi funcționalități
- îmbunătățirea sistemului de comandă și control al robotului pășitor JQuadRobot prin implementarea unei camere web, a unui senzor ultrasonic și a unui *embedded computer* pentru obținerea unei autonomii de mișcare (aplicațiile rulează direct pe robot, comunicarea realizându-se prin *wireless*)

Bibliografie

- [1] Alexander R.M. The gaits of bipedal and quadrupedal animals. *The International Journal of Robotics Research*, Vol.3(No.2):pp 49–59, 1984.
- [2] Arikawa, K. and Hirose, S. Development of quadruped walking robot TITAN-VIII. *Proceedings IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1996.
- [3] Bares, J., Hebert, M., Kanade, T., Krotkov, E., Mitchell, T., Simmons, R. and Whittaker, W. Ambler: An autonomous rover for planetary exploration. *IEEE Computer*, vol.22(no.6):18–26, June 1989.
- [4] Bares, J.E. and Whittaker, W.L. Configuration of autonomous walkers for extreme terrain. *International Journal Robotic Research*, Vol. 12(6):535–59, 1993.
- [5] Baudoin, Y. Improved operator - robot - interaction in mobile teleoperated or autonomous robotics. *ISMCR'99 - Tropical Workshop on Virtual Reality and Advanced Human-Robot System*, Vol.X, June 10-11 , Tokyo, Japan, 1999.
- [6] Beer, R.D., Chiel, H.J. and Sterling, L.S. A biological perspective on autonomous agent design. *Robotics and Autonomous Systems*, 1990.
- [7] Beyond Logic. Port serial. <http://beyondlogic.org/serial/serial.htm>.
- [8] Buehler, M., Battaglia, R., Cocosco, A., Hawker, G., Sarkis, J. and Yamazaki, K. Scout: A simple quadruped that walks, climbs, and runs. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol.(2):1707–1712, 1998.

- [9] Cheng, F., Lee, H. Increasing the locomotive stability margin of multilegged vehicles. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA-99*, Vol.3:1708–1712, Detroit, SUA, 1999.
- [10] Cordes, S., Berns, K., Eberl, M. and Ilg, W. On the design of a four-legged walking machine. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1997.
- [11] Doroftei, I. *Introducere în roboți pășitori*. Editura Cerami, Iași, 1998.
- [12] Dudek, G., Giguere, P., ș.a. AQUA: An Amphibious Autonomous Robot. *IEEE Computer*, Vol.40(No.1):46–53, January 2007.
- [13] Espenscheid, K.S., Quinn, R.D., Beer, R.D. and Chiel, H.J. Biologically based distributed control and local reflexes improve rough terrain locomotion in a hexapod robot. *Robotics and Automation*, 1996.
- [14] Free Software Foundation, Inc. The gnu project. <http://www.gnu.org>.
- [15] Fukuda, T., Adachi, Y. Posture control of 6-leg walking robot. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA-95*, Vol.1:1006–1008, Nagoya, Japan, 1995.
- [16] Gambaryan, P. P. *How Mammals Run: Anatomical Adaptations*. John Wiley and Sons, New York, 1974.
- [17] Gifu University, Tokyo. Colt3 robot. http://earth.kwangwoon.ac.kr/Robots/node_c.html.
- [18] Goodwine, B., Burdick, J. Gait controllability for legged robots. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol.1:484–492, Leuven, Belgium.
- [19] Halme, A., Leppänen, I., Montonen, M. and Ylönen, S. Robot motion by simultaneously wheel and leg propulsion. *Proceedings International Conference on Climbing and Walking Robots*, 2001.

- [20] Hildebrand, M. Motions of the running cheetah and horse. *Journal of Mammalogy*, Vol.40:481–495, 1959.
- [21] Hildebrand, M., Bramble, D. M., Liem, K. F. *Walking and running*. Belknap Press, Cambridge, 1985.
- [22] Hirose, S., Yoneda, K. and Arai, I. Design of prismatic quadruped walking vehicle TITAN VI. *International Conference on Advanced Robotics*, 1991.
- [23] Hirose S.A. Study of design and control of a quadruped walking vehicle. *The International Journal of Robotics Research*, Vol.3(No.2):pp 113–133, 1984.
- [24] Hitec. Servomotor hitec hs-5955tg. <http://www.rctoys.com/pdf/hitec-servos/HIT-HS5955TG.pdf>.
- [25] Honda. Asimo robot. <http://world.honda.com/ASIMO/>.
- [26] Honda. Honda humanoid robot - p2. http://world.honda.com/ASIMO/history/p1_p2_p3.html.
- [27] Howell, A. B. *Speed in Animals*. University of Chicago Press, Chicago, 1944.
- [28] Ion I., Simionescu I., Avramescu A. Stability analysis of spider gaits of four legged walking machines. *The 4th International Workshop Robotics in Aple-Adria-Region RAA '95*, Portschach, Austria, July 6-8, 1995.
- [29] Ion, N.I. *Roboți pășitori*. Editura Bren, București, 2001.
- [30] Ispas, V. *Roboți pentru aplicații speciale*. Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1999.
- [31] Iwasaki, M., ș.a. Development of aquatic walking robot for underwater inspection. *ISRC - International Symposium on Robotics in Construction*, Tokyo, 1988.
- [32] Kopacek, Peter. Robots in entertainment, leisure and hobby. *Proceedings 32nd International Symposium on Robotics ISR 2001*, Vol.(2):1339–1342, Seoul, Korea, 2001.
- [33] Kovács, Fr. Mecanisme pseudospațiale. studii și cercetări de mecanică aplicată. *Ed. Academiei Române, București*, Tom 34(nr.3), 1975.

- [34] Kovács, Fr. *Utilizarea noțiunii de conexiune cinematică în teoria mecanismelor și robotică - lucrare de disertație*. Universitatea Politehnica din Timișoara, 1999.
- [35] Kovács, Fr., Varga, Șt., Pau, V. *Introducere în Robotică*. Printech Publisher, București, 2000, ISBN 973-632-230-X.
- [36] Koyachi, N., Arai, T. Hexapod with integrated limb mechanism of leg and arm. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA-95*, Vol.2:1952–1958, Nagoya, Japan, 1995.
- [37] Lynxmotion. Irpd sensor. <http://www.lynxmotion.com/images/data/irpd-v7.pdf>.
- [38] Lynxmotion. Robotul EH2 Geekbot. <http://www.lynxmotion.com/images/html/proj067.htm>.
- [39] Lynxmotion. Robotul Hexapod Phoenix. <http://www.lynxmotion.com/images/html/proj098.htm>.
- [40] Lynxmotion. Ssc-32 servo controller. <http://www.lynxmotion.com/Product.aspx?productID=395>.
- [41] Lynxmotion, Inc. Atom bot board. <http://www.lynxmotion.com>.
- [42] Massachusetts Institute of Technology. Spring flamingo robot. <http://web.mit.edu/spotlight/spring-turkey/>.
- [43] McGeer, T. Passive dynamic walking. *International Journal Robotics Research*, 1990.
- [44] McGhee, R.B. Some finite state aspects of legged locomotion. *Math Biosciences*, Vol.2(1):67–84, 1968.
- [45] McGhee, R.B. *Vehicular Legged Locomotion*. Advances in Automation and Robotics, ed. by G:N: Saridis, Jai Press, Inc., Greenwich, Con, 1985.
- [46] Moore, E.Z. and Buehler, M. Stable stair climbing in a simple hexapod. *International Conference on Climbing and Walking Robots*, pages 603–609, 2001.

- [47] Nelson, G.M. and Quinn, R.D. Posture control of a cockroach-like robot. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998.
- [48] Nițulescu, Mircea. *Roboți mobili*. Editura Sitech, Craiova, 1998.
- [49] Nițulescu, Mircea. *Sisteme robotice cu capacitate de navigație*. Editura Universitaria, Craiova, 2002.
- [50] Northeastern University - Marine Science Center. Robotul Robolobster. http://www.onr.navy.mil/media/releases/image_gallery/default.asp?categoryID=10.
- [51] Okhotsimski, D.E., ș.a. Integrated walking robot development. *Machine Intelligence*, ed. by Hayes, J.H., Michie, D., Mikulich, L.J., Vol.9, 1977.
- [52] Oprea, A., Ispas, C., Ciobanu, E, ș.a. *Accionări și automatizări industriale*. Editura Tehnică, București, 1989.
- [53] Perju, D., ș.a. *Mecanisme de mecanică fină*. Litografia Universității Politehnica din Timișoara, 1984.
- [54] Petrișor, A. *Algoritmi pentru conducerea roboților pășitori în condițiile existenței unor modele dinamice incerte*. Teză de doctorat, Universitatea din Craiova, 2004.
- [55] Pratt, J. and Pratt, G. Exploiting natural dynamics in the control of a three-dimensional bipedal walking simulation. *International Conference on Climbing and Walking Robots*, pages 797–807, 1999.
- [56] Pratt, J., Dillworth, P. and Pratt, G.A. Virtual model control of a bipedal walking robot. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1997.
- [57] Quinn, R.D and Espenschied, K. Control of a hexapod robot using biologically inspired neural network. *Biological neural networks in invertebrate neuroethology and robotics*, Academic press, 1993.
- [58] Radulescu C., Vatau S. *Roboți mobili - Vehicule ghidate automat*. Vol.1, Editura Politehnica, Timișoara, 2008.

- [59] Raibert, M.H. *Legged robots that balance*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1986.
- [60] Rădulescu, C., Varga, Șt. Walking locomotion system for quadruped mobile platform with adaptive hoofs. *IFAC Publications-Intelligent Assembly and Disassembly, ELSEVIER Publishers, Elsevier Science Ltd, Oxford, UK*, pages 96–101, March 2004.
- [61] Ridderström, C. Legged locomotion: Balance, control and tools - from equation to action. *International Journal of Robotics Research*, 2003.
- [62] Schmiedeler, J. P. *The Mechanics of and Robotic Design for Quadrupedal Galloping*. The Ohio State University, 2001.
- [63] Silva, M.F. and Tenreiro Machado, J.A. A historical perspective of legged robots. *Journal of Vibration and Control*, Vol.13(9-10):1447–1486, 2007.
- [64] Song, S.M. and Waldron, K.J. *Machines that walk: The adaptive suspension vehicle*. Massachusetts: MIT Press, 1989.
- [65] Song, S.M., Waldorn, K.J., Kinzel, G.L. Computer-aided geometric design of legs for a walking vehicle. *Mechanism and Machine Theory*, Vol.20(No.6):587–596, 1985.
- [66] Song, S.M., Waldron, K.J. An analytical approach for gait study and its applications on wave gaits. *The International Journal of Robotics Research*, Vol.3(2):60–71, Summer, 1987.
- [67] Sukhanov, V. B. *General System of Symmetrical Locomotion of Terrestrial Vertebrates and Some Features of Movement of Lower Tetrapods*. Amerind Publishing, New Delhi, 1974.
- [68] Sun Microsystems, Inc. Java 3d api tutorial. <http://java.sun.com/developer/onlineTraining/java3d>.
- [69] Tașcău-Toth, M. *Cinematica și dinamica roboților inteligenți*. Editura Politehnica, Timișoara, 2001.

- [70] The Hobby Robotics Page. Servomotor. http://www.geocities.com/hobby_robotics/was.htm, 2008.
- [71] Tilman Walther, Martin Wilke. Mathparser. http://www.tilman.de/programme/mathparser/download_en.html, 2004.
- [72] Tokyo Institute of Technology. Titan robot. http://www-robot.mes.titech.ac.jp/robot/walking/titan4/titan4_e.html.
- [73] Univeristy Carlos III Madrid - Robotics Lab. Robotul Roma 2. http://roboticslab.uc3m.es/roboticslab/proyecto.php?id_proy=5, 1999-2001.
- [74] Universitatea Stanford. Sprawl robot. <http://www-cdr.stanford.edu/biomimetics/documents/sprawl/>.
- [75] Universitatea Stanford, NASA's Jet Propulsion Laboratory. Lemur robot. <http://www-robotics.jpl.nasa.gov/systems/system.cfm?System=5>.
- [76] University of South Carolina. Phoney poney robot. <http://agrosy.informatik.uni-kl.de/wmc/historical.php>.
- [77] University of Southern California. Robotul Awir. <http://teamster.usc.edu/~fixture/Robotics/SpaceRoboticsTC/SpaceRoboticsTC.html>.
- [78] University of the Pacific. Robotul Dante. <http://www1.pacific.edu/eng/research/cvrg/members/bvotaw/>.
- [79] Varga, Șt. *Contribuții la sinteza optimală a celulelor flexibile de fabricație servite de manipolatoare și roboți cu aplicații în sectoare calde*. Teză de doctorat, Universitatea Politehnica din Timișoara, 1997.
- [80] Varga, Șt., Rădulescu, C. Un sistem de locomoție pe roțile pentru platforme mobile. *Proceedings of 2th National Workshop on mobile Robots, WMRC'01*, Craiova, România, 2001.
- [81] Varga, Șt., Rădulescu, C. Mobile platform with wheeled - walking locomotion system. *The 10th International Workshop on Robotics in Alpe - Adria - Danube Region, Raad 01*, Vienna, 2001.

- [82] Vatau, S. *Capitole speciale din teoria mecanismelor - examen nr.1*. Universitatea Politehnica din Timișoara, 2005.
- [83] Vatau, S. *Stadiul actual al cercetărilor și realizărilor în domeniul roboților mobili pășitori - referat nr.1*. Universitatea Politehnica din Timișoara, 2005.
- [84] Vatau, S. *Planificarea mișcării roboților mobili. Ocolire / escaladare obstacole - examen nr.3*. Universitatea Politehnica din Timișoara, 2006.
- [85] Vatau, S. *Stadiul actual al cercetărilor și realizărilor în domeniul roboților mobili - referat nr.1*. Universitatea Politehnica din Timișoara, 2006.
- [86] Vatau, S. *Mecanica pășirii - referat nr.2*. Universitatea Politehnica din Timișoara, 2007.
- [87] Vatau S. Dynamic gaits for a jadro - quadruped robot. *The International Journal Robotica and Management*, Vol.13(No.1):pp 7–10, June 2008, ISSN 1453-2069.
- [88] Vatau S., Cioi D. Graphical user interface for quadruped's leg robot. *ISI Proceedings of The 19th INTERNATIONAL DAAAM SYMPOSIUM "Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Next Generation of Intelligent Systems and Solutions"*, 22-25th October, Trnava, Slovakia, 2008.
- [89] Vatau S., Cioi D. Jrobo: Simulation and control with java for quadruped robot. *ISI Proceedings of The 19th INTERNATIONAL DAAAM SYMPOSIUM "Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Next Generation of Intelligent Systems and Solutions"*, 22-25th October, Trnava, Slovakia, 2008.
- [90] Vatau S., Cioi D., Rădulescu C. Mechanical design of a hip joint for an anthropomorphic leg. *ISI Proceedings of The 18th International DAAAM Symposion-Intelligent Manufacturing and Automation: Focus on Creativity, Responsibility and Ethics of Engineers*, pages 801–802, Croatia, Zadar, 24-27th October 2007, ISSN 1726-9679, ISBN 3-901509-58-5.
- [91] Vatau S., Radulescu C. *Roboți mobili - Roboți mobili pășitori*. Vol.2, Editura Politehnica, Timișoara, 2008.

-
- [92] Vatau S., Rădulescu C. Locomotion of a walking robot over rough terrain. *The International Journal Robotica and Management*, Vol.10(No.2):46–48, December 2005, ISSN 1453-2069.
- [93] Vatau S., Rădulescu C., Dolga V. Mechanical design and control system configuration of quadruped walking robot. *ROBOTICA 2008, The 4rd International Conference on Robotics, Braşov, Romania*, 13-14 November 2008.
- [94] Vatau S., Rădulescu C., Dolga V. Petri net controller for walking robot. *Proceedings of COMEFIM'9, The 9th International Conference on Mechatronics and Precision Engineering, Buletinul I.P.Iasi, Tomul LIV (LVIII), Fascicula 4, Secția Construcții de Masini*, pages pp 351–358, Iași, Romania, June 12-14, 2008, ISSN 1011-2855.
- [95] Vatau S., Varga Șt., Rădulescu C. Algorithms for the quadruped mobile robot locomotion system configuration. *The 2nd International Scientific Meeting "Optimization of the Robots and Manipulators" OPTIROB*, pages 161–167, May, Predeal, Romania, 2007, ISBN 978-973-648-656-2.
- [96] Wadden, T. and Rehlinger, H. The basic design of the quadruped robot WARP1. *International Conference on Climbing and Walking Robots*, pages 87–94, 2000.
- [97] Waldorn, K.J. Mobility and controllability characteristics of mobile robotic platforms. *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 237–243, St. Louis, 1985.
- [98] Walking Machines Catalogue. <http://www.catalog.walking.html>.
- [99] Wikipedia, the free encyclopedia. Extensible markup language. <http://en.wikipedia.org/wiki/XML>.
- [100] Wikipedia, the free encyclopedia. Mediu de dezvoltare. http://ro.wikipedia.org/wiki/Mediu_de_dezvoltare.
- [101] Wikipedia, the free encyclopedia. Open source. <http://ro.wikipedia.org/wiki/Open-source>.

1

Listă de figuri

1.1	Evoluția roboților mobili de-a lungul timpului.	4
1.2	Brevet de invenție pentru construirea unui cal mecanic în 1893.	10
1.3	The Steam Man - prima mașina bipedă construită în 1893.	11
1.4	Brevet de invenție pentru construirea unui vehicul pășitor în 1910.	11
1.5	Robotul construit de firma General Electric	12
1.6	Robotul Phoney Poney	12
1.7	Robotul subacvatic pășitor - Aquarobot	13
1.8	Robotul Mascha	13
1.9	Robotul Titan III și Robotul Titan IV	14
1.10	Robotul Odex I	14
1.11	Robotul Ambler	15
1.12	Vehiculul cu Suspensie Adaptivă (ASV)	16
1.13	Robotul CWRU	16
1.14	Robotul Tarry	17
1.15	Robotul Sprawl	17
1.16	Robotul LEMUR	18
1.17	Robotul Colt3	18
1.18	Robotul Robug II	19
1.19	Robotul pășitor modular MERO	19
1.20	Roboții bipezi de la MIT: Troddy, Spring Turkey și Spring Flamingo	20
1.21	Robot biped Honda Humanoid Robot - P2	21
1.22	Robotul humanoid cu locomoție pășitoare bipedă - ASIMO	21

2.1	Ordinea de pășire 4-2-3-1 a unui robot pășitor cu patrupe	26
2.2	Deplasarea unui patrupe în "pas cu pas"	27
2.3	Ciclograme de mișcare ale picioarelor roboților pășitori cu $p = 2$ și $p = 4$	28
2.4	Deplasarea unui patrupe în "trap" [62]	29
2.5	Deplasarea unui patrupe în "pas" [62]	29
2.6	Deplasarea unui patrupe în "salt" [62]	30
2.7	Deplasarea unui patrupe în "jumătate de salt" [62]	30
2.8	Deplasarea unui patrupe în "galop" transversal [62]	31
2.9	Deplasarea unui patrupe în "galop" rotativ [62]	32
2.10	Deplasarea unui patrupe în "galop mic" [62]	32
2.11	Mecanism de tip RRR: a) faza de suport; b) faza de pășire	35
2.12	Mecanism de tip TRR: a) faza de suport; b) faza de pășire	35
2.13	Mecanism de tip RTR: a) faza de suport; b) faza de pășire	35
2.14	Mecanism de tip RRT: a) faza de suport; b) faza de pășire	36
2.15	Mecanism de tip RRR plan: a) faza de suport; b) faza de pășire	36
2.16	Mecanism de tip TRRRRRRRRRRT plan - picior "Odetics": a) faza de suport; b) faza de pășire	36
2.17	Mecanism de tip TRRRRRRRRT - picior "ASV": a) faza de suport; b) faza de pășire	37
2.18	Mecanism de tip SSS - multipicior: a) faza de suport; b) faza de pășire	37
2.19	Articulația sferică S de clasa a IV-a, la care sistemul de acționare poate impune simultan doi parametri cinematici independenți mișcării relative a elementelor E și F	38
2.20	Schema cinematică a unui robot pășitor biped	39
2.21	Schema cinematică a unui robot pășitor patrupe	40
2.22	Schema cinematică a unui robot pășitor patrupe "Odetics"	41
2.23	Schema cinematică a unui robot pășitor hexapod cu mișcare plan-paralelă	41
2.24	Schema cinematică a unui robot pășitor hibrid	42
2.25	Definirea parametrilor geometrici și numerotarea picioarelor	45
2.26	Tipurile de mers ale roboților pășitori	48
2.27	Mers ondulat înainte	49

2.28	Mers ondulat înapoi	50
2.29	Ciclograma mersului succesiv: a) robot hexapod cu $\tau = 1/6$; b) robot patruped cu $\tau = 1/4$	52
2.30	Ciclograma mersului în diagonală: a) robot hexapod cu $\tau = 1/4$; b) robot patruped cu $\tau = 1/2$	53
2.31	Ciclograma mersului în trei picioare cu $\tau = 1/2$ pentru un robot hexapod	54
2.32	Ciclograma mersului în galop pentru un hexapod	55
2.33	Ciclograma mersului în semidiagonală pentru un hexapod	55
2.34	Poligonul de sprijin și definirea diferitelor limite de stabilitate	58
2.35	Condițiile de evitare a interferenței geometrice a picioarelor succesive: a) ($\phi_3 \leq \lambda$); b) ($\phi_3 \geq \lambda$)	60
2.36	Robot pășitor patruped	61
2.37	Limitele stabilității unui robot patruped	63
2.38	Analiza grafică a stabilității mersului	64
2.39	Ordinea de așezare a picioarelor unui robot patruped	65
3.1	Fazele modelării geometrice a piciorului platformei mobile pășitoare . . .	68
3.2	Structura cinematică a piciorului robotului pășitor	70
3.3	Spațiul sferic de lucru	71
3.4	Situarea relativă dintre lanțul considerat și secțiunea meridiană a spațiului de lucru	73
3.5	Elementele lanțurilor minimale plane distincte	75
3.6	<i>Screenshot</i> - aplicația DimLegJQuadRobot	77
3.7	Spațiul de lucru al piciorului robotului pășitor patruped	78
4.1	Obiectivele analizei cinematice	79
4.2	MGT cu structură R II R II R	81
4.3	Secțiunea mediană a spațiului de lucru (conținută în planul Ayz)	81
4.4	Mișcarea punctului caracteristic în spațiu după o traiectorie	84
4.5	Configurarea piciorului prin modelul geometric invers	89
4.6	Traietorie de configurare fragmentată	90

4.7	Descompunerea traiectoriei de mers în pas: a) - segmentare grosolană b) - segmentare fină	91
4.8	Schema cinematică a piciorului robotului JQuadRobot	93
4.9	Dependența spațiului, vitezei și accelerației de timp pentru deplasarea pe verticală (C_1Q_1 și C_2Q_2) a punctului caracteristic de la nivelul gleznei . .	101
4.10	Dependența funcțiilor de pseudocomandă de ordin 0 la deplasarea punctului caracteristic al piciorului pe verticală	107
4.11	Dependența funcțiilor de pseudocomandă de ordin 1 la deplasarea punctului caracteristic al piciorului pe verticală	108
4.12	Dependența funcțiilor de pseudocomandă de ordin 2 la deplasarea punctului caracteristic al piciorului pe verticală	109
4.13	Dependența spațiului, vitezei și accelerației de timp pentru deplasarea pe orizontală (Q_1Q_2) a punctului caracteristic de la nivelul gleznei	114
4.14	Dependența funcțiilor de pseudocomandă de ordin 0 la deplasarea punctului caracteristic al piciorului pe verticală	120
4.15	Dependența funcțiilor de pseudocomandă de ordin 1 la deplasarea punctului caracteristic al piciorului pe verticală	121
4.16	Dependența funcțiilor de pseudocomandă de ordin 2 la deplasarea punctului caracteristic al piciorului pe verticală	122
4.17	Dependența poziției, vitezei și accelerației centrului de masă al piciorului în planul yOz	127
5.1	Piciorul A în faza de pășire	130
5.2	Piciorul C în faza de pășire	131
5.3	Piciorul B în faza de pășire	132
5.4	Piciorul D în faza de pășire	133
5.5	Forțele și momentele ce acționează asupra tibiei	135
5.6	Forțele și momentele ce acționează asupra femurului	136
5.7	Momentul de inerție dat de forța de inerție F_{Iz} și de forța de greutate G_t în raport cu dreapta BD	138
5.8	Momentul de inerție dat de forța de inerție F_{Iy} în raport cu dreapta BD	138

5.9	Momentul de inerție dat de forța de inerție F_{I_z} și de forța de greutate G_t în raport cu dreapta BD	147
5.10	Momentul de inerție dat de forța de inerție F_{I_y} în raport cu dreapta BD	148
5.11	Variația momentului de inerție total ce apare în centrul de masă al piciorului în timpul fazei de pășire	148
6.1	Robotul pășitor patruped JQuadRobot - structura cinematică	152
6.2	Cupla pasivă de la nivelul gleznei - modelul CAD	153
6.3	Cupla pasivă de la nivelul gleznei - modelul real	153
6.4	Robotul pășitor patruped JQuadRobot - modelul CAD	154
6.5	Robotul pășitor patruped JQuadRobot - modelul real	154
6.6	Componentele unui servomotor	157
6.7	Poziționare servomotor	157
6.8	Motorul Hitech HS-5955TG	158
6.9	Montaj SSC-32 cu ABB II	159
6.10	Diagrama de conectare SSC-32 cu ABB II	161
6.11	Conectorul DB-9 utilizat pentru porturile seriale ale calculatoarelor	163
6.12	Asignarea semnalelor la pinii conectorului DB-9 al portului serial.	163
6.13	Senzorul de proximitate IRPD	164
6.14	Detectare obstacole pe o rază de 8 inch [37]	164
6.15	Switch	165
6.16	Sursa AC-DC în comutație tip S-240 5V/40A	165
6.17	Acumulatorul reîncărcabil de tip 6V Ni-MH 2800mAh	165
6.18	Mersul legănat la robotul patruped	167
6.19	Variația configurației piciorului în timpul mersului legănat	168
6.20	Mersul legănat static stabil la robotul patruped	169
6.21	Deplasarea robotului pășitor JQuadRobot	170
7.1	Schema modulară a aplicație "JQuadRobot"	177
7.2	MotorController - diagrama de clasă	178
7.3	Robotul JQuadRobot în poziția de zero	181
7.4	Robotul JQuadRobot în <i>home position</i>	181

7.5	Screenshot aplicație "JQuadRobot" - Editor	182
7.6	JQuadRobot Editor - graficul mișcării	183
7.7	EGMove - diagrama de clasă	184
7.8	JQuadRobot Editor - slider-ele de mișcare	187
7.9	JQuadRobot Editor - butoane	189
7.10	Fereastra de dialog ce apare în urma accesării butonului "Export"	190
7.11	JQuadRobot Simulator - schema bloc	193
7.12	JQuadRobot - Simulator	194
7.13	Keys Control Panel	194
7.14	Results Panel	195
7.15	File Panel	195
7.16	Strategia de trecere peste obstacole de înălțimi mici	196
8.1	Cele patru tipuri de obstacole fundamentale	198
8.2	Caracteristicile geometrice robotului pășitor	198
8.3	Unghiul de înclinare al pantei	200
8.4	Deplasarea robotului pe pantă cu menținerea orizontală a corpului față de aceasta	202
8.5	Deplasarea robotului pe pantă prin reducerea înclinării corpului	203
8.6	Deplasarea mixtă a robotului pe pantă cu reducerea înclinării și înălțimii corpului	204
8.7	Deplasarea transversală pe o pantă prin reducerea înălțimii corpului robotului	205
8.8	Deplasarea robotului pe o pantă prin ajustarea lungimii picioarelor	206
8.9	Deplasarea robotului pe o pantă de-a lungul unei direcții aleatoare	208
8.10	Relațiile dintre unghiuri la deplasaera pe o pantă	209
8.11	Urmele pașilor în mersul periodic de tip <i>follow the leader</i>	210
8.12	Urmele pașilor în mersul pendular al robotului pășitor	211
8.13	Trecerea robotului pășitor hexapod peste un obstacol de tip șanț cu lățime mare	212
8.14	Mișcările unui robot pășitor hexapod peste un obstacol de tip șanț	215
8.15	Trecerea unui șanț prin înclinarea corpului robotului	216
8.16	Distanța maximă de pășire a picioarelor frontale în cazul $\theta \geq \gamma$	218

8.17	Distanța maximă de pășire a picioarelor frontale în cazul $\theta \leq \gamma$	219
8.18	Distanța maximă de pășire a picioarelor mijlocii	220
8.19	Distanța maximă de pășire a picioarelor din spate	221
8.20	Secvență completă de pășire (în vedere laterală) pentru trecerea robotului pășitor peste un obstacol de tip treaptă [54]	223
8.21	Detalierea pășirii între pozițiile 7-12 în vedere laterală	225
8.22	Coborârea unei trepte de înălțime mare	226
8.23	Deplasarea robotului peste un obstacol de tip prag	229
8.24	Strategia de deplasare peste un obstacol de tip prag cu lățime mică	231
9.1	Robotul Sherpa și robotul Robug III	234
9.2	Robotul Awimr [77] și robotul Dante [78]	235
9.3	Robotul Robolobster [50] și robotul Aqua [12]	236
9.4	Robotul PlustechForestry	237
9.5	Robotul AIBO	238
9.6	Robotul Roma 2	239
9.7	Robotul EH2 Geekbot	240
9.8	Robotul Hexapod Phoenix	240

Lista publicațiilor personale

- Sanda Grigorescu, Steliana Vatau, "*Roboți industriali - Aplicații practice*", în curs de apariție la Editura Politehnica, Timișoara
- Corneliu Rădulescu, Steliana Vatau, "*Roboți mobili - Vehicule ghidate automat*", vol.1, Editura Politehnica, Timișoara, 2008, ISBN 978-973-625-664-6, ISBN 978-973-625-665-3
- Steliana Vatau, Corneliu Rădulescu, "*Roboți mobili - Roboți mobili pășitori*", vol.2, Editura Politehnica, Timișoara, 2008, ISBN 978-973-625-664-6, ISBN 978-973-625-666-0
- Vatau Steliana, Rădulescu Corneliu, Dolga Valer, "MECHANICAL DESIGN AND CONTROL SYSTEM CONFIGURATION OF QUADRUPED WALKING ROBOT", ROBOTICA 2008, The 4rd International Conference on Robotics, Brașov, Romania, 13-14 November 2008
- Vatau Steliana, Cioi Daniel, "JROBO: SIMULATION AND CONTROL WITH JAVA FOR QUADRUPED ROBOT", **ISI Proceedings** of The 19th INTERNATIONAL DAAAM SYMPOSIUM "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Next Generation of Intelligent Systems and Solutions", 22-25th October, 2008, pp 1455-1456, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-68-1, factor de impact 0.34
- Vatau Steliana, Cioi Daniel, "GRAPHICAL USER INTERFACE FOR QUADRUPED'S LEG ROBOT", **ISI Proceedings** of The 19th INTERNATIONAL DAAAM SYMPOSIUM "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Next Generation of Intelligent Systems and Solutions", 22-25th October, 2008, pp 1453-1454, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-68-1, factor de impact 0.34
- Grigorescu Sanda, Vatau Steliana, Dobra Andreea, "DEDICATED ROBOT-ROBOT COOPERATION", **ISI Proceedings** of The 19th INTERNATIONAL DAAAM SYMPOSIUM "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Next Generation of Intelligent Systems and Solutions", 22-25th October, 2008, pp 567-568, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-68-1, factor de impact 0.34

- Vatau Steliana, "Dynamic Gaits for a JADRO - Quadruped Robot", The International Journal Robotica & Management, Vol.13, No.1, June 2008, pp 7-10, ISSN 1453-2069
- Vatau Steliana, Rădulescu Corneliu, Dolga Valer, "Petri Net Controller for Walking Robot", Proceedings of COMEFIM'9, The 9th International Conference on Mechatronics and Precision Engineering, Iași, Romania, June 12-14, 2008, pp 351-358, Buletinul I.P.Iasi, Tomul LIV (LVIII), Fascicula 4, Secția Constructii de Masini, ISSN 1011-2855
- Rădulescu Corneliu, Vatau Steliana, "Kinematic Analysis of Mobile Robot With Different Tips of Wheels", The 9th International Conference on Automation / Robotics in Theory and Practice, Proceedings of ROBTEP 2008, Nové-Smokovec Vysoké Tatry, Slovakia, June 9-11, 2008, Acta Mechanica Slovaca, 2-A/2008,ISSN 1335-2393
- Vatau Steliana, Cioi Daniel, Rădulescu Corneliu, "Mechanical design of a hip joint for an anthropomorphic leg", **ISI Proceedings** of The 18th International DAAAM Symposion "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Creativity, Responsibility and Ethics of Engineers", Croatia, Zadar, 24-27th October 2007, pp 801-802, ISSN 1726-9679, ISBN 3-901509-58-5, factor de impact 0.34
- Vatau Steliana, Rădulescu Corneliu, "Mobile Robot - Path Planning in a Dynamic Environment", The International Journal Robotica & Management, Vol.12, No.1, June 2007, pp 7-10, ISSN 1453-2069
- Vatau Steliana, Varga Ștefan, Rădulescu Corneliu, "Algorithms for the quadruped mobile robot locomotion system configuration", The 2nd International Scientific Meeting "Optimization of the Robots and Manipulators" OPTIROB, May 2007, Predeal, Romania, pp 161-167, ISBN 978-973-648-656-2
- Vatau Steliana, "Kinematic modeling for a walking robot's leg with pair of reference system method", Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering, Vol.VI (XVI), CD-ROM edition, May 2007, pp 1096-1101, ISSN 1583-0691

- Vatau Steliana, "Modelica - A language of modeling and simulation for design of mechatronics systems", PRASIC'06, Simpozionul național cu participare internațională Proiectarea Asistată de Calculator, Brașov, Romania, November 09-10, 2006, Vol.III - Design de Produs, pp 137-140, ISBN (10)973-635-826-7; ISBN (13)978-973-635-826-5
- Vatau Steliana, "Mobile Robots Navigation Base on the Vision Stereo", ROBOTICA 2006, The 3rd International Conference on Robotics, Iasi, Romania, September 07-09, 2006, pp 253-258, Buletinul I.P.Iasi, Tomul LII (LVI), Fascicula 7B Constructii de Masini, ISSN 1011-2855
- Rădulescu Corneliu, Diaconu Aurel, Vatau Steliana, "Educational flexible assembly system", ROBOTICA 2006, The 3rd International Conference on Robotics, Iasi, Romania, September 07-09, 2006, pp 169-176, Buletinul I.P.Iasi, Tomul LII (LVI), Fascicula 7B Constructii de Masini, ISSN 1011-2855
- Vatau Steliana, "A Quadruped Walking Robot as Educational Robot", The 15th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, Balatonfured, Hungary, June 15-17, 2006, pp 249-255, ISBN 9637154485
- Vatau Steliana, Kovacs V. Francisc, "Kinematic Modeling of Quadruped Walking Robot with Pair of Reference System Method", Proceedings of COMEFIM'8, The 8th International Conference on Mechatronics and Precision Engineering, Cluj-Napoca, Romania, June 8-10, 2006, pp 171-176, Acta Tehnica Napocensis, vol II, ISSN 1221-5872
- Cioi Daniel, Vatau Steliana, Maniu Inocențiu, "Virtual Reality Laboratory for Robot Systems", Proceedings of SACI, 3rd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, Timisoara, May, 2006, pp 634-641, ISBN 963 7154 46 9
- Vatau Steliana, Rădulescu Corneliu, "Computer Aided Design of Mechatronics Systems", The 1st International Scientific Meeting "Optimization of the Robots and Manipulators" OPTIROB, Predeal, Romania, May 26-28, 2006, pp 29-34, ISBN (10)973-648-572-3, ISBN (13)978-973-648-572-5

- Vatau Steliana, Rădulescu Corneliu, "Path Planning for a Mobile Robot in a Rough Terrain Environment", In 8th International Conference on Automation and Robotics in Theory and Practice (Robtep), printed in Acta Mechanica Slovaca, 2-A/2006, Jasná, Slovakia, May 2006, ISSN 1335-2393
- Vatau Steliana, "How Using Lego Mindstorms in Mobile Robotics", The International Journal Robotica & Management, Vol.11, No.1, June 2006, pp 22-26, ISSN 1453-2069
- Vatau Steliana, Rădulescu Corneliu, "Locomotion of a Walking Robot over Rough Terrain", The International Journal Robotica & Management, Vol.10, No.2, December 2005, pp 46-48, ISSN 1453-2069

Listă proiecte de cercetare

Participare în 5 granturi (2 granturi ca director și 3 granturi ca membru), respectiv director de proiect la 3 contracte cu terți.

- Grant CNCSIS TD GR98/11.06.2008, Tema 5, COD 132, Optimizarea constructiv-funcțională a roboților mobili quadrupezi. Director de proiect, 2008; <http://www.jquadrobo.org>
- Grant CNCSIS TD GR49/11.05.2007, Tema 5, COD 132, Optimizarea constructiv-funcțională a roboților mobili quadrupezi. Director de proiect, 2007; <http://www.jquadrobo.org>
- 21 Grant CEEEX I 03/2005, Cercetări privind posibilitățile de utilizare ale sistemelor robotice în scopul creșterii competitivității tehnico-economice a industriei românești, Etapa I, 2005 - Studii privind posibilitățile de implementare a sistemelor inteligente flexibile în întreprinderile zonale.
- 21 Grant CEEEX I 03/2006, Cercetări privind posibilitățile de utilizare ale sistemelor robotice în scopul creșterii competitivității tehnico-economice a industriei românești, Etapa II, 2006 - Algoritmi, programe și încercări experimentale pentru sisteme inteligente flexibile.
- 21 Grant CEEEX I 03/2007, Cercetări privind posibilitățile de utilizare ale sistemelor robotice în scopul creșterii competitivității tehnico-economice a industriei românești, Etapa III, 2007 - Implementarea cercetărilor teoretice și experimentale. Diseminarea rezultatelor.
- Contract nr.713/13.07.2007, Consultanța în proiectarea asistată de calculator în AutoCad, beneficiar Maerz Ofenbau S.R.L
- Contract nr.714/13.07.2007, Consultanța în proiectarea asistată de calculator în AutoCad, beneficiar Maerz Ofenbau S.R.L
- Contract nr.795/05.12.2007, Consultanța în proiectarea asistată de calculator în AutoCad, beneficiar Maerz Ofenbau S.R.L

Titluri recent publicate în colecția „TEZE DE DOCTORAT” seria 8: Inginerie Industrială

1. **Mariana Ilie** – *Etude de l'interaction laser matière dans le cas des polymères semi-transparents: applications au soudage des polimères*, ISBN 978-973-625-449-9, (2007);
 2. **Puiu Căneparu** – *Contribuții privind îmbunătățirea performanțelor echipamentelor mecanizate de tăiere termică*, ISBN 978-973-625-478-9, (2007);
 3. **Marius Cătălin Grănescu** – *Aspecte privind strategii de dezvoltare specifice întreprinderilor mici și mijlocii în vederea alinierii la cerințele Uniunii Europene*, ISBN 978-973-625-486-4, (2007);
 4. **Corina-Dana June** – *Optimizarea procesului de încărcare prin sudare în mediu de gaz protector cu rată mare de depunere – încărcarea prin sudare mag cu electrod bandă*, ISBN 978-973-625-501-4, (2007);
 5. **Gheorghe Marcel Mocuța** – *Contribuții la reducerea intensității energetice în județul Bihor*, ISBN 978-973-625-517-5, (2007);
 6. **Marius Iulian Tamas** – *Studiul măririi capacităților de producție ale mașinilor de prototipare rapidă prin prelevare de material*, ISBN 978-973-625-611-0, (2008);
 7. **Cristian Cosma** – *Studii privind optimizarea tehnicii de Reverse Engineering la realizarea produselor injectate din materiale plastice*, ISBN 978-973-625-612-7, (2008).
 8. **Cristian Dan Duran** – *Aspecte privind evaluarea riscului ca sursă a deciziei la nivelul firmei*, ISBN 978-973-625-554-0, (2008);
 9. **Laurențiu Călin** – *Contribuții la optimizarea sistemelor tehnologice de uscare a produselor cerealiere*, ISBN 978-973-625-534-2, (2008);
 10. **Sorin Vasile Savu** – *Senzori nanostructurați pentru sistemele de sudare hibride laser-arc*, ISBN 978-973-625-752-0, (2008).
-



EDITURA POLITEHNICA