



U.P.B.

T E Z A D E A B I L I T A R E

Prof.univ.dr.ing.Adrian Olaru

Increasing 3D positioning accuracy by applying its own matrix-vector methods and neural networks in forward and inverse kinematics technique, inverse and direct dynamic behavior, as well as pseudo - inverse matrix Jacobian and intelligent dampers in robotics

Cresterea preciziei de pozitionare 3D prin aplicarea propriilor metode matricial- vectoriale si a retelelor neuronale in tehnica cinematicii directe si inverse, comportarii dinamice directe si inverse, precum si a matricilor pseudo-inverse Jacobian si a amortizoarelor inteligente in robotica.

R E Z U M A T

BUCURESTI, MAI 2016

Content

Scientific and professional activity

1. Generalities on modern methods of optimizing 3D precision in robotics
2. Optimizing the dynamic behavior in robotics by using the intelligent dampers
3. Assisted research of the neural network parameters
4. Some methods of the inverse kinematics in robotics
5. Proper method for increasing the 3D accuracy by using the Pseudo-Inverse Jacobian Matrix Method (PIJMM) coupled with Bipolar Sigmoid Hyperbolic Tangent Neural Network with Time Delay and Recurrent Link (BSHTNN-TDRL)
6. Case study of the multi robots application by using the proper method to optimize of the 3D space trajectory
7. Conclusion and future work

Cuprins

Activitatea stiintifica si profesionala

1. Generalitati privind metode moderne de optimizare a preciziei 3D in robotica
2. Optimizarea comportarii dinamice in robotica prin utilizarea amortizoarelor inteligente
3. Cercetarea asistata a parametrilor retelelor neuronale
4. Metode actuale in domeniul cinematicii inverse in robotica
5. Metoda proprie pentru cresterea preciziei spatiale prin utilizarea Metodei Matriciale Jacobiene Pseudo- Inverse (PIJMM) cuplata cu retea neurala proprie Bipolar Sigmoida Hyperbolic Tangent cu Intarziere temporala si legaturi recurente (BSHTNN-TDRL)
6. Studiu de caz pentru o aplicatie multi robot prin utilizarea propriei metode pentru optimizarea trajectoriei spatiale
7. Concluzii si directii viitoare de cercetare

REZUMAT

Teza de abilitare cuprinde o trecere în revistă a activității științifice și profesionale a autorului și cele mai importante realizări științifice în domeniul *Roboticii*, după susținerea tezei de doctorat, precum și activitatea de cercetare, modelare și simulare asistată, desfășurată personal precum și cu alți cercetători, printre care și peste 6 studenți doctoranzi, care au finalizat tezele lor în perioada 2000-2015. Domeniile de interes științific au vizat în principal optimizarea comportării dinamice a roboților industriali prin aplicarea metodelor moderne de analiză și control, precum și a unor dispozitive și algoritmi specifici care să asigure controlul vibrațiilor, introducerea acestora într-un domeniu impus, creșterea preciziei de poziționare spațială. Au fost abordate împreună cu masteranzi și doctoranzi teme specifice de cercetare care au cuprins utilizarea rețelelor neuronale, a amortizoarelor inteligente, a cercetării și simulării cu ajutorul instrumentației virtuale LabVIEW, precum și a schemelor inteligente de control. Prin abordarea multidisciplinară a optimizării comportării dinamice a roboților s-a reușit realizarea unor algoritmi proprii de control cu precizia deplasării în cuple de peste 0.001mm prin utilizarea matricilor pseudo inverse Jacobiene cuplate cu rețele neuronale proprii. Recentele cercetări în domeniu au fost cuprinse în prezenta teză de abilitare și structurate în 7 capitole, fără însă a avea pretenția cuprinderii întregii problematice propuse și realizate pe parcursul întregii activități de cercetare de-a lungul a 26 de ani. Multe alte abordări de interes din acest domeniu foarte vast au fost cuprinse în capitolele de concluzii și direcții ulterioare de cercetare multidisciplinară. Prin cercetarea efectuată au fost create noi concepte, noi relații matematice și noi algoritmi proprii de control, care să asigure optimizarea deplasării mâinii mecanice după traiectorii spațiale. Au fost create pentru cinematica roboților, relațiile matematice matriciale- vectoriale pentru determinarea pozițiilor funcție de coordonatele bazei robotului, față de coordonatele locale și coordonatele globale. A fost creat modelul matriciale- vectorial pentru analiză de poziții, viteze, accelerații, forțe și momente, precum și numeroase instrumente virtuale pentru analiză, cercetarea experimentală și conducerea asistată a roboților. Au fost introduse conceptele de complianță dinamică globală, funcția de transfer a amortizorului inteligent, coeficientul global de amortizare vascoasă, transmisibilitatea dinamică globală și spectrul Fourier de vibrații a roboților.

În introducere se prezintă succint **Activitatea științifică și profesională**. Acest capitol cuprinde o trecere în revistă a celor 26 ani de activitate în Universitatea "POLITEHNICA" din București, activitatea științifică în domeniile proprii de interes și competență, activitatea didactică și profesională, dezvoltarea de cursuri noi, îndrumarea doctoranzilor, parteneriatul cu universități din țară și din Europa, managementul proiectelor de cercetare-dezvoltare, recunoașterea națională și internațională, experiența managerială și administrativă, afilierea organizațională și premii. Printre realizări se pot enumera cele peste 130 de lucrări publicate în perioada

post-doctorală, 15 articole sunt publicate în periodice cu factor de impact , cotate de baza de date ISI Thomson Reuters si 44 de lucrări sunt indexate în alte baze de date internaționale, cum sunt IEEE Xplore, Scopus, INSPEC, EBSCO, ProQuest, and Google Scholar. Lucrările științifice publicate în reviste sau la conferințe indexate în baze de date internaționale totalizează *un factor de impact cumulat egal cu 54.966*, conform regulilor de calcul ale punctajului , stabilit de Comisia nr . 17 a CNADTCU. Relevanța și impactul rezultatelor științifice ale acestor articole este susținută de cele *30 citări* în articole publicate de alți autori , dintre care 17 sunt indexate ISI Thomson Reuters și 13 sunt indexate BDI in ultimii 5 ani. Timp de peste 26 de ani, autorul a fost implicat activ în peste *11 de proiecte și programe de cercetare-dezvoltare-inovare*, ca director (3), sau membru în echipă (9). Echivalentul sumei totale de finanțare a proiectelor manageriate a fost de aproximativ 119.000 euro.

Autorul a fost chairman al conferintelor internationale si la care a participat keynote speaker:

| |
|--|
| OPTIROB 2015 Publicat in Elvetia, Trans Tech Publishing Ltd. Zurich |
| ICMERA 2015 publicat in Elvetia, Trans Tech Publishing Ltd. Zurich |
| ICCMMA 2015- Dubai-EAU |
| ICCRC 2015-BERLIN-GERMANIA |
| ICCMMA 2015- Dubai-EAU |
| ICAAT 2015 |
| ICRCA 2015 |
| MECHANITECH 2015 |
| ICMMCCE 2015 |
| ICDCE 2015 |
| GSAM 2015 |
| ICCMMA 2014- Dubai-EAU |
| MSIT- China, Martie 2013 |
| ICMAE- Moskova, Rusia, Iulie 2013 |
| ICPAM- Moskova, Rusia, Iulie 2013 |
| ISCEMP- China, August 2013 |
| ICIET- Bruxelles, Belgia, Ianuarie 2013 |
| ICCEI- Bruxelles, Belgia, Ianuarie 2013 |
| ICCAE- Bruxelles, Belgia, Ianuarie 2013 |
| ICTLE- Istanbul, Turcia, Martie 2013 |
| FDTT- Istanbul, Turcia, Martie 2013 |
| ICMAE2012, ICPAM2012, ICHEP2012, ICCEM2012, ICKET2012, ICSIP2012, Paris iulie 2012 |
| CCASM 2012 |
| ICMENS 2012 |
| ICNECS 2012 |
| OEMR 2012 |
| ICRTC 2012 |
| ICNCT 2012 |
| ICENC 2012 |
| ICAMR 2012 |

Autorul a fost cooptat in numeroase comitete stiintifice internationale ale conferintelor din tara si strainatate. Se pot enumera conferintele:

| |
|------------------------------------|
| ISEIM- Beijing, China 2015 |
| ROBOTICS 2015 |
| Mecanitech 2015 |
| ICCMMA 2015 |
| OPTIROB 2015 |
| ICMERA 2015 |
| ICIET 2015 |
| ICSST 2015 |
| MSETASSE 2015 |
| ICCAEE 2015 |
| ISCEE 2015 |
| CEMSET 2015 |
| ISEIM- Beijing, China 2014 |
| ROBOTICS 2014 |
| Mecahitech 2014 |
| ICCMMA 2014 |
| OPTIROB 2014 |
| ICMERA 2014 |
| IOCEE- Kuala Lumpur, Malaysia 2013 |
| ICACCT- New Delhi, India 2013 |
| AMIS- Hong Kong, China 2013 |
| ICRTC- New Delhi, India 2013 |
| ISEIM- Beijing, China 2013 |
| ISCEE- Shijiazhuang, China 2013 |
| ICCASM- Shenyang, China 2013 |
| ICSTEA- Beijing, China 2013 |
| ICMEEE- Tianjin, China 2013 |
| JCMO- Beijing, China 2013 |
| ICMSE- Jiujiang, China 2013 |
| ICMAE 2012 |
| ICCASM 2012 |
| EMEIT 2012 |
| ICNCS 2012 |
| ICIMTR 2012 |
| ICSST 2012 |
| ICENC 2012 |
| AFASES 2012 |
| ICMST 2012 |
| ICMMT 2012 |
| AMMASS 2012 |
| MSIT 2012 |
| ISCEMP 2012 |
| IACSIT 2012 |

| |
|-------------|
| ROBTEP 2012 |
| ISCIRA 2012 |
| ICEDAC 2012 |
| ICEOE 2012 |

Autorul este membrul unor asociatii universitare de prestigiu din lume printre care se pot mentiona:

| |
|--|
| fellow membru- IACSIT Singapore |
| fellow membru- SCIE USA |
| fellow membru- Robotics and Automation Society - RAS Singapore |
| senior membru - American Nano Society- ANS- SUA |
| senior membru- IEEE-Robotics SUA- Romanian Section- 92451733 |
| membru SAI |
| membru WASET |

Este editor sef si editor la revistele internationale:

| |
|--|
| EDITOR SEF revista international International Jurnal of Modelling and Optimization IJMO-Singapore |
| EDITOR SEF revista internationala International Jurnal of Electrical and Electronic Engineering IJEEE- Singapore |
| EDITOR Trans Tech Publishing, Applied Mechanics and Materials revista Zurich, Elvetia |

Primul capitol de sinteza din cadrul activitatii de cercetare stiintifica a autorului se refera la **Generalitati privind metode moderne de optimizare a preciziei 3D in robotica** si reprezinta o abordare a unuia dintre directiile principale de cercetare ale autorului. Domeniul de cercetare a fost corelat cu cercetarea in domeniul Extenics efectuata pe durata unei luni in R.P.China martie 2013, la Universitatea Tehnica din Guangzhou impreuna cu prof. Cai Wen creatorul acestei teorii. Domeniul abordat se refera la rezolvarea optima a compromisului precizie- stabilitate cunoscut fiind faptul ca acestea sunt performante dinamice care se exclud reciproc. S-a abordat aceasta teorie in rezolvarea compromisului optim precizie- stabilitate la cilindrii hidraulici utilizati in constructia robotilor. Cercetarea a abordat gasirea punctului de functionare in planul poli- zerouri in asa fel incat sa fie rezolvat compromisul optim precizie- stabilitate. Dupa determinarea acestui punct s-a trecut la cercetarea si gasirea limitei, sau asa numitului punct de atractie. S-a abordat transformarea liniara cu determinarea limitei, dupa aplicarea algoritmului de optimizare Extenics. Algoritmul si cercetarea asistata au fost efectuate prin utilizarea propriei instrumentatii virtuale LabVIEW.

Un alt domeniul vizat in cadrul cercetarii cuprinse in primul capitol se refera la cercetarea asistata teoretica si experimentală a servoactionarii robotilor cu motoare de current continuu. In acest scop au fost construiti si utilizati in cercetare 3 roboti didactici, 2 cu control analogic si unul cu control digital. Au fost realizate instrumente virtuale LabVIEW cu ajutorul carora au fost modelate si simulate modelele experimentale, au fost comandate miscarile spatiale si au fost comparate ulterior caracteristicile teoretice cu cele experimentale si s-a putut trece la corectia modelului matematic. A fost realizat modelul matematic matricial- vectorial pentru pozitii, viteze acceleratii, forte si momente, model care ofera informatii complete si cu ajutorul carora a fost posibila punerea in evidenta a influentei amortizorului magneto reologic in tehnica optimizarii raspunsului dinamic a structurii robotizate. Au fost realizate programe de comanda si control in LabVIEW pentru controlul miscarii

simultane a robotilor.

Un domeniu de varf in cercetarea asistata in scopul optimizarii comportarii dinamice si implicit a preciziei de miscare spatiala a robotilor l-a constituit abordarea cercetarii asistate a comportarii cinematice si dinamice cu instrumentatia virtuala proprie LabVIEW. In acest mod au fost comparate caracteristicile de viteza ale end-effectorului determinate experimental cu cele teoretice si au fost ajustate modelele matricial- vectoriale ale analizei de viteze. Au fost create VI-uri pentru determinarea asistata a caracteristicilor de viteze, acceleratii, forte si momente pentru diverse cazuri de miscare precum: miscarea succesiva, miscarea succesiv- simultana, miscarea complet succesiva, sau complet simultana, etc. Prin utilizarea programelor a fost posibila punerea in evidenta a caracteristicilor, precum si a posibilitatilor de optimizare a raspunsului dinamic, prin reducerea salturilor de forte si momente.

In primul capitol este cuprinsa si cercetarea si optimizarea comportarii vibratorii a robotilor prin utilizarea modelelor teoretice si experimentale. Au fost create instrumente virtuale pentru analiza teoretica si experimentală a spectrelor Fourier cu posibilitatea compararii spectrelor teoretice cu cele reale si ajustarea modelului teoretic. In urma validarii modelului s-a trecut la optimizarea raspunsului vibrator prin modificarea maselor, a lungimilor de segmente, a rigiditatilor statice in cuple, etc. S-au trasat modurile proprii de vibratii prin calcularea coeficientilor de influenta si a deplasarilor pentru fiecare articulatie functie de frecventa.

Cel de al doilea capitol ***Optimizarea comportarii dinamice in robotica prin utilizarea amortizoarelor inteligente*** se refera la o cercetare abordata de autor prin indrumarea unui doctorand pe baza de contract de cercetare CNCSIS BD2012. A fost cercetat un amortizor inteligent magneto reologic si o schema proprie de control a vibratiilor. Intreaga activitate s-a desfasurat pe parcursul a patru ani, timp in care a fost dezvoltat domeniul amortizarii inteligente si controlul on-line a spectrului Fourier de vibratii. Au fost testate diverse tipuri de amortizoare conventionale si comparate cu amortizorul magneto reologic. A fost creat un model matematic nou pentru amortizorul magneto reologic prin completarea modelului Bouc-Wen cunoscut. Abordarea acestui subiect s-a efectuat prin cercetarea teoretica si experimentală si identificarea parametrilor care determina alura caracteristicilor Forta- viteza de deplasare la amortizarea histeretica. A fost scrisa o carte care a fost coordonata de autor aparuta in 2010 in editura Printech recunoscuta CNCSIS. Una dintre lucrarile prezentate la conferintele internationale din cadrul acestei cercetari - *Assisted Research of the New Mathematical Model for the Magnetorheological Damper, Olaru A., Olaru S., IFAC 2009- Moscova*, a primit premiul pentru cea mai buna lucrare prezentata intr-o sectiune. Cu ocazia acestei cercetari au fost introduse noile concepte GDC- complianta dinamica globala, VGDDC- coeficientul dinamic global de amortizare vascoasa, GDDR- ratia dinamica de amortizare globala, VGDDDEC- coeficientul echivalent de amortizare dinamica vascoasa globala. Prin cercetarea efectuata au fost create premisele implementarii si testarii sistemelor inteligente de amortizare si control on-line a spectrului de vibratii si realizarea spectrului Fourier dorit.

Capitolul 3 se ocupa de ***Cercetarea asistata a parametrilor retelelor neuronale*** domeniu fara de care nu se pot realiza precizii extreme. Cercetarea a cuprins dezvoltarea instrumentatiei virtuale pentru toate tipurile de neuroni, trecandu-

se apoi la dezvoltarea de rețele neuronale simple și complexe. Au fost create VI-uri pentru cercetarea influenței diversilor parametrii ale rețelelor asupra gradului de convergență, stabilindu-se cei pentru reducerea numărului de iterații. Au fost dezvoltate apoi rețele complexe cu întârzieri de timp și legături de reacție multiple. A fost realizată o rețea neuronală proprie care folosește funcțiile bipolare hiperbolice tangente cu scopul corectării mișcării în ambele sensuri, rețea cu legături de reacție multiple și întârzieri de timp. Aceasta rețea a fost ulterior aplicată într-o combinație cu un model Iterativ Jacobian Invers, care a condus în final la rezolvarea optimă a cinematicii inverse și găsirea coordonatelor interne de mișcare în fiecare articulație, care să asigure o precizie de mișcare a end-efectorului sub 0.001mm.

În capitolul 4 sunt evidențiate **Metode actuale în domeniul cinematicii inverse în robotica** a abordat cercetarea diverselor metode de rezolvare a cinematicii inverse cu stabilirea performanțelor și a modalităților de aplicare. Au fost studiate și transpuse în programe în LabVIEW cu ajutorul cărora a fost posibilă compararea rezultatelor și găsirea variantei optime de program care în final să asigure realizarea preciziei de mișcare a end-efectorului robotului sub 0.001mm. Au fost studiate metodele CCDM (Cycle Coordinate Descent Method) și comparată cu metoda proprie propusă metoda complexă care utilizează o rețea neuronală SBHTNN(TDRL)(Sigmoid Bipolar Hiperbolic Tangent Neural Network with Time Delay and Recurrent Links) și o metoda iterativă proprie IPIJMM (Iterative Pseudo Inverse Jacobian Matrix Method). Cele două metode au fost aplicate la roboți diversi de tip brat articulată, robot portal dublu și roboți în cooperare cu mișcare simultană cu aceeași țintă sau cu mișcare simultană cu ținte multiple. Algoritmul testat a fost ulterior implementat pe o structură de umanoid, respectiv o construcție cu două mâini și două picioare cu mișcare independent. A fost creat un program LabVIEW de simulare a mișcării umane.

Capitolul 5 cuprinde **Metoda proprie pentru creșterea preciziei spațiale prin utilizarea Metodei Matriciale Jacobiene Pseudo-Inverse (PIJMM) cuplata cu rețeaua neurală proprie Bipolar Sigmoidă Hyperbolic Tangent cu Întârziere temporală și legături recurente (BSHTNN-TDRL)**. Metoda a fost creată și testată cu ajutorul programelor LabVIEW cu scopul atingerii unor precizii extreme prin controlul riguros al cinematicii inverse. Metoda cuprinde mai multe programe LabVIEW cu ajutorul cărora se determină iterativ coordonatele interne, algoritm care se repetă până când este atinsă precizia impusă față de ținta de sub 0.001mm. Dacă se dorește generarea unei curbe spațiale, atunci sunt testate punctele de extreme din cadrul curbei pentru a se verifica dacă nu este depășit spațiul de lucru al robotului. După testarea punctelor extreme, se trece la generarea fișierului de date cu coordonatele interne pentru fiecare punct (coordonață externă) de pe curba spațială țintă și coordonatele interne aferente fiecărui punct extern se salvează într-un fișier cu coordonate interne, după ce fiecare punct a atins ținta cu o precizie sub limita impusă de 0.001mm. Programul de animație cu ajutorul căruia se testează dacă coordonatele interne au fost corect determinate, constă în animația mișcării robotului după curba impusă, prin citirea coordonatelor interne din fișierul creat anterior și mișcarea robotului după curba spațială impusă. Metoda a fost extinsă, așa cum se poate observa în capitolul 6 și la aplicații multi-robot, cu ținte diferite, pe aceeași curbă acelas punct sau puncte diferite, sau curbe spațiale diferite, funcție de aplicație.

Capitolul 6 cuprinde un *Studiu de caz pentru o aplicatie multi robot prin utilizarea propriei metode pentru optimizarea traiectoriei spatiale*. Cercetarea a constat in generarea unui model matematic matricial- vectorial pentru aplicatii robotizate multiple. In acest scop au fost definite coordonatele bazei robotului RI, coordonatele locale LWC (Local World Coordinates) ale sectorului aplicatiei robotizate, coordonatele globale GWC (Global World Coordinates), coordonate ale sectiei robotizate. Toate modelele pentru analiza de pozitii, viteze, acceleratii, forte si momente au fost reanalizate si rescrise in asa fel incat sa tina cont de aceste noi coordonate de referinta. S-au creat programe de calcul si rezolvare a cinematicii inverse si dinamicii directe astfel ca acestea sa fie implementate in programul de generare a coordonatelor interne simultan pentru trei roboti, care lucreaza in cooperare, utilizand o aceeasi tinta, respectiv un acelas punct de pe o curba spatiala. S-a trecut la generarea coordonatelor interne pentru fiecare dintre cei trei roboti, astfel ca toti sa lucreze in cooperare si sa genereze curba spatiala impusa, cu precizia mai buna de 0.001mm. Programul a fost rulat si in varianta ca fiecare dintre cei trei roboti, care lucreaza in paralel, sa genereze curba spatiala, dar pornind din puncte diferite. Constructia structurii cu trei roboti cu o aceeasi tinta curba spatiala a prefigurat constructia algoritmului pentru structurile paralele care vor face obiectul unei directii viitoare de cercetare.

Capitolul 7 sintetizeaza *Concluzii si directii viitoare de cercetare* desprinse din activitatea efectuata pe o perioada de peste 26 de ani de cercetare aplicativa. Au fost create peste 600 de instrumente virtuale LabVIEW care acopera domeniul cercetarii comportarii dinamice in general, precum si a modelarii sistemelor mecanice, electrice si electronice prin utilizarea functiilor de transfer. Au fost create programe de simulare a schemelor mecanice cu corpuri multiple, cu arcuri si amortizoare sau electronice complexe, gasindu-se solutii de corectie a comportarii dinamice prin introducerea unor asemenea corectii electrice, mecanice sau mecatronice in etajele de mica sau mare putere. Au fost realizate programe de simulare care au pus in evidenta influenta diverselor corectii asupra comportarii dinamice evidentiate cu ajutorul caracteristicilor Bode, sau a planului poli-zero-uri. Prin controlul on-line a simularii s-au asigurat conditiile ca parametrii constructivi-functionali ai servoactionarii sa poata fi ajustati cu scopul optimizarii functionarii. Odata limitele fiind atinte (limitele de variatie a parametrii constructivi-functionali) s-a trecut la implementarea unor componente in cadrul schemelor de comanda si control, component de tip anticipatie- intarziere, sau intarziere- anticipatie, sau combinate, corectii atat electrice cat si mecanice. Etapa urmatoare de incercare a optimizarii a fost legata de utilizarea amortizoarelor inteligente, amortizoare introduce intr-o bucla inteligenta, de autoreglare astfel ca parametrii de amortizare sa depinda de semnalul electric generat de accelerometrul pus pe end-effector. Astfel a fost posibila obtinerea unui spectru Fourier dorit, inlocuindu-se spectrul real al structurii. Performantele de precizie- stabilitate au fost regandite si optimizate prin introducerea inteligentei artificiale cuplate cu metodele matematice iterative in modelarea comportarii dinamice si a cinematicii.

Atat instrumentatia virtuala LabVIEW creata cat si metodele dezvoltate pot fi utilizate in orice domeniu mecatronic pentru optimizarea performantelor dinamice. In Robotica, fara aceste instrumente modern nu ar fi fost posibila cercetarea asistata, precum si obtinerea rezultatelor prezentate.

Teza de abilitare a cuprins cateva dintre directiile de cercetare abordate de autor pe parcursul celor peste 26 de ani de activitate de cercetare si mai cu seama dupa obtinerea titlului de doctor si nu are pretentia de a fi acoperit intreg domeniul de cercetare abordat de autor precum si necesar intr-un asemenea domeniu. Rezultatele prezentate sunt cateva din portofoliul propriu, acestea fiind reprezentative directiilor abordate in teza.