

# Conceptul unui sistem robotic inteligent, bio-inspirat și comandat cu ajutorul creierului uman

Dan M. Dobrea, Monica C. Dobrea

**Abstract:** Între rata de transfer a informației și acuratețea clasificării unui sistem de interfațare creier-calculator (BCI) există întotdeauna o balanță. Dacă se dorește o rată de clasificare mai mare atunci, sistemul va deveni, ca o consecință directă, unul mai lent. De asemenea, un sistem BCI (în timp real) mai rapid implică, la rândul lui, o rată de clasificare mai mică. Dacă se analizează sistemul motor uman se poate remarca organizarea ierarhică (cu diferite niveluri de control ce recepționează informații senzoriale diferite) ca o posibilă soluție biologică pentru problema de mai sus, respectiv cea a complexității versus controlul în timp real (online). În cazul soluției biologice, proprioceptorii din mușchi și receptorii sistemului vestibular informează (în special la nivelurile inferioare ale controlului motor) sistemul nervos central (SNC) despre postura corpului și mecanica locomotorie a acestuia. Spre deosebire de acestea, informațiile tactile, vizuale și auditive sunt în principal utilizate de către nivelurile superioare de control/comandă ale sistemului motor uman (HMS). Sistemul motor uman necesită, așa după cum se știe, o perioadă de instruire/exersare/antrenare/învățare în vederea executării unui anumit program motor (așa cum se învață, de exemplu, la începutul vieții, mersul) – urmată apoi de o adaptare continuă la schimbarea parametrilor sistemului uman viu și a caracteristicilor mediului înconjurător al acestuia. Din această perspectivă, lucrarea de față vine și prezintă conceptele unui sistem robotic inteligent, bio-inspirat și cu auto-organizare (de exemplu, un scaun cu roțile) – referit în cele ce urmează ca iBIAoRS – ce va fi capabil pe de o parte să controleze dinamica mișcării sistemului, folosind pentru aceasta un sistem BCI integrat, iar pe de altă parte să respecte principiul subordonării ierarhice succesive ce caracterizează HMS. În cele ce urmează prezentăm câteva rezultate preliminare obținute în faza de testare a unuia dintre conceptele fundamentale ale unui sistem robotic cu auto-organizare iBIAoRS dezvoltat de autori.

## 1. INTRODUCERE

În vederea dezvoltării unui sistem BCI performant, util în controlul mediului înconjurător și al comunicațiilor – sistem dedicat, în general, persoanelor cu severe dizabilități motorii (exemple de astfel de sisteme: un program de procesare a cuvintelor, un scaun-cu-roțile inteligent sau o neuroproteză) – trebuie luate în considerare cel puțin două aspecte: capacitățile de lucru în timp real ale sistemului precum și performanțele de clasificare ale acestuia. Între aceste două aspecte constructive ale sistemului întotdeauna trebuie făcut un compromis. Astfel, dacă se dorește o rată de clasificare corectă, mai mare, atunci sistemul BCI va deveni mai lent datorită, în general, complexității crescute a algoritmilor implementați în fazele de extragere și de clasificare a trăsăturilor. În prezent, acuratețea unui sistem BCI variază foarte mult între 70% și 95% [1], [2], [3] – diversele performanțe raportate în literatură depinzând în mod esențial de o serie de factori cum ar fi: numărul canalelor, tipul de metode BCI, metodele utilizate în eliminarea artefactelor, tehnicile de procesare folosite, complexitatea și puterea discriminativă a algoritmilor de clasificare abordați, numărul și tipurile de task-uri mentale folosite etc. Astfel, spre exemplu, multe sisteme BCI online folosesc task-uri motorii imaginate în scopul de a obține o comandă a sistemului global pornind de la semnalele electroencefalografice (EEG) astfel generate și care sunt înregistrate și procesate în timp real. Cu toate că un progres major a fost înregistrat în ultimii 15 ani – mai exact, dacă în 1998 mișcări imaginate ale degetelor puteau fi distinse, pe baza semnalelor EEG, cu o acuratețe în jur de

70% [4], în prezent (în 2009), în medie, acuratețea clasificării este undeva în jur de 80% - 86% [2] – , noi îmbunătățiri trebuie aduse pentru a obține o acuratețe medie de cel puțin 95%. Așa cum era de așteptat, rezultatele diverselor cercetări raportate în literatură au arătat că acuratețea clasificării depinde, în mod esențial, de caracteristicile creierului subiectului investigat și, în plus, ea depinde și de existența sau nu a unor sesiuni speciale, preliminare, de antrenare/învățare (asa numitul biofeedback). În cazul folosirii task-urilor motorii imaginate, acuratețea clasificării în cazul investigării unui singur subiect variază, în medie, între 75% și 95% [2], [5]. Aceste performanțe nu se regăsesc însă în cazul tuturor subiecților supuși analizei, rate de clasificare între 60% și 70% fiind, de asemenea, posibil de obținut în alte câteva cazuri individuale de subiecți investigați [2], [5]. Datorită dificultății subiecților de a-și controla propriile semnale EEG, un protocol adecvat de antrenare/învățare, care să dureze câteva săptămâni sau luni [2] și care să fie bazat pe un feedback vizual îl regăsim adesea implementat în multe studii [2], [6]. Sistemele convenționale de biofeedback se bazează pe simple reprezentări vizuale [2] în timp ce alte sisteme de tip BCI utilizează realitatea virtuală ca mijloc de îmbunătățire a utilizării feedback-ului în aplicațiile BCI [6]. În general, performanța tehnologiilor BCI, măsurată în rată de transfer a informației (mai exact, bit rate), sunt modeste. În fapt, performanța bit rate diferă de la sistem la sistem. Astfel, se poate vorbi atât de sisteme pentru care rata medie de comunicare este de 5.45 biți/min cât și sisteme care lucrează undeva în jur de 10 biți/min [2] etc. Însă, chiar și în condiții optime [8], niciunul dintre sistemele BCI existente nu atinge mai mult de 25 biți/min. Rata de transfer a informației este una limitată, în principal, de doi factori majori: abilitatea subiectului de a se interfața cu sistemul BCI (tradusă în performanțele de clasificare), pe de o parte, iar pe de altă parte ea este limitată de performanțele în domeniul timp al algoritmilor implementați în sistemul BCI (respectiv, algoritmi de procesare, de extragere de trăsături și de clasificare); ca un exemplu, în general, în task-urile motorii imaginate subiecții trebuie să execute mental un task motor sau altul un interval de timp de cel puțin 7 – 8 s astfel încât puterea ritmului *mu* să fie detectată cu acuratețe [2]. Oricum, dintre cei doi factori limitativi enunțați mai sus, chiar dacă în ultimul timp au fost dezvoltate noi tehnologii (mai rapide) precum și noi algoritmi (mai puțin consumatori de timp), factorul uman rămâne în continuare, de departe, factorul cel mai limitativ în dezideratul de a obține o rată de transfer a informației cât mai mare. În susținerea acestei idei vin diversele rezultate raportate în literatura de specialitate, iar dintre acestea menționăm aici doar rezultatele unui studiu [2] făcut pe 10 subiecți umani pentru care rata de transfer obținută a fost, în medie, în jur de 7 biți/min; excepție de la acest rezultat a făcut doar un singur subiect pentru care rata obținută a fost cea mai ridicată, respectiv de 22 biți/min.

În concluzie, pentru a avea simultan, atât o rată de transfer a informației mai mare, cât și o acuratețe a clasificării task-urilor mentale, de asemenea, mare, se impune definirea, implementarea și testarea unui nou concept pentru sistemele de tip BCI.

## 2. Considerații biologice

Sistemul motor uman are o organizare ierarhică foarte complexă [9], cu diferite niveluri de control, iar fiecare dintre acestea primește informații senzoriale specifice funcționării sale. Astfel, proprioceptorii din tendoane, mușchi, articulații și ligamente, precum și receptorii din sistemul vestibular oferă creierului informațiile necesare ajustării posturii și a mișcării (astfel de informații sunt: lungimea și tensiunea mușchilor, unghiurile diverselor articulații, poziția corpului în spațiu) [10]. Acest tip de informații, de monitorizare a detaliilor, este necesar în special funcționării nivelurilor inferioare ale controlului motor, în timp ce informația senzorială dată de exteroceptorii

din piele, ochi și urechi informează creierul cu privire la localizarea obiectelor în spațiu și poziția relativă a corpului subiectului în raport cu aceste obiecte. Acest din urmă tip de informație (informația senzorială) este una utilizată în special la nivelurile superioare ale controlului ierarhic al mișcării – niveluri implicate, de altfel, în elaborarea strategiilor legate de mișcare. Un aspect cheie legat de aceste niveluri ierarhice superioare constă în aceea că aceste niveluri de control al mișcării nu implică o monitorizare pas cu pas a informațiilor de detaliu.

În cadrul sistemului motor, măduva spinării îndeplinește o triplă funcție, și anume: (i) *integrarea reflexă*, (ii) *coordonarea reflexă* (comanda mișcării) și (iii) *funcția de conducere*. **Reflexele spinale** (*răspunsuri motorii rapide, involuntare la un stimul*) sunt reflexe somatice mediate de către măduva spinării. Reflexele sunt, prin definiție, rapide datorită faptului că ele, pe de o parte, implică puțini neuroni iar, pe de altă parte, **inițiază răspunsul fără să aștepte o analiză prealabilă din partea etajului superior al sistemului nervos central (creierul)**. Stimulii senzoriali ce inițiază reflexele spinale iau naștere în receptorii din mușchi, articulații și piele iar **circuitul neuronal responsabil pentru acest tip de răspuns motor se regăsește (ca localizare) în totalitate în măduva spinării**. În rețelele spinale ale acestui circuit neuronal un rol cheie îl joacă inter-neuronii, care: (1) mediază influențele intrării senzoriale asupra motoneuronilor și (2) constituie rețelele ce sunt direct responsabile de generarea unor pattern-uri complicate (așa cum sunt, de exemplu, rețelele reverberante, generatorii de ritm etc.). De asemenea, circuitele reflexului spinal pune la dispoziția centrilor superiori un set de pattern-uri de coordonare, începând cu combinații simple (cum ar fi inervarea reciprocă de la nivelul unei singure articulații) și mergând până la pattern-uri complexe ale mișcării, atât spațiale (așa cum este, de exemplu, reflexul de flexie) cât și temporale (ca exemplu avem reflexul de scărpinare).

Alături de funcția reflexă, măduva spinării are, de asemenea, și o **funcție de coordonare**. Deși comportamentele reflexe sunt automate, centrii de procesare de la nivelul creierului pot facilita sau inhiba pattern-uri motorii reflexe cu localizare la nivelul măduvei spinării [11]. Din această perspectivă, măduva spinării reprezintă o componentă majoră a procesului de ajustare a actelor reflexe, ea contribuind efectiv la: stabilirea evoluțiilor cronologice în timp și la controlul intensității răspunsurilor, la stabilirea ritmului și modularea acestuia [12]. În acest mod, **măduva spinării devine practic responsabilă pentru coordonarea diferitelor pattern-uri motorii cum ar fi: mersul, înotul, mestecatul, alergatul etc.**

Așa cum am mai menționat deja, **caracteristicile principale al mișcărilor reflexe** sunt acelea că acestea sunt: ***involuntare, rapide și stereotipe***. Cu toate acestea, aceiași centri nervoși care comandă mișcărilor reflexe, participă, în același timp, și la realizarea reflexelor condiționate și a actelor voluntare; acest lucru este posibil, în principal, datorită faptului că ei primesc – de la nivelul centrilor superiori, encefalici – comenzi pe care le transmit, mai departe, sistemelor de execuție. Din această perspectivă, se poate spune că, la om cel puțin, fiecare reflex medular are o dublă integrare. **Această dublă integrare apare din principiul subordonării ierarhice a nivelurilor de control ale dinamicii mișcării.**

La oameni, **comanda generală a mișcării ia naștere în centrii nervoși superiori (corticali), în timp ce detaliile privind execuția fiecărei mișcări se află sub controlul atât a ariilor corticale cât și a ariilor sub-corticale** [13]. Reflexele spinale sunt integrate, practic, cu comenzile motorii generate central în vederea producerii unor mișcări adaptive prin, pe de o parte, ajustarea ieșirii motorii pe parcursul unei mișcări aflată în evoluție și, pe de altă parte, prin compensarea variabilității intrinseci a ieșirii motorii.

Corespunzător gradului de complexitate și a tipului de control (voluntar sau nu), mișcărilor generate de către sistemul motor uman pot fi clasificate în următoarele trei clase: *mișcări voluntare*,

*răspunsuri reflexe și pattern-uri motorii ritmice.* Dintre aceste categorii ale mișcării, mișcărilor voluntare sunt, de departe, cele mai complexe, ele fiind caracterizate de: faptul că au un anumit scop, pot fi învățate și îmbunătățite în timp. ***În pattern-urile de mișcare doar inițierea și sfârșitul sunt procese voluntare, ele combinând astfel caracteristicile atât ale actelor voluntare cât și pe cele ale actelor reflexe.*** În plus, s-a descoperit că circuitul neuronal spinal la oameni are capacitatea de a genera o activitate de tip locomotor (cum este, de exemplu, pattern-ul de pășire) chiar și atunci când el este izolat, fără control neuronal superior (cortical) și fără feedback aferent periferic [14]. Acești generatori spinali de pattern-uri s-au dovedit a juca un rol major în organizarea activității locomotorii prin producerea unei ieșiri motorii coordonate. În condiții normale, acești generatori spinali se află sub control cortical și, în plus, intrările periferice senzoriale pot modula activitatea lor.

### 3. Conceptele sistemului iBiAoRS

Luând în considerare soluția biologică prezentată mai sus, conceptul fundamental al sistemului iBiAoRS rezidă, practic, în construirea unui sistem robotic inteligent, cu auto-organizare și bio-inspirat, capabil să exercite un control dinamic al mișcării, similar cu cel discutat mai sus, pentru sistemul motor uman. **Sistemul propus va respecta, astfel, principiul subordonării ierarhice – el reprezentând, de altfel, și elementul de noutate, central al propunerii de grant.** În particular, sistemul va consta din trei niveluri de control (bucle de feedback) pentru dinamica mișcării (MD). Fiecare componentă a sistemului va primi astfel o informație diferențiată și specifică, corespunzător nevoilor sale. În acest mod, se vor obține reprezentări interne diferite pentru lumea externă aflată în continuă schimbare. În concordanță cu aceste reprezentări, fiecare nivel ierarhic de control va reacționa specific în scopul de a atinge un obiectiv global impus în mod voluntar de către subiectul uman. Cele trei niveluri ale structurii ierarhice de control ale sistemului iBiAoRS (vezi Fig. 2) vor fi, după cum urmează:

- (1) La primul nivel de control al DM, viteza de rotație a fiecăruia dintre cele două motoare ale sistemului implementat va fi ajustată adecvat, cu ajutorul a două bucle. Fiecare buclă va fi compusă dintr-un controler de tip PI. Primul controler va ajusta curentul prin motor iar cel de-al doilea controler va ajusta viteza de rotație a motorului. Acest nivel de control al motorului este echivalent cu căile spinale reflexe existente în sistemele umane vii. La acestea din urmă, acest nivel inferior de control privește, în principal, reflexele de menținere a posturii, echilibrului și/sau reflexele de menținere constantă a lungimii unui mușchi.
- (2) Al doilea nivel de control al DM va fi compus dintr-un sistem adaptiv ce va permite sistemului iBiAoRS să evite obstacolele din imediata proximitate; acest proces adaptiv – care este unul continuu și cu auto-organizare – va folosi doar reprezentarea lumii externe, obținută cu ajutorul informațiilor primite de la senzorii sistemului. Acest nivel va putea fi implementat folosind, de exemplu, o rețea neuronală (sau un sistem fuzzy, algoritm genetic etc.) ce va avea ca obiectiv minimizarea erorii dată de suma distanțelor relative obținute de la ieșirile senzorilor,  $E = \sum_i (\Delta d_i)^2$ . În ecuația anterior menționată,  $\Delta d_i$  reprezintă gradientul informației de distanță de la senzorul  $i$ . În acest mod, într-o primă etapă, sistemul iBiAoRS se va comporta asemeni unei ființe umane care învață, la începutul vieții, să meargă – lucru realizabil doar printr-un proces continuu de exersare și învățare. Din această perspectivă, cel de-al doilea nivel de control al DM este

echivalent cu ariile corticale și sub-corticale care controlează detaliile de execuție ale fiecărei mișcări, **printr-un proces continuu de ajustare a actelor reflexe.**

- (3) Ultimul nivel de control al DM, implementat cu ajutorul componentei de tip BCI a sistemului global, va consta, ca și în cazul sistemului motor uman, în generarea unei comenzi similare comenzii motorii voluntare dată, în cazul omului, la nivel central superior (cortical). În cazul nostru, dinamica mișcării sistemului iBiAoRS va fi dictată de către activitatea cerebrală a unui subiect uman care, într-un prim pas, va evalua vizual, în mare, traiectoria pe care robotul (**în cazul nostru, un echipament/sistem non-umanoid**) va trebui să o urmeze și, ulterior, într-un al doilea pas, va da mental o comandă globală (înainte, înapoi, stânga, dreapta), folosindu-se pentru aceasta de un sistem de tip BCI. Datorită autonomiei sale locale (consecință a modului de implementare prezentat mai sus), sistemul iBiAoRS va executa comanda globală, generată la nivel mental de către subiectul uman, fără a avea nevoie de alte comenzi de detaliu în vederea evitării obstacolelor locale. Pentru a face, însă, acest lucru, sistemul iBiAoRS va trebui să facă o dublă integrare: aceea a comenzii globale cu controlul local al dinamicii mișcării. În acest mod, autonomia locală, oferită de modul constructiv al sistemului global, va degreva componenta de tip BCI a sistemului de toate acele comenzi legate de detaliile mișcării – un aspect foarte important, care va conferi componentei BCI posibilitatea de a-și crește, în mod semnificativ, performanțele. Mai exact, pentru o rată de transfer a informației dată (specificată) a componentei BCI, datorită autonomiei locale a sistemului global iBiAoRS (care nu presupune generarea de către componenta BCI și a comenzilor de detaliu ale mișcării), timpul dintre două comenzi ale mișcării, generate de sistemul BCI va crește; din această perspectivă, comportamentul dinamic al mișcării globale în timp real ar urma să se îmbunătățească. Mai mult chiar, acuratețea clasificării va putea fi crescută (prin implementarea unor algoritmi mai complecși care, în general, sunt mai mari consumatori de timp sau **și printr-o fereastră mai mare de timp a semnalului electroencefalografic pe care se va face analiza în vederea clasificării**) – și toate acestea fără efecte secundare asupra operării în timp real a sistemului propus.

#### **4. Controler-ul inteligent, cu auto-organizare**

Un prim pas în construirea sistemului global iBiAoRS a fost implementarea și testarea fiecărui nivel al sistemului de control al DM prezentat anterior.

În această parte a lucrării prezentăm controler-ul inteligent, cu auto-organizare. Acest al doilea nivel al controlului DM este cel care trebuie să învețe (într-o manieră adaptivă, printr-un proces de auto-organizare continuă) să se deplaseze evitând obstacolele – lucru posibil prin utilizarea doar a reprezentării locale a mediului înconjurător oferită de către senzori.

Implementarea conceptelor acestui nivel al DM a fost realizată cu ajutorul unui mic sistem robotic prevăzut cu un număr de senzori de distanță. Acest sistem robotic a trebuit să învețe, într-o manieră adaptivă, să minimizeze valoarea erorii propusă mai sus.

Sistemul robotic inteligent, cu auto-organizare (ISoRSy) a fost construit cu ajutorul unei plăci de dezvoltare MCF213 pe care a rulat algoritmul. Acest microcontroler – produs de compania FreescaleTM – reprezintă o **implementare integrată superioară** a familiei ColdFireTM de

microcontrolere cu un set redus de instrucțiuni. Microcontroler-ul MCF213 reprezintă o familie de microcontrolere pe 32 de biți, înalt integrată, având un SRAM intern de până la 32 Kbytes, o memorie Flash de 256 Kbytes, opt canale PWM, patru timere pe 32 de biți, cu **capacitate de cerere DMA**, opt canale ADC, 3 UART-uri etc. Robotul dispune de patru senzori de măsurare a distanței (GP2D120XJ00F), dintre care 3 sunt plasați în față și unul în spate, Fig. 2. Fiecare motor DC este controlat de către microcontroler prin intermediul unui canal PWM bazat pe o punte H.

Algoritmul inteligent, cu auto-organizare, folosit în controlul robotului a constatat într-o rețea neuronală de tip perceptron multistrat (MLP), cu două straturi ascunse. Pe primul strat ascuns, rețeaua a avut 5 neuroni, în timp ce, al doilea strat ascuns a avut 3 neuroni. Rețeaua MLP a avut 4 intrări (respectiv, valorile normalizate obținute de la senzorii de distanță) și două ieșiri (care au furnizat mai departe comanda către motoare). Fiecare ieșire a putut lua valori doar în intervalul  $[-1,1]$ , cu următoarea semnificație: 1 – putere maximă înainte pentru motor, -1 – putere maximă înapoi pentru motor și 0 – oprirea motorului. Rețeaua MLP a fost antrenată cu ajutorul algoritmului backpropagation. Termenul de eroare utilizat a fost:

$$err = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (s_i[n] - s_i[n-1])^2 \quad (1)$$

unde:  $s_i$  este valoarea senzorului  $i$  iar  $n$  este momentul de timp. Între momentele  $n$  și  $n-1$  de timp există o întârziere de 0.4 s. Această întârziere este una necesară sistemului robotic inteligent în sensul că oferă timpul necesar delăsării acestuia și, în consecință, schimbării valorilor senzorilor.

## 5. Rezultate

Task-ul realizat de robot – pentru care a trebuit să învețe un comportament adecvat, printr-un algoritm cu auto-organizare – a constatat în navigarea într-o zonă delimitată iar obiectivul principal a fost dat de evitarea obstacolelor plasate în mod aleator în această zonă. În consecință, întrucât robotul nu a dispus de nici o hartă globală a zonei de lucru, acest task nu a reprezentat propriu-zis o problemă de planificare a drumului ci una de navigare locală și de evitare a oricărei posibile coliziuni cu obstacolele din zonă.

Task-ul de învățare în sine a presupus evoluția comportamentului inteligent, cu auto-organizare – comportament reprezentat sub forma unui set de reguli de tip stimuli-răspuns ce a mapat distanțele curente ale senzorilor în comenzi privind viteza de rotație ce a trebuit implementată de către robot. Rata de învățare a fost de aproximativ 0.4 Hz.

Un prim comportament învățat de către sistemul astfel implementat a constatat în evitarea, într-o primă etapă, a unei coliziuni iminente cu un obstacol oarecare. Acest comportament a evoluat, însă, ulterior și într-un alt tip de comportament, respectiv, de tip pradă-prădător (vezi Fig. 3). Acest nou tip de comportament se poate traduce prin aceea că, atunci când presupusul obstacol a dobândit o comportare de tip prădător, urmărind sistemul IsoRSy, acesta din urmă nu numai că s-a oprit din mersul său și și-a schimbat direcția, mergând în sens opus atunci când sistemul prădător s-a aflat în raza unuia dintre senzorii săi ci, în plus, el și-a crescut progresiv viteza în încercarea continuă de a crește distanța dintre el și sistemul care-l urmărea (a se vedea Fig. 3).

## 6. Concluzii

În această lucrare am prezentat un nou concept pentru un complex bioinstrumental având și o componentă de tip BCI – complex bioinstrumental pe care l-am referit aici sub numele de iBiAoRS.

Inspirat din organizarea ierarhică a sistemului motor uman, iBiAoRS are capacitatea de a rezolva problema compromisului care apare întotdeauna în astfel de sisteme între, pe de o parte, procesarea on-line și, pe de altă parte, acuratețea clasificării.

Folosind un controler adaptiv, cu o structură de tip auto-organizare continuă bazată, în principal, pe o reprezentare locală a lumii înconjurătoare, complexul iBiAoRS a fost unul capabil să evite obstacolele fără vreun control suplimentar venit din partea componentei de tip BCI a sistemului global. În acest mod, utilizatorul sistemului s-a regăsit în situația de a iniția doar și, respectiv, de a termina o acțiune globală (de exemplu, comenzi cum ar fi: “ia-o la stânga”, “mergi înainte”) fără să mai dea, suplimentar, atenție și obstacolelor locale. Astfel, intervalul de timp dintre două comenzi succesive a crescut, oferind utilizatorului, precum și componentei BCI a sistemului, o fereastră mai mare de timp pentru a putea, pe de o parte, în cazul utilizatorului – iniția și susține corect un anumit task mental – și, pe de altă parte, în cazul componentei BCI – pentru a procesa corect semnalele electroencefalografice aferente task-ului.

În ultima parte a lucrării, cel de-al doilea nivel de control al dinamicii mișcării a fost implementat și testat. Rezultatele obținute în acest caz vin și ele și susțin validitatea principalelor concepte ale complexului bioinstrumental iBiAoRS propus.

## REFERINȚE

- [1] C. Guger, A. Schlögl, C. Neuper, D. Walterspercher, T. Strein, and G. Pfurtscheller, “Rapid prototyping of an EEG-based brain-computer interface (BCI),” *IEEE Trans. on Neural Syst. and Rehab. Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 49-58, March 2001
- [2] J. Lehtonen, P. Jylanki, L. Kauhanen, M. Sams, “Online Classification of Single EEG Trials During Finger Movements,” *IEEE Trans. on Biomed. Eng.*, vol. 55, no 2 pp. 713 – 720, Feb. 2008
- [3] S. J. Roberts, W. D. Penny, “Real-time brain-computer interfacing: a preliminary study using Bayesian learning,” *Med. & Biol. Eng. & Comp.*, vol. 38, 2000, pp. 56-61
- [4] W. Penny, and S. Roberts, “Imagined hand movements identified from the EEG Mu-Rhythm,” 1998 Technical report, Imperial College, University of London. Available via <http://www.ee.ic.ac.uk>.
- [5] C. Vidaurre, A. Schlogl, R. Cabeza, R. Scherer, and G. Pfurtscheller, “Study of On-Line Adaptive Discriminant Analysis for EEG-Based Brain Computer Interfaces,” *IEEE Trans. on Biomed. Eng.*, vol. 54, no. 3, pp. 550 – 556, March 2007
- [6] R. R. Angevin, and A. D. Estrella, “Brain-computer interface: Changes in performance using virtual reality techniques,” *Neurosci. Let.*, vol. 449, no. 2, pp. 123-127, 2009
- [7] H. Serby, E. Yom-Tov, and G.F. Inbar, “An improved P300-based brain-computer interface,” *IEEE Trans. on Neural Sys. and Rehab. Eng.*, Volume 13, Issue 1, March 2005, pp. 89 – 98
- [8] G. Schalk, D. J. McFarland, T. Hinterberger, N. Birbaumer, and J. R. Wolpaw, “BCI2000: a general-purpose brain-computer interface (BCI) system,” *IEEE Trans. on Biomed. Eng.*, vol. 51, no. 6, pp. 1034 – 1043, June 2004
- [9] S. T. Grafton, and A. F. de C. Hamilton, “Evidence for a distributed hierarchy of action representation in the brain,” *Hum. Movement. Sci.*, vol. 26, no. 4, pp. 590-616, 2007
- [10] B. Schepens, and T. Drew, “Strategies for the Integration of Posture and Movement During Reaching,” *J Neurophysiology*, 90, pp. 3066-3086, 2003.

- [11] J. Michel, H.J.A. van Hedel, and V. Dietz, "Facilitation of spinal reflexes assists performing but not learning an obstacle-avoidance locomotor task", *Eur. J Neurosci.*, vol. 26, no. 5, pp. 1299-306, Sept. 2007
- [12] L. Dănilă, and M. Golu, "Tratat de neuropsihologie," vol. 1, Editura Medicală, 2002
- [13] C. Ghez, The control of movement, în E.R. Kandel, J.H. Schwartz, T.M. Jessell, *Principles of neural science*, Elsevier, pp. 533-547, 1991
- [14] M. R. Dimitrijevic, Y. Gerasimenko, M. Pinter, "Evidence for a Spinal Central Pattern Generator in Humans," *Annals of the New York Acad. of Sci.* 860, pp. 360-376, 1998



## Figuri

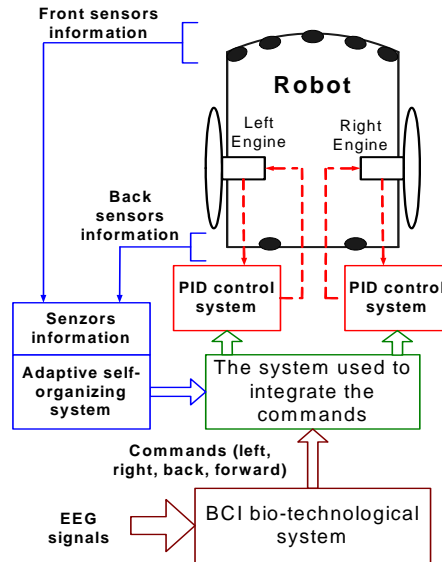


Fig. 1. Sistemul robotic bio-inspirat

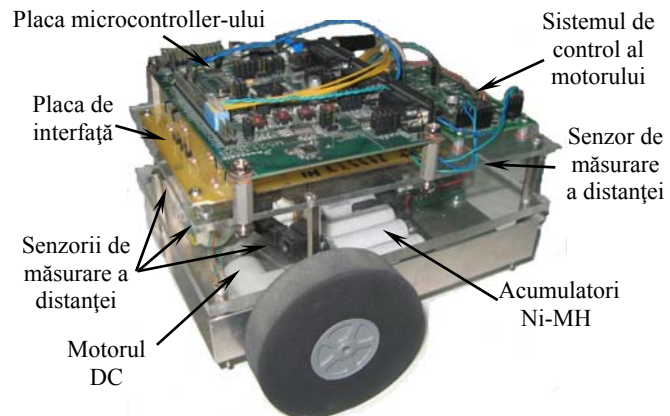


Fig. 2. Sistemul robotic inteligent și cu auto-organizare

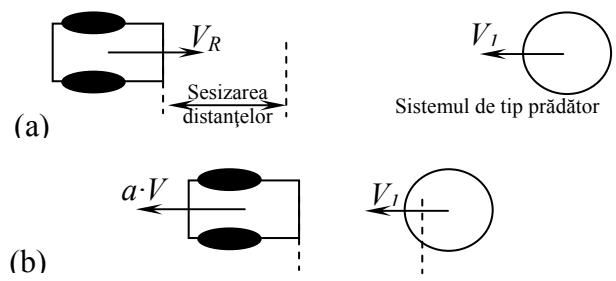


Fig. 3. Un comportament dobândit prin auto-organizare de către robot ( $a > 1$ )