

Sorin MĂNOIU-OLARU

Mircea NIȚULESCU

CERCETĂRI ÎN ROBOTICA HEXAPODĂ

Sorin MĂNOIU-OLARU

Mircea NIȚULESCU

CERCETĂRI ÎN ROBOTICA HEXAPODĂ



EDITURA UNIVERSITARIA
Craiova, 2014

Referenți științifici:

Prof. univ. dr. ing. Mircea IVĂNESCU,
Universitatea din Craiova

Prof. univ. dr. ing. Corneliu LAZĂR,
Universitatea Tehnică "Ghe. Asachi" din Iași

Copyright © 2014 Editura Universitaria

Toate drepturile sunt rezervate Editurii Universitaria.

Deșcrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României**MĂNOIU OLARU, SORIN**

Cercetări în robotica hexapodă / Sorin Mănoiu-Olaru,
Mircea Nițulescu. - Craiova : Universitaria, 2014

Bibliogr.

ISBN 978-606-14-0825-2

I. Nițulescu, Mircea

621.865.8

Prefață

Tema abordată face parte din cercetările intense realizate în ultima vreme pe plan mondial în privința dezvoltării structurilor robotice mobile, care prin autonomie și inteligență îmbarcată introduc multiple aplicații posibile, mai ales în domeniul serviciilor. Recunoașterea importanței acordată acestor sisteme robotice avansate este confirmată și prin faptul că în nomenclatorul de clasificare elaborat de către organizația mondială de profil IFR (International Federation of Robotics), domeniul serviciilor face parte dintre ultimele categorii de aplicații robotizate introduse.

Spre deosebire de roboții industriali (clasici sau convenționali), roboții mobili sunt din start structuri robotice mult mai sofisticate și de ultimă generație sub aproape toate aspectele: structură mecanică, sistem de conducere, inteligență intrinsecă, sistem senzorial interoceptiv și exteroceptiv, sistem de acționare, alimentare energetică, materiale și tehnologii neconvenționale folosite pentru construcția lor etc. Aceasta se explică în primul rând prin particularitățile specifice acestei clase de roboți, legate de tipul aplicațiilor, spațiul în care ei operează, cooperarea permanentă sau cvasi-permanentă cu operatorul uman, independență decizională și energetică etc. Toate aceste aspecte fac ca robotica mobilă să reprezinte un spațiu important de cercetare și de testare a unor soluții constructive extrem de diverse.

Prezenta lucrare s-a focalizat pe dezvoltarea unei structuri robotice mobile pășitoare hexapode și investigarea capacităților sale de evoluție în medii de operare structurate sau nestructurate aprioric. Ea se bazează pe cercetările efectuate de către autori și finalizate prin elaborarea tezei de doctorat intitulată “Dezvoltarea unei structuri robotice pășitoare pentru medii structurate și nestructurate” a Ing. Sorin Mănoiu Olaru sub conducerea Prof. univ. dr. ing. Mircea Nițulescu la Universitatea din Craiova.

Pe parcursul derulării lor, aceste cercetări au beneficiat de sprijinul financiar al proiectului intitulat “Prin burse doctorale spre cercetare de nivel european”, POSDRU /88/1.5/S/50783, ID 50783, proiect implementat de Universitatea „Politehnica” din Timișoara în parteneriat cu Universitatea din Oradea și cu Universitatea din Craiova.

Abordarea acestui subiect științific a vizat două etape distincte. În primul rând abordările teoretice, necesare fazei de proiectare, de definire a strategiilor și algoritmilor funcționali și de creare a unui mediu adecvat de simulare comportamentală prin dezvoltări Matlab. S-a trecut apoi la construcția unui model fizic experimental (în limitele disponibilităților existente), testarea sa, determinarea și verificarea comportărilor sale reale prin comparație cu cele simulate în situații tipice. De menționat faptul că au fost realizate succesiv câteva variante constructive ale părții mecanice a robotului hexapod. Tipurile de obstacole impuse inițial studiului comportamental au fost cele considerate clasice în literatura de specialitate: planul înclinat, treapta, șanțul și pragul. Acestea s-a adăugat ulterior scara dreaptă și scara în spirală, obstacole care introduc o complexitate algoritmică mult sporită, dar care adaugă în același timp și o direcție aplicativă pronunțată. Tematica de cercetare a impus și două restricții suplimentare, puțin abordate până în prezent, respectiv menținerea orizontalității corpului robotului pe parcursul evoluției și menținerea unei înălțimi maxim posibilă a corpului robotului față de sol sau față de obstacolul escaladat. Aceste două trăsături au fost generate de posibile dezvoltări ulterioare și realizarea unor aplicații utile omului.

În **Capitolul 1, *Introducere***, se realizează o trecere în revistă a patru probleme generale legate de prezentarea succintă a domeniului abordat – robotica pășitoare hexapodă, prin evaluarea critică a numeroase referințe bibliografice; definirea obiectivelor inițial fixate pentru tema de cercetare și a elementelor de noutate științifică legate de abordarea scărilor spiralate și restricții asupra orizontalității și distanței corpului robotului în raport cu solul sau cu obstacolul pe durata deplasării; motivația pentru alegerea acestei tematicii; organizarea generală a materialului prezentat cititorului și elementele cheie ale fiecărui capitol.

În privința definirii domeniului de cercetare și al obiectivelor s-a optat, pe baza studiului referințelor bibliografice, către structurile pășitoare hexapode, care sunt evaluate critic atât în raport cu celelalte soluții de mobilitate terestre (roți, șenile, târâre, șerpuire etc.), cât și în raport cu alte structuri pășitoare (bipede, tetrapode, octopode, miriapode etc.). Se prezintă succint și mai multe trăsături specifice ale structurilor robotice pășitoare, sursa lor de inspirație biologică, proiecte semnificative realizate până în prezent (cu scop științific sau comercial), structuri tipice ale lanțurilor cinematice folosite pentru realizarea picioarelor, probleme critice legate de stabilitate, pășire și gama performanțelor obținute în mod curent. Tot aici se definește în mod clar metodologia cercetării în subiectul abordat, respectiv mai întâi studiul comportamental al robotului prin soluții de simulare, urmat apoi de validarea prin experiențe reale cu un model proiectat și construit special în acest scop. Sunt vizate inițial toate categoriile de obstacole fundamentale (planul înclinat, treapta, șanțul și pragul), iar ulterior obstacole mai complexe de tip scară.

Capitolul 2, intitulat *Modelarea piciorului robotic*, este destinat studiului acestui element esențial al locomoției, dar în același timp și determinant pentru performanțele globale ale întregii structuri robotice hexapode. În prima secțiune a

capitolului, autorul analizează diferite variante constructive pentru picior, sursele de inspirație fiind în mod evident cele biologice. Analiza are ca punct de plecare piciorul mamiferelor și cel al unor insecte, iar în continuare sunt analizate gradual soluții mai simple, cum ar fi piciorul format din două segmente, cât și mecanisme mai complicate, compuse din 5 segmente, cum ar fi piciorul pentagraf și piciorul pantograf. Din considerente legate nu în ultimul rând și de posibilitățile care au existat pentru construcția unui model fizic real al robotului hexapod, s-a ales în final o soluție de complexitate medie pentru picior, de tip lanț cinematic deschis cu 3 segmente (coxă, femur și tibie) și 3 cuple de rotație (șold, genunchi și gleznă) care diferă față de unele prezentate în referințele bibliografice prin faptul că segmentul de legătură dintre primele 2 articulații este mult mai lung.

Următoarea secțiune a acestui capitol abordează mai întâi fundamentele formalismului general Denavit - Hartenberg pentru cinematica directă și cinematica inversă a structurilor robotice. Apoi, corespunzător tipului de picior ales pentru construcția modelului experimental, s-a elaborat setul de ecuații al modelului cinematic direct și al modelului cinematic invers. Este inclusă și o analiză a spațiului de operare aferent piciorului robotic, obținută prin simulare Matlab, cu evidențierea punctelor semnificative de extrem. Această analiză a stat la baza proiectării dispunerii picioarelor în jurul corpului robotului hexapod.

Ultima secțiune a capitolului al 2-lea este destinată elaborării unui model dinamic simplificat al piciorului robotic folosind formalismul Euler-Lagrange. Ca și în secțiunea precedentă, punctul de plecare este prezentarea metodologiei generale urmată de particularizarea sa pentru stabilirea componentelor vectorului forțelor generalizate din articulațiile piciorului.

Capitolul 3, intitulat *Analiza categoriilor fundamentale de obstacole*, pleacă de la ideea că scenele de operare structurate sau nestructurate în care poate evalua un robot mobil conțin o mare varietate de obstacole. Unele dintre acestea trebuie ocolite, dar altele pot fi escaladate. Omul a dezvoltat mediile preparate aprioric, deci pe cele structurate, pentru care a inventat locomoția prin roți. Natura însă a construit ființe biologice cu picioare pentru mediile nestructurate. Roboții pășitori sunt deci teoretic capabili să depășească o mare varietate de obstacole, dar o abordare sistemică se impune. Categoriile fundamentale de obstacole propuse în literatura de specialitate sunt planul înclinat, treapta, șanțul și pragul. Prin combinarea lor rezultă diferite obstacole complexe, între care scara dreaptă și scara în spirală. Fiecare dintre aceste obstacole necesită un studiu separat menit să conducă în final la elaborarea unor strategii adecvate de locomoție. De asemenea, fiecare tip de obstacol are asociați parametri descriptivi care, în conjuncție cu parametrii constructivi ai robotului pășitor, constituie elementul de decizie în legătură cu posibilitatea de a escalada sau nu acel obstacol.

În afară de definirea tipurilor de obstacole și a parametrilor caracteristici, acest capitol introduce notațiile folosite și principalele relații dimensionale care trebuie să stea la baza proiectării unor strategii de locomoție adecvate pentru toate aceste tipuri de obstacole. Relațiile vizează mai multe aspecte esențiale ale

locomoției, între care stabilitatea statică și stabilitatea dinamică a robotului, rezerva sa de stabilitate (longitudinală și laterală), poziționarea judicioasă a perechilor de picioare în raport cu obstacolele, prevenirea blocării articulațiilor pe durata escaladării prin atingerea limitelor de cursă, ajustarea periodică a orizontalității, orientării și a înălțimii robotului, controlul picioarelor într-o manieră care să prevină interacțiunile dintre acestea etc.

Capitolul 4 al lucrării, denumit *Interfața grafică pentru simularea funcțională a robotului hexapod*, are drept scop final prezentarea mediului de simulare proiectat și realizat pentru testarea robotului hexapod în diferite situații funcționale. În același timp, dezvoltarea unui mediu de simulare comportamentală a permis alte trei aspecte importante. În primul rând este vorba de reducerea costurilor de construcție ale modelului real al robotului, scopul fundamental al utilizării simulării în procesul modern de proiectare asistată. Apoi, rezultatele simulării au stat la baza dezvoltării variantelor succesive ale diferitelor strategii de locomoție pentru toate categoriile de obstacole analizate. În al treilea rând, mediul de simulare a oferit un set de rezultate de referință care au putut fi analizate critic prin conjuncție cu cele obținute pe calea experiențelor reale. Cum desigur acestea din urmă dau validarea finală a cercetărilor, concluziile desprinse au constituit un feedback pentru mediul de simulare realizat, conducând în final la ajustarea corespunzătoare a algoritmilor proiectați.

În primele secțiuni ale acestui capitol se prezintă succint aspecte fundamentale și caracteristici ale limbajului de programare Matlab care au fost folosite pentru crearea interfeței de simulare grafică și comportamentală a robotului hexapod. Elementele reținute au fost editorul Matlab G.U.I.D.E., cu o serie de elemente grafice cum ar fi diferite tipuri de butoane, liste, căsuțe text editabile, căsuțele de selecție, cursoare de valori, grupuri de obiecte grafice organizate în panouri etc., utilitarele Matlab Object Browser și respectiv Property Inspector, precum și proprietatea Callback. Interfața realizată are o organizare modulară formată din șapte zone de control, fiecare dintre acestea vizând un anumit aspect. În esență, interfața permite setarea și afișarea parametrilor corpului robotului și ai segmentelor unui picior, afișarea grafică a configurației robotului în funcție de parametrii selectați, controlul unui picior, implementarea modelului cinematic direct și a celui invers al robotului, simularea locomoției peste diferite tipuri de obstacole folosind modelele matematice asociate robotului, analiza stabilității robotului pe parcursul deplasării sale sau în caz de defect apărut la nivelul unui picior. În ceea ce privește afișarea grafică a configurației robotului, într-o secțiune separată sunt prezentate detaliat toate notațiile folosite pentru robot, sisteme de referință, poligon de sustentație, relații matriceale de transformare între sistemul de coordonate atașat punctului caracteristic al tălpii fiecărui picior și sistemul global de coordonate, relațiile de calcul implementate în Matlab pentru calculul centrelor de masă.

O funcție specială a interfeței permite și cuplarea sa la restul sistemului de conducere al modelului real al robotului prin placa de dezvoltare Arduino Mega,

variantele 2560. În acest caz, interfața împreună cu programele Matlab care sunt rulate pe un PC reprezintă nivelul strategic al sistemului de conducere implementat.

Capitolul 5, respectiv *Structura hardware a robotului hexapod*, include toate aspectele semnificative din construcția modelului fizic real al robotului hexapod, sub aspect mecanic, electric și al sistemului său de conducere. Așa cum s-a precizat anterior, această realizare practică s-a făcut după dezvoltarea mediului de simulare Matlab și după efectuarea unui număr considerabil de simulări comportamentale în raport cu diferitele categorii fundamentale de obstacole, fapt care a permis tragerea unor concluzii clare referitoare la dimensionarea robotului. Pe de altă parte, explorarea bibliografică dar și analiza unor structuri existente în laboratorul nostru au condus la concluzia că, chiar dacă nu au fost identificate structuri mobile hexapode disponibile direct pentru achiziție care să satisfacă integral obiectivele dorite, una dintre ele, așa-numitul model BH3 produs de firma Lynxmotion, a putut constitui un punct important de plecare. Astfel, având ca exemplu câteva elemente ale structurii BH3, s-au realizat mai întâi modelele CAD-SolidWorks ale picioarelor, ale elementelor de prindere ale servomotoarelor din articulații și ale corpului robotului. Au fost construite succesiv trei variante ale modelului experimental al robotului hexapod, folosindu-se diferite materiale constructive dar și soluții de construcție și de acționare a celor 18 articulații care intră în structura celor 6 picioare. Sunt descrise problemele apărute la fiecare model al robotului și modul în care acestea au fost depășite.

Tot în acest capitol este prezentat și sistemul de conducere al robotului. Acesta a fost conceput pe 3 nivele, respective nivelul strategic, nivelul tactic și nivelul executiv.

Nivelul strategic rulează pe un PC, el fiind reprezentat de pachetul software dezvoltat în mediul Matlab. Prin comenzi adecvate ale operatorului asupra interfeței grafice, acesta poate funcționa off-line, respectiv numai pentru simulare, sau on-line, caz în care se realizează cuplarea la nivelul tactic și sunt transmise toate comenzile articulațiilor pentru evoluția dorită.

Nivelul tactic este reprezentat de o placă de dezvoltare Arduino Mega 2560 bazată pe un microcontroler Atmel – AVR. Se prezintă aici și mediul de programare Arduino IDE folosit pentru programarea acestei plăci. Comunicația dintre acest nivel și cel ierarhic superior este de tip serial prin port USB cu o rată de transmisie de 9.600 Baud. Robotul a fost dotat în tălpile picioarelor și cu 6 senzori de contact de tip “tot sau nimic” care sunt cuplați pe intrările analogice ale plăcii. Ei furnizează o reacție informațională transmisă în final nivelului strategic în privința existenței contactului fiecărui picior cu solul sau cu un obstacol.

Nivelul executiv conține în principal o placă de comandă SSC-32 Lynxmotion și cele 18 servomotoare din articulații. Fiecare servomotor este controlat prin semnale PWM și conține câte o buclă de reglare pentru atingerea poziției prescrisă prin factorul de umplere al semnalului de comandă. Comunicația dintre nivelul executiv și cel ierarhic superior (tactic) este tot de tip serial prin port USB cu o rată de 9.600 Baud și cu nivelul semnalelor specific tehnologiei TTL.

Capitolul 6, Controlul robotului peste obstacole fundamentale. Rezultate experimentale, dezvoltă mai întâi o serie de aspecte teoretice și practice care au fost folosite apoi în elaborarea tuturor strategiilor de control. Se începe cu problema aproximării traiectoriilor pur poligonale în robotica pășitoare. Traiectoriile poligonale introduc discontinuități ale vitezei și accelerației în punctele de joncțiune ale segmentelor liniare, iar în final erori de urmărire ale traiectoriei dorite. Soluția analizată folosește arce de cerc și curbe Spline de ordinul al treilea, o soluție de complexitate medie care elimină discontinuitățile vitezei liniare, dar le menține pe cele din accelerația liniară. În continuare s-a testat și analizat modul în care punctul caracteristic al tălpii piciorului realizează câteva traiectorii specifice pășirii: traiectorie liniară, traiectorie curbilinie plană și traiectorie curbilinie în spațiu. Acestea li se impun mai întâi trei puncte de trecere (inițial, intermediar și final), dar pentru o precizie mai bună ele pot fi rafinate suplimentar. Mai multe experiențe au fost simulate cu partea interfeței grafice care a fost creată special în acest scop, iar rezultatele obținute sunt evaluate în fiecare caz în parte. Pentru calculul punctelor de pe traiectoria impusă tălpii unui picior se folosește funcția *interparc* din extensia Matlab. S-au făcut simulări cu 6, 11 și 21 de puncte intermediare de trecere, sau analizat graficele erorilor carteziene și s-a concluzionat că erorile de urmărire cele mai mici sunt pentru traiectoria curbilinie plană. Apoi, aceleași teste au fost repetate și cu piciorul robotului hexapod construit. Analiza rezultatelor experimentale a condus la concluzia că, din cauza puterii limitate de calcul, traiectoriile optime sunt cele cu 6 puncte impuse, acestea fiind ulterior implementate în algoritmi de locomoție peste toate tipurile de obstacole studiate.

Tot aici este definită și detaliată arhitectura sistemului de conducere al unui picior ca parte componentă a sistemului general de conducere al întregului robot. Codul sursă a fost scris permițând în final implementarea comunicației cu placa de control a celor 18 servomotoare (SSC-32), afișarea de informații și mesaje de stare pe un ecran LCD, achiziția datelor de la cei șase senzori de forță montați pe tălpile picioarelor și introducerea mai multor funcții care facilitează comunicația cu modelul experimental real al robotului hexapod.

O altă analiză efectuată asupra configurației piciorului robotic a vizat testarea modelului său dinamic pentru determinarea forțelor și momentelor pe care servomotoarele din articulații trebuie să le dezvolte în vederea păstrării stabilității robotului pe traiectorie. Analiza s-a făcut cu editorul SimMechanics, parte componentă a Matlab.

În continuare s-a trecut la proiectarea, implementarea și corectarea impusă de experiențele simulate sau reale a strategiilor de locomoție pentru fiecare tip de obstacol fundamental: plan înclinat, treaptă, prag și șanț. Proiectarea tuturor strategiilor a avut permanent în vedere criteriile suplimentare impuse inițial cercetării, respectiv menținerea unei înălțimi maxime față de sol sau față de obstacol și orizontalitatea corpului robotului.

Prima strategie studiată a fost locomoția pe planul orizontal, cazul cel mai simplu de deplasare al robotului hexapod. S-a realizat o analiză a stabilității robotului pentru secvențele de pășire pe plan orizontal în condițiile apariției unui defect intervenit la nivelul articulațiilor din structura unor picioare. Pentru analiza stabilității în regim de defect s-a urmărit comportamentul robotului când una sau mai multe articulații se blochează mecanic sau când comanda transmisă către acestea nu este îndeplinită corespunzător din diferite alte motive. Se studiază modul în care se modifică poligonul de sustentație al robotului în funcție de secvența de pășire aleasă.

Pentru urcarea pe un obstacol de tip plan înclinat s-a urmărit aceeași procedură ca și pentru mersul pe plan orizontal. Elementul specific al algoritmului proiectat este legat de calculul coordonatelor Z ale tălpilei picioarelor astfel încât poziționarea acestora să fie corectă și să nu afecteze stabilitatea robotului pe durata deplasării.

A fost abordat apoi obstacolul de tip treaptă, pentru care s-a proiectat de asemenea o strategie de locomoție adecvată. Experiențele realizate cu modelul construit al robotului hexapod au relevat necesitatea introducerii unor corecții periodice, care inițial nu au fost identificate prin simulările grafice efectuate. Ele au fost cauzate în principal de funcționarea articulațiilor picioarelor cu valori apropiate de cele limită și au condus în final la ajustarea înălțimii treptei peste care se poate realiza fizic pășirea.

Pentru obstacolul de tip prag s-a considerat cazul în care lățimea acestuia nu permite poziționarea simultană a două perechi de picioare. Un element de dificultate care a fost abordat este cel în care picioarele plasate pe prag urmează să pășească pe sol. Experiențele au arătat că pentru pășirea lor este necesar ca articulațiile din șold să fie plasate deasupra sau după marginea pragului.

În cazul obstacolului de tip șanț s-au elaborat două strategii de locomoție, funcție de lățimea acestuia. Prima strategie este asemănătoare cu cea a deplasării pe planul orizontal și permite traversarea unui șanț de lățime relativ mică. A doua strategie permite robotului traversarea unui șanț cu o lățime aproape dublă. O observație importantă legată de această strategie este aceea că în anumite secvențe picioarele mijlocii se află plasate deasupra șanțului, nemaifiind deci puncte de sprijin pentru robot. Devine atunci foarte importantă ordinea de mișcare a picioarelor pentru ca robotul să nu-și piardă stabilitatea, iar experiențele au condus la stabilirea acesteia.

Capitolul 7, respectiv *Controlul robotului pentru escaladarea obstacolelor complexe. Rezultate experimentale*, prezintă cercetările teoretice și experimentale în privința strategiilor adecvate de locomoție pentru escaladarea unor obstacole mai dificil de abordat. Sunt studiate două cazuri de obstacole particulare, cu complexitate sporită. Este vorba de obstacolul de tip scară dreaptă și de obstacolul de tip scară în spirală, obiective ale tezei stabilite inițial pentru posibile dezvoltări ulterioare de aplicații în sfera serviciilor.