

MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE  
UNIVERSITATEA DIN PETROȘANI  
ȘCOALA DOCTORALĂ  
DOMENIUL DE DOCTORAT: INGINERIA SISTEMELOR

TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

CONTRIBUȚII PRIVIND CONDUCEREA UNUI SISTEM DE TIP  
EXOSCHELET

COORDONATOR ȘTIINȚIFIC:

PROF. UNIV. DR. HABIL. ING. LEBA MONICA

DOCTORAND:

ING. RÎSTEIU MARIUS-NICOLAE

Petroșani

2019

# Cuprins

<b>Introducere</b> .....	<b>3</b>
<b>Capitolul I</b>	
<b>Stadiul actual al cercetărilor</b> .....	<b>6</b>
1.1. Exoschelet .....	6
1.2. Electromiografia (EMG) .....	13
1.3. Controllere .....	23
1.4. Aplicatii .....	41
<b>Capitolul II</b>	
<b>Metodologia cercetării</b> .....	<b>46</b>
Obiectivul 1 Proiectarea unui exoschelet care să permită susținerea mișcărilor unui braț cu mobilitate redusă .....	48
Obiectivul 2 Realizarea predicției intenției de mișcare prin utilizarea unor senzori specifci .....	49
Obiectivul 3 Acționarea exoscheletului pe baza intenției de mișcare identificate în vederea susținerii brațului .....	50
<b>Capitolul III</b>	
<b>Modelarea și simularea brațului uman</b> .....	<b>52</b>
3.1. Traiectorii de mișcare a roboților .....	52
3.2. Modelul cinematic direct al brațului uman .....	71
3.3. Modelul cinematic invers al brațului uman .....	80
3.4. Modelul cinematic dinamic al brațului uman .....	86
<b>Capitolul IV</b>	
<b>Proiectarea unui exoschelet pentru brațul drept</b> .....	<b>92</b>
4.1. Proiectarea mecanică .....	92
4.2. Modelul cinematic direct Denavit-Hartenberg pentru exoschelet .....	99
4.3. Modelul cinematic invers Denavit-Hartenberg pentru exoschelet .....	103
4.4. Modelul cinematic dinamic direct si invers pentru exoschelet .....	108
<b>Capitolul V</b>	
<b>Conducerea sistemului integrat braț-exoschelet</b> .....	<b>113</b>
5.1. Concepte de bază privind identificarea sistemelor .....	113
5.2. Identificarea sistemelor utilizând rețele neuronale .....	121
5.3. Identificarea intenției și poziției brațului pe baza semnalelor EMG și IMU .....	125
5.4. Modelare si simulare ansamblu braț – exoschelet .....	134
<b>Capitolul VI</b>	
<b>Contribuții și propuneri</b> .....	<b>138</b>
<b>Bibliografie</b> ...	<b>139</b>

## Introducere

În ultimii ani au apărut tot mai multe tehnici și tehnologii care asistă anumite operații, fapt care a determinat apariția unor dispozitive special concepute pentru reabilitarea persoanelor cu diferite grade de handicap. În special în cazul brațelor amputate sau în cazul în care pacientul are mobilitate și control redus asupra membrilor, au fost proiectate mai multe tipuri de dispozitive. La ora actuală protezele folosite ca extensii ale oricărui membru aduc îmbunătățiri atât estetice cât și de flexibilitate.

Mai multe proiecte de cercetare sunt centrate pe idea de a dezvolta dispozitive care să susțină mișcările umane, chiar dacă rezultatele sunt promițătoare nici una dintre soluțiile propuse nu oferă un sistem de control sau acționare eficient pentru acest tip de dispozitive. Această cercetare este centrată pe realizarea unui dispozitiv robotic de tip exoschelet pentru persoanele care au anumite probleme sau limitări în mișcările de bază ale membrilor superioare. Deși unele mișcări pot părea banale, acestea sunt esențiale în procesul de reabilitare, dar și în viața de zi cu zi, deoarece pacientul nu va mai fi dependent de altă persoană pentru anumite operații.

Dispozitivul propus va fi dotat cu un sistem de achiziție și analiză a semnalelor EMG care va fi capabil să perceapă intențiile de mișcare ale purtătorului, iar sistemul de acționare va ajuta și susține mișcarea independentă a exoscheletului robotic.

Am luat această decizie de a ne concentra eforturile asupra dezvoltării unui dispozitiv pentru facilitarea mișcării brațului deoarece, după o cercetare a acestor tipuri de dispozitive, am observat faptul că majoritatea acestora sunt axate pe susținerea sau limitarea mișcării brațului în procesul de recuperare, puține dintre ele având și parte de acționare pentru a reduce efortul depus de braț pentru realizarea mișcării, în ciuda faptului că majoritatea pacienților au nevoie și de acest lucru.

Pentru început a fost necesară determinarea semnalului EMG de pe mai multe brațe perfect sănătoase pentru a putea vedea valoarea semnalului în funcție de intenția de mișcare, ulterior realizând aceeași mișcare a unui braț cu probleme să vedem diferențele care apar pentru a putea determina un model. Apoi vom descrie structura unui model biomecanic al brațului uman în scopul recunoașterii intențiilor subiectului prin efectuarea unei analize a activității electromiografice. După determinarea intenției de mișcare este necesară realizarea comenzii sistemului de acționare pentru mișcarea exoscheletului în același fel cu brațul. Un model complet al relațiilor dintre semnalul EMG și mișcările asociate va fi util în proiectarea exoscheletului robotic pentru susținerea și ajutorarea mișcării brațului bolnav. În plus, se vor include și senzori de tip IMU pentru corectarea mișcării exoscheletului pe baza informațiilor privind orientarea segmentelor brațului uman.

Din obiectivul general rezultă obiectivele specifice:

- OB.1.** Proiectarea unui exoschelet care să permită susținerea mișcărilor unui braț cu mobilitate redusă.
- OB.2.** Realizarea predicției intenției de mișcare prin utilizarea unor senzori specifici.

**OB.3.** Acționarea exoscheletului pe baza intenției de mișcare identificate în vederea susținerii brațului.

Cercetarea este structurată în trei capitole de conținut, un capitol introductiv, un capitol de metodologie a cercetării, un capitol de concluzii, contribuții și dezvoltări ulterioare și referințe bibliografice relevante pentru tematica abordată.

## **Capitolul I - Stadiul actual al cercetărilor**

În acest capitol se prezintă un studiu al literaturii de specialitate în vederea realizării obiectivelor cercetării. S-a efectuat o cercetare a stadiului actual al dispozitivelor robotice de tip exoschelet folosite pentru susținerea mișcării membrilor superioare sau folosite în tratamente de reabilitare de către persoanele care în urma unui accident și-au pierdut parțial mobilitatea brațelor deoarece mușchii nu mai reușesc să realizeze anumite mișcări uzuale. În același timp s-a realizat o cercetare și asupra tipurilor de senzori și a semnalelor achiziționate și prelucrate în vederea determinării intenției de mișcare și conform acestora să se realizeze comanda exoscheletului și modelul mișcării, pentru a putea determina poziția la care trebuie să ajungă brațul conform intenției mișcării.

### **1.1. Exoschelet**

Prima aplicație a robotului activ de tip exoschelet a fost de a furniza o putere externă unui soldat, astfel încât el să poată transporta greutate în plus. De atunci, această tehnologie s-a concentrat pe dezvoltarea sistemelor de asistare și îmbunătățire a puterii umane. Ulterior, această tehnologie a fost utilizată în alte aplicații, cum ar fi reabilitarea membrilor și tele-operații. Cercetarea în domeniul exoscheletelor este încă o zonă în creștere și necesită abordări multidisciplinare în rezolvarea unor probleme tehnice complexe.

### **1.2. Electromiografia (EMG)**

Dezvoltarea electromiografiei (EMG) a început cu documentația lui Francesco Redi în 1666. Documentul informează că unele grupe de mușchii ale țiparului generează electricitate. În 1773, Walsh a reușit să demonstreze că țesutul muscular al țiparului ar putea genera o scânteie de electricitate. În 1792 a apărut o publicație intitulată „Viribus Electricitatis in Motu Musculari Commentarius”, scrisă de A. Galvani, în care autorul a arătat că energia electrică ar putea declanșa contracții musculare.

Electromiografia (EMG) este studiul funcției musculare prin analiza potențialului electric produs de către mușchi. EMG în zilele noastre a devenit un instrument important în aplicațiile biomedicale și clinice. Astfel, detectarea, prelucrarea și analiza semnalului EMG a devenit un element major de cercetare în domeniul biomedical, care implică o gamă largă de experți de la medic, inginer, fizician la cercetător în domeniul informaticii.

Semnalele electromiografice (EMG) pot fi utilizate pentru aplicații clinice și biomedicale. În prezent, există trei aplicații comune ale semnalului EMG. În primul rând, determinarea timpului de activare a mușchiului, adică momentul în care începe și în care se termină excitarea la mușchi. În al doilea rând, estimarea forței produse de mușchi iar în al treilea rând, obținerea unui indice al momentului la care un mușchi este obosit prin analiza spectrului de frecvență al semnalului.

Pentru a obține semnalul sEMG, electrozii sunt plasați pe piele în zona care acoperă mușchiul. Alternativ, se folosesc electrozi cu fir sau cu ac și aceștia pot fi plasați direct în mușchi. Când semnalul EMG este achiziționat de la electrozi montați direct pe piele, acesta este un compozit al tuturor potențialelor de acțiune a fibrelor musculare care se găsesc foarte aproape de piele

### **1.3. Controllere**

Exoscheletul este o structură electromecanică purtată de utilizator, care se potrivește cu forma și funcțiile corpului uman. Acesta este capabil să sporească capacitatea membrilor umane și/sau să trateze mușchii, articulațiile sau părțile scheletice care sunt slabe, ineficiente sau rănite din cauza unei boli sau a unei afecțiuni neurologice. Mai mult, combină puterea mașinii și inteligența umană pentru a spori inteligența mașinii și puterea utilizatorului. Exoscheletul funcționează mecanic în paralel cu corpul uman și poate fi acționat pasiv și/sau activ.

Unul din tipurile de sisteme de control al exoscheletului este sistemul de control bazat pe modele. În general, conform modelului utilizat, strategia de control pentru exoschelet poate fi împărțită în două tipuri: control bazat pe modelul dinamic și control bazat pe modelul muscular. Modelul dinamic al exoscheletului este derivat prin modelarea corpului uman ca legături rigide reunite prin îmbinări (oase). Acest model este format din combinația de efecte inerțiale, gravitaționale, coriole și centrifuge. Modelul dinamic poate fi obținut în trei moduri: modelul matematic, identificarea sistemului și metoda inteligenței artificiale. Modelul matematic este obținut prin modelarea teoretică a exoscheletului bazat pe caracteristicile fizice ale sistemului. Al doilea mod de a obține modelul dinamic este metoda de identificare a sistemului. Această metodă este foarte utilă deoarece este dificil să se atingă un model dinamic bun prin utilizarea modelului matematic teoretic. Ultima metodă pentru obținerea modelului dinamic este metoda inteligenței artificiale. Popularitatea sa de a rezolva multe probleme neliniare a atras unii cercetători să se implice în identificarea dinamică a modelului.

### **1.4. Aplicații**

În prezent, roboții wearable uzuali sunt destinați în principal aplicațiilor din domeniul militar, celor de reabilitare în sectorul sănătății și de ridicare a încărcăturii în industrie și producție. În lucrarea Sensor and Control Concept for a Wearable Robot for Manual Load Handling Assistance este prezentat un concept de senzor și de control pentru un robot care poate fi purtat pentru asistență în manevrarea manuală a încărcăturilor în industrie. Sunt abordate cerințe speciale, cum ar fi costurile reduse, contactul direct dintre om și încărcătură și configurarea ușoară. A fost construit un stand montat pe perete de testare al unei articulații acționate pentru a evalua senzorii propuși și algoritmi de control. Prin utilizarea unui senzor de cuplu în articulație ca referință se arată că pot fi utilizați senzori de forță cu cost redus în antebraț pentru a măsura interacțiunea robotului cu omul. Se compară o abordare bazată pe cuplu și viteză și una bazată pe controlul impedanței, care permite utilizatorului să se miște liber în timp ce nu manevrează sarcini și care, de asemenea, permite integrarea unui semnal de comandă umană pentru reglarea suportului forței.

## **Capitolul II - Metodologia cercetării**

Teza de doctorat se încadrează în cercetare științifică aplicativă.

Prezenta metodologie a cercetării răspunde obiectivului general și obiectivelor derivate.

Astfel, cercetarea din prezenta teză își propune să ofere soluții pentru problema identificată, și anume necesitatea de dispozitive care să completeze paleta de exoschelete destinate susținerii mișcării brațului uman în condițiile în care numărul persoanelor care sunt afectate de probleme neurologice care le limitează mișcările membrilor superioare este în creștere.

Din studiul literaturii de specialitate, cuprinzând stadiul actual al evoluției abordărilor teoretice și aplicative din domeniul temei, au fost formulate următoarele obiective specifice pentru realizarea cercetării:

**Obiectivul 1: Proiectarea unui exoschelet care să permită susținerea mișcărilor unui braț cu mobilitate redusă.**

Prima etapă în vederea proiectării exoscheletului constă în modelarea matematică a brațului uman, și anume lanțul cinematic umăr-cot-încheietură. Pentru aceasta se dezvoltă modelele cinematice direct și invers, precum și modelul dinamic. Toate aceste modele sunt implementate în platforma de modelare-simulare MatLab-Simulink, utilizând toolbox-ul SimMechanics.

**Obiectivul 2: Realizarea predicției intenției de mișcare prin utilizarea unor senzori specifici.**

Pentru a folosi modelul DH direct determinat, este necesară cunoașterea unghiurilor de mișcare a fiecărei cuple a brațului. Pentru estimarea unghiului de mișcare a fiecărei cuple a brațului uman se folosesc senzori de electromiografie (EMG). Acest sistemul se proiectează folosind instrumente de identificare a sistemelor pe baza datelor de intrare culese de la senzorii EMG și a datelor de ieșire furnizate în timpul identificării de senzori de poziție unghiulară (IMU).

Achiziționarea și prelucrarea semnalelor EMG se face prin metodă neinvazivă, în conformitate cu modelele deja consacrate.

**Obiectivul 3: Acționarea exoscheletului pe baza intenției de mișcare identificate în vederea susținerii brațului.**

În această etapă se realizează modelul și simularea ansamblului braț uman – exoschelet pentru testarea mișcării sincrone a acestora. Se utilizează în această etapă modelul cinematic direct al brațului uman și modelul cinematic invers al exoscheletului. Mișcarea brațului uman se face prin acționarea fiecărei cuple, pe baza unghiurilor estimate folosind senzorii EMG, și determinarea cu ajutorul modelului cinematic direct a poziției încheieturii. Încheietura, conform proiectului prototipului de exoschelet, este utilizată ca reper pentru mișcarea elementului final al exoscheletului. Adică, poziția încheieturii mâinii, rezultată din modelul direct al brațului, reprezintă poziția la care trebuie să ajungă elementul final al exoscheletului, ceea ce reprezintă mărimea de intrare pentru modelul cinematic invers al exoscheletului. Acest model determină mișcările de translație și rotație pentru cuplele exoscheletului, care aduc elementul final al acestuia în aceeași poziție cu încheietura mâinii.

### **Capitolul III - Modelarea și simularea brațului uman**

În acest capitol se prezintă abordarea simplificată a brațului uman în vederea dezvoltării modelelor matematice atât cinematice cât și dinamice. Pentru modelele cinematice se utilizează formalismul Denavit-Hartenberg pentru determinarea modelului cinematic direct și invers. Pentru modelul cinematic se consideră toate cuplele de rotație din cele trei cuple ale brațului: umăr (3 rotații), cot (2 rotații) și încheietură (2 rotații). Pentru modelul cinematic direct și invers se consideră doar cuplele de rotație din umăr și cot deoarece în cazul cercetării din prezenta teză ne interesează poziția încheieturii mâinii. Pentru modelele dinamice se utilizează metoda Jacobianului pentru determinarea vitezelor atât ca model direct cât și invers. Înainte de a realiza simularea mișcării s-au analizat tipurile de traiectorii de mișcare utile în conducerea oricărui robot sau sistem asimilat unui robot.

### **Capitolul IV - Proiectarea unui exoschelet pentru brațul drept**

În acest capitol se prezintă proiectarea mecanică a unui exoschelet pentru brațul drept care să permită urmărirea mișcării brațului uman și să poată să susțină brațul în cazul în care persoana care folosește exoscheletul a obosit. Pentru a realiza proiectarea părții mecanice a exoscheletului a fost făcută mai întâi o cercetare privind dispozitivele existente și a brevetelor de invenție cu această temă. După studierea în detaliu a mai multor tipuri de astfel de dispozitive propunem un model propriu de exoschelet folosit pentru susținerea mișcării membrului superior drept.

Pentru acesta s-au dezvoltat modelele matematice atât cinematice cât și dinamice. La fel ca în capitolul anterior, pentru modelele cinematice se utilizează formalismul Denavit-Hartenberg pentru determinarea modelului cinematic direct și invers. Pentru modelele dinamice se utilizează metoda Jacobianului pentru determinarea vitezelor atât ca model direct cât și invers. Pentru simularea mișcării s-au utilizat tipurile de traiectorii de mișcare prezentate în capitolul anterior.

Ca mediu de modelare-simulare s-a utilizat MatLab, împreună cu toolboxul SimMechanics din Simulink, care permite implementarea modelelor matematice cinematic și dinamic pentru simularea mișcării exoscheletului.

În ultima parte a acestui capitol se implementează în MatLab modelul direct cinematic și dinamic al brațului cuplat cu modelul invers cinematic și dinamic al exoscheletului.

### **Capitolul V - Conducerea sistemului integrat braț-exoschelet**

#### **5.1. Concepte de bază privind identificarea sistemelor**

De foarte multe ori, în practica inginerescă este nevoie de modelul matematic dinamic a procesului, a elementului de execuție, a elementului de măsurare etc. În domeniul conducerii proceselor automate modelele matematice sunt necesare pentru simularea și proiectarea sistemelor, iar ulterior detecția defectelor și optimizarea proceselor. Modelele matematice pot fi conceptuale (fenomenologice), fizice (empirice) și matematice (analitice). Determinarea modelelor matematice pe cale experimentală este obiectul de studiu a identificării sistemelor. Analiza experimentală a sistemului ce urmează a fi modelat matematic, presupune fie achiziția off-line, fie on-line a variabilelor de intrare și ieșire a sistemului, iar apoi prelucrarea acestora în vederea determinării modelului matematic.

#### **5.2. Identificarea sistemelor utilizând rețele neuronale**

Rețelele neurale caracterizează ansambluri de elemente de procesare simple, interconectate și operând în paralel, care urmăresc să interacționeze cu mediul înconjurător într-un mod asemănător creierelor biologice și care prezintă capacitatea de a învăța.

Nu există o definiție general acceptată a acestor tipuri de sisteme, dar majoritatea cercetătorilor sunt de acord cu definirea rețelelor artificiale ca rețele de elemente simple puternic interconectate prin intermediul unor legături numite interconexiuni prin care se propagă informație numerică.

Rețelele neurale artificiale sunt parte componenta a așa-numitelor sisteme cognitive, care reprezintă o colecție de tehnologii informatice inspirate de mecanismele care sunt utilizate de creierul uman în prelucrarea semnalelor recepționate, în procesul gândirii, în luarea unor decizii, precum și de principiile evoluției naturale. În aceeași categorie sunt incluse sistemele fuzzy, algoritmi genetici și sistemele expert.

Originea rețelelor neurale se află în studierea rețelelor formate în creier din neuroni și sinapsele acestora. Acestea au capacitatea de a învăța din exemple într-un mod conexiunist și își îmbunătățesc performanțele folosind experiența anterioară.

### **5.3. Identificarea intenției și poziției brațului pe baza semnalelor EMG și IMU**

#### **EMG**

Pentru realizarea părții experimentale au fost utilizați două tipuri de senzori. Senzorul de electromiografie (EMG) a fost folosit pentru detectarea intenției de mișcare pentru abducția/adducția brațului. Pe braț alături de senzorul EMG a fost poziționat și un senzor IMU pentru determinarea unghiului la care se află brațul.

Senzorul de electromiografie (EMG) măsoară activitatea musculară prin monitorizarea potențialului electric generat de țesutul muscular. Acesta preia, amplifică și procesează activitatea electrică complexă a unei grupe de mușchi după care o transformă într-un semnal analogic simplu care poate fi citit de orice microcontroler cu convertor analog digital (DAC). Relația dintre activitatea musculară și tensiunea de ieșire poate fi reglată cu ajutorul potențiometrului aflat pe placa senzorului.

#### **IMU**

Senzorul de măsurare a unghiului de mișcare a brațului BNO055 este primul dintr-o nouă familie de senzori de orientare absolută care include toți senzori într-un singur pachet.

BNO055 este un sistem în pachet care integrează un accelerometru triaxial pe 14 biți, un giroscop triaxial pe 16 biți cu un interval de  $\pm 2000$  de grade pe secundă, un senzor geomagnetic triaxial și un microcontroler de 32 de biți.

### **5.4. Modelare și simulare ansamblu braț – exoschelet**

Avem modelul cinematic direct Denavit-Hartenberg, care calculează poziția și orientarea încheieturii pe baza mișcărilor estimate din semnalele primite de la senzorii EMG și IMU. Poziția încheieturii determinată din modelul direct Denavit-Hartenberg al brațului uman reprezintă mărimea de intrare în modelul Denavit-Hartenberg invers al exoscheletului, care calculează deplasarea  $d_1$  pentru cupla de translație și unghiurile  $\theta_1$  și  $\theta_2$  pentru cuplele de rotație.

## **Capitolul VI - Contribuții și propuneri**



## Contribuții

1. Am realizat un studiu al stadiului actual al exoscheletelor și a metodelor de comandă și control.
2. Am realizat modelul matematic cinematic și dinamic al brațului uman.
3. Am realizat modelul cinematic direct și invers al exoscheletului pentru a determina poziția în care trebuie să ajungă și viteza cu care să facă asta.
4. Am proiectat, în urma studiului domeniul exoscheletelor, un model folosind doar acționări electrice.
5. Realizarea unui model nou de exoschelet care să urmărească brațul utilizatorului pentru susținerea mișcării.
6. Utilizarea unei mișcări de translație pentru susținerea mișcării din umăr a brațului, ceea ce înseamnă o uzură mai mică a sistemului de transmisie a mișcării, față de utilizarea unei mișcări de rotație.
7. Achiziționarea și prelucrarea semnalelor EMG, prin metodă neinvazivă, în conformitate cu modelele deja consacrate și îmbunătățirea predicției prin utilizarea senzorilor pentru orientarea brațului.
8. Realizarea sistemului de acționare a exoscheletului pe baza intenției de mișcare identificate în vederea susținerii brațului.

## Propuneri

1. Utilizarea unor tipuri de materiale mult mai ușoare dar cel puțin la fel de rezistente pentru construcția exoscheletului.
2. Să se încerce realizarea unui exoschelet care să poată fi purtat de către utilizator.
3. Să poată fi realizat un dispozitiv universal ușor de adaptat pentru brațul drept sau stâng

## Bibliografie

- [1] Fabricio Muri et al 2013, *Virtual reality upper limb model controlled by EMG signals* J. Phys.: Conf. Ser. 477 012041
- [2] Sartori, M., Chemello, G., Reggiani, M., & Pagello, E. (2008), *Control of a virtual leg via EMG signals from four thigh muscles*. In W. Burgard, R. Dillmann, C. Plagemann, & N. Vahrenkamp (Eds.), *Intelligent Autonomous Systems 10 (IAS-10)* (pp. 137-144). IOS Press. DOI: 10.3233/978-1-58603-887-8-137
- [3] Gopura RARC, Bandara DSV, Kiguchi K, Mann GKI, *Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots*, A review. Robot Auton Syst. 2015. doi:10.1016/j.robot.2015.10.001
- [4] <https://exoskeletonreport.com/what-is-an-exoskeleton>
- [5] <http://www.romedic.ro/ce-este-electromiografia-0F27118>
- [6] Nef T, Guidali M, Klamroth-Marganska V, Riener R: ARMin, *Exoskeleton Robot for Stroke Rehabilitation*. In World Congress on Medical Physics and Biomedical

Engineering, September 7 - 12. Edited by: Dössel O, Schlegel WC. Munich, Germany: Springer; 2009:127-130.

[7] Kiguchi, K. and Y. Hayashi, 2012, *An EMG-Based Control for an Upper-Limb Power-Assist Exoskeleton Robot*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, vol. PP, no. 99, pp. 1-8.

[8] Gopura RARC, Kiguchi K, Li Y, *SUEFUL-7: A 7DOF upper-limb exoskeleton robot with muscle-model-oriented EMG-based control*. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). St. Louis, MO; 2009:1126-1131

[9] Kiguchi K, Rahman MH, Sasaki M, Teramoto K, *Development of a 3DOF mobile exoskeleton robot for human upper-limb motion assist*. Robotics and Autonomous Systems 2008,56(8):678-691.[<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V16-4R8MDRP-1/2/7d307e7bbef3e5958a6960e3da652723>] [ ] 10.1016/j.robot.2007.11.007

[10] Perry JC, Rosen J, Burns S, *Upper-Limb powered exoskeleton design*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2007, 12 (4): 408-417

[11] N. M. Sobahi, *Denoising of EMG signals Based on Wavelet Transform*. Asian Transaction on Engineering (ATE ISSN: 2221-4267); 1 (5)

[12] Samarawickrama, Kasun & Ranasinghe, Sadun & Wickramasinghe, Yasoja & Marasinghe, Vidarshi & Mallehevidana, Wageesha. (2018). *Surface EMG Signal Acquisition Analysis and Classification for the operation of a Prosthetic Limb*.

[13] Hiesmair Leopold (2016). *Compliant exoskeleton*.

[14] S. Conforto, *The role of the sEMG signal processing in the field of the Human Movement Analysis*, in World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, September 7-12, 2009, Munich, Germany SE-140, vol. 25/9, O. Dössel and W. Schlegel, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 523-526.

[15] Cavalcanti Garcia, Marco Antonio & Vieira, Taian. (2011), *Surface electromyography: Why, when and how to use it*. Revista Andaluza de Medicina del Deporte. 4. 17-28.

[16] Norali, A., Som, M. M. & Kangar-arau, J, *Surface electromyography signal processing and application: A review*. In Proceedings of the International Conference on Man-Machine Systems, 11–13 (2009).

[17] MZ Al-Faiz and AH Miry 2012, *Artificial Human Arm Driven by EMG Signal*. INTECH Open Access Publisher, URL: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/39325.pdf>.

[18] Chowdhury, R.H.; Reaz, M.B.I.; Ali, M.A.B.M.; Bakar, A.A.A.; Chellappan, K.; Chang, T.G., *Surface electromyography signal processing and classification techniques*. Sensors 2013, 13, 12431–12466.

[19] Anam K, Al-Jumaily AA, *Active exoskeleton control systems: state of the Art*. Proc Eng 2012, 41:988-994.

[20] Babiarez A., Czornik A., Klamka J., Niezabitowski M., Zawiski R., *The mathematical model of the human arm as a switched linear system*, Proceedings of the 19th International

Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, 02-05.09.2014, Miedzyzdroje, Polska (2014).

[21] A *Software Tool for Faster Development of Complex Models of Musculoskeletal Systems and Sensorimotor Controllers in Simulink™*

[22] C. Fleischer, C. Reinicke, G. Hummel, *Predicting the intended motion with EMG signals for an exoskeleton orthosis controller*, Proc. 2005 IEEE Int. Conf. Robot. Auton. Syst. (IROS), pp. 2029-2034.

[23] Koo, T.K., Mak, A.F. *Feasibility of using EMG driven neuromusculoskeletal model for prediction of dynamic movement of the elbow*. J. Electromyogr. Kinesiol. 2005; 15:12–26.

[24] Giacomo Severini, *Development of techniques and algorithms for the functional evaluation and assistance in the movements of the upper limb*

[25] Claudio Filipe Semedo Brito, *Physical Human-Robot Interaction based on Neuro-Muscular Models*

[26] Rahman, M. H., Rahman, M. J., Cristobal, O. L., Saad, M., Kenné, J. P. and Archambault, P. S., *Development of a whole arm wearable robotic exoskeleton for rehabilitation and to assist upper limb movements*, Robotica, Available on CJO 2014doi:10.1017/S0263574714000034

[27] A. Fougner, *Proportional myoelectric control of a multifunction upper-limb prosthesis*, Norwegian Univ. Sci. Technol., 2007.

[28] Kazuo Kiguchi and Qilong Quan, *Muscle-model-oriented EMG-based control of an upper-limb power-assist exoskeleton with a neuro-fuzzy modifier*, 2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE World Congress on Computational Intelligence), Hong Kong, 2008, pp. 1179-1184

[29] Z. Li et al., *sEMG-based joint force control for an upper-limb power-assist exoskeleton robot*, IEEE J. Biomed. Health Informat., vol. 18, no. 3, pp. 1043-1050, May 2014.

[30] K. Kiguchi, Y. Imada and M. Liyanage, *EMG-Based Neuro-Fuzzy Control of a 4DOF Upper-Limb Power-Assist Exoskeleton*, 2007 29th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Lyon, 2007, pp. 3040-3043.

[31] Kiguchi K, Rahman MH, Sasaki M, Teramoto K, *Development of a 3DOF mobile exoskeleton robot for human upper-limb motion assist*. Robotics and Autonomous Systems 2008,56(8):678-691. [<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V16-4R8MDRP-1/2/7d307e7bbef3e5958a6960e3da652723>] [] 10.1016/j.robot.2007.11.007

[32] Z. Tang, K. Zhang, S. Sun, Z. Gao, L. Zhang, Z. Yang, *An upper-limb power-assist exoskeleton using proportional myoelectric control*, Sensors, vol. 14, no. 4, pp. 96677-6694, 2014.

[33] W. Yu, J. Rosen, *Neural PID control of robot manipulators with application to an upper limb exoskeleton*, IEEE Trans. Cybern., vol. 43, no. 2, pp. 673-684, Apr. 2013.

- [34] J. C. Perry, H. Zabaleta, A. Belloso, T. Keller, *ARMAssist: A low-cost device for telerehabilitation of post-stroke arm deficits*, World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, Sep 7–Sep 12, 2009.
- [35] Pott, Andreas & Stelzer, Patrick & Otten, Bernward & Kraus, Werner. (2016). *Sensor and Control Concept for a Wearable Robot for Manual Load Handling Assistance*.
- [36] *Textile Electrodes Embedded in Clothing: A Practical Alternative to Traditional Surface Electromyography when Assessing Muscle Excitation during Functional Movements*
- [37] Luppescu, G., Lowney, M., Shah, R: *Classification of Hand Gestures using Surface Electromyography Signals For Upper-Limb Amputees*. Technical report, Stanford University. <http://cs229.stanford.edu/proj2016spr/report/040.pdf>
- [38] Shin, D, Kim, J, Koike, Y (2009) *A myokinetic arm model for estimating joint torque and stiffness from EMG signals during maintained posture*. Journal of Neurophysiology 101: 387–401. Google Scholar, Crossref, Medline, ISI
- [39] J. Vogel, J. Bayer, P. van der Smagt, *Continuous robot control using surface electromyography of atrophic muscles*, IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., pp. 845-850, 2013.
- [40] J. C. Perry, J. Rosen and S. Burns, *Upper-Limb Powered Exoskeleton Design*, in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 12, no. 4, pp. 408-417, Aug. 2007. doi: 10.1109/TMECH.2007.901934
- [41] M. Mulas, M. Folgheraiter and G. Gini, *An EMG-controlled exoskeleton for hand rehabilitation*, 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005., Chicago, IL, 2005, pp. 371-374. doi: 10.1109/ICORR.2005.1501122
- [42] T. Lenzi, S. M. M. De Rossi, N. Vitiello and M. C. Carrozza, *Intention-Based EMG Control for Powered Exoskeletons*, in IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 59, no. 8, pp. 2180-2190, Aug. 2012. doi: 10.1109/TBME.2012.2198821
- [43] Lenzi, Tommaso & De Rossi, Stefano Marco Maria & Vitiello, Nicola & Carrozza, Maria Chiara. (2012). *Intention-Based EMG Control for Powered Exoskeletons*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 10.1109/TBME.2012.2198821.
- [44] K. Kong and M. Tomizuka, *Control of exoskeletons inspired by fictitious gain in human model*, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 14, no. 6, pp. 689–698, Dec. 2009.
- [45] Novak Mark, *Design of An Arm Exoskeleton Controlled by the EMG Signal*, Professor Derin Sherman, December 2011.
- [46] Y. Mangukiya, B. Purohit and K. George, *Electromyography (EMG) sensor controlled assistive orthotic robotic arm for forearm movement*, 2017 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Glassboro, NJ, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/SAS.2017.7894065
- [47] K. Liu and C. Xiong, *A Novel 10-DoF Exoskeleton Rehabilitation Robot Based on the Postural Synergies of Upper Extremity Movements*, in Intelligent Robotics and Applications, J. Lee, M. C. Lee, H. Liu, and J.-H. Ryu, Eds. Springer Berlin Heidelberg 2013, pp. 363–372.

- [48] H. Lee, W. Kim, J. Han, and C. Han, *The technical trend of the exoskeleton robot system for human power assistance*, Int. J. Precis. Eng. Manuf., vol. 13, no. 8, pp. 1491–1497, Aug. 2012.
- [49] Petrișor A., Bizdoacă N.G., Popescu M.C., *Control Strategy of a 3-DOF Walking Robot*, The International Conference on „Computer as a Tool”, pp.2337-2342,1-4244-0813-X/IEEE, Warsaw, Polonia, 9-12, sept. 2007
- [50] J. Bae and I. Moon, *Design and control of an exoskeleton device for active wrist rehabilitation*, in 2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 2012, pp. 1577–1580.
- [51] A. Gupta and M. K. O’Malley, *Design of a haptic arm exoskeleton for training and rehabilitation*, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 11, pp. 280-289, 2006.
- [52] F. Popescu, J. M. Hidler, and W. Z. Rymer, *Elbow impedance during goal-directed movement*, Exp. Brain Res., vol. 152, no. 1, pp. 17–28, Sep. 2003.
- [53] Ganesan, Y., Gobee, S., & Durairajah, V. (2015). *Development of an Upper Limb Exoskeleton for Rehabilitation with Feedback from EMG and IMU Sensor*. Procedia Computer Science, 76(Iris), 53–59. <http://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.275>
- [54] Elamvazuthi, I., Zulkifli, Z., Ali, Z., Khan, M. K. A. A., Parasuraman, S., Balaji, M., & Chandrasekaran, M. (2015). *Development of Electromyography Signal Signature for Forearm Muscle*. Procedia Computer Science, 76(Iris), 229–234. <http://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.347>
- [55] J. C. Perry and J. Rosen, *Design of a 7 Degree-of-Freedom Upper-Limb Powered Exoskeleton*, The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006. BioRob 2006., Pisa, 2006, pp. 805-810. doi: 10.1109/BIOROB.2006.1639189
- [56] Stoicuța, O., & Mândrescu, C. (2012). *Identificarea sistemelor*. Petroșani: Editura Universitatii.
- [57] J. A. Birdwell, R. F. Weir, *Forward-dynamic musculoskeletal models of the human arm and hand*, Great Lakes Biomed. Conf., 2008.
- [58] A. B. Ajiboye, R. F. Weir, *A heuristic fuzzy logic approach to EMG pattern recognition for multifunctional prosthesis control*, IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng., vol. 13, no. 3, pp. 280-291, Sep. 2005.
- [59] J. Rosen, J. C. Perry, *Upper limb powered exoskeleton*, Int. J. Humanoid Robot., vol. 4, no. 3, pp. 529-548, Sep. 2007.
- [60] London, J. T. *Kinematics of the elbow*. J. Bone Joint Surg. Am. 63:529–535, 1981
- [61] van der Helm FC. *Analysis of the kinematic and dynamic behavior of the shoulder mechanism*. J Biomech 1994; 27: 527–550
- [62] RÎSTEIU, Marius; LEBA, Monica; ARAD, Andrei. *Exoskeleton for improving quality of life for low mobility persons*. Quality - Access to Success. 2019 Supplement1, Vol. 20, p341-346. 6p.

- [63] van der Helm FC. *A finite element musculoskeletal model of the shoulder mechanism*. J Biomech 1994; 27: 527–550
- [64] Xin Yao, *Evolving artificial neural networks*, in Proceedings of the IEEE, vol. 87, no. 9, pp. 1423-1447, Sept. 1999. doi: 10.1109/5.784219
- [65] N. Murata, S. Yoshizawa and S. Amari, *Network information criterion-determining the number of hidden units for an artificial neural network model*, in IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 5, no. 6, pp. 865-872, Nov. 1994. doi: 10.1109/72.329683
- [66] Ayazi F (2011) *Multi-DOF inertial MEMS: from gaming to dead reckoning*. In: 16th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (transducers), pp 2805–2808
- [67] A. Kim and M. F. Golnaraghi, *A quaternion-based orientation estimation algorithm using an inertial measurement unit*, PLANS 2004. Position Location and Navigation Symposium (IEEE Cat. No.04CH37556), Monterey, CA, USA, 2004, pp. 268-272. doi: 10.1109/PLANS.2004.1309003
- [68] Anastassiou G. A., *A Recurrent Neural Fuzzy Network*, J. Computational Analysis and Applications, vol. 20, no.2, 2016, Eudoxus Press, LLC
- [69] Ahmad, N.; Ghazilla, R.A.R.; Khairi, N.M.; Kasi, V. *Reviews on various inertial measurement unit (IMU) sensor applications*. Int. J. Signal Process. Syst. 2013, 1, 256–262.
- [70] Caron, F., Duflos, E., Pomorski, D., Vanheeghe, P.: *GPS/IMU data fusion using multisensor Kalman filtering: introduction of contextual aspects*. Information Fusion, pp. 221–230 (2004)
- [71] Alatisé, M.B.; Hancke, G.P. *Pose Estimation of a Mobile Robot Based on Fusion of IMU Data and Vision Data Using an Extended Kalman Filter*. Sensors 2017, 17, 2164.
- [72] R.E. Kearney and I.W. Hunter. *System identification of human joint dynamics*. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 18(1):55–87, 2000.
- [73] L. Ljung. *System Identification. Theory for the User*. Prentice Hall, Upper Saddle River, USA, 2nd edition, 1999.
- [74] Pătrășcoiu N., *Modelarea și simularea sistemelor*, 973-85487-8-0, 2001, Publishing Focus, Petroșani, 2001
- [75] Y. Zhang, C. Yi, Zhang, *Neural Networks and Neural-Dynamic Method*, Hauppauge, NY, USA: Nova, 2011.
- [76] H. B. Demuth, M. H. Beale, O. De Jess, M. T. Hagan, *Neural Network Design*, Stillwater, OK, USA: Martin Hagan Publisher, 2014.
- [77] Collobert, R., Kavukcuoglu, K., Farabet, C.: *Torch7: a Matlab-like environment for machine learning*. In: NIPS BigLearn Workshop (2011)
- [78] Z.-L. Gaing, *Wavelet-based neural network for power disturbance recognition and classification*, IEEE Trans. Power Del., vol. 19, no. 4, pp. 1560-1568, Oct. 2004.

- [79] Cioca, M., Cioca, L., *Multi-criterion Analysis of Reference Architectures and Modelling Languages used in Production Systems Modelling*, 3 IEEE International Conference on Industrial Informatics, Perth, Australia, 2005.
- [80] R. Pintelon and J. Schoukens. *System Identification: a Frequency Domain Approach*. IEEE Press, Piscataway, USA, 2001.
- [81] Filipescu, A., Susnea, I., & Stamatescu, G. (2009, December). *Distributed system of mobile platform obstacle avoidance and control as robotic assistant for disabled and elderly*. Paper presented at the IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA 2009), Christchurch, New Zealand. (1886–1891). USA: IEEE.
- [82] G.P. Rao and H. Unbehauen. *Identification of continuous-time systems*. IEE Proceedings-Control Theory and Applications, 153(2):185–220, 2006.
- [83] R. Pintelon, J. Schoukens, and Y. Rolain. *Box-Jenkins continuous-time modeling*. Automatica, 36(7):983–991, 2000.
- [84] Nelles O. 2001. *Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks and fuzzy models*. Springer, Berlin.
- [85] X. Zhang, X. Chen, Y. Li, V. Lantz, K. Wang, J. Yang, *A framework for hand gesture recognition based on accelerometer and EMG sensors*, IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part A Syst. Humans, vol. 41, no. 6, pp. 1064-1076, Nov. 2011.
- [86] Öberg, *Muscle fatigue and calibration of EMG measurements*, J. Electromyogr. Kinesiol., vol. 5, no. 4, pp. 239-243, Dec. 1995.
- [87] L. Ljung. *Perspectives on system identification*. Annual Reviews in Control, 34(1):1–12, 2010.