



ACADEMIA ROMÂNĂ
INSTITUTUL DE MECANICA SOLIDELOR

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Contribuții în dezvoltarea sistemelor de control neuronal al mișcării roboților mobili autonomi

Conducător Științific:
Prof. Dr. Ing. Luige Vlădăreanu

Doctorand:
Ing. Ștefan Adrian Dumitru

București
2014

Mulțumiri

Doresc să mulțumesc domnului Profesor Dr. Ing. Luige Vlădăreanu pentru îndrumarea și susținerea acordată pe parcursul realizării și finalizării acestei teze.

Mulțumesc Prof. Florentin Smarandache, de la Universitatea din New Mexico - Gallup SUA, fondatorul logicii neutrosofice, pentru ajutorul acordat în dezvoltarea sistemelor neutrosofice de inferență.

Mulțumesc Prof. Hongnian Yu de la Universitatea Bournemouth UK, coordonator al proiectului FP7 IRSES, RABOT, "Real-time adaptive networked control of rescue robots" pentru colaborarea în publicarea de lucrări științifice.

Mulțumesc Prof. Tianhong Yan de la Universitatea Jiliang din China, Prof. Chenkun Qi de la Universitatea Jiao Tong Shanghai din China, Prof. Radu Ioan Munteanu, Prof. Adrian Munteanu, de la Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca, Prof. Mircea Boscoianu de la Academia Forțelor Aeriene Henri Coandă, Prof. Vladimir Balan, Prof. Ion Ion, Prof. Adrian Curaaj de la Universitatea Politehnica din București, Prof. Dr. Ing. Tudor Sireteanu, Cercet. Șt. Gr. II Emil Videa, Cercet. Șt. Gr. III Doina Marin de la Institutul de Mecanica Solidelor al Academiei Române, pentru colaborarea în publicarea de lucrări științifice.

Mulțumesc prietenilor și colegilor pentru sprijinul moral, și pentru încurajările acordate.

Mulțumesc părinților care m-au sprijinit atât moral, cât și financiar în realizarea modelului experimental și a tezei de doctorat.

Mulțumesc soției care m-a sprijinit pe toată perioada derulării stagiului de doctorat și care a avut încredere în mine și mi-a fost alături.

Ing. Ștefan Adrian Dumitru

Cuprins

1	Introducere	4
2	Stadiul actual al cercetărilor privind controlul neuronal al mișcării roboților mobili antropoizi autonomi	5
3	Elaborarea unor tehnici de inteligență artificială pentru controlul în poziție al roboților mobili autonomi	5
4	Elaborarea unor tehnici de inteligență artificială pentru navigarea roboților mobili autonomi	6
5	Cercetări experimentale asistate de calculator; simularea și validarea modelelor matematice elaborate	9
6	Contribuții originale	11
7	Concluzii	13
	Bibliografie Selectivă	15
	Anexe	20

1 Introducere

Robotica reprezintă în prezent unul din cele mai mari realizări ale omenirii și este cea mai mare încercare de a produce o ființă artificială capabilă să simtă și să transmită emoții, producătorii de roboți realizând în ultimii ani modele de serie extrem de complexe disponibile pentru publicul larg.

Roboții mobili autonomi au aplicații în diferite domenii cum ar fi industria nucleară, cercetări spațiale, aplicații în agricultură, aplicații de mentenanță, asistența oamenilor cu dizabilități, aplicații de detectare și recuperare a victimelor unor catastrofe/accidente sau aplicații militare.

În prezent sunt cercetate atât varianta roboților umanoizi (ATLAS - Boston Dynamics [27]), cât și cea a roboților ce imită animale sau orice altă formă (MorpHex MKII - Zenta Robotic Creations [28], BigDog, Cheetah - Boston Dynamics [27]).

Controlul unui robot mobil se bazează pe inteligența artificială, senzori avansați pentru percepția auditivă și vizuală a mediului, sisteme de fuziune a informației, vederea artificială, etc.

Rețelele neuronale reprezintă una din cele mai utilizate tehnici de calcul în controlul roboților [7]. Acestea sunt caracterizate de ansambluri de elemente de procesare simple, puternic interconectate ce operează în paralel, astfel încât să interacționeze cu mediul înconjurător asemănător creierelor biologice [8]. Asigurând convergența rapidă între semnalul de referință și cel țintă, rețelele neuronale pot fi utilizate cu succes atât pentru controlul unor structuri cinematice complexe, cât și pentru realizarea unor operațiuni complexe.

Scopul lucrării este de a îmbunătăți mișcarea roboților în prezența obstacolelor prin utilizarea unor tehnici inovative de detecție și ocolire a obstacolelor a căror implementare este realizată cu ajutorul rețetelor neuronale.

Teza de doctorat conține rezultate în totalitate originale ce vizează domeniul detecției și ocolirii obstacolelor în timpul navigării roboților în mediul de lucru. Importanța și corectitudinea cercetărilor realizate au fost validate prin expunerea lor în cadrul a numeroase manifestări științifice naționale și internaționale și prin publicarea în reviste științifice prestigioase.

Importanța națională și internațională a temei tezei de doctorat este susținută de colaborări cu universități din întreaga lume și de publicațiile în comun cu autori din țară și din străinătate, precum Prof. Hongnian Yu [119, 122] de la Universitatea Bournemouth din UK, Prof. Tianhong Yan [112] de la Universitatea Jiliang din China, Prof. Chenkun Qi [112, 131] de la Universitatea Jiao Tong Shanghai din China, Prof. Radu Ioan Munteanu, Prof. Adrian Munteanu [118, 123], de la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Prof. Mircea Boscoianu [113] de la Academia Forțelor Aeriene Henri Coandă, Prof. Vladimir Balan, Prof. Ion Ion, Prof. Adrian Curaj [19, 114] de la Universitatea Politehnică din București, Prof. Cercet. Șt. Gr. I dr. ing. Tudor Sireteanu, Cercet. Șt. Gr. II Emil Videa, Cercet. Șt. Gr. III Doina Marin [90, 117] de la Institutul de Mecanica Solidelor al Academiei Române.

De asemenea, începând cu anul 2013, s-a început cercetarea pe domeniul roboților de salvare în cadrul programului european FP7 IRSES, FP7-PEOPLE-2012_IRSES, "Real-time adaptive networked control of rescue robots - RABOT", cu doi parteneri din UK, Bournemouth University - care este și coordonatorul proiectului - și Staffordshire University, și trei parteneri din China, Shanghai University, Yanshan University și un Institut de Automatizări al Academiei de Științe Chineze. Directorul de proiect este Prof. Hongnian Yu de la Bournemouth University din UK, iar din partea Institutului de Mecanica Solidelor al Academiei Române este Profesorul Luige Vlădăreanu. Prin acest proiect, s-a început o colaborare strânsă între colectivele de cercetare ale partenerilor de proiect, cu rezultate comune deja publicate [119, 122]. În cadrul acestui proiect am participat ca membru al colectivului de cercetare de la Institutul de Mecanica Solidelor al Academiei Române.

Din 2014 am făcut parte din echipa de cercetare în cadrul proiectului "Platforma robot versatilă, inteligentă, portabilă cu sisteme de control în rețele adaptive pentru roboți de salvare - VIPRO" din programul național PNII, acceptat la finanțare pentru 2014-2016, director de proiect - Prof. Dr. Ing. Luige Vlădăreanu, având membri în echipa de cercetare profesori din UK, SUA și China.

De asemenea, sunt membru în echipa de cercetare implicată în propunerea unui proiect internațional, "Research on human multi-joint arm information based bio-robot for telerobotics" din programul japonez "Brain Circulation", coordonat de Tokyo University, cu partenerii: Bournemouth University (UK), Pascal Institute at the

French Institute for Advanced Mechanics (FR), Imperial College London (UK).

2 Stadiul actual al cercetărilor privind controlul neuronal al mișcării roboților mobili antropoizi autonomi

În acest capitol este prezentat stadiul actual al cercetărilor în domeniul roboților mobili autonomi a unor colective de cercetare din universități de renume raportat la cercetările efectuate în această teză de doctorat. Multitudinea de lucrări publicate în reviste de renume indexate BDI și ISI, demonstrează actualitatea și importanța domeniului de cercetare al roboților mobili autonomi [11, 25, 29–39, 42, 43, 78–82]. Studiile prezentate întăresc importanța cercetărilor abordate în această teză de doctorat și demonstrează comparativ contribuțiile aduse temei de cercetare.

Pentru a înțelege mai bine domeniul roboților mobili pășitori, și pentru a modela cât mai corect strategiile dezvoltate, s-au cercetat și problemele specifice ale structurii, cinematicii și dinamicii roboților mobili antropoizi autonomi [15, 16, 44, 45, 50–57, 61–64, 66, 68, 70, 71, 83, 84, 99]. Astfel, s-au pus în evidență câteva probleme legate de problemele ce apar în cadrul proiectării structurilor cinematice ale roboților mobili. De asemenea, probleme ale calculului cinematicii inverse reprezintă o sursă permanentă de eroare. Detectia și ocolirea obstacolelor reprezintă o componentă foarte importantă a roboților mobili autonomi, dar care ridică probleme legate de interpretarea datelor.

3 Elaborarea unor tehnici de inteligență artificială pentru controlul în poziție al roboților mobili autonomi

În acest capitol se propune o strategie de control în poziție care are la bază controlul modelului intern pentru implementarea unui control cu ajutorul rețelelor neuronale.

În cadrul acestei lucrări tehnica IMC a fost utilizată pentru controlul în poziție al unui robot pășitor biped, în care modelul direct realizează calculul cinematic direct, iar modelul invers realizează calculul cinematic invers. Prima variantă abordată implementează schema clasică de control IMC, în care semnalul de feedback este rezultatul comparării dintre modelul direct și robot. În cea de-a doua abordare (Fig. 1), controlul este reglat de două semnale de feedback, cel clasic și eroarea dintre modelul direct și referință, pentru a crește robustețea sistemului de control.

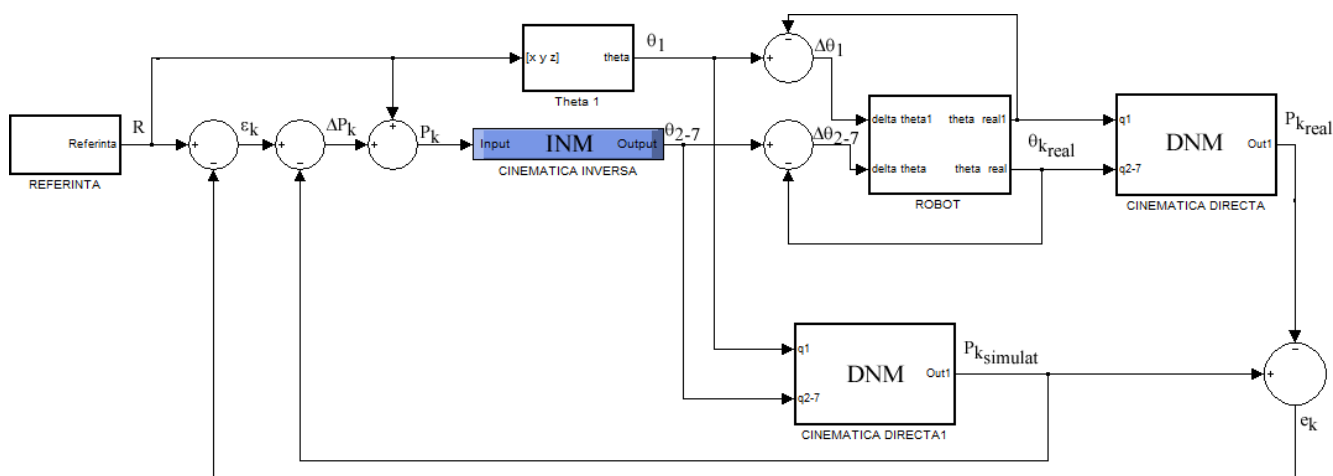


Fig. 1: Structura controlerului IMC - a doua abordare

Deoarece strategia propusă are ca scop controlul în poziție, este realizată o analiză cinematică a unei structuri de robot cu 12 grade de libertate în scopul dezvoltării unor rețele neuronale pentru calculul cinematicii directe, respectiv cinematicii inverse. Rețeaua neuronală pentru cinematica inversă realizează transformarea coordonatelor

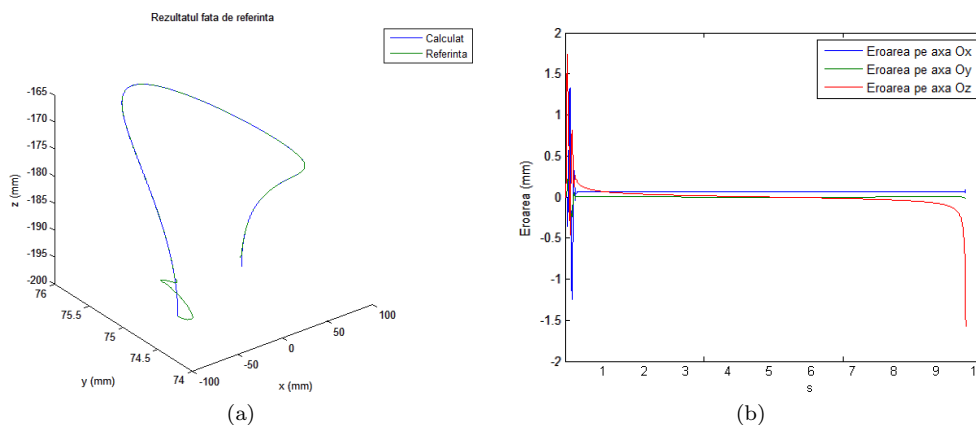


Fig. 2: Eroarea de poziționare în raport cu referința (a) în spațiu, (b) pe axa Ox , (c) pe axa Ox , (d) pe axa Oz , albastru = referința, verde = traiectoria urmată de robot

poziției de referință a tălpii în coordonate în spațiul articulațiilor pentru a putea fi transmise motoarelor, iar rețeaua neuronală pentru cinematica directă, utilizată pentru a prezice poziția end-effectorului, transformă comanda motoarelor în coordonatele aproximative ale poziției tălpii robotului. În cadrul analizei cinematice s-au propus mai multe rețele neuronale în vederea determinării arhitecturii optime pentru rezolvarea cinematicii inverse a unui robot pășitor cu 14 grade de libertate.

Rezultatele experimentale obținute aplicând controlul IMC au arătat robustețea strategiei de control. De asemenea, erorile obținute în timpul simulărilor au validat posibilitatea aplicării IMC pentru controlul în poziție al roboților mobili pășitori.

4 Elaborarea unor tehnici de inteligență artificială pentru navigarea roboților mobili autonomi

Planificarea traiectoriei reprezintă o etapă importantă în navigarea roboților mobili autonomi și determină modalitatea în care aceștia se pot mișca eficient, între două locații date. Tehnicile de planificare ale traiectoriei propuse în acest capitol se bazează în principal pe ce se detectează prin vederea artificială.

NeuroControlerul cu Analiza de Imagine

Prima tehnică de navigare propusă este Neurocontrolerul cu Analiză de Imagine ce utilizează metode neuronale aplicate captării video pentru navigarea în timp real a robotului într-un mediu cu obstacole.

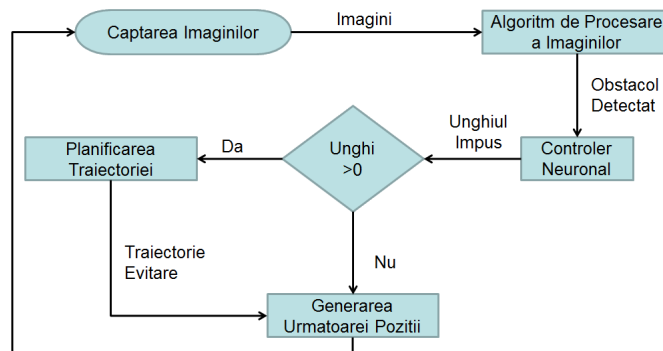


Fig. 3: Algoritm de control al robotului

Metoda este alcătuită din patru module (Fig. 3). Primul modul, Image processing algorithm, captează

și prelucrează imaginea captată în vederea obținerii datelor de intrare a rețelei neuronale din modulul Neural Controller. Acesta prelucrează datele primite, iar la ieșire furnizează unghiul de rotație pe care robotul trebuie să-l efectueze.

Modulul al treilea, Interpolare Besier, calculează abaterea de la vechea traiectorie astfel încât robotul să ocolească obstacolul întâlnit. Determinarea poziției următoare a pasului presupune aflarea coordonatelor punctului de sprijin necesar efectuării unui nou pas.

Cercetarile experimentale au fost realizate prin simularea unui robot într-un mediu virtual. Unul din experimentele virtuale este efectuat într-un mediu de lucru virtual în care robotul își va desfășura activitățile. În acest mediu robotul trebuie să atingă punctul țintă dat fără a se lovi de peretele existent în mediul de lucru. Traiectoria inițială este schimbată de fiecare data când robotul este prea aproape de perete.

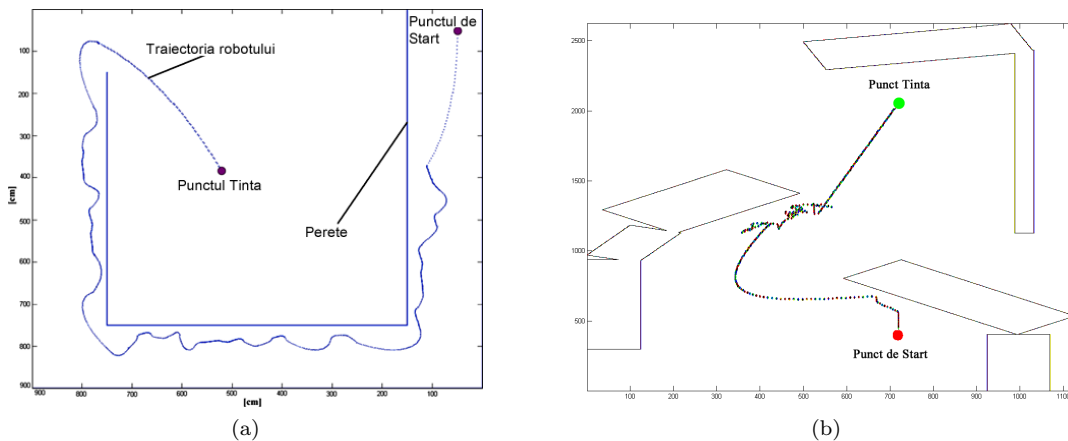


Fig. 4: Traiectoria urmată de robot pentru a atinge punctul țintă dat

În alt experiment virtual, robotul trebuie să ajungă în punctul țintă dat prin ocolirea obstacolelor. Traiectoria urmată de robot în timpul deplasării de la punctul de start la punctul țintă este schimbată pe măsură ce robotul se apropie de obstacolele din mediu, astfel încât aceasta să fie minimă.

Rezultatele obținute, prezentate în Figura 4, au evidențiat faptul că atunci când un obstacol este detectat, pot apărea situații în care robotul are o traiectorie haotică într-un perimetru restrâns datorită faptului că acesta nu este echipat și cu alți senzori în afară de camera video.

Metoda câmpului de potențial utilizând rețele neuro-fuzzy

Cea de-a doua strategie de navigare propusă are la bază metoda câmpului de potențial. Această strategie cartografiază mediul în timp ce robotul se deplasează, calculează forțele ce acționează asupra robotului utilizând rețele neuro-fuzzy.

Forța de atracție reprezintă atracția pe care punctul țintei îl exercită asupra robotului. Aceasta depinde de distanța dintre robot și țintă. Valoarea acestei forțe scade proporțional cu distanța dintre robot și țintă.

Forța de repulsie depinde în mod direct atât de distanța dintre robot și obstacol d , cât și de unghiul dintre direcția robotului și direcția spre obstacol α . Această forță crește invers proporțional cu distanța dintre robot și obstacolul analizat.

În lucrarea de față amplitudinea forței de repulsie se calculează utilizând o rețea neuro-fuzzy de tip Sugeno.

Variabilele de intrare care se definesc sunt:

- **Distanța** dintre robot și obstacol; acest observator ia valori în intervalul $[0, 1.5]$ $[m]$; pentru orice valoare mai mare decât 1.5 m potențialul asociat obstacolului este zero;
- **Unghiul** dintre vectorul de orientare al robotului și direcția către obstacolul analizat; acest observator ia valori în intervalul $[0, 180]$.

Aceste două variabile de intrare au fiecare 3 grade de apartenență: *Mic*, *Mediu*, *Mare*, iar pentru ieșire se definește variabila **repulsie** de tip singleton cu valori 3 funcții ce oferă valoarea forței de repulsie.

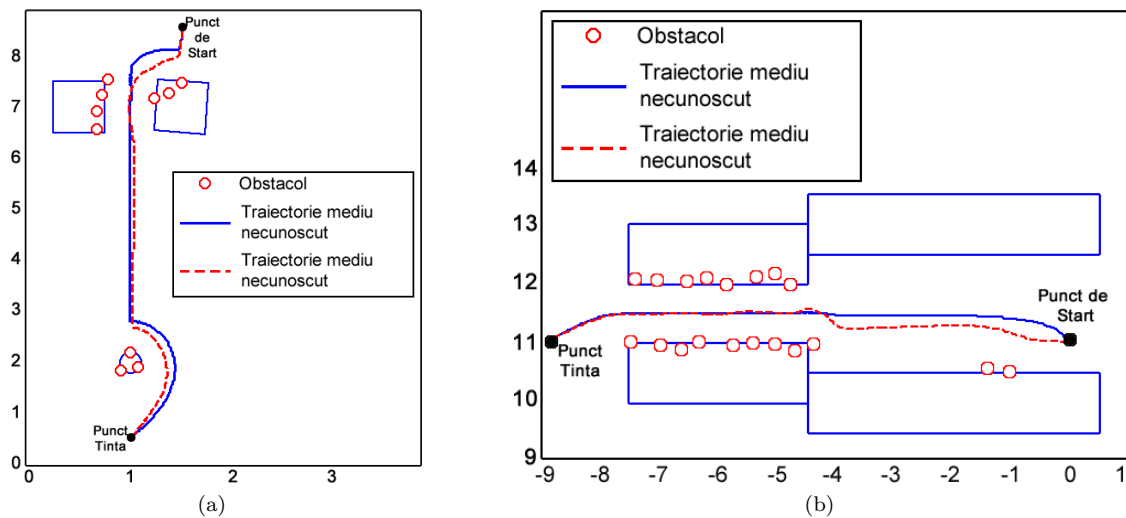


Fig. 5: Traiectoria urmată de robot pentru (a) scenariul în care robotul trebuie să ocolească trei obstacole, (b) scenariul în care robotul trebuie să traverseze un coridor.

Utilizând acest model, un obstacol aflat în față robotului are un potențial de repulsie mai mare deoarece are un risc mai mare de coliziune, în timp ce un obstacol aflat în spatele robotului are un potențial mai mic datorită riscului scăzut de coliziune.

Rezultatele experimentale au fost realizate prin simularea unui robot într-un mediu virtual. Cartografierea mediului realizată utilizând doar datele provenite de la o cameră și aplicând transformarea inversă de perspectivă s-a dovedit a fi utilă, eroarea de max 8 cm fiind suficient de bună pentru ca majoritatea roboților mobili să navigheze într-un mediu necunoscut. Navigarea utilizând strategia îmbunătățită a câmpului de potențial s-a dovedit a fi de o precizie ridicată, robotul reușind să atingă punctul țintă fără coliziuni.

Au fost implementate 3 scenarii, primul în care robotul trebuie să ocolească 3 obstacole, al doilea în care robotul trebuie să treacă printr-un coridor și al treilea când robotul este forțat să intre într-un punct de minim local pentru a găsi traiectoria de ieșire.

În cazul rezultatelor primelor două scenarii traiectoria urmată fără nici o informație prealabilă despre mediu este asemănătoare cu traiectoria urmată când robotul cunoaște harta mediului (Fig. 5). În cazul primului scenariu, robotul se apropie mai mult de obstacol deoarece detecția se realizează în interiorul razei potențialului de repulsie. În cazul coridorului, dacă robotul cunoaște harta, robotul se centrează pe centrul coridorului și nu este afectat de îngustarea acestuia. Dacă, însă robotul nu are nici o informație despre topologia mediului, acesta urmărește traiectoria cea mai scurtă pe care o modifică de fiecare dată când detectează pereții coridorului. Când coridorul se îngustează, traiectoria robotului este uniformă când harta este cunoscută și oscilează dacă nu se cunoaște harta. Cu toate acestea, oscilația nu deviază robotul pe o traiectorie de coliziune, se stabilizează, iar navigarea se execută în siguranță către punctul țintă. În cazul celui de-al treilea scenariu, robotul este forțat să intre într-un punct de minim local (Fig 6). Soluția utilizată este marcarea punctului de minim local ca fiind un obstacol, întoarcerea robotului pe aceeași traiectorie la un punct considerat sigur (de exemplu, un punct al traiectoriei cu potențial de repulsie nul) și reînceperea navigării către punctul țintă. Aceste marcaje sunt interpretate de către tehnica de navigare ca fiind obstacole astfel încât robotul este respins gradual din capcana minimului local.

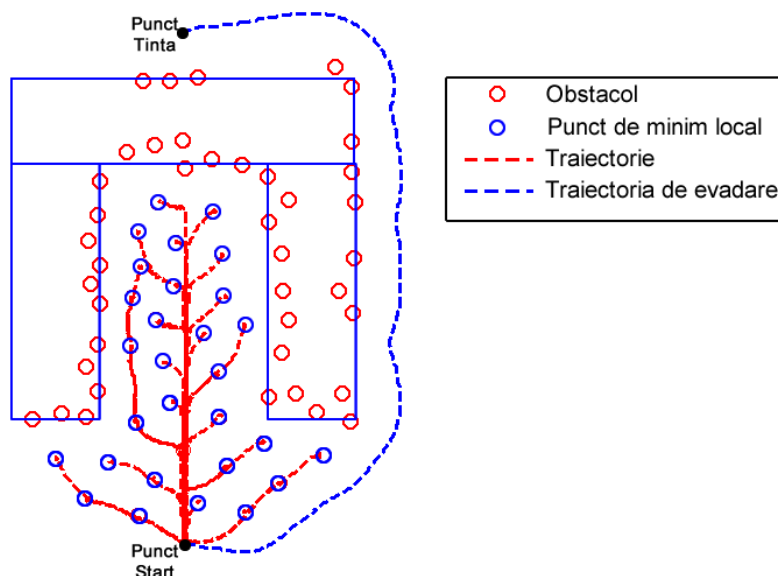


Fig. 6: Traiectoriile urmate de robot în încercarea de a evita punctul de minim local

5 Cercetări experimentale asistate de calculator; simularea și validarea modelelor matematice elaborate

Cercetarea privind tehnicile inteligente de control dezvoltate și prezentate în Capitolele 3 și 4 sunt extinse prin experimentări utilizând un robot mobil pășitor.

În cadrul cercetărilor doctorale s-a realizat un proiect 3D pentru un robot pășitor umanoid cu 20 de grade de libertate, pentru care s-a realizat proiectul CAD¹ utilizând Autodesk Inventor, analiza de stres cu element finit pentru determinarea punctelor slabe ale structurii proiectate și analiza dinamică pentru a determina cuplurile necesare acționării articulațiilor. În final, modelul CAD a stat la baza printării 3D a robotului în plastic ABS².

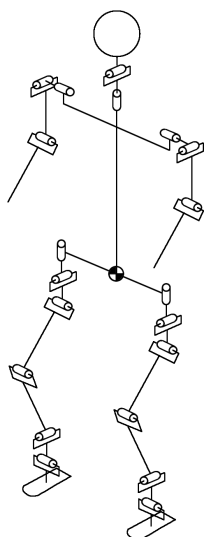


Fig. 7: Schema cinematică a modelului experimental

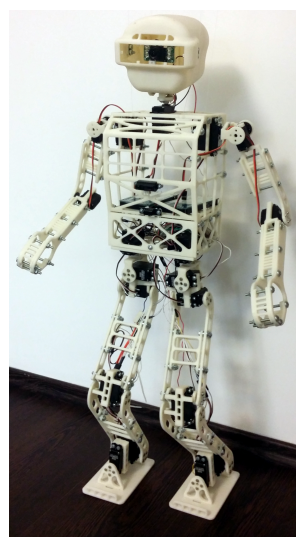


Fig. 8: Modelul Experimental

Controlul structurii mecanice are la bază controlul IMC în poziție prezentat în Capitolul 3, pentru care rezultatele simulării au arătat că este o metodă robustă de control în poziție.

Rezultatele experimentale au arătat ca cele mai mari erori obținute în timpul urmării traiectoriei de referință

¹CAD = Computer Aid Design = Proiectare Asistată de Calculator

²ABS = Acrilonitril-Butadien-Stiren

sunt de 2 mm și apar atunci când robotul ridică piciorul de la sol și se datorează faptului că motoarele pot fi comandate doar din grad în grad. Dar, având în vedere că eroarea medie este de aproximativ 0.4 mm traiectoria este urmărită suficient de bine pentru a nu destabiliza robotul.

În scopul realizării experimentelor, este necesară elaborarea unei tehnici de detecție a obstacolelor bazată pe vederea artificială. Având o cameră montată pe modelul experimental, se propune ca detecția obstacolelor să aibă la bază metoda fluxului optic [20, 77]. Pe baza detecției obstacolelor robotul poate să se deplaseze în mediu fără coliziuni și, de asemenea, poate cartografia mediul de lucru. În scopul îmbunătățirii gradului de detecție al metodelor de flux optic, se propune introducerea derivatelor Gateaux și implementarea fluxului optic utilizând rețele neuronale.

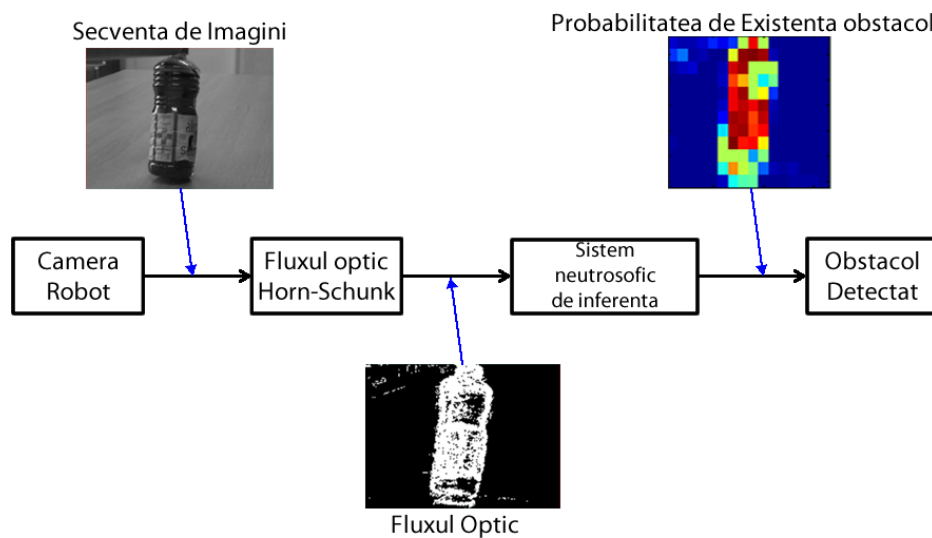


Fig. 9: Algoritmul propus

De asemenea, o metodă originală de implementare bazată pe logica neutrosifică, fondată de Prof. Florentin Smarandache, este propusă astfel încât robustețea tehnicii să crească, iar timpul de calcul să scadă (Fig. 9). Metoda propusă capturează imagini din mediu cu ajutorul unui sistem monocular montat pe robot și realizează fluxul optic utilizând metoda Horn-Schunk îmbunătățită cu derivate direcționale [19]. Deoarece fluxul optic poate avea zgomot puternic din pricina calității imaginilor captate, rezultatul este procesat pentru a putea fi introdus la intrarea unui sistem neutrosific de inferență. Sistemul de inferență analizează pe baza setului intern de reguli și determină dacă în există obstacol, dar și poziția acestora în imaginile captate.

Rezultatele experimentale au aratat că aplicând modelul matematic, respectiv cel neuronal, gradul de detecție este îmbunătățit datorită introducerii derivatelor Gateaux, dar timpul de calcul, de peste 30 de secunde, face aceste abordări să nu poată fi utilizate pentru controlul în timp real al roboților mobili. Aplicând logica neutrosifică, precizia de detecție a scăzut, dar abordarea poate fi aplicată cu succes și în condiții de zgomot puternic (Fig. 10). Mai mult decât atât, timpul de calcul este de sub 0.2 secunde.

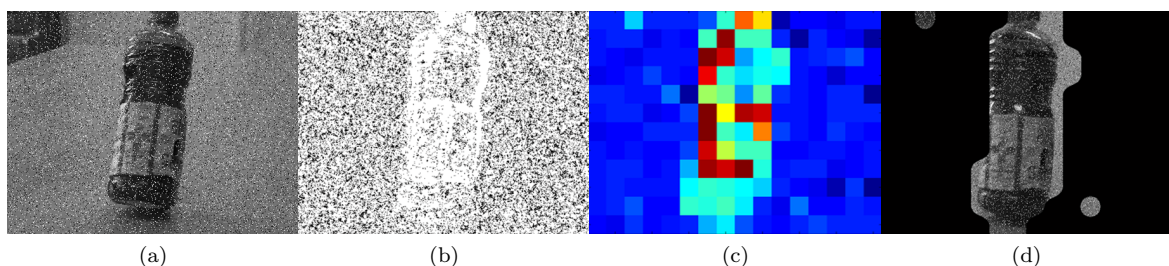


Fig. 10: (a) Imagine capturată cu zgomot, (b) Imaginea Fluxului Optic, (c) Probabilitatea de existență a obstacolului; (d) Zona detectată din (c) în raport cu imaginea captată (a)

6 Contribuții originale

Pe parcursul cercetărilor doctorale efectuate, descrise în această teză de doctorat, s-au obținut o serie de soluții originale în domeniul roboților mobili autonomi. Printre cele mai importante contribuții originale ale autorului se pot enumera:

1. S-a realizat un studiu comparativ, aprofundat asupra stadiului actual al cercetărilor, care a validat interesul global al domeniului de cercetare abordat deoarece acesta este obiectul de cercetare al marilor universități și centre de cercetare din întreaga lume;
2. Proiectarea, simularea și realizarea unui model experimental de robot pășitor umanoid;
3. Realizarea simulărilor dinamice în Autodesk Inventor pentru a determina cuplul necesar acționării articulațiilor;
4. S-au dezvoltat metodele de detecție a obstacolelor cu vederea artificială:
 - Introducerea derivatelor Gateaux în fluxul optic pentru a utiliza toată informația din vecinătatea considerată;
 - Îmbunătățirea detecției fluxului optic prin introducerea rețelelor neuronale;
 - Îmbunătățirea timpului de detecție aplicând sisteme de inferență neutrosofice, definite de teoria neutrosofică;
 - Determinarea prin transformarea inversă de perspectivă a distanței până la obstacolele întâlnite utilizând un sistem monocular de vedere artificială;
5. S-au realizat modelări și simulări ale roboților mobili utilizând mediul de lucru VMworld din Matlab, rezultând un mediu de testare a roboților mobili cu vedere monoculară.
6. S-au realizat o serie de experimente virtuale pentru:
 - Testarea contribuțiilor aduse în cadrul controlului structurii cinematice;
 - Testarea performanțelor de detecție a obstacolelor utilizând mediul virtual VMworld din Matlab;
 - Testarea performanțelor sistemelor neutrosofice de inferență;
 - Îmbunătățirea detecției obstacolelor a metodei fluxului optic utilizând rețelele neuronale;
 - Testarea riguroasă a calculului cinematicii inverse utilizând rețele neuronale;
 - Testarea riguroasă a sistemului de navigare într-un mediu necunoscut utilizând metoda câmpului de potențial;
7. S-au realizat experimente folosind camera video *Link Sprite JPEG Color Camera*, montată pe modelul experimental, pentru a demonstra comparativ performanțele obținute de tehnicile de detecție a obstacolelor dezvoltate;

Pe baza cercetărilor efectuate, autorul a elaborat, susținut și publicat 18 lucrări științifice în domeniul tezei dintre care 9 au fost publicate ca prim autor. Dintre aceste lucrări, una este în curs evaluare în vederea publicării în jurnalul *Advanced Robotics*, indexat ISI cu factor de impact 0.569, două sunt indexate ISI și acceptate la conferințele *ICMERA 2014*, respectiv *ROBOTICS 2014*, 6 lucrări sunt indexate BDI susținute la diferite conferințe internaționale, și 9 lucrări în conferințe organizate sub egida Academiei Române. Actualitatea și nivelul ridicat al cercetărilor dezvoltate în teză sunt dovedite prin publicarea în comun cu autori din țară și din străinătate precum Prof. Hongnian Yu [119, 122] de la Universitatea Bournemouth din UK, Prof. Tianhong Yan [112] de la Universitatea Jiliang din China, Prof. Chenkun Qi [112, 131] de la Universitatea Jiao Tong Shanghai din China, Prof. Radu Ioan Munteanu, Prof. Adrian Munteanu [118, 123], de la Universitatea Tehnica din Cluj-Napoca, Prof. Mircea Boscoianu [113] de la Academia Forțelor Aeriene Henri Coandă, Prof. Vladimir Balan, Prof. Ion Ion, Prof. Adrian Curaj [19, 114] de la Universitatea Politehnica din București, Prof. Cercet. Șt. Gr. I Dr. Ing. Tudor Sireteanu, Cercet. Șt. Gr. II Emil Videa, Cercet. Șt. Gr. III Doina Marin [90, 117] de la Institutul de Mecanica Solidelor al Academiei Române. Colaborările internaționale au condus la creșterea vizibilității activității de cercetare desfășurate și demonstrează interesul manifestat de cercetătorii din universități de renume pentru

cercetările dezvoltate în teza de doctorat. În continuare sunt prezentate toate publicațiile și proiectele de cercetare științifică naționale și internaționale la care am contribuit pe durata programului de pregătire doctorală.

Lucrări științifice:

1. **Ștefan A. DUMITRU**, Luige VLĂDĂREANU, Tianhong YAN, Chenkun QI, Dănuț A Bucur, "Mobile Robot Navigation Techniques Using Potențial Field Method în Unknown Environments", Acceptat spre publicare ICMERA 2014.
2. Dănuț Bucur, Luige Vladareanu, Hongnian Yu, Chenk Qi, **Ștefan Dumitru**, Hybrid force-position humanoid hand control in 3D virtual environment, Acceptat spre publicare ROBOTICS 2014.
3. **Ștefan Dumitru**, Simona Dumitru, "Obstacle detection based on optical flow and neutrosophic inference systems", în curs de evaluare, Advanced Robotics, indexare ISI, factor de impact 0.569.
4. **Ștefan A. Dumitru**, Dănuț A. Bucur, Vladimir Balan, Obstacle detection in robot vision using an improved optical flow algorithm, The V-th International Conference of Differential Geometry and Dynamical Systems, Bucharest, Romania, October 2011.
5. **Ștefan A. Dumitru**, D.A. Bucur, M. Boscoianu, L. Vladareanu, Intelligent exoskeleton structures for military applications, Latest Advances in Information Science, Circuits and Systems Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Evolutionary Computing (EC12), Iași, România, 13-15 iunie 2012, pp. 122-127, ISSN: 1790-5109, ISBN: 978-1-61804099-2.
6. Luige Vlădăreanu, Ion Ion, Adrian Curaj, **Ștefan A. Dumitru**, "Dynamic Stability Improvement Of Walking Robots", Proceedings of CLAWAR 2011: the 14th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Paris, France, 2011.
7. **Ștefan Adrian Dumitru**, Dan Bucur, Doina Marin, Methods and Algorithms for Motion Control of Walking Mobile Robot with Obstacle Avoidance, Proceedings of the European Computing Conference, Paris, France, April 2011, pp. 404-409, ISBN: 978-960-474-297-4
8. Dănuț A. Bucur, **Ștefan A. Dumitru**, Genetic Algorithm for Walking Robots Motion Optimization, Recent Researches în System Science, Corfu, Greece, July 2011, pp.364-369, ISBN: 978-1-61804-023-7
9. **Ștefan A. Dumitru**, Dănuț A. Bucur, Walking Robot Method Control Using Artificial Vision, Recent Researches in System Science, Corfu, Greece, July 2011, pp.370-375, ISBN: 978-1-61804-023-7
10. Videa E.M., Sireteanu T., Bucur D.A., **Dumitru Ștefan A.**, Designing a set of optimized Stockbridge type dampers for controlling the overhead line vibrations induced by the wind. Part two: Experimental optimization and characterization of some new models. The Annual Symposium of the Institute of Solid Mechanics 2014, Bucharest, Romania
11. **Dumitru Ștefan**, Luige Vladareanu, Radu I. Munteanu, Dănuț Bucur, "Obstacle avoidance method based on neutrosophic logic", The Annual Symposium of the Institute of Solid Mechanics 2013, Bucharest, Romania
12. Dănuț A. BUCUR, Hongnian YU, Luige VLĂDĂREANU, **Ștefan A. DUMITRU**, Genetic Algorithm For Walking Robots Power Optimization, The Annual Symposium of the Institute of Solid Mechanics 2011, Bucharest, Romania
13. Dănuț A. Bucur, **Ștefan A. Dumitru**, Luige Vladareanu, Inverse Kinematics For A 3-Dof Planar Manipulator Using Neural Networks, The Annual Symposium of the Institute of Solid Mechanics 2012, Bucharest, Romania
14. **Ștefan Dumitru**, Luige Vladareanu, Dan Bucur, Obstacle Avoidance Intelligent Robot Control Method Based On Optical Flow And Neural Networks, The Annual Symposium of the Institute of Solid Mechanics 2012, Bucharest, Romania
15. Bucur A. D., **Dumitru A. Ștefan**. Humanoid Hand Control în 3D Environment. The Annual Symposium of the Institute of Solid Mechanics 2014, Bucharest, Romania.
16. Dănuț A. BUCUR, Hongnian YU, Luige VLĂDĂREANU, **Ștefan A. DUMITRU**, Intelligent Control of Walking Mobile Robot with Obstacle Avoidances, The Annual Symposium of the Institute of Solid Mechanics

2011, Bucharest, Romania

17. Dănuț Bucur, **Ștefan Dumitru**, Luige Vladareanu, Radu Adrian Munteanu, Humanoid robotic hand modeling in virtual environment, The Annual Symposium of the Institute of Solid Mechanics 2013, Bucharest, Romania.
18. **Ștefan A. Dumitru**, Simona I. Dumitru, Distance estimation using monocular vision system based on inverse perspective, The Annual Symposium of the Institute of Solid Mechanics 2014, Bucharest, Romania.

Proiecte de cercetare:

1. Real-time adaptive networked control of rescue robots, acronim RABOT, 2012-2015, 7th Framework Program for Research, Project Marie Curie, International Research Staff Exchange Scheme (IRSES), coordonator: Staffordshire University, UK, parteneri: Institutul de Mecanica Solidelor al Academiei Române, Bournemouth University UK, Shanghai Jiao Tong University CN, Institute of Automation Chinese Academy of Sciences CN, Yanshan University CN, Prof. Hongnian Yu, UK - coordonator proiect, Prof. Luige Vlădăreanu coordonator IMSAR, **Ștefan Adrian Dumitru** -membru în proiectul FP7.
2. Platforma robot versatilă, inteligentă, portabilă cu sisteme de control în rețele adaptive pentru roboți de salvare- VIPRO din programul național PNII, acceptat la finanțare pentru 2014-2016, director de proiect - Prof. Dr. Ing. Luige Vlădăreanu, **Ștefan Adrian Dumitru** - membru în proiectul PNII.

7 Concluzii

Obiectivul principal al acestei teze de doctorat este îmbunătățirea mișcării roboților mobili autonomi în prezența obstacolelor, prin utilizarea unor tehnici inovative de detecție și ocolire a obstacolelor implementate cu ajutorul rețelelor neuronale.

În Capitolele 3 și 4 s-au prezentat tehnici inteligente de control și de navigare a roboților mobili pășitori. De asemenea, în Capitolul 5 s-au descris experimentările realizate pe un robot mobil pășitor autonom.

În primul rând, în Capitolul 3 s-a prezentat o tehnică neuronală pentru rezolvarea problemei cinematicii inverse. Calculul cinematic invers utilizând rețele neuronale scurtează mult timpul în care se obține soluția cinematică pentru o poziție dată a end-effectorului deoarece transformă o relație puternic neliniară într-una strict liniară. Cu alte cuvinte, calculul neuronal reprezintă o alternativă la soluțiile analitice sau numerice, deoarece aproximează poziția endeffectorului printr-o combinație liniară de unghiuri ale articulațiilor. Calculul neuronal al cinematicii inverse, deși are o precizie ridicată, după cum s-a observat în urma analizei rezultatelor obținute, are dezavantajul că necesită resurse foarte mari pentru antrenare. Un alt dezavantaj al rețelelor neuronale este intoleranța la soluții multiple, din acest motiv cinematica inversă a fost descompusă în două părți, fără ca precizia de calcul să fie afectată.

Controlul structurii este vital pentru orice tip de robot. Acest control poate fi în poziție, când robotul este controlat în funcție de poziția endeffectorului sau în forță, când robotul este controlat dinamic în funcție de cuplul necesar la endeffector. Strategia pe care s-a axat prezenta lucrare este metoda modelului neuronal intern ce implementează un control în poziție. Contribuția principală a acestei strategii este aplicarea metodei IMC pentru controlul în poziție al structurii modelului experimental atât la nivel de simulare, cât și la nivel experimental. Printre avantajele acestei metode se menționează eroarea scăzută și robustețea la perturbații datorită modelului intern direct al cărui scop este de a prezice mișcările efectuate de robot. Astfel traiectoria tălpii poate fi corectată mult mai bine.

O altă componentă importantă a roboților mobili autonomi este detecția de obstacole. Cercetările pe această direcție au pornit de la metodele fluxului optic Lukas Kanade [77] și Horn Schunk [20]. Acestea au fost îmbunătățite prin introducerea derivatelor direcționale Gateaux ce facilitează utilizarea completă a informației din vecinătatea pixelului. Astfel pixelul nu este analizat doar din prisma derivatelor spațiale pe direcțiile i și j , ci și pe diagonalele vecinătății. Analizând rezultatele, gradul de detecție al metodei a crescut, dar timpul de calcul nu este satisfăcător

pentru detecția obstacolelor în timp real.

S-a încercat o a doua abordare utilizând rețelele neuronale pentru a reduce timpul de calcul. Această abordare, prezentată în comparație cu modelarea matematică, realizează toate calculele necesare analizei unui pixel printr-o rețea neuronală. Datorită proprietății de generalizare a rețelelor neuronale, rezultatul obținut a fost mult îmbunătățit, dar timpul de calcul a crescut din pricina creșterii semnificative a numărului de operații ce trebuie efectuate.

Astfel, pentru a reduce timpul de calcul la o valoare suficient de mică pentru ca metoda să fi utilizată în timp real, s-a dezvoltat o metodă bazată pe logica neutrosifică. Această metodă a rezolvat problema timpului de calcul, dar precizia de detectare a scăzut. În urma aplicării metodei obstacolul real este inclus complet în proiecția sa detectată. Analizând rezultatele obținute se poate menționa că metoda are o precizie suficient de bună pentru ca un robot mobil să nu intre în coliziune cu obstacolul detectat.

Toate cele trei tehnici de detecție a obstacolelor au fost experimentate utilizând camera video montată pe robot. Deoarece metoda de detecție a obstacolelor bazată pe fluxul optic și pe logica neutrosifică are timpul de calcul redus, acesta poate fi implementat drept modul de detecție în timp real a obstacolelor în controlul unui robot mobil autonom.

Pentru navigarea roboților au fost elaborate și simulate două tehnici. Prima tehnică, neurocontrolerul cu analiză de imagini, analizează imaginea în care sunt evidențiate obstacole pentru a determina unghiul cu care robotul trebuie să devieze de la traiectoria actuală. Rezultatele au arătat că metoda nu este eficientă, prin urmare traiectoria obținută nu este optimă atât din punct de vedere al lungimii, dar nici dintr-un alt punct de vedere. De asemenea, robotul poate rămâne blocat într-o multitudine de situații.

Cea ce-a doua tehnică de navigare dezvoltată îmbunătățește metoda clasică a câmpului de potențial introducând o rețea neuro fuzzy pentru calculul forței de repulsie astfel încât un obstacol respinge robotul cu o forță ce depinde de poziția sa în raport cu robotul. Astfel, forța de repulsie pe care un obstacol aflat în fața robotului este mai mare datorită riscului ridicat de coliziune, în timp de forța de repulsie a unui obstacol aflat în spatele robotului este mai mică datorită riscului scăzut de coliziune. Un alt plus al strategiei câmpului de potențial este realizarea unei hărți a mediului pe baza rezultatelor obținute dintr-una din tehnicile de detectare a obstacolelor. Odată ce obstacolul este detectat în imaginea captată, poziția sa în spațiul 3D se poate afla aplicând transformarea inversă de perspectivă. În acest fel robotul realizează harta mediului pe care o poate interpreta în scopul navigării către punctul țintă. Analizând rezultatele simulate ale acestei strategii de navigare, se poate spune că robotul reușește să își construiască harta aproximativă a mediului și navighează fără coliziuni către punctul țintă în cele mai multe cazuri.

Concluzia generală a cercetărilor efectuate în cadrul acestei teze de doctorat, constă în faptul că aceasta contribuie semnificativ la cercetările în domeniul navigării roboților mobili autonomi în medii necunoscute. Detecția obstacolelor prin metoda fluxului optic îmbunătățită cu logica neutrosifică, împreună cu strategia de navigare prin metoda câmpului de potențial reprezintă contribuții majore în domeniul roboților mobili autonomi. Astfel, se poate afirma că scopul acestei teze a fost îndeplinit.

Rezultatele obținute permit studii viitoare atât în domeniul mișcării roboților mobili în prezența obstacolelor, cât și în domeniul vederii artificiale. De asemenea, tehnicile dezvoltate pot fi cu ușurință integrate în sisteme de comandă și control al roboților mobili, fiind foarte utile inginerilor și cercetătorilor din acest domeniu.

Bibliografie Selectivă

- [1] Lim, Hun-Ok, and Atsuo Takanishi. "Biped walking robots created at Waseda University: WL and WABIAN family." *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 365, no. 1850 (2007): 49-6
- [2] Doroftei, Ioan D., *Introducere in roboți pășitori*, Editura Cermi, Iași, 1998, ISBN:973-984-439-1.
- [7] Misra, Janardan, and Indranil Saha. "Artificial neural networks in hardware: A survey of two decades of progress." *Neurocomputing* 74, no. 1 (2010): 239-255.
- [8] Asensio, Jonathan, Wenjie Chen, and Masayoshi Tomizuka. "Robot Learning Control Based on Neural Network Prediction." In *ASME 2012 5th Annual Dynamic Systems and Control Conference joint with the JSME 2012 11th Motion and Vibration Conference*, pp. 917-925. American Society of Mechanical Engineers, 2012.
- [11] Vladareanu, L., Tont, G., Ion, I., Munteanu, M. S., Mitroi, D., *Walking Robots Dynamic Control Systems on an Uneven Terrain*, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 146-153, 2010.
- [15] Andreas Aristidou, Joan Lasenby, *Inverse Kinematics Solutions Using Conformal Geometric Algebra*, *Guide to Geometric Algebra in Practice*, DOI 10.1007/978-0-85729-811-9_3, Springer-Verlag London Limited 2011
- [16] Paul, R.P., *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1981.
- [19] Stefan A. Dumitru, Danut A. Bucur, Vladimir Balan, *Obstacle detection in robot vision using an improved optical flow algorithm*, *The V-th International Conference of Differential Geometry and Dynamical Systems*, Bucharest, Romania, October, 2011.
- [20] B.K.P. Horn, B.G. Schunk, *Determining optical flow*, *Artificial Intelligence*, 17 (1981), 185-204.
- [21] J.L. Barron, D.J. Fleet, S.S. Beauchemin, *Performance of optical flow techniques*, *International Journal of Computer Vision* 12(1):43-77, 1994.
- [22] John Immerkaer, *Fast noise variance estimation*, *Computer Vision and Image Understanding*, Volume 64, Issue 2, September 1996, Pages 300-302.
- [23] Jean J. Saade and Hassan B. Diab, *Defuzzification Methods and New Techniques for Fuzzy Controllers*, *Iranian Journal of Electrical And Computer Engineering*, vol. 3, no. 2, 2004.
- [24] Vukobratovic, M., Borovac, B., Surla, D., Stokic, D. (1990). *Biped Locomotion-Dynamics, Stability, Control and Application*. Springer-Verlag.
- [25] Kim, D., Seo, S.-J., Park, G.-T. (2005). *Zero-moment point trajectory modelling of a biped walking robot using an adaptive neurofuzzy system*. *IEEE Proceedings - Control Theory and Applications* 152(4), 411426.
- [27] <http://www.bostondynamics.com/robot>
- [28] <http://zentasrobots.com/2014/03/17/morphex-mkii/>
- [29] Poramate Manoonpong, Florentin Worgotter, Pudit Laksanachoen, "Biologically inspired modular neural control for a leg-wheel hybrid robot", *Advances in Robotics Research* Volume 1, Number 1, January 2014, pages 101-126, DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/arr.2014.1.1.101>
- [30] R. Batllori, C.B. Laramee, W. Land, J.D. Schaffer, "Evolving spiking neural networks for robot control", *Procedia Computer Science*, Volume 6, 2011, Pages 329334, DOI: 10.1016/j.procs.2011.08.060
- [31] Johannes Schröder-Schetelig, Poramate Manoonpong, Florentin Wrgtter, "Using efference copy and a forward internal model for adaptive biped walking", *Autonomous Robots*, November 2010, Volume 29, Issue 3-4, pp 357-366, DOI:10.1007/s10514-010-9199-7
- [32] Florentin Smarandache, M. Khoshnevisan, *Fuzzy Logic, Neutrosophic Logic, and Applications*, *BISC FLINT-CIBI International Joint Workshop on Soft Computing for Internet and Bioinformatics*, Berkeley, California, USA, 2003.
- [33] F.Smarandache, L.Vladareanu, *Applications of Neutrosophic Logic to Robotics - An Introduction*, *The 2011 IEEE International Conference on Granular Computing Kaohsiung, Taiwan*, Nov. 8-10, 2011, pp. 607-612, ISBN 978-1-4577-0370-6, IEEE Catalog Number: CFP11GRC-PRT.
- [34] Florentin Smarandache, *A Unifying Field in Logics: Neutrosophic Field, Multiple-Valued Logic / An International Journal*, Vol. 8, No. 3, 385-438, June 2002
- [35] Alexandru Gal, Luige Vladareanu, Hongnian Yu, *Applications of Neutrosophic Logic Approaches in RABOT Real Time Control*, *SISOM 2012 and Session of the Commission of Acoustics*, Bucharest 25-26 May 2013

- [36] Florentin Smarandache, Neutrosophy : neutrosophic probability, set, and logic ; analytic synthesis & synthetic analysis, Gallup, NM : American Research Press, 1998. - 105 p., ISBN 1-87958-563-4.
- [37] Editori Florentin Smarandache și Jean Dezert, Advances and Applications of DSMT for Information Fusion, Editura: American Research Press, Rehoboth, 2004, ISBN: 1-931233-82-9.
- [38] N. Nirmal Singh, Avishek Chatterjee, Amitava Chatterjee, Anjan Rakshit, "A two-layered subgoal based mobile robot navigation algorithm with vision system and IR sensors", Measurement, Volume 44, Issue 4, May 2011, Pages 620641, DOI: 10.1016/j.measurement.2010.12.002
- [39] Naoya Ohnishi, Atsushi Imiya, "Independent component analysis of optical flow for robot navigation", Neurocomputing, Volume 71, Issues 1012, June 2008, Pages 21402163, DOI: 10.1016/j.neucom.2007.09.015
- [40] Danica Janglova, "Neural Networks in Mobile Robot Motion", International Journal of Advanced Robotic Systems, pp. 15-22, Volume 1 Number 1 (2004), ISSN 1729-8806.
- [42] Genci Capi, Hideki Toda, "Evolution of Neural Controllers for Robot Navigation in Human Environments", Journal of Computer Science 6 (8): 837-843, 2010, ISSN 1549-3636.
- [43] R. Abiyev, D. Ibrahim, B. Erin, "Navigation of mobile robots in the presence of obstacles", Advances in Engineering Software, Volume 41, Issues 1011, October/November 2010, Pages 11791186.
- [44] S. Roland, Introduction to autonomous mobile robots, Intelligent Robotics and Autonomous Agents series, The MIT Press, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 02142, ISBN 0-262-01535-8.
- [45] M.H. Raibert, H. Brown, M. Chepponis, E. Hastings, J. Koechling, K.N. Murphy, S.S. Murthy, A. Stentz, "Dynamically Stable Legged Locomotion", Progress Report: October 1982 - October 1983, Robotics Institute of Carnegie Mellon University.
- [48] <http://asimo.honda.com/news/>
- [50] C. Queiroz, N. Goncalves, P. Menezes, "A Study on Static Gaits for a Four Legged Robot", International Conference CONTROL'2000, 2000, Cambridge, UK
- [51] L.-C. T. Wang and C. C. Chen, A combined optimization method for solving the inverse kinematics problem of mechanical manipulators, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 7 (1991), pp. 489-499.
- [52] D. E. Whitney, Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses, IEEE Transactions on Man-Machine Systems, 10 (1969), pp. 47-53
- [53] A. Balestrino, G. De Maria, and L. Sciavicco, Robust control of robotic manipulators, in Proceedings of the 9th IFAC World Congress, Vol. 5, 1984, pp. 2435-2440.
- [54] W. A. Wolovich and H. Elliot, A computational technique for inverse kinematics, in Proc. 23rd IEEE Conference on Decision and Control, 1984, pp. 1359-1363.
- [55] C. W. Wampler, Manipulator inverse kinematic solutions based on vector formulations and damped least squares methods, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 16 (1986), pp. 93-101
- [56] Y. Nakamura and H. Hanafusa, Inverse kinematics solutions with singularity robustness for robot manipulator control, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 108 (1986), pp. 163-171.
- [57] J. Zhao and N. I. Badler, Inverse kinematics positioning using nonlinear programming for highly articulated figures, ACM Transactions on Graphics, 13 (1994), pp. 313-336.
- [58] Deo, A.S., Walker, I.D., Adaptive non-linear least squares for inverse kinematics, in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1993, pp. 186-193
- [61] E. Oyama, N. Y. Chong, A. Agah, T. Maeda, and S. Tachi, Inverse kinematics learning by modular architecture neural networks with performance prediction networks, in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2001, pp. 1006-1012.
- [62] A. Ramdane-Cherif, B. Daachi, A. Benallegue, and N. Levy, Kinematic inversion, in Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2002, pp. 1904-1909
- [63] A. D'Souza, S. Vijayakumar, and S. Schaal, Learning inverse kinematics, in Proc. IEEE IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol. 1, 2001, pp. 298-303.
- [64] R. Grzeszczuk, D. Terzopoulos, and G. Hinton, NeuroAnimator: Fast neural network emulation and control of physics-based models, in Proc. ACM SIGGRAPH'98, New York, 1998, ACM Press, pp. 9-20.
- [66] G. Tevatia and S. Schaal, Inverse kinematics for humanoid robots, in Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 1, 2000, pp. 294-299

- [67] E.R. Davies. Laws texture energy in texture . In *Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities* 2nd Edition . Academic Press, San Diego, 1997
- [68] E.Olson, " A Primer on Odometry and Motor Control", December 2004.
- [69] <http://www.mathworks.com/hardware-support/arduino-simulink.html>
- [70] Ding Fu-guang; Jiao Peng; Bian Xin-qian; Wang Hong-jian, AUV local path planning based on virtual potential field, *Mechatronics and Automation*, 2005 IEEE International Conference, Vol.4, Iss., 2005 Pages:1711-1716 Vol. 4
- [71] Gregory Dudek and Michael Jenkin, *Computational principles of mobile robotics*, Cambridge University Press, Cambridge, 2000, ISBN: 0-521-56021-7.
- [72] Lisboa, P. J. G, Edisbury, B., Vellido, A., *Business Applications of Neural Networks*, World Scientific, Singapore, USA, UK, (ISBN 981-02-4089-9).
- [73] Vizitiu, Constantin, *Algoritmi genetici și rețele neuronale : Teorie și aplicații*, Editura Academiei Tehnice Militare, Bucuresti, 2004.
- [75] Lee, W. S., Anderson, B. D. O., Kosut, R. L., and Mareels, I. M. Y., A new approach to adaptive robust control, *Int. J. Adaptive Control and Signal Processing*, 7, No. 3, pp.183-211.
- [77] B.D. Lucas and T. Kanade, An iterative image registration technique with an application to stereo Vision, *DARPA Image Understanding Workshop* (1981) 121-130.
- [78] H. Wang, F. Smarandache, Y.Q. Zhang, R. Sunderraman, *Interval Neutrosophic Sets and Logic: Theory and Applications in Computing*, HEXIS Neutrosophic Book Series, No.5, 2005.
- [79] N. Vandapel, J. Kuffner, O. Amidi, Planning 3-D path networks in unstructured environments, *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.4624-4629, 2005.
- [80] Tovar, et al., Planning exploration strategies for simultaneous localization and mapping, *Robotics and Autonomous Systems*, vol.54, no.4, pp.314-331, 2006.
- [81] Luo, R. and B. Hong, An adaptive algorithm for localization in highly symmetric environments, *International Journal of Innovative Computing, Information & Control*, vol.1, no.2, pp.167-179, 2005.
- [82] Su, L., Z. Cao, S. Wang and M. Tan, A real-time on-line method for exploring unknown environment with multiple robots, *High Technology Letters*, no.11, pp.56-60, 2003.
- [83] Francisco Bonin-Font, Alberto Ortiz and Gabriel Oliver (2010). A Visual Navigation Strategy Based on Inverse Perspective Transformation, *Robot Vision*, Ales Ude (Ed.), ISBN: 978-953-307-077-3, InTech, DOI: 10.5772/9309.
- [84] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, pp. 175, 2000.
- [85] Luige Vladareanu, Ion Ion, Lucian M. Velea, Daniel Mitroi, and Alexandru Gal. "The Real Time Control of Modular Walking Robot Stability." in *Proceedings of the 8th International Conference on Applications of Electrical Engineering (AEE09)*, Houston, USA, pp. 179-186. 2009.
- [87] Ibrahim Kaya, IMC based automatic tuning method for PID controllers in a Smith predictor configuration, *Computers & Chemical Engineering*, Volume 28, Issue 3, 15 March 2004, Pages 281290, DOI: 10.1016/j.compchemeng.2003.01.001
- [88] Dazi Li, Fanyou Zeng, Qibing Jin, Lideng Pan, Applications of an IMC based PID Controller tuning strategy in atmospheric and vacuum distillation units, *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, Volume 10, Issue 5, October 2009, Pages 27292739, DOI: 10.1016/j.nonrwa.2008.08.013
- [89] Tien-Li Chia, Irving Lefkowitz, Internal model-based control for integrating processes, *ISA Transactions*, Volume 49, Issue 4, October 2010, Pages 519527, DOI: 10.1016/j.isatra.2010.03.012
- [90] Stefan Adrian Dumitru, Dan Bucur, Doina Marin, Methods and algorithms for motion control of walking mobile robot with obstacle avoidance, *Proceedings of the European Computing Conference (ECC '11)*, ISBN: 978-960-474-297-4, Paris, 2011.
- [92] Bloemen Bert, *Study and implementation of potential field algorithms for autonomous mobile robot navigation*, Hoboken KdG.IWT, 2005.
- [93] Palm, R.; Bouguerra, A, "Market-based algorithms and fuzzy methods for the navigation of mobile robots," *Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, 2012 IEEE International Conference on , pp.1,8, 10-15 June 2012,doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2012.6251228

- [94] M.H. Mabrouk, C.R. McInnes, Solving the potential field local minimum problem using internal agent states, *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 56, Issue 12, 31 December 2008, Pages 1050-1060, ISSN 0921-8890, <http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2008.09.006>.
- [96] Luis Garrote, Cristiano Prenebida, Marco Silva and Urbano Nunes (2014). An RRT-based Navigation Approach for Mobile Robots and Automated Vehicles. In: *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Industrial Informatics, INDIN 2014, Brasil*.
- [97] Ishii, I; Taniguchi, T.; Yamamoto, K.; Takaki, T., High-Frame-Rate Optical Flow System, *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on* , vol.22, no.1, pp.105,112, Jan. 2012, doi: 10.1109/TCSVT.2011.2158340
- [98] Ishii, Idaku, et al. "1000-fps real-time optical flow detection system." *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. Vol. 7538. 2010.
- [99] Simon Fojtu, Michal Havlena, and Tomas Pajdla, Nao Robot Localization and Navigation Using Fusion of Odometry and Visual Sensor Data, *ICIRA 2012, Part II, LNAI 7507*, pp. 427438, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012
- [100] Tanara Masahiro, Onishi Shintaro, Detection of Flat Ground Area by Single Camera on Mobile Vehicles, *Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS), 2011 International Conference on*, pp. 403-408, 11-13 Aug. 2011.
- [101] Kita, N.; Kanehiro, F.; Morisawa, M.; Kaneko, K., Obstacle detection for a bipedal walking robot by a fisheye stereo, *System Integration (SII), 2013 IEEE/SICE International Symposium on* , pp.119,125, 15-17 Dec. 2013, doi: 10.1109/SII.2013.6776672
- [102] Garreau, Alexandre, Cornelia Cuisin, and Boualem Hamichi. "Telecom & Energy Supplying System for robots in nuclear environment." In *Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR), 2013 IEEE International Symposium on*, pp. 1-4. IEEE, 2013.
- [103] Kashiwazaki, Koshi, Naoaki Yonezawa, Mitsuru Endo, Kazuhiro Kosuge, Yusuke Sugahara, Yasuhisa Hirata, Takashi Kanbayashi, Koki Suzuki, Kazunori Murakami, and Kenichi Nakamura. "A car transportation system using multiple mobile robots: iCART II." In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 4593-4600. IEEE, 2011.
- [104] Takahashi, Masaki, Toshiki Moriguchi, Shoji Tanaka, Hirofumi Namikawa, Hideo Shitamoto, Tsuyoshi Nakano, Yuichirou Minato, Takashi Ihama, and Takahiko Murayama. "Development of a Mobile Robot for Transport Application in Hospital." *Journal ref: Journal of Robotics and Mechatronics* 24, no. 6 (2012): 1046-1053.
- [105] Xiang, Jingyu, Yuichi Tazaki, Shinkichi Inagaki, and Tatsuya Suzuki. "Autonomous VariableResolution Map Building for Mobile Robots in Unknown Environments." *Electrical Engineering in Japan* 186, no. 4 (2014): 59-69.
- [108] Ivan Martynov, Joni-Kristian Kamarainen, Lasse Lensu, Projector Calibration by Inverse Camera Calibration, *Proceeding of 17th Scandinavian Conference, SCIA 2011, Ystad, Sweden, May 2011*, pp 536-544, DOI: 10.1007/978-3-642-21227-7_50
- [111] Yu Cao, Ying Feng, Yun-tao Yang, Yun-jin Chen, Bing Lei, Li-shuang Zhao, Monocular visual odometry based on inverse perspective mapping, *Proc. SPIE 8194, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011: Advances in Imaging Detectors and Applications*, 819418 (August 18, 2011); doi:10.1117/12.900010
- [112] Stefan A. DUMITRU, Luige VLADAREANU, Tianhong YAN, Chenkun QI, Danut A Bucur, "Mobile Robot Navigation Techniques Using Potential Field Method in Unknown Environments", *Acceptat spre publicare ICMERA 2014*
- [113] St.A.Dumitru, D.A.Bucur, M.Boscoianu, L.Vladareanu, Intelligent exoskeleton structures for military applications, *Latest Advances in Information Science, Circuits and Systems Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on Evolutionary Computing (EC12), Iai, Romnia, 13-15 iunie 2012*, pp. 122-127, ISSN: 1790-5109, ISBN: 978-1-61804099-2.

- [114] Luige Vladareanu, Ion Ion, Adrian Curaj, Stefan A. Dumitru, Dynamic Stability Improvement Of Walking Robots, Proceedings of CLAWAR 2011: the 14th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, Paris, France, 2011
- [117] Videa E.M., Sireteanu T., Bucur D.A., Dumitru St.A., Designing a set of optimized Stockbridge type dampers for controlling the overhead line vibrations induced by the wind. Part two: Experimental optimization and characterization of some new models. The Annual Symposium of the Institute of Solid Mechanics 2014, Bucharest, Romania.
- [118] Dumitru Stefan, Luige Vladareanu, Radu I. Munteanu, Danut Bucur, Obstacle avoidance method based on neutrosophic logic, The Annual Symposium of the Institute of Solid Mechanics 2013, Bucharest, Romania.
- [119] Danut A. BUCUR, Hongnian YU, Luige VLADAREANU, Stefan A. DUMITRU, Genetic Algorithm For Walking Robots Power Optimization, The Annual Symposium of the Institute of Solid Mechanics 2011, Bucharest, Romania.
- [122] Danut A. BUCUR, Hongnian YU, Luige VLADAREANU, Stefan A. DUMITRU, Intelligent Control of Walking Mobile Robot with Obstacle Avoidances, The Annual Symposium of the Institute of Solid Mechanics 2011, Bucharest, Romania
- [123] Danut Bucur, Stefan Dumitru, Luige Vladareanu, Radu Adrian Munteanu, Humanoid robotic hand modeling in virtual environment, The Annual Symposium of the Institute of Solid Mechanics 2013, Bucharest, Romania.
- [124] Stefan A. Dumitru, Simona I. Dumitru, Distance estimation using monocular vision system based on inverse perspective, The Annual Symposium of the Institute of Solid Mechanics 2014, Bucharest, Romania.
- [128] Rivera, Daniel E. "Internal model control: a comprehensive view." Arizona State University (1999).
- [130] Buntine, Wray L., and Andreas S. Weigend. "Bayesian back-propagation." *Complex systems* 5, no. 6 (1991): 603-643.
- [131] Danut Bucur, Luige Vladareanu, Hongnian Yu, Chenk Qi, **Stefan Dumitru**, Hybrid force-position humanoid hand control in 3d virtual environment, Robotics 2014, Acceptat spre publicare ROBOTICS 2014.
- [132] L.Vladareanu, A.Curaj, R.I.Munteanu, Complex Walking Robot Kinematics Analysis And Plc Multi-Tasking Control, *Revue Roumaine des Sciences Techniques Serie Electrotechnique et Energetique*, 2011, 10 pag., ISSN 0035-4066.
- [133] Victor Vladareanu, Gabriela Tont, Luige Vladareanu, Florentin Smarandache, , The navigation of mobile robots in non-stationary and non-structured environments, Inderscience Publishers, *Int. J. Advanced Mechatronic Systems*, Vol. 5, No. 4, 2013, pg.232- 243, ISSN online: 1756-8420, ISSN print: 1756-8412, ERA_ID 41210, IJAMechS is listed in: Excellence in Research for Australia (ERA): Journal list 2012 , Scopus (Elsevier)
- [134] Vladareanu L., Tont G., Vladareanu V., Smarandache F., Capitanu L., The Navigation Mobile Robot Systems Using Bayesian Approach through the Virtual Projection Method, *International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS 2012)*, Tokyo, Japan, , ISBN 978-1-4577-1690-10, doi by IEEE Conference, 2012, pp.228-233.
- [135] Y.Liu, H.Yu, L.Vladareanu, S.Cang, F.Gao, Trajectory Planning of a Pendulum-Driven Underactuated Cart, *Revue Roumaine des Sciences Techniques Serie de Mecanique Appliquee* 56(3), 2011, ISSN 0035-4074.
- [136] C.Secara, L.Vladareanu, Iterative strategies for obstacle avoidance of a redundant manipulator, *Transactions on Mathematics*, 9, 3, pp. 211-221, 2010, ISSN: 1109-2769.
- [137] Ion Ion, Luige Vladareanu, Ion Simionescu, Aurelian Vasile, The Structure of Modular Walking Robot MERO Displacement Systems, Support of the Heavy Load Transportation, *Transactions on Systems and Control*, Issue 1, Vol. 4, 2009, pg. 35-44, ISSN: 1991-8763, BDI Journals - INSPEC
- [138] C.Secara, L.Vladareanu, Iterative genetic algorithm based strategy for obstacles avoidance of a redundant manipulator, *Recent Advances in Applied Mathematics Proceedings of the American Conference on Applied Mathematics*, Harvard University, Cambridge, USA, January 27-29, 2010, pp. 361-366, ISBN: 978-960-474-150-2, ISSN: 1790-2769.

Anexe

Anexa A: Piese Componente Robot

Anexa prezintă tabelul cu piesele componente ale modelului experimental împreună cu masa și volumul acestora.

Anexa B: Cinematica directă a unui picior al Modelului Experimental

În această Anexa este prezentat modul de calcul al cinematicii directe pentru schema cinematică pentru un picior al modelului experimental.

Anexa C: Grafice Cuplu Necesar în articulațiile robotului

Anexa prezintă graficele cuplurilor necesare pentru a acționa articulațiile modelului experimental.

Anexa D: Detalierea blocurilor schemei de comandă și control

Anexa prezintă principalele blocuri din schema de control a modelului experimental realizat în Matlab Simulink.