

Sorin MĂNOIU-OLARU

Mircea NIȚULESCU

CERCETĂRI ÎN ROBOTICA HEXAPODĂ



EDITURA UNIVERSITARIA
Craiova, 2014

Cuprins

Prefață	1
----------------	----------

Capitolul 1	13
--------------------	-----------

Introducere

1.1 Robotica mobilă	13
1.2 Robotica pășitoare hexapodă	16
1.3 Obiective	23

Capitolul 2	25
--------------------	-----------

Modelarea piciorului robotic

2.1 Variante constructive ale piciorului	27
2.2.1 Piciorul mamiferelor	28
2.2.2 Piciorul format din două segmente	29
2.2.3 Piciorul pentagraf	29
2.2.4 Piciorul pantograf	30
2.2 Cinematica piciorului	31
2.2.1 Cinematica directă	31
2.2.2 Cinematica inversă	34
2.2.3 Modelul cinematic al piciorului robotic	35
2.2.4 Poziția centrului de masă al piciorului	39
2.3 Analiza spațiului de operare al piciorului	40
2.4 Modelul dinamic al piciorului	42

2.4.1	Calculul matricelor de transformare de bază	45
2.4.2	Calculul vectorilor de poziție ai elementelor piciorului	47
2.4.3	Calculul vitezelor liniare ale elementelor piciorului	47
2.4.4	Calculul vitezelor unghiulare ale elementelor piciorului	49
2.4.5	Calculul energiei cinetice și potențiale	49

Capitolul 3

55

Analiza categoriilor fundamentale de obstacole

3.1	Obstacolul de tip plan înclinat	57
3.1.1	Deplasarea de-a lungul unui plan înclinat	57
3.1.2	Deplasarea transversală pe planul înclinat	59
3.2	Obstacolul de tip treaptă	62
3.3	Obstacolul de tip prag	65
3.4	Obstacolul de tip șanț	67
3.5	Obstacole cu formă particulară	69

Capitolul 4

73

Interfață grafică pentru simularea funcțională

4.1	Editorul Matlab G.U.I.D.E.	74
4.2	Elementele grafice din componența editorului G.U.I.D.E.	75
4.2.1	Butonul cu revenire (Push Button)	77
4.2.2	Textul static (Static Text)	78
4.2.3	Căsuțe text editabile (Editable TextBox)	79
4.2.4	Liste (Listbox)	80
4.2.5	Cursorul (Slider)	81
4.2.6	Căsuțele de selecție (Checkbox)	83
4.2.7	Grupuri de obiecte (Panel)	84
4.3	Proprietatea callback	85
4.4	Modelul grafic al robotului hexapod	86
4.5	Interfața grafică pentru controlul robotului hexapod	89
4.5.1	Implementarea cinematicii directe	91
4.5.2	Setarea parametrilor corpului robotic și controlul unui picior	93
4.5.3	Afișarea parametrilor corpului robotului	94
4.5.4	Implementarea cinematicii inverse	94

4.5.5 Simularea locomoției peste diferite tipuri de obstacole	95
4.5.6 Setarea parametrilor structurali ai segmentelor piciorului	98
4.5.7 Afișarea configurației robotului în funcție de parametrii selectați	98
4.8 Interfața grafică de control a piciorului robotului hexapod	100
4.8.1 Modul Offline	101
4.8.2 Modul Online	101

Capitolul 5 103

Structura hardware a robotului hexapod

5.1 Structura mecanică	103
5.2 Platforma Arduino	112
5.2.1 Arduino Mega2560	113
5.2.2 Mediul de programare Arduino IDE	114
5.3 Placa de comandă a servomotoarelor SSC-32	116
5.4 Servomotoarele din articulațiile robotului	118

Capitolul 6 121

Controlul robotului peste obstacole fundamentale. Rezultate experimentale

6.1 Aproximarea unei traiectorii poligonale folosind arce de cerc și curbe Spline	121
6.2 Arhitectura sistemului de conducere al robotului	123
6.3 Controlul unui picior al robotului hexapod	125
6.3.1 Arhitectura sistemului de conducere al unui picior	125
6.3.2 Algoritm de generare a traiectoriei tălpii piciorului	127
6.3.3 Rezultate experimentale cu interfața grafică	128
6.3.4 Rezultate experimentale cu modelul fizic al piciorului	133
6.3.5 Analiza modelului dinamic al piciorului	135
6.4 Analiza stabilității statice	139
6.4.1 Algoritm de simulări	139
6.4.2 Condiția de stabilitate statică	140
6.4.3 Analiza stabilității statice în regim de defect	140
6.4.4 Analiza stabilității statice pe durata deplasării	141

6.5	Controlul robotului pe plan orizontal	142
6.5.1	Rezultate experimentale cu interfața grafică a robotului	144
6.5.2	Rezultate experimentale cu modelul fizic al robotului	149
6.6	Controlul robotului pe plan înclinat	154
6.6.1	Rezultate experimentale cu interfața grafică a robotului	157
6.6.2	Rezultate experimentale cu modelul fizic al robotului	160
6.7	Controlul robotului pe un obstacol de tip treaptă	165
6.7.1	Rezultate experimentale cu interfața grafică a robotului	167
6.7.2	Rezultate experimentale cu modelul fizic al robotului	170
6.8	Controlul robotului peste un obstacol de tip prag	174
6.8.1	Rezultate experimentale cu interfața grafică a robotului	176
6.8.2	Rezultate experimentale cu modelul fizic al robotului	180
6.9	Controlul robotului peste un obstacol de tip șanț	184
6.9.1	Rezultate experimentale cu interfața grafică a robotului	188
6.9.2	Rezultate experimentale cu modelul fizic al robotului	194

Capitolul 7

199

Controlul robotului pentru escaladarea obstacolelor complexe. Rezultate experimentale

7.1	Controlul robotului pe un obstacol de tip scară dreaptă	199
7.1.1	Rezultate experimentale cu interfața grafică a robotului	202
7.1.2	Rezultate experimentale cu modelul fizic al robotului	207
7.2	Controlul robotului pe un obstacol de tip scară în spirală	209
7.2.1	Rezultate experimentale cu interfața grafică a robotului	212
7.2.2	Rezultate experimentale cu modelul fizic al robotului	216

Bibliografie

219

Capitolul I

Introducere

1.1 Robotica mobilă

Cu mai mult de un milion de ani în urmă, strămoșii noștri au început să transforme pietrele în unelte pentru a-i ajuta în lupta cu prădătorii. Știința pe care o știm noi astăzi datează de acum 500 de ani, din perioada renașcentistă. În timpul Renașterii, artiștii și gânditorii au început să exploreze sistematic natura, iar primii oameni de știință moderni, Leonardo da Vinci (1452-1519) și Galileo Galilei (1564-1642), au folosit instrumente și experimente pentru a dezvolta și testa idei despre modul în care obiectele se comportă în univers. O succesiune de revoluții au urmat, de multe ori introduse de genii ale științei: Isaac Newton (1643-1727) în mecanică și matematică, Charles Darwin (1809-1882) în evoluția biologică, Albert Einstein (1879-1955) în relativitate și fizică cuantică, James D. Watson (1928) și Francis Crick (1916-2004) în genetica modernă. Domeniile emergente de astăzi din cadrul științei și tehnologiei, cum ar fi ingineria genetică, nanotehnologia și inteligența artificială, au propriii lor lideri. Domeniul roboticii s-a născut la mijlocul secolului trecut, o dată cu dezvoltarea calculatoarelor.

Ca expresie a cutezanței sale vizionare, umanitatea a fost fascinată de roboți de mii de ani. Imagini ale oamenilor artificiali și ale servitorilor mecanici sunt prezente chiar în miturile antice. De exemplu, despre zeul grec al metalurgiei, Vulcan sau Hephaestus, se spunea că ar fi creat doi servitori mecanici: o slujnică de aur și o masă cu trei picioare, care se putea deplasa singură. Automatele construite înainte de secolul 20 nu aveau o legătură percepție-acțiune deoarece fie erau comandate de un operator uman, fie erau mașini repetitive. După anul 1940, dezvoltarea calculatoarelor digitale, a electronicii, dar și elaborarea unor

sisteme de control au oferit inginerilor mijloacele construirii roboților adevărați. Cercetători precum Grey Walter au început să construiască roboți care navigau singuri căutând surse de lumină sau care interacționau cu mediul înconjurător. La mijlocul anilor '60 Institutul Stanford Research a creat un robot care încerca să interpreteze imaginile percepute cu ajutorul unei camere TV.

Primul impact real al roboților s-a produs când inginerul antreprenor Joseph Engelberger și inventatorul George Devol au creat robotul *Unimate* [64], primul robot industrial, folosit în uzinele General Motors în 1961. *Unimate* era de fapt un braț robotic folosit la muncile obositoare la care se cerea precizie constantă. Roboții industriali au crescut productivitatea și au ajutat fabricile să rămână competitive prin reducerea costului produsului finit. De regulă, aceștia erau ficși și integrați într-o linie de asamblare. În paralel, cercetătorii dezvoltau roboți care se puteau mișca liberi în scene de operare, care percepeau și reacționau la prezența oamenilor și la mediul înconjurător.

La începutul deceniului al șaptelea s-au făcut numeroase încercări de dezvoltare a unor sisteme de navigație pentru roboți, iar spre sfârșitul acestuia Hans Moravec a dezvoltat platforma *Stanford Cart* [111], unul din primii roboți mobili autonomi capabil să traverseze o cameră plină cu scaune fără să intre în coliziuni cu acestea.

În anii '80 roboții „învățau” să meargă. În laboratorul „*Leg Laboratory*” de la Institutul de Tehnologie din Massachusetts (MIT), Marc Raibert a analizat mersul oamenilor și al animalelor și a creat roboți care se puteau deplasa pe două ori pe patru picioare, sau chiar puteau să sară asemenea cangurilor. Alți cercetători, cum ar fi Rodney Brooks (MIT), au studiat insectele și modalitatea implementării unor roboți pășitori.

Cu timpul, roboții mobili au început să fie utili în viața de zi cu zi. În unele spitale roboții *HelpMate* [27], [108], (dezvoltați de același Joseph Engelberger) aduc pacienților medicamentele și înregistrează date fără supervizarea omului. Roboții mobili pot fi folosiți și pentru treburile casnice, așa cum este *Roomba* [110], creat de Colin Angle, Helen Greiner și Rodney Brooks, destinat curățeniei podelelor. Într-un viitor foarte apropiat, roboții îi vor ajuta pe bătrâni să se descurce, vor aduce lucruri pentru ei și le vor monitoriza sănătatea.

Cei mai evoluți roboți, aceia pe care îi știm din mituri vechi și, mai târziu, din filmele SF, sunt cei care arată și se comportă ca o ființă umană. Cercetările realizate de Rodney Brooks și Cynthia Breazeal în anii '90 cu roboții *Cog* [98] și *Kismet* [99] indică o abordare mai organică în dezvoltarea unui robot. Acești roboți generează acțiunile datorită unor interacțiuni complexe, cum ar fi percepția tactilă, vizuală sau anumite gesturi ale oamenilor din jurul lor.

Pionieratul în zona roboților cu picioare este atins în jurul anilor '70 de către doi celebri cercetători, Kato [4] și Vukobratovic [83].

În Japonia (1973), Kato și echipa lui de la Universitatea Waseda au prezentat primul robot antropomorf, *Wabot 1* [90]. Folosind o schemă de control simplă, robotul a fost capabil de a face câțiva pași menținându-și echilibrul static.

Această performanță notabilă a devenit punctul de pornire al generației de roboți pășitori din Japonia.

În paralel, Vukobratovic și echipa sa erau foarte interesați în problemele generate de reabilitarea funcțională. La institutul Mihailo Puppın din Belgrad, Iugoslavia, s-au proiectat primul exoschelet activ și alte câteva dispozitive, cum ar fi *Belgrade's hand* [93] dar cel mai important rezultat rămâne analiza privind stabilitatea locomoției (1972), din care reiese conceptul de punct de moment zero (Zero Moment Point – ZMP [51]), folosit frecvent de atunci.

O perioadă cheie în evoluția roboților pășitori o constituie începutul anilor '90. Ideea studiului sistemelor mecanice pur pasive a fost inițiată de McGeer [49], [50], care a introdus conceptul comportamentului ciclic natural pentru o clasă relativ simplă de sisteme: un compas plan pe un plan înclinat. Mersul stabil rezultă din echilibrul dintre creșterea puterii datorată pantei și pierderile de la impactul cu solul. Ideea compasului plan a fost extinsă de alți cercetători care au adăugat acestui model corp, picioare, genunchi, control semi-pasiv, formând sisteme subacționate, ca robotul *Rabbit* [94].

Sfârșitul mileniului a fost perioada unor activități tehnologice intense, iar dezvoltările industriale au arătat lumii că este posibil să se construiască structuri robotice pășitoare.

Pășirea este asemănătoare cu mișcarea unui pendul. Construcția unui robot pășitor dinamic implică folosirea mai multor sisteme diferite. Pe lângă controlul specific mișcării fiecărui picior în parte, este necesară existența un sistem master care determină ordinea de pășire pentru fiecare picior. În plus, trebuie avut în vedere și feedback-ul care informează partea de control a robotului asupra pierderii echilibrului. În final, trebuie să existe și un planificator strategic care determină destinația dorită a robotului, analizează posibilele locuri de pășire și alege ruta cea mai bună.

În privința locomoției pășitoare Raibert [57] propunea divizarea procesului în trei forme de control. Se consideră ca reper modul în care oamenii aleargă. O parte din energie este folosită pentru mișcarea de "topăială", împingând cu piciorul pentru compensarea efectului gravitației. În același timp picioarele sunt mișcate alternativ înainte. Cât timp se execută aceste acțiuni, corpul trebuie să-și mențină o poziție adecvată, controlându-se unghiul dintre trunchi și picioare pentru a rămâne vertical. Proiectul unui astfel de robot implică crearea unui algoritm pentru fiecare tip de mișcare în parte – în sus, înainte și pe verticală. Algoritmul de conducere poate fi ajustat pentru sincronizarea celor trei aspecte ale mișcării în diferite condiții. Cea mai simplă formă de locomoție este atunci când un singur picior se mișcă la un moment dat.

Pentru a putea merge precum oamenii sau precum animalele patrupede (ex. pisica), este nevoie să se acționeze simultan mai mult decât un picior. Raibert a rezolvat această problemă combinând două sau chiar patru picioare într-un singur picior "virtual", unde picioarele individuale sunt coordonate astfel încât să se comporte ca modelul unui singur picior.

1.2 Robotica pășitoare hexapodă

Imitarea naturii nu este lipsită de sens. Timpul și natura au sculptat creaturile pământului, permițându-le să supraviețuiască și să se adapteze la mediul înconjurător în moduri la care discipolii roboticii numai visează. Unii cercetători nu se mulțumesc doar cu imitarea rezultatelor naturii, ci vor să și reproducă metodele acesteia [15].

Roboții pășitori sunt inspirați din natură, reprezentând rezultatul eforturilor omului de a aduce tainele naturii la nivel intuitiv. Potențialitatea instructivă a naturii se vedește cu ușurință la sistemele pășitoare pe care aceasta le-a "inventat" [32], [60]. Diferite configurații de picioare și-au dovedit succesul la o varietate de organisme (Figura 1.1). Animalele de talie mare, precum mamiferele și reptilele, au patru picioare, iar insectele au șase sau mai multe picioare. La unele mamifere (primatele în special) mersul în două picioare trebuie perfecționat. În cazul oamenilor, echilibrul a progresat până în punctul în care putem sări într-un singur picior. Această abilitate are un cost: un control activ mai complex pentru menținerea echilibrului.

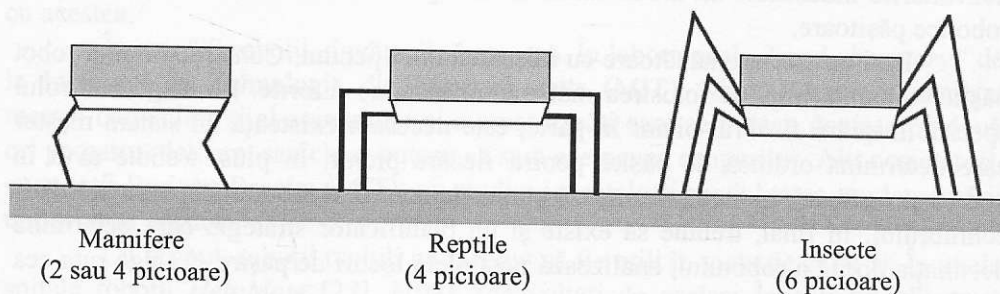


Figura 1.1. Dispunerea picioarelor la diferite grupe de viețuitoare [61].

Cele mai cunoscute structuri robotice pășitoare prezente în literatura de specialitate se pot împărți în:

- bipede (*ASIMO* [95], *HPR-4* [96], *NAO* [97])
- patrupede (*AIBO* [112], *BIG DOG* [113], *CHEETAH* [114])
- hexapode (*RHEX* [11], [62], [102], *ROBOT III* [103], *TIMBERJACK* [104])
- octopode (*SPIDER* [68], [117], *LOBSTAR* [5], *SCORPION* [116])
- miriapode (*CENTPEDE ROBOT* [105], [106], *GAKKEN MECHAMO* [107])

Între paranteze sunt enumerate cele mai importante și actuale structuri robotice, atât comerciale, cât și didactice. Un avantaj major al structurilor robotice pășitoare cu 6 picioare în comparație cu structurile bipede sau patrupede îl reprezintă posibilitatea mișcării cu viteze mari, cu păstrarea echilibrului static. Interesul constant al comunității științifice asupra acestor tipuri de structuri a condus la dezvoltarea unei piețe destul de răspândite [78]-[81]. Cele mai comercializate

modele de roboți hexapozi au corp rectangular sau circular, cu 12, 18 sau 24 servomotoare electrice. Pe lângă acestea, se pot achiziționa multe alte componente adiacente (servomotoare, senzori, părți mecanice, părți electronice etc.).

Din punct de vedere structural, piciorul unui robot hexapod are de regulă două până la patru grade de libertate. Picioarele cele mai studiate au în general trei grade de libertate. Modelul piciorului roboților pășitori hexapozi își are originea în lumea insectelor [19]. Anatomic, piciorul unei insecte este format din 5 segmente: coxa, trocanter, femur, tibie și tarsus (Figura 1.2.a). Pentru modelarea din punct de vedere robotic al unui astfel de picior se neglijează de cele mai multe ori talpa și articulația aferentă, transformând piciorul robotului hexapod într-un manipulator cu 3 grade de libertate (Figura 1.2.b).

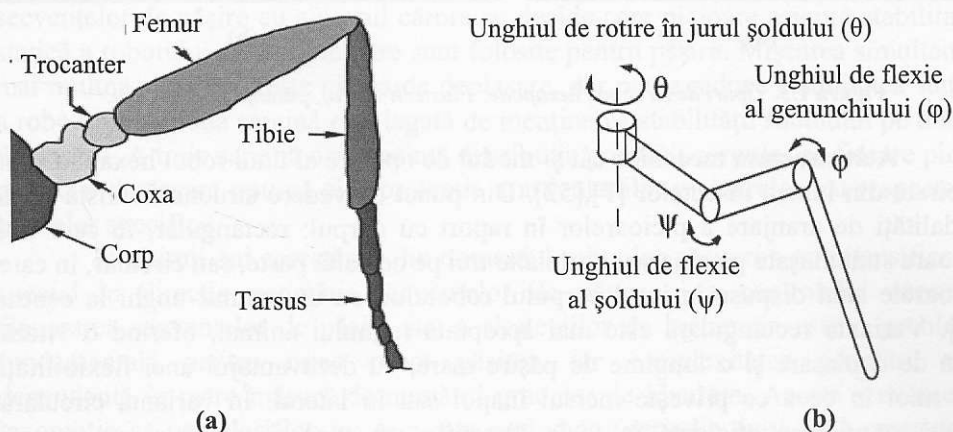


Figura 1.2. Anatomia piciorului unui gândac (a) [72] și modelul fizic asociat (b) [61].

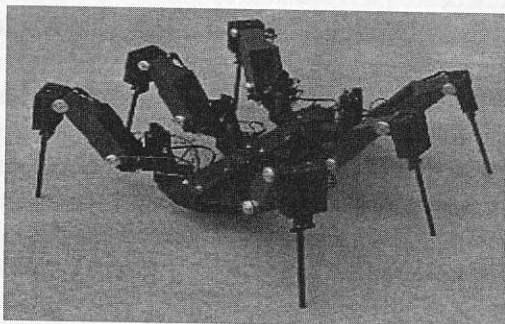
În cazul roboților pășitori, un minim de două grade de libertate este necesar pentru schimbarea poziției piciorului prin ridicarea și deplasarea acestuia. De obicei se mai adăugă încă un grad de libertate pentru manevre mai complexe. Pentru ca un robot hexapod să se poată mișca într-un spațiu tridimensional, fiecare picior ar trebui să aibă 3 grade de libertate, rezultând un total de 18 grade de libertate pentru întregul robot care trebuie controlate.

Modalitatea de distribuție a picioarelor afectează stabilitatea robotului și spațiul de operare (anvelopa) al fiecărui picior [21]. Există două configurații de prindere a picioarelor pe corpul robotului prin articulația șoldului, inspirate tot din natură. Singura diferență este dată de modalitatea de balansare a picioarelor față de corpul robotului. Prima configurație este similară pisicilor, oamenilor și păsărilor, în care piciorul se rotește în jurul unei axe orizontale. Picioarele sunt situate în linie, îndreptate în aceeași direcție, sub corp, în apropierea proiecției centrului de masă pe sol (Figura 1.3.a). Al doilea tip este similar insectelor, picioarele rotindu-se în jurul unei axe verticale. Picioarele se întind în lateral față de corp, iar suportul corpului este asigurat de un poligon de sustentație cu suprafața mai mare decât cea

a corpului robotului, sporind stabilitatea. Această configurație este familiară roboților patruzezi și hexapozi (Figura 1.3.b).



(a)

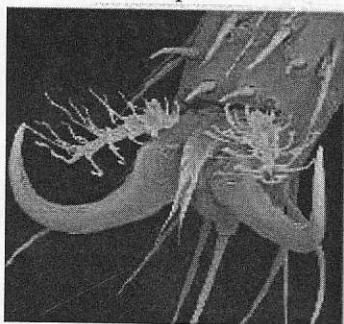


(b)

Figura 1.3. Tipuri de structuri hexapode: Plustech Oy (a), păianjen robotic (b).

Atât structura mecanică cât și modul de operare al unui robot hexapod sunt inspirate din lumea insectelor [7],[52]. Din punct de vedere structural există două modalități de aranjare a picioarelor în raport cu corpul: rectangular, în care trei picioare sunt atașate pe o parte și celelalte trei pe cealaltă parte, sau circular, în care picioarele sunt dispuse în jurul corpului robotului, cu un anumit unghi la centru [21]. Varianta rectangulară este mai apropiată regnului animal, oferind o viteză bună de deplasare și o lungime de pășire mare, cu dezavantajul unei flexibilități mai mici în ceea ce privește mersul înapoi sau în lateral. În varianta circulară rezultă o mișcare eficientă în toate direcțiile, cu aceeași viteză și cu aceeași lungime de pășire. Secvențele de mișcare pentru varianta rectangulară pot fi implementate și pe cea circulară, dar viceversa nu este întotdeauna valabilă.

Drosophila



Syrphid fly

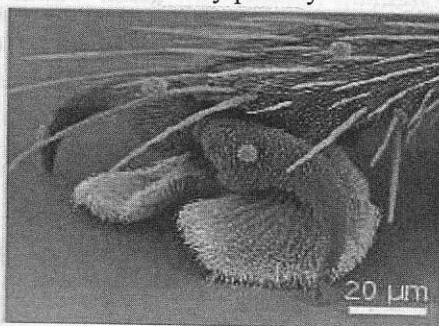


Figura 1.4. Structuri pasive prezente pe picioarele insectelor: gheare, țepi și pernțe cu păr specifice ființelor biologice [22].

Deși insectele au dimensiuni destul de reduse în raport cu obstacolele întâlnite, acestea sunt capabile să traverseze orice formă de teren folosindu-se de

cele șase picioare. Diferențele dintre capacitățile insectelor cu șase picioare și roboții cu același număr de picioare sunt încă mari. Aceste diferențe nu se datorează numărului insuficient de grade de libertate, ci faptului că insectele combină un număr mic de grade active cu structuri pasive, cum ar fi ghimpi microscopici și/sau suprafețe texturate (Figura 1.4) care sporesc semnificativ puterea de prindere a fiecărui picior, permițând chiar deplasarea cu capul în jos.

Locomoția pășitoare este caracterizată printr-o serie de puncte de contact între talpa piciorului robotului și sol. Un *pas* (gait) este definit ca o secvență de mișcări coordonate ale picioarelor și ale corpului pentru a deplasa robotul într-o anumită direcție, cu o orientare dată.

Principala provocare pentru roboții pășitori o reprezintă sistemul de control care trebuie să îndeplinească mai multe sarcini. Prima dintre acestea ar fi generarea secvențelor de pășire cu ajutorul cărora se decide care picioare asigură stabilitatea statică a robotului și care picioare sunt folosite pentru pășire. Mișcarea simultană a mai multor picioare crește viteza de deplasare, dar poate reduce stabilitatea statică a robotului. A doua sarcină este legată de menținerea stabilității robotului pe durata deplasării. A treia sarcină o reprezintă distribuția greutății corpului pe fiecare picior pentru o deplasare optimă și o protecție a articulațiilor picioarelor, cu respectarea limitelor specifice.

În ultimii ani cercetările din domeniul roboților pășitori s-au intensificat în special în direcția generării secvențelor de pășire și a controlului acestora. Generarea secvențelor de pășire sau a strategiilor de locomoție este o problemă fundamentală pentru orice robot pășitor, iar complexitatea generării este dependentă în mare măsură de numărul gradelor de libertate. Aceste secvențe de locomoție se pot clasifica în: secvențe periodice (periodic gait) [18], aperiodice (free gait) [48] sau o combinație a celor două [10]. Secvențele periodice de mișcare sunt folosite în special pentru suprafețe fără denivelări [65], [70], iar secvențele de mișcare aperiodice sunt foarte utilizate în cazul mersului pe teren accidentat și cu obstacole. Posibilitățile de modelare a acestor tipuri de secvențe de mișcare, cu avantajele și dezavantajele specifice, pot fi: rețele neuronale (RN [8]), generatoare centrale de forme (CPG [9], [56]), algoritmi evolutivi (genetici) (AE [33], [55]) și altele [34].

Studiile asupra mersului insectelor reprezintă o sursă de inspirație pentru secvențele roboților pășitori. Când se implementează o anumită secvență inspirată din natură, este posibil ca alte secvențe să fie ignorate sau excluse tocmai pentru că nu au fost observate la creaturi vii [16]. Secvențele de pășire modelate și optimizate pe o structură robotică pot avea performanțe mult mai bune decât cele obținute din studiul direct al unei secvențe de pășire naturală datorită adaptabilității structurii pentru care s-au creat.

În cazul roboților hexapozi există un număr foarte mare de combinații pentru poziționarea picioarelor pe sol. Coordonarea acestor picioare în timpul mersului se face prin intermediul unor strategii de pășire. O astfel de strategie de pășire este o secvență de ridicări și de coborâri ale picioarelor. Numărul posibilităților

strategii de pășire este dependent de numărul picioarelor. Pentru un robot mobil cu k picioare numărul total de evenimente posibile (ridicări sau coborări) este egal cu $(2k-1)!$ [61]. Spre exemplu, pentru un robot biped la care $k = 2$, rezultă următoarele 6 evenimente diferite posibile:

- ridicarea piciorului stâng
- ridicarea piciorului drept
- coborârea piciorului drept
- coborârea piciorului stâng
- ridicarea ambelor picioare
- coborârea ambelor picioare

Pentru un robot cu 6 picioare rezultă 39.916.800 evenimente diferite posibile. Locomoția cu mai multe picioare are avantajul major al îmbunătățirii stabilității pe durata deplasării pentru că robotul se sprijină pe mai multe picioare la un moment dat. Un dezavantaj direct este însă lipsa de manevrabilitate, pentru că robotul este constrâns să țină simultan mai multe picioare pe sol.

Evoluția societății umane, dar mai ales a nevoilor acesteia, implică îmbunătățirea constantă a structurilor robotice actuale. Dacă dorim ca un robot să activeze în jurul unui om, este nevoie ca robotul să se poată descurca în mediul uman modern fără să pună în pericol viața omului. Un alt aspect fundamental pe care robotul trebuie să-l îndeplinească în aceste circumstanțe este pășirea peste obstacole, inclusiv urcarea și coborârea scârilor, o activitate des întâlnită în viața oamenilor. Cele mai multe încercări s-au făcut pentru roboții cu roți [12], [13], [109] și mai puțin pentru roboții pășitori [30], [89]. Problema dezvoltării unor roboți capabili să urce scările datează din mijlocul anilor '80, dar a rămas o temă actuală chiar și azi, datorită complexității și avantajelor oferite.

O altă problemă în construcția roboților pășitori este legată de stabilitatea acestora pe durata deplasării. Stabilitatea în locomoția pășitoare este raportată la stabilitatea statică. Necesitatea stabilității statice în cazul artropodelor este principalul motiv pentru care insectele au cel puțin șase picioare și folosesc alternativ două configurații ale picioarelor pentru sprijinul pe sol. Pentru obținerea echilibrului static minim (echilibru isostatic) este nevoie de poziționarea a trei picioare pe sol. Dacă proiecția centrului de masă este în afara triunghiului suport format de tălpile celor trei picioare poziționate pe sol, robotul este instabil și va cădea. În pășirea cvasi-statică a unui robot, centrul de masă se deplasează în funcție de poziția picioarelor, iar probabilitatea de a cădea crește cu cât centrul de masă se apropie de marginile triunghiului suport.

Problema menținerii stabilității unei platforme cu patru picioare este mult mai complexă decât în cazul platformelor cu șase sau mai multe picioare (Figura 1.5). În figura 1.5 talpa piciorului considerat pe sol este evidențiată printr-un cerc cu linie continuă, iar talpa piciorului care nu asigură stabilitate robotului este evidențiată printr-un cerc cu linie punctată.

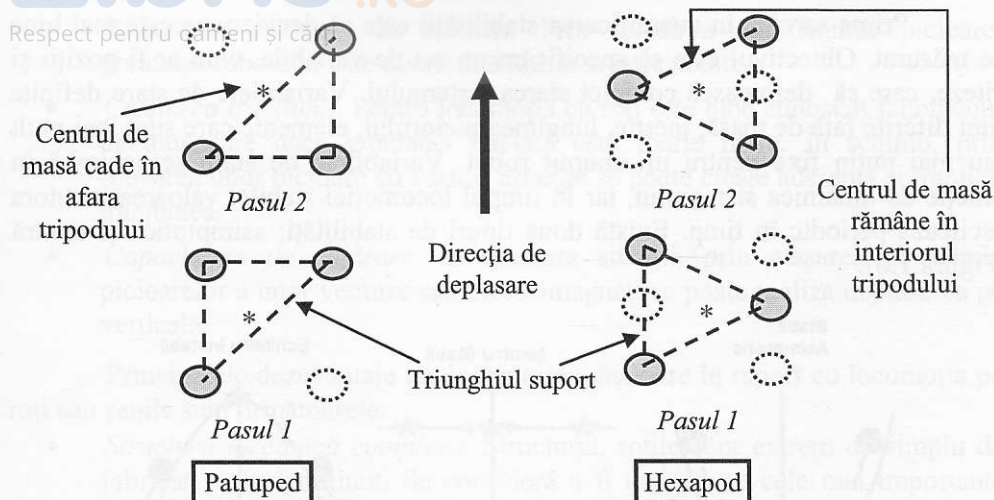


Figura 1.5. Echilibrul static în pășirea patrupedă și hexapodă.

Așa cum se observă din figura 1.5, roboții cu patru picioare trebuie să-și deplaseze centrul de masă (în cazul pasului 2) pentru a putea pași și pentru a-și menține stabilitatea. La robotul cu șase picioare proiecția centrului de masă cade în interiorul triunghiului suport. Menținerea proiecției centrului de masă în interiorul triunghiului suport asigură stabilitatea robotului, chiar dacă încetinește locomoția acestuia. Pentru a minimiza efectele forțelor destabilizatoare rezultate din energia internă a picioarelor, roboții se construiesc cu picioare mult mai ușoare în raport cu greutatea corpului lor.

În funcție de geometrie, viteza de deplasare a roboților pășitori static stabili este limitată la cel mult o lungime de corp pe secundă. O dată cu creșterea vitezei robotului, inerția și viteza corpului acestuia influențează proiecția centrului de masă, făcându-l un mijloc mai puțin precis pentru evaluarea stabilității acestuia. Roboții dinamic stabili nu prezintă constrângeri de viteză și pot folosi forțele dinamice și feedback-ul pentru a menține rezerva de stabilitate.

Din nefericire, roboții dinamic stabili suferă de lipsa formalismului de control și a tehnicilor de analiză, întrucât aceste sisteme prezintă discontinuități dinamice la tranziția stărilor, sunt puternic neliniare, sunt multi-intrări și multi-ieșiri și interacționează cu medii complex nestructurate [35].

Analiza stabilității dinamice este necesară pentru toate platformele pășitoare, mai puțin pentru cele lente. S-a observat că gradul de stabilitate statică la insecte scade concomitent cu creșterea vitezei de deplasare. La viteze foarte mari devin static instabile în timpul mersului, chiar dacă triunghiul suport (Figura 1.5) este prezent. Roboții cu șase sau opt picioare sunt modelați cel mai bine prin mecanisme cu resorturi sau cu ajutorul modelului pendulului inversat, exact ca și alergătorii patrupezi sau bipezi. Aceste modele sugerează că alergarea cu o viteză constantă este periodică în timp.