

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI"
DIN IAȘI**



Contribuții privind utilizarea interfețelor creier- calculator pentru controlul roboților

REZUMAT

Alexandru Mitocaru

Conducător de doctorat: Prof. dr. ing. Marian Silviu Poboroniuc

IAȘI, 2025

Introducere

Interfețele Creier Calculator (sau BCI - Brain Computer Interfaces în literatura de specialitate) ce controlează dispozitive robotice sunt o tehnologie revoluționară cu implicații semnificative în medicină și reabilitare. Prin stabilirea unei căi de comunicație directă între creier și o un dispozitiv extern, roboții controlați prin intermediul unei interfețe creier-calculator pot ocoli posibilele probleme de la nivelul sistemului nervos, oferind astfel utilizatorului un nivel nou de independență și funcționalitate.

Cel mai important impact a acestor dispozitive controlate prin BCI este asupra câmpului medicinei, în special pentru pacienți cu condiții ce cauzează paralizia sau deficiențe motorii. În cazul pacienților cu accidente la nivelul coloanei vertebrale, scleroză laterală amiotrofică (sau ALS - amyotrophic lateral sclerosis în literatura de specialitate), sau accident vascular cerebral (sau stroke în literatura de specialitate), aceste sisteme pot restaura funcțiile motorii pierdute. De exemplu, un pacient paralizat își poate utiliza gândurile pentru a controla un braț robotic, realizând astfel sarcini de zi cu zi cum ar fi ridicarea unui pahar sau hrănirea autonomă, ce îmbunătățesc semnificativ calitatea vieții și autonomia.

Exoschelete și neuroproteze controlate prin intermediul BCI sunt un subiect important pentru cercetările curente. Aceste sisteme robotice permit utilizatorilor redobândirea mobilității prin comanda directă a membrilor robotice. Această tehnologie nu este doar ajută mișcarea, ci promovează neuroplasticitate, sau abilitatea creierului de a se reorganiza prin formarea unor noi conexiuni neurale. Prin prezentarea unui sistem de tip closed-loop unde semnalele cerebrale ale utilizatorului sunt transformate direct în comenzi de mișcare și utilizatorul primește feedback de tip vizual, aceste dispozitive ajută creierul să reînvețe căi motorii neurale, o componentă critică în cazul accidentului vascular cerebral și al reabilitării neurologice.

În afara sferei medicale, dispozitivele controlate prin BCI prezintă potențialul de a îmbunătăți abilitățile umane și de a avansa cercetarea științifică. Pentru utilizatori normali, sănătoși, această tehnologie poate fi utilizată în cadrul operării de la distanță sau teleprezență, permițând oamenilor să controleze roboți în medii ostile sau inaccesibile.

Integrarea inteligenței artificiale (sau AI – Artificial Intelligence în literatura de specialitate) în cadrul sistemelor BCI accelerează cercetarea în acest câmp. Algoritmii AI pot decodifica semnale neurale complexe cu o viteză și precizie superioară. Aceasta este cu atât mai important în cazul sarcinilor ce necesită un număr mare de grade de libertate, cum sunt manipularea obiectelor sau

navigarea prin scenarii complexe. Această sinergie nu îmbunătățește doar performanțele dispozitivelor dar crește și înțelegerea proceselor neurale.

Cercetarea internațională se concentrează pe dezvoltarea de sisteme BCI mai precise și mai puțin invazive. Jucători majori precum Neuralink (SUA), NeuroXess (China), Synchron (SUA/Australia) și numeroase consorții de cercetare din universități de top, cum ar fi Universitatea Carnegie Mellon și Universitatea din California - San Diego, conduc aceste eforturi. Se caută soluții pentru a îmbunătăți stabilitatea semnalelor, a reduce necesitatea recalibrării frecvente și a crește numărul de canale de înregistrare.

Pe lângă aplicațiile tradiționale de asistare a persoanelor cu dizabilități motorii, cercetarea actuală explorează:

- **Neuroreabilitarea:** Utilizarea BCI-urilor pentru a accelera recuperarea funcțiilor motorii la pacienții cu AVC sau leziuni medulare.
- **Augmentarea cognitivă:** Sisteme BCI care ar putea îmbunătăți memoria, atenția sau chiar viteza de reacție, un domeniu de interes major pentru armată și explorarea spațială.
- **Divertisment și comunicare:** Controlul jocurilor video, al roboților mobili sau al aplicațiilor de teleprezență doar prin intermediul gândurilor.

Având în vedere ritmul rapid al inovației, comunitatea internațională de neuroștiințe și tehnologie a ridicat o serie de întrebări etice și legale cruciale. Printre acestea se numără:

- **Confidențialitatea datelor:** Cum pot fi protejate datele neuronale extrem de sensibile?
- **Responsabilitatea legală:** Cine este responsabil în cazul unui accident cauzat de un robot controlat de un BCI?
- **Inegalitatea socială:** Cum să ne asigurăm că aceste tehnologii nu vor crea noi diviziuni sociale între cei care au acces la ele și cei care nu au?

Pe măsură ce tehnologia BCI avansează, apar întrebări importante legate de etică și societate. Problemele includ potențialul de compromitere a datelor personale și a securității datelor cerebrale, precum și nevoia de adresare a controverselor referitoare la autonomie și responsabilitate. Dacă un sistem robotic controlat prin BCI cauzează un accident, cine este tras la răspundere – utilizatorul sau tehnologia? Acest câmp trebuie să ia în considerare și posibilitatea de diferențiere în funcție de buget, unde doar cei privilegiați au acces la această tehnologie salvatoare.

I. Interfețe creier Calculator

Capitolul I oferă o prezentare comprehensivă a interfețelor creier-calculator (BCI), tehnologii inovatoare care permit comunicarea directă între creier și un dispozitiv extern, fără a implica mișcări fizice. În deschidere, este explicat rolul sistemului nervos central în inițierea și controlul mișcărilor, evidențiindu-se complexitatea proceselor neurale și biomecanice care pot fi exploatate pentru dezvoltarea sistemelor BCI, în special în contextul asistării persoanelor cu dizabilități.

Sunt analizate în detaliu metodele de **achiziție a semnalelor cerebrale**, cu accent pe tehnologiile electrice (precum EEG), dar și pe cele hemodinamice (fMRI, fNIRS), discutând avantajele și limitările fiecăreia în funcție de aplicație, cost și precizie. Etapa de **preprocesare** este esențială pentru eliminarea artefactelor fiziologice și de mediu, asigurând acuratețea interpretării semnalului cerebral.

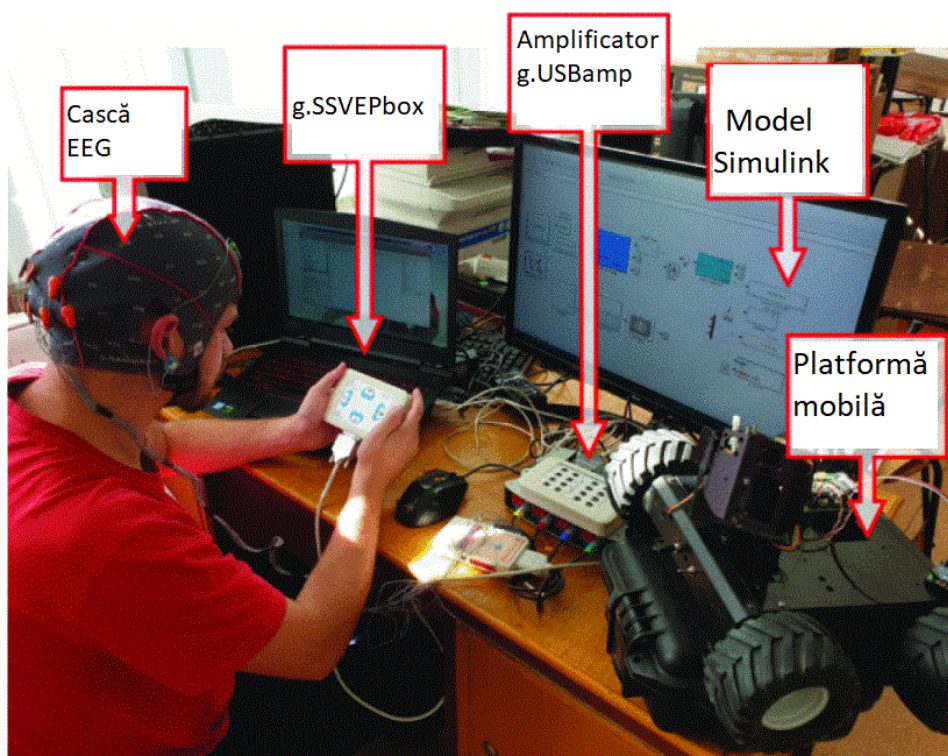
În continuare, sunt prezentate diverse metode de **extragere și selecție a caracteristicilor**, cum ar fi PCA, ICA, transformata Wavelet, modelul spațial comun (CSP) sau algoritmi genetici. Aceste tehnici permit identificarea celor mai relevante trăsături din datele cerebrale, reducând dimensionalitatea și maximizând eficiența sistemului. Ulterior, sunt abordați cei mai utilizați **algoritmi de clasificare**, inclusiv k-NN, LDA, SVM, clasificatorul Bayes și rețelele neuronale, care interpretează semnalele procesate și le transformă în comenzi concrete pentru controlul unui dispozitiv.

Capitolul se încheie cu o trecere în revistă a **aplicațiilor interfețelor BCI**, precum comunicarea asistată, restaurarea funcțiilor motorii, controlul mediului, locomoția și chiar divertismentul. Aceste aplicații demonstrează potențialul vast al interfețelor creier-calculator în domenii medicale, educaționale și tehnologice, oferind soluții reale pentru îmbunătățirea calității vieții și a interacțiunii om-mașină.

II. Implementarea unui sistem tip Interfață Creier-Calculator pentru controlul unei platforme robotice mobile utilizând metoda Potențialelor Evocate în Stare Stabilă (SSVEP)

Capitolul descrie realizarea practică a unui sistem BCI destinat controlului unei platforme mobile (scaun cu rotile), utilizând semnale EEG de tip SSVEP (Steady-State Visually Evoked Potentials). Scopul experimentului a fost dezvoltarea unei soluții care să permită utilizatorilor paraplegici să controleze un scaun cu rotile doar prin activitate cerebrală, fără mișcare fizică. Metoda presupune ca utilizatorul să-și concentreze atenția asupra unor LED-uri care clipesc la frecvențe distincte, fiecare frecvență fiind asociată cu o comandă direcțională.

În cadrul experimentului au fost măsurate întârzierile dintre momentul în care utilizatorul se concentrează pe un stimul vizual și momentul în care comanda este efectiv transmisă către platforma robotică. Rezultatele au indicat o întârziere medie de aproximativ 1.1 – 1.2 secunde, ceea ce permite un control adecvat în medii ambulatorii, mai ales la viteze moderate de deplasare (ex. 0.5 m/s). Aceste întârzieri sunt compensate prin integrarea unui sistem de inteligență artificială auxiliară, care permite platformei să continue deplasarea autonomă (ex. evitare de obstacole), chiar și în perioada de procesare a comenzii.



Figură 1 Metoda de implementare a sistemului descris

Concluziile evidențiază fezabilitatea utilizării răspunsurilor SSVEP în controlul sistemelor mobile asistive și subliniază potențialul acestor interfețe pentru îmbunătățirea autonomiei persoanelor cu dizabilități motorii. Rezultatele experimentale validează funcționarea conceptului în condiții reale, iar direcțiile viitoare de cercetare vizează reducerea timpului de răspuns și extinderea setului de comenzi recunoscute de sistem.

III. Implementarea unui sistem Interfață Creier-Calculator bazat pe metoda imaginarea mișcării

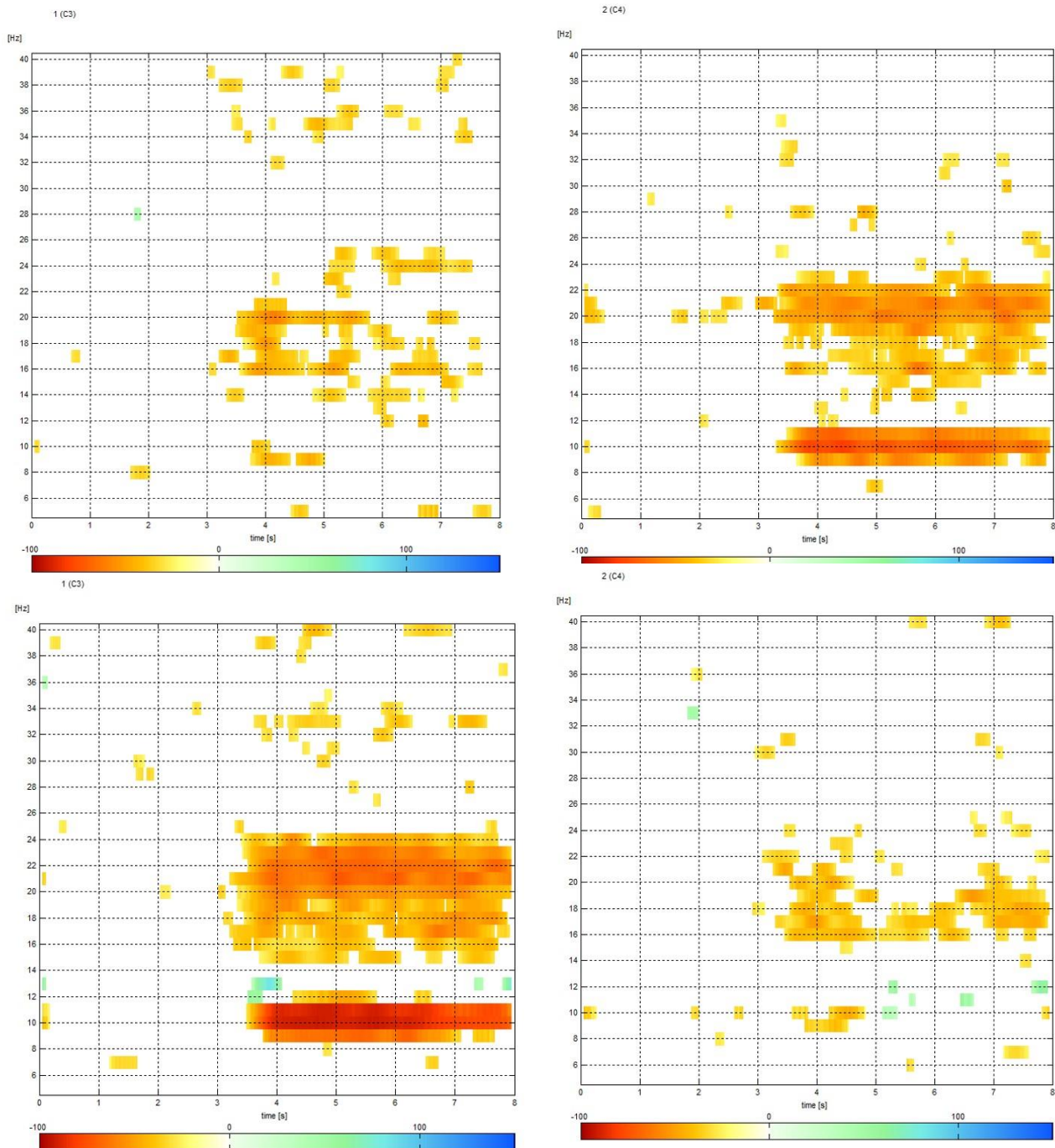
Capitolul III prezintă dezvoltarea și testarea unui sistem BCI bazat pe metoda **imaginării mișcării (motor imagery)**, folosind tehnologia g.Nautilus. Experimentul a avut ca scop evaluarea capacității utilizatorului de a controla o platformă mobilă prin intermediul activității cerebrale asociate cu imaginarea mișcării mâinilor. Sistemul a inclus o interfață grafică care oferea indicii vizuale, iar utilizatorii erau instruiți să-și imagineze mișcarea mâinii corespunzătoare direcției indicate. Platforma software a funcționat în trei moduri: training, feedback și control liber (freerun), permițând o evaluare progresivă a performanței utilizatorilor.

În cadrul experimentului au participat doi subiecți sănătoși, fără experiență anterioară cu interfețele BCI. S-a observat o întârziere considerabilă între momentul stimulului vizual și momentul clasificării intenției utilizatorului, cu o performanță generală mai scăzută cu peste 40% față de metoda SSVEP utilizată în capitolul anterior. Totuși, s-au remarcat îmbunătățiri în timp între cele două sesiuni experimentale, susținând ideea că antrenamentul repetat duce la creșterea acurateței și vitezei de răspuns în cazul acestei metode.

Un avantaj important al metodei imaginării mișcării este **gradul crescut de libertate fizică** oferit utilizatorului, care nu este nevoit să se concentreze pe stimuli vizuali statici, ceea ce face această abordare mai confortabilă și mai naturală. Cu toate acestea, metoda este limitată la comenzi simple (stânga/dreapta), ceea ce restrânge aplicabilitatea în scenarii de navigație complexă. Pentru a compensa această limitare, autorii propun un sistem hibrid, în care deplasarea înainte și evitarea obstacolelor sunt gestionate autonom, combinând astfel controlul mental cu algoritmi de inteligență artificială.

În concluzie, deși metoda imaginării mișcării prezintă inițial performanțe mai slabe față de alte metode BCI, aceasta oferă un potențial semnificativ în dezvoltarea unor interfețe mai flexibile, intuitive și mai ușor de adoptat de utilizatori. Odată cu antrenamentul adecvat și optimizarea

algoritmilor de clasificare, această abordare ar putea deveni o soluție viabilă pentru controlul dispozitivelor asistive mobile și pentru aplicații avansate în interacțiunea om-mașină.



Figură 2 Hărțile CSP de activare a ariilor cerebrale. Primul rând prezintă o activare a mâinii stângi, iar rândul doi o activare a mâinii drepte

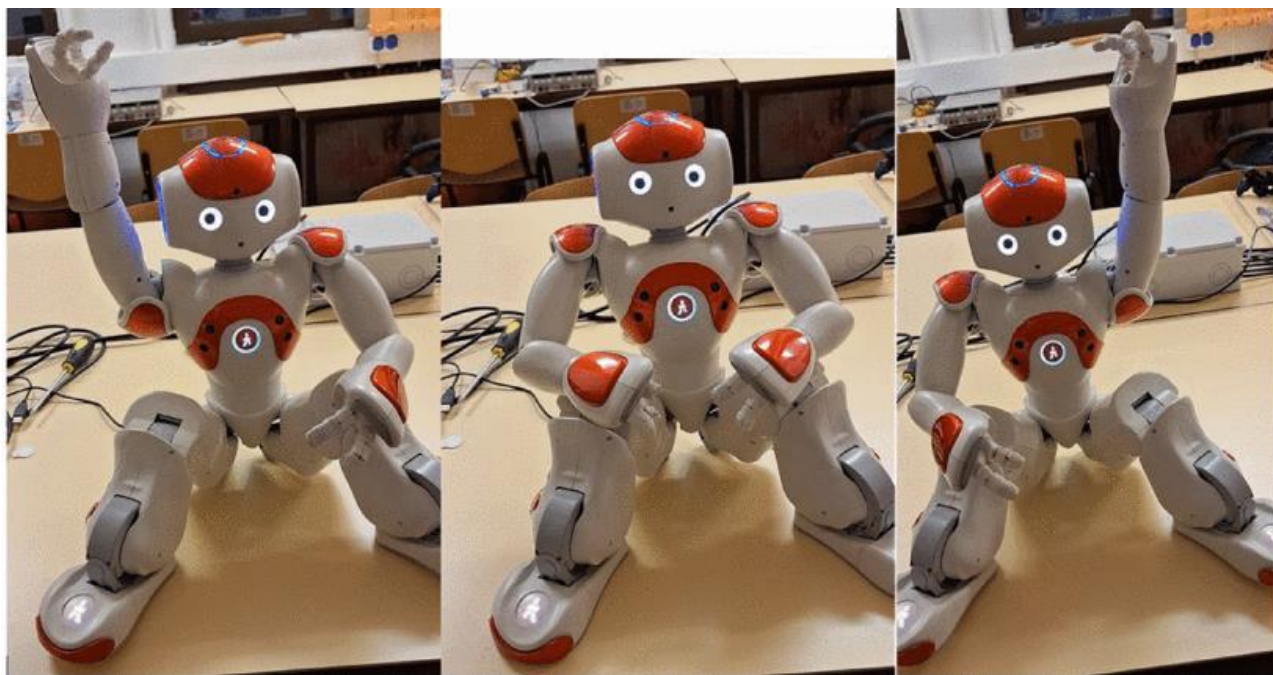
IV. Implementarea unui sistem interfață creier-calculator ce utilizează imaginarea mișcării pentru controlul unui robot umanoid

Capitolul IV detaliază dezvoltarea unui sistem BCI bazat pe **imaginarea mișcării**, aplicat în controlul unui **robot umanoid NAO**, folosind semnale EEG. Experimentul a fost realizat într-un mediu controlat de laborator, cu participarea a cinci subiecți sănătoși, care au fost supuși inițial unei sesiuni de antrenament fără feedback. Scopul acestei etape a fost generarea unui **clasificator EEG personalizat** pentru fiecare participant, capabil să distingă între intenția de a mișca mâna stângă și cea dreaptă. După calibrări, clasificatorul a fost utilizat într-un mediu cu feedback vizual, crescând astfel capacitatea de adaptare a utilizatorului și eficiența sistemului.

Sistemul de control a fost implementat în MATLAB, permițând interacțiunea în timp real cu robotul NAO, care primea comenzi doar atunci când clasificarea era validată în mod activ. Etapa finală a experimentului a inclus modul „free run”, în care utilizatorul putea iniția comenzi mentale fără a primi stimuli vizuali, simulând un scenariu real de interacțiune liberă. Rezultatele au arătat o **desincronizare clară** între activitatea cerebrală asociată celor două tipuri de mișcare imaginată, observată în jurul valorii de 3,6 secunde de la prezentarea indiciului, aspect ce confirmă robustețea metodei.

Un aspect esențial în validarea sistemului a fost **rata de eroare** a clasificatorului. Aceasta a scăzut semnificativ de la 18,77% în faza de antrenament la 11,47% în faza cu feedback, ceea ce evidențiază capacitatea sistemului de a învăța și de a se adapta la particularitățile fiecărui utilizator. Această îmbunătățire demonstrează potențialul real al utilizării semnalelor EEG pentru controlul precis și fiabil al unui robot umanoid, într-un cadru practic.

Capitolul include, de asemenea, două subsecțiuni dedicate **modelării cinematice și dinamice a robotului NAO**, care explică detaliat funcționarea și controlul său din perspectivă mecanică și matematică. Aceste secțiuni sunt fundamentale pentru înțelegerea modului în care comenzile mentale sunt transmise către robot și transformate în mișcări fizice. În concluzie, experimentul confirmă viabilitatea utilizării BCI pentru controlul roboților umanoizi, deschizând direcții de cercetare în asistența robotică, neuroreabilitare și interacțiunea om-mașină bazată pe activitate neuronală.



Figură 3 Acțiunile realizate de NAO în cadrul experimentului

V. Concluzii generale

Lucrarea de față a urmărit investigarea și validarea potențialului interfețelor creier–calculator (BCI) bazate pe semnale EEG pentru controlul unor platforme mobile sau roboți asistențiali. Dincolo de prezentarea teoretică a procesării semnalelor EEG și a limitărilor asociate, lucrarea s-a axat pe dezvoltarea și testarea unor prototipuri funcționale care demonstrează fezabilitatea controlului mental în contexte aplicative, precum deplasarea unui scaun cu roțile sau controlul unui robot umanoid.

În primul rând, analiza lanțului algoritmic implicat în prelucrarea semnalului EEG a evidențiat importanța majoră a etapelor de preprocesare, extragere de caracteristici și clasificare. Fără aplicarea unor metode robuste, precum filtrarea spațială (CSP, ICA) sau selecția adaptivă a caracteristicilor, semnalul EEG – afectat de zgomot, variabilitate și artefacte – nu poate fi exploatat eficient. De asemenea, provocările legate de driftul semnalului și lipsa unor date etichetate în cantitate mare pot afecta semnificativ performanța în aplicații reale.

În ceea ce privește aplicațiile practice, lucrarea a demonstrat două direcții importante: (1) controlul unui scaun cu roțile prin metoda SSVEP și (2) controlul unui robot mobil prin metoda imaginării mișcării. Prima metodă, bazată pe concentrarea vizuală asupra unor stimuli LED, a oferit o performanță superioară în ceea ce privește timpul de reacție, cu o întârziere medie de aproximativ

1,1 secunde, suficient de redusă pentru a permite un control eficient în medii ambulatorii. Cea de-a doua metodă, deși mai lentă și mai sensibilă la erori, a demonstrat avantajul libertății de mișcare, permițând un control intuitiv, mai confortabil pentru utilizator, și cu potențial de îmbunătățire odată cu antrenamentul repetat.

Experimentul final, desfășurat în mediu controlat de laborator, a utilizat metoda imaginării mișcării pentru controlul robotului NAO. Rezultatele au arătat o îmbunătățire notabilă a performanței sistemului după calibrarea clasificatorului individual și introducerea feedback-ului, cu reducerea ratei de eroare de la 18,77% la 11,47%. De asemenea, modul „free run” a arătat potențialul unei interacțiuni complet libere între utilizator și robot, deschizând posibilitatea unor aplicații personalizate.

Prin urmare, lucrarea susține validitatea interfețelor BCI în contexte de mobilitate asistată, control robotic și interacțiune om-mașină. Deși performanțele actuale nu permit încă o integrare largă în mediul real, direcțiile identificate – precum învățarea adaptivă, clasificarea hibridă și integrarea cu inteligența artificială – conturează perspective promițătoare pentru viitor. Rezultatele obținute în această lucrare pot fi considerate un fundament solid pentru dezvoltări ulterioare în direcția îmbunătățirii accesibilității pentru persoanele cu dizabilități motorii, dar și pentru crearea unor noi paradigme de interacțiune om-tehnologie.

VI. Contribuții personale

În cadrul lucrării, contribuțiile personale s-au concretizat în următoarele aspecte:

1. **Studiul și analiza comparativă a metodelor de prelucrare EEG:** Am realizat o documentare amplă asupra tehnicilor moderne de filtrare, extragere de caracteristici și clasificare aplicate semnalului EEG, cu accent pe aplicabilitatea acestora în sisteme BCI.
2. **Configurarea și testarea a două paradigme de control mental:**
 - Implementarea unei interfețe SSVEP pentru controlul unui scaun cu roțile, bazată pe concentrarea asupra unor LED-uri frecvente.
 - Implementarea unei interfețe de tip imaginație motrică pentru controlul unui robot mobil (platforma A4WD1 și robotul NAO), utilizând clasificatori personalizați.
3. **Proiectarea și dezvoltarea aplicației MATLAB pentru integrarea semnalului EEG cu comenzile robotului NAO:** Am contribuit direct la dezvoltarea unei aplicații MATLAB ce permite controlul robotului NAO pe baza comenzilor generate prin clasificarea semnalului EEG.

4. **Analiza performanței sistemului în diverse scenarii experimentale:** Am colectat, prelucrat și analizat datele EEG înregistrate de la participanți, determinând rata de eroare, întârzierile de clasificare și diferențele dintre clasele de semnale (stânga/dreapta).

5. **Evaluarea comparativă a metodelor SSVEP vs. Imaginarea mișcării:** Am realizat o comparație detaliată a celor două metode în termeni de precizie, latență, flexibilitate și grad de confort pentru utilizator.

6. **Integrarea unui model de control hibrid:** Am propus și testat conceptul unui sistem de control combinat (comenzi mentale + navigație autonomă), care compensează întârzierile în răspunsul sistemului EEG prin evitarea automată a obstacolelor sau menținerea traiectoriei.

7. **Documentarea și redactarea completă a lucrării:** Toate capitolele teoretice și experimentale au fost documentate, structurate și redactate integral pe baza cercetării proprii și a rezultatelor obținute în cadrul testelor.

VII. Valorificarea rezultatelor

Activitatea de cercetare desfășurată în cadrul acestei lucrări a generat o serie de rezultate relevante care au fost valorificate prin publicarea lor în cadrul unor conferințe și reviste de specialitate. Aceste lucrări reflectă atât progresul realizat în domeniul interfețelor creier–calculator (BCI) și al controlului robotic prin semnale EEG, cât și explorarea unor teme conexe, relevante pentru domeniul ingineriei biomedicale, inteligenței artificiale sau sistemelor mecatronice.

1) **A. Mitocaru**, A. Buzamat, M. S. Poboroniuc, D. C. Irimia, A. G. Baci, *Brain Computer Interface Controlled Humanoid Robot*, 2024 E-Health and Bioengineering Conference (EHB), IASI, Romania, 2024, pp. 1-4, doi:10.1109/EHB64556.2024.10805718. [indexat WoS]

2) **A. Mitocaru**, M. S. Poboroniuc, A. G. Baci, D. C. Irimia, *Animated application to control humanoid robot through a brain-computer interface*, The VIIth International Fair of Innovation and Creative Education for Youth (ICE-USV), July 07-09 2023, Suceava, Romania. [indexat IEEEExplore]

3) M. S. Poboroniuc, R. Ionașcu, A. I. Roman, A. Piseru, T. Piseru, D. C. Irimia, **A. Mitocaru**, A. G. Baci, *Clinically tested mechatronic devices for hand rehabilitation*, The 15th Edition European Exhibition of Creativity and Innovation EUROINVENT, Mai 11-13 2024, Iași România. [indexat IEEEExplore]

- 4) M. S. Poboroniuc, A. I. Roman, R. Ionașcu, T. Piseru, A. Piseru, D. C. Irimia, A. G. Baci, **A. Mitocaru**, *Hybrid fes&mechatronic devices aiming to assess and support rehabilitation in stroke people*, THE 27th INTERNATIONAL CONFERENCE OF INVENTICS “INVENTICS 2023-Science of Creativity”, June 21-23 2022, Iași, Romania. **[indexat IEEEExplore]**
- 5) **A. Mitocaru**, M. S. Poboroniuc, D. C. Irimia, S. Plăcintă, A.G. Baci, *Brain-Computer Interface Based Control for a Humanoid Robot*, 2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), October 20-22 2022, Iași, Romania. **[indexat IEEEExplore]**
- 6) S. Plăcintă, M. S. Poboroniuc, D. C. Irimia, **A. Mitocaru**, *Extending the Control's Number in Motor Imagery Based Brain-Computer Interfaces Applications*, 2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), October 20-22 2022, Iași, Romania. **[indexat IEEEExplore]**
- 7) R. Ionașcu, M. S. Poboroniuc, A. I. Roman, **A. Mitocaru**, T. Piseru, E. A. Piseru, D. C. Irimia, *Hybrid FES & Mechatronic Hand Control Method for Upper Limb Rehabilitation Systems*, 2022 E-Health and Bioengineering Conference (EHB), November 17-18 2022, Iași Romania. **[indexat IEEEExplore]**
- 8) **A. Mitocaru**, M. S. Poboroniuc, D. C. Irimia, A. G. Baci, *Comparison Between Two Brain Computer Interface Systems Aiming to Control a Mobile Robot*, 2021 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), October 06-08 2021, Iași, Romania. **[indexat IEEEExplore]**
- 9) R. Ionașcu, A. I. Roman, M. S. Poboroniuc, D. C. Irimia, **A. Mitocaru**, *A Smart FES and Mechatronic Glove System MANUTEX Aiming for Recovery of the Upper Limb in Stroke People*, 2021 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), October 06-08 2021, Iași, Romania. **[indexat IEEEExplore]**
- 10) M. S. Poboroniuc, D. C. Irimia, R. Ionașcu, A. I. Roman, **A. Mitocaru**, A. G. Baci, *Design and Experimental Results of New Devices for Upper Limb Rehabilitation in Stroke*, 2021 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB), November 18-19 2021, Iași Romania 2022. **[indexat WoS]**
- 11) D. C. Irimia, **A. Mitocaru**, A. G. Baci, M. S. Poboroniuc, *Steady-State Visual Evoked Potentials-based Control of a Mobile Robot Platform as a Preamble to Support Paraplegics Mobility*, 2019 E-Health and Bioengineering Conference (EHB), November 21-23 2019, Iași, Romania. **[indexat WoS]**

VIII. Direcții următoare de cercetare

Având în vedere rezultatele experimentale obținute în această lucrare, precum și limitările identificate pe parcursul testărilor, se conturează o serie de direcții viitoare de cercetare cu un potențial semnificativ pentru îmbunătățirea și extinderea sistemelor BCI (Brain-Computer Interface) bazate pe semnale EEG. Dezvoltarea unor astfel de sisteme implică nu doar rafinarea algoritmilor de procesare a semnalului, ci și integrarea unor noi paradigme de control, precum și adaptarea la scenarii reale de utilizare.

1. Integrarea metodei P300 pentru extinderea gamei de comenzi

O direcție promițătoare constă în implementarea metodei P300 pentru controlul robotului umanoid NAO. Spre deosebire de imaginarea mișcării sau SSVEP, metoda P300 permite selecția unor comenzi discrete dintr-o matrice vizuală, în urma reacției creierului la apariția unui stimul rar, dar semnificativ. Prin intermediul acestei metode, utilizatorul ar putea alege între mai multe acțiuni ale robotului – cum ar fi deplasarea în direcții multiple, interacțiuni sociale (ex. salut, vorbire), gesturi sau rutine programate – ceea ce ar spori considerabil complexitatea și naturalitatea interacțiunii. Un sistem BCI-P300 bine calibrat poate funcționa cu o rată de eroare scăzută și ar putea reduce gradul de efort cognitiv necesar în controlul direct al robotului.

2. Dezvoltarea unui sistem BCI hibrid

Un alt pas firesc în evoluția acestui tip de interfețe este dezvoltarea unei arhitecturi BCI hibride, care să combine mai multe paradigme EEG: imaginația mișcării (motor imagery), SSVEP și P300. Astfel, utilizatorul ar putea folosi comenzi direcționale prin imaginație motrică, selecții rapide cu SSVEP și comenzi complexe prin P300. Combinarea acestor metode poate îmbunătăți gradul de control, acuratețea și adaptabilitatea sistemului, în funcție de contextul de utilizare.

3. Îmbunătățirea clasificatorilor și reducerea întârzierilor

Timpii de răspuns rămân un aspect critic în utilizarea practică a interfețelor BCI. Cercetări viitoare pot viza utilizarea unor algoritmi de învățare automată avansați – cum ar fi rețele neuronale convoluționale (CNN), rețele recurente (LSTM) sau modele hibride – pentru reducerea timpului necesar clasificării și pentru creșterea preciziei, mai ales în aplicațiile cu feedback în timp real. De asemenea, introducerea unor metode de învățare incrementală ar putea permite adaptarea dinamică a clasificatorului la modificările fiziologice ale utilizatorului.

4. Generalizarea pentru utilizatori cu dizabilități motorii

O direcție esențială este testarea și adaptarea sistemului pentru persoane cu dizabilități motorii severe, întrucât întreaga arhitectură a fost concepută ca suport pentru creșterea autonomiei acestor utilizatori. Este importantă calibrarea fină a sistemului la caracteristicile individuale ale utilizatorilor, precum și asigurarea unei interfețe grafice intuitive și ușor de înțeles.

5. Reducerea etapelor de calibrare și personalizare

Actualmente, sistemele BCI necesită o etapă inițială de antrenament pentru fiecare utilizator, ceea ce poate fi un proces consumator de timp și obositor. Utilizarea tehnicilor de transfer learning sau few-shot learning ar putea contribui la reducerea acestei perioade, permițând sistemului să se adapteze rapid la utilizatori noi pe baza unor seturi de date EEG preexistente.

6. Navigație autonomă asistată de AI

Pentru platformele mobile, precum scaunele rulante sau roboții de asistență, este recomandată integrarea unui modul de inteligență artificială pentru navigație autonomă. Astfel, în perioadele de întârziere în procesarea comenzilor EEG, robotul ar putea evita obstacole, păstra traseul stabilit sau opri în condiții de risc, sporind siguranța generală.

7. Utilizarea echipamentelor portabile cu electrozi uscați

Pentru a facilita implementarea sistemului în medii reale, viitoarele cercetări pot evalua performanța sistemului cu echipamente EEG portabile și electrozi uscați de nouă generație. Această direcție urmărește creșterea confortului utilizatorului și eliminarea necesității unui mediu de laborator pentru utilizarea zilnică a sistemului.

8. Interfețe grafice adaptative și feedback multimodal

Un sistem eficient de feedback vizual și/sau auditiv poate contribui la o mai bună învățare și adaptare a utilizatorului. În cazul metodei P300, interfața grafică ar putea fi adaptată dinamic în funcție de performanțele înregistrate, nivelul de atenție detectat sau preferințele individuale ale utilizatorului.

În concluzie, direcțiile prezentate susțin ideea că sistemele BCI EEG pot evolua rapid de la stadiul de cercetare experimentală spre aplicații reale, prin integrarea unor noi paradigme de control, a inteligenței artificiale și a tehnologiilor portabile. Implementarea metodei P300 și dezvoltarea unor arhitecturi hibride multifuncționale deschid drumul către o interacțiune naturală și eficientă între om și mașină, cu beneficii reale pentru persoanele cu dizabilități și nu numai.

IX. Distincții și premii câștigate

- (1) **Medalie de aur** "Animated Application to Control Humanoid Robot Through a Brain-Computer Interface", Salonul Internațional de Inventică și Educație Creativă pentru Tineret, editia a VII-a 2023 –Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava, 08 Iulie 2023



- (2) **Premiu "Junior Inventor"** in cadrul INVENTICA 2023 – Universitatea Tehnica "Gheorghe Asachi" Iasi, 23 Iunie 2023.





- (3) **Medalie de argint** "Tehnici de control ale roboților umanoizi bazate pe interfețe creier-calculator", Salonul Internațional de Inventică și Educație Creativă pentru Tineret, editia a VI-a 2022 –Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava, Iulie 2022



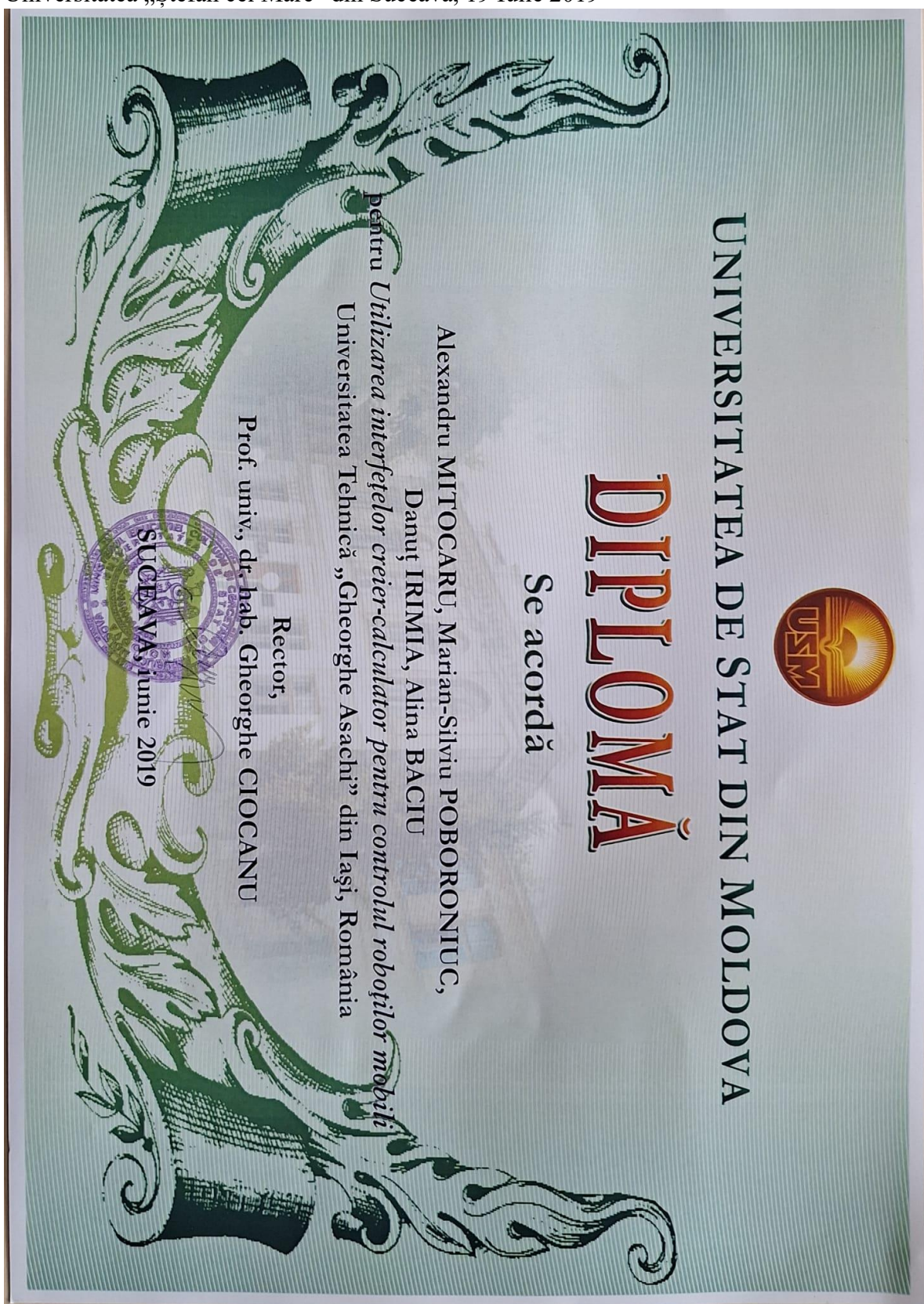
- (4) **Medalie de aur** "Brain-Computer Interfaces to control a humanoid/mechanical robot",
EUROINVENT – European Exhibition of Creativity and Innovation 13th edition, Mai 2022



- (5) **Medalie de aur** "Brain Computer Interfaces to control neuroprostheses and robots", EUROINVENT – European Exhibition of Creativity and Innovation 11th edition, 17 Mai 2019



- (6) **Premiu special** "Utilizarea interfețelor creier-calculator pentru controlul roboților mobili",
Salonul Internațional de Inventică și Educație Creativă pentru Tineret, editia a III-a 2019 –
Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava, 19 Iulie 2019





UNIVERSITATEA DE
STAT DIN MOLDOVA
SUCEAVA 2019