



(12)

## BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: **a 2008 00451**

(22) Data de depozit: **13/06/2008**

(45) Data publicării mențiunii acordării brevetului: **30/05/2016** BOPI nr. **5/2016**

(41) Data publicării cererii:  
**26/02/2010** BOPI nr. **2/2010**

(73) Titular:  
• **UNIVERSITATEA TEHNICĂ DIN  
CLUJ-NAPOCA,  
STR.CONSTANTIN DAICOVICIU NR.15,  
CLUJ-NAPOCA, CJ, RO**

(72) Inventatori:  
• **CIUPAN EMILIA, STR.MESTECENILOR  
NR.6, AP.2, CLUJ-NAPOCA, CJ, RO;**

• **MORAR LIVIU, STR. CIUCAȘ, NR. 3,  
SC. 3, AP. 25, CLUJ-NAPOCA, CJ, RO;**  
• **CIUPAN CORNEL, STR.MESTECENILOR  
NR.6, AP.2, CLUJ-NAPOCA, CJ, RO**

(56) Documente din stadiul tehnicii:  
**EP 0589394 A1; US 5371834 A;  
US 2002/0079857 A1; EP 1616674 A2**

(54) **METODĂ DE CONDUCERE A ROBOȚILOR INDUSTRIALI**



# RO 125211 B1

1 Invenția se referă la o metodă de conducere a roboților industriali, în special a roboților  
paraleli, bazată pe modelarea și instruirea unei rețele neuronale cu trei straturi.

3 Se cunosc numeroase metode de conducere a roboților industriali, bazate pe modele  
matematice. Aceste metode prezintă dezavantaje legate de complexitatea modelului matematic  
5 și de necesitatea efectuării în timp real a unui volum mare de calcule, fapt resimțit mai ales la  
roboții cu structuri complexe și care operează cu viteze mari, de peste 1 m/s.

7 Pentru comanda roboților industriali se utilizează analiza cinematică a acestora. Aceasta  
se bazează pe două abordări: analiza cinematică directă și analiza cinematică inversă.

9 În analiza cinematică directă se consideră cunoscute coordonatele cuplelor motoare  
(notate  $q_i$ ,  $i=1, \dots, m$ , unde  $m$  reprezintă numărul axelor cinematice, egal cu numărul gradelor  
11 de libertate) și se vor determina coordonatele de poziție ale efectorului ( $X, Y, Z$ ) și orientarea  
acestui  $\psi$ ,  $\theta$  și  $\varphi$ .

13 În analiza cinematică inversă se consideră cunoscute coordonatele efectorului ( $X, Y, Z$ )  
și orientarea acestuia  $\psi$ ,  $\theta$  și  $\varphi$ , și se vor determina coordonatele cuplelor motoare  $q_i$ . Deși  
15 aparent simplă, problema de determinare a coordonatelor cuplelor motoare se complică atunci  
când este vorba de roboți cu structură cinematică complexă, cum sunt roboții paraleli.

17 Comanda propriu-zisă a robotului se face de către echipamentul de comandă al  
robotului, prin generarea unei mărimi de comandă pentru fiecare cuplă motoare, astfel ca  
19 aceasta să realizeze coordonata  $q_i$  rezultată din cinematica inversă, iar efectorul să treacă prin  
puncte de coordonate aparținând traiectoriei. De aceea, o problemă deosebit de importantă este  
21 determinarea coordonatelor cuplelor motoare.

23 De asemenea, sunt cunoscute metode de conducere a roboților și a echipamentelor de  
fabricație, bazate pe modelarea și instruirea unor rețele neuronale.

25 Aceste metode de instruire prezintă dezavantaje legate de numărul mare de date de  
instruire, de volumul mare de calcule necesare instruirii, mai ales atunci când se doresc precizii  
mari.

27 Acest dezavantaj este pus în evidență când setul datelor de instruire se determină prin  
experimentare pe un model fizic. Determinarea experimentală a unui mare număr de date  
29 presupune un timp mare și alte cheltuieli materiale aferente experimentelor.

31 În cazul unor roboți industriali, cum ar fi roboții paraleli, poziția efectorului este deter-  
minată de un număr de șase parametri, adică de coordonatele de poziție  $X, Y, Z$  și de unghiurile  
lui Euler  $\psi$ ,  $\theta$  și  $\varphi$ . Coordonatele și orientarea efectorului sunt dependente de coordonatele a  
33 șase cuple motoare  $q_1, q_2, \dots, q_6$  (fig. 1).

35 Conducerea robotului se poate face pe baza modelului matematic, însă acesta necesită  
un volum mare de calcule, fapt ce prezintă un dezavantaj mai ales în cazul roboților care  
lucrează cu viteze mari, datorită necesității de procesare a datelor în timp real. Modelele bazate  
37 pe rețele neuronale oferă avantaje privind simplificarea modelului și mai ales a operațiilor care  
se efectuează, acestea fiind doar înmulțiri și adunări. Un model bazat pe rețele neuronale, care  
39 să răspundă conducerii roboților paraleli, presupune o modelare adecvată și o bună instruire  
a rețelei. Modelarea rețelei presupune stabilirea structurii acesteia, adică a numărului de straturi  
41 și a numărului de neuroni din fiecare strat. S-a constatat că rețelele neuronale cu trei straturi,  
având un strat de intrare, un strat de ieșire și un strat intermediar, sunt corespunzătoare pentru  
43 conducerea proceselor industriale și a roboților. Numărul de neuroni din stratul de intrare este  
egal cu numărul semnalelor de intrare, numărul de neuroni din stratul de ieșire este egal cu  
45 numărul semnalelor de ieșire, iar numărul de neuroni din stratul intermediar se adoptă în funcție  
de complexitatea procesului.

# RO 125211 B1

Problema pe care o rezolvă invenția constă în realizarea unei metode de conducere a roboților industriali bazată pe modelarea și instruirea unei rețele neuronale cu o mulțime restrânsă de exemple de instruire, asigurând precizia dorită în tot spațiul de lucru al robotului, și reducerea timpului de instruire.

Metoda conform invenției înlătură dezavantajele menționate mai sus prin aceea că se bazează pe modelarea, instruirea și exploatarea unei rețele neuronale cu trei straturi, având 6 neuroni în stratul de intrare, corespunzător coordonatelor cuplelor motoare  $q_i$   $i=1, \dots, 6$ , șase neuroni în stratul de ieșire, corespunzător poziției și orientării efectorului  $(X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi)$ , un număr  $n$  cuprins între 9 și 50 de neuroni în stratul intermediar, datele de instruire fiind determinate prin simulare pe modelul matematic sau prin experimentare pe modelul fizic al robotului, prin impunerea unor deplasări succesive a coordonatelor  $q_i$ ,  $i=1, \dots, 6$ , prin deplasarea, pe rând, a fiecărei axe cinematice cu un pas  $p$ , iar apoi prin deplasări combinate a mai multor axe, pentru fiecare set  $j$  de date de intrare  $q_{i,j}$ ,  $i=1, \dots, 6$  și  $i=1, \dots, m$ ,  $m$  fiind numărul total de astfel de seturi, rezultând un set de date de ieșire  $X_j, Y_j, Z_j, \psi_j, \theta_j, \varphi_j$ , care se utilizează pentru instruirea rețelei.

Se dă în continuare un exemplu de realizare a invenției în legătură cu fig. 1...4, ce reprezintă:

- fig. 1, schema cinematică a unui robot cu șase grade de libertate;
- fig. 2, schema de conducere a robotului;
- fig. 3, arhitectura rețelei neuronale;
- fig. 4, organigrama de obținere a modelului neuronal MN.

Pentru o mai bună înțelegere a invenției, se va exemplifica modul de aplicare a metodei în cazul unui robot serial cu șase grade de libertate (fig. 1). Așa cum sunt ilustrate în fig. 1, cele șase grade de libertate sunt date de trei mișcări de poziționare  $X, Y, Z$  și alte trei mișcări  $\psi, \theta, \varphi$ , de orientare a efectorului.

Deplasarea pe axa  $Ox$  se face de către modulul 1 care se mișcă pe ghidajul 2, paralel cu axa  $Ox$ , și este asigurată de către motorul  $M_x$  printr-un mecanism de transformare  $T_x$ .

Deplasarea pe axa  $Oy$  se face de către modulul 3 care se deplasează pe ghidajul 4 paralel cu axa  $Oy$ . Motorul  $M_y$  acționează modulul 3 prin intermediul mecanismului de transformare  $T_y$ .

Deplasarea pe axa  $Oz$  se realizează cu ajutorul modulului de translație 5 și al ghidajului 6 paralel cu axa  $Oz$ , și este asigurată de către motorul  $M_z$  care, prin mecanismul de transformare  $T_z$ , acționează modulul 5. Mâna mecanică 7 cu efectorul final 8 este fixată de modulul 3.

Poziția efectorului 8, reprezentată prin punctul  $P(x,y,z)$ , este dată de către coordonatele cuplelor motoare  $q_1, q_2$  și  $q_3$ . Astfel, coordonata  $q_1$  a motorului  $M_x$  determină coordonata  $x$  a efectorului 8, coordonata  $q_2$  a motorului  $M_y$  determină coordonata  $y$  a efectorului, iar coordonata  $q_3$  a motorului  $M_z$  determină coordonata  $z$  a efectorului.

Orientarea obiectului manipulat în spațiul de lucru al robotului se face cu ajutorul a trei module de orientare 9, 10 și 11.

Modulul 9, acționat de către motorul  $M_\psi$  prin mecanismul de transformare  $T_\psi$ , realizează mișcarea  $\psi$ , iar modulul 10, acționat de către motorul  $M_\theta$  cu mecanismul de transformare  $T_\theta$  realizează mișcarea  $\theta$  de orientare a mâinii mecanice 7.

Mișcarea  $\varphi$ , de orientare a mâinii mecanice 7 în jurul propriei axe, este dată de modulul 11 acționat de către motorul  $M_\varphi$  prin mecanismul de transformare  $T_\varphi$ .

# RO 125211 B1

1 În cazul robotului din fig. 1, datorită simplității structurii cinematice a acestuia, având trei  
mișcări de translație paralele cu axele de coordonate, modelul matematic ce descrie legătura  
3 dintre coordonatele cuplelor motoare  $q_1, q_2, \dots, q_6$  și poziția și orientarea efectorului ( $X, Y, Z, \psi,$   
 $\theta, \varphi$ ) devine foarte simplu.

5 Pe baza schemei cinematice a robotului din fig. 1 se pot scrie relațiile de legătură dintre  
coordonatele cuplelor motoare  $q_i$  și poziția efectorului ( $X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi$ ). Astfel, modelul  
7 matematic pentru cinematica directă va fi dat de sistemul de relații (1):

$$\begin{aligned} X &= q_1 \cdot i_{Tx} + X_0; Y = q_2 \cdot i_{Ty} + Y_0; Z = q_3 \cdot i_{Tz} + Z_0 \\ \psi &= q_4 \cdot i_{T\psi} + \psi_0; \theta = q_5 \cdot i_{T\theta} + \theta_0; \varphi = q_6 \cdot i_{T\varphi} + \varphi_0 \end{aligned} \quad (1)$$

11 unde  $i_{Tx}, i_{Ty}, i_{Tz}, i_{T\psi}, i_{T\theta}, i_{T\varphi}$  reprezintă funcțiile de transfer ale mecanismelor de transformare ce  
13 generează mișcările respective, iar  $X_0, Y_0, Z_0, \psi_0, \theta_0, \varphi_0$  reprezintă valorile inițiale obținute pentru  
 $q_i=0$ .

15 Modelul matematic pentru cinematica inversă va fi dat de sistemul de relații (2):

$$q_1 = \frac{X - X_0}{i_{Tx}}; q_2 = \frac{Y - Y_0}{i_{Ty}}; q_3 = \frac{Z - Z_0}{i_{Tz}} \quad (2)$$

$$q_4 = \frac{\psi - \psi_0}{i_{T\psi}}; q_5 = \frac{\theta - \theta_0}{i_{T\theta}}; q_6 = \frac{\varphi - \varphi_0}{i_{T\varphi}}$$

23 Toate metodele de conducere a roboților folosesc modelul pentru analiza cinematică  
25 inversă, și nu cel direct. Modelul cinematic direct nu poate fi utilizat deoarece în practică se  
cunosc poziții ale efectorului descrise prin coordonatele ( $X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi$ ), și nu coordonate ale  
27 cuplelor motoare  $q_i$  asociate acestor poziții.

29 Metodele cunoscute, fie că se bazează pe modelul matematic sau pe rețele neuronale,  
utilizează modelul cinematic invers. Aceasta înseamnă că se furnizează poziții ale efectorului  
robotului în spațiul de lucru, de forma ( $X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi$ ), iar echipamentul de comandă calcu-  
31 lează coordonatele cuplelor motoare corespunzătoare  $q_1, q_2, \dots, q_6$ , pe baza cărora generează  
mărimile de comandă.

33 O metodă generală de conducere a roboților industriali presupune parcurgerea  
următorilor pași:

35 1. furnizarea datelor de intrare conform sarcinii de lucru a robotului, date care constau  
în poziția și orientarea efectorului ( $X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi$ ), în anumite puncte din spațiul de lucru al  
37 robotului;

39 2. determinarea coordonatelor cuplelor motoare  $q_i, i=1, \dots, 6$ , utilizând modelul matematic  
pentru analiza cinematică inversă, sau un model neuronal MN implementat în echipamentul de  
comandă al robotului;

41 3. transmiterea coordonatelor cuplelor motoare  $q_i, i=1, \dots, 6$ , controlerului care generează  
mărimile de comandă  $c_i, i=1, \dots, 6$ , pentru variatoarele electronice ale axelor cinematice ale  
43 robotului;

45 4. variatoarele electronice ale axelor robotului generează mărimile de execuție  $e_i,$   
 $i=1, \dots, 6$ , pentru fiecare dintre motoarele de acționare a axelor cinematice ale robotului, astfel  
încât aceste motoare efectuează coordonatele cuplelor motoare  $q_i, i=1, \dots, 6$  aferente sarcinii de  
47 lucru.

Metoda generală de conducere, descrisă în paragraful precedent, se prezintă schematic în fig. 2, într-un mod particularizat pentru cazul utilizării unor modele neuronale.	1
În fig. 3 se prezintă arhitectura unei rețele neuronale cu trei straturi, adecvată robotului din fig. 1. Stratul de intrare are șase neuroni. Fiecare neuron corespunde unui semnal de intrare (una dintre mărimile $X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi$ ). Stratul de ieșire are tot șase neuroni, fiecare neuron corespunzând unui semnal de ieșire, adică unei coordonate a cuplei motoare $q_i, i=1, \dots, 6$ .	3 5
Pentru obținerea modelului neuronal MN se utilizează organigrama din fig. 4. Modelului neuronal MN utilizat în metoda de conducere a roboților industriali se obține prin parcurgerea următorilor pași:	7 9
1. generarea unei mulțimi de exemple de instruire și testare a rețelei neuronale, formată din perechi de date de intrare și de ieșire, pe baza modelului matematic sau pe cale experimentală, prin măsurători pe modelul fizic;	11
2. alegerea unei arhitecturi de rețea neuronală cu trei straturi, adecvată structurii cinematice a robotului (fig. 3). Primul strat, de intrare, corespunde coordonatelor efectorului, și are în structura sa un număr de neuroni egal cu numărul semnalelor de intrare. Al treilea strat, de ieșire, are un număr de neuroni egal cu numărul semnalelor de ieșire corespunzător numărului de axe cinematice. Al doilea strat este un strat intermediar (ascuns), iar numărul de neuroni poate fi variabil;	13 15 17
3. instruirea rețelei neuronale și obținerea modelului neuronal MN. Instruirea rețelei neuronale se poate face prin oricare dintre metodele cunoscute, cu condiția obținerii unei erori mai mici decât o valoare impusă, stabilită inițial;	19 21
4. testarea modelului neuronal MN, utilizând perechi de date de intrare și de ieșire obținute la pasul 1, de regulă, altele decât cele utilizate la instruirea rețelei. Dacă eroarea obținută la testare este mai mică decât o valoare admisă, atunci se consideră că modelul este valid, și se implementează în echipamentul de comandă al robotului;	23 25
5. dacă eroarea obținută la testare este mai mare decât o valoare admisă, atunci se consideră că modelul neuronal nu este valid, și se revine la modificarea numărului de neuroni ai stratului intermediar (pasul 2) sau la instruirea rețelei neuronale (pasul 3), cu modificarea parametrilor de instruire (de exemplu: rata de învățare, numărul de treceri, ponderile rețelei etc.).	27 29
Datele de instruire și cele de testare se determină pe modelul matematic pentru cinematica directă a robotului, sau prin măsurare pe modelul fizic, prin modificarea coordonatelor cuplelor motoare, conform tabelului 1.	31
În modelul matematic direct (relațiile 1) se introduc succesiv seturi de coordonate ale cuplelor motoare ( $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$ ), și se calculează coordonatele de poziție ale efectorului ( $X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi$ ). Datele de instruire se pot obține și prin măsurare pe modelul fizic al robotului. În acest caz se comandă deplasarea cuplelor motoare cu coordonatele $q_i, i=1, \dots, 6$ , și se măsoară coordonatele de poziție ale efectorului ( $X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi$ ). În oricare dintre cazuri, rezultatele se completează în tabelul 1. Datele obținute după completarea tabelului 1 constituie mulțimea exemplilor de învățare și de testare.	33 35 37 39
Noutatea metodei și aspectul inovativ constau în modul de determinare a datelor de instruire a rețelei neuronale, în scopul obținerii unui model neuronal performant, cu un număr redus de exemple de instruire. Prin obținerea unui model neuronal performant se înțelege obținerea unui model neuronal care oferă erori acceptabile în tot spațiul de lucru al robotului. Alternativa la soluția propusă, constând în alegerea aleatoare a mulțimii datelor de instruire, ar conduce la necesitatea unui număr extrem de mare de exemple de instruire, și la obținerea unor precizii de poziționare foarte diferite în raport cu poziția efectorului în spațiul de lucru al robotului. Astfel, într-o anumită zonă a spațiului de lucru (acolo unde densitatea exemplilor de instruire este mai mare), efectorul va fi poziționat cu o precizie foarte bună (eroare mică), iar în alte zone precizia	41 43 45 47

# RO 125211 B1

1 poate fi total necorespunzătoare. Este evident faptul că, măbind mulțimea exemplilor de  
instruire prin creșterea densității punctelor în care se face învățarea, se poate obține în final  
3 precizia dorită, dar acest lucru conduce la complicații privind obținerea datelor, și la dificultăți  
privind instruirea în sine a rețelei, aceasta necesitând un volum mare de calcule, și calculatoare  
5 cu putere mare de calcul.

În scopul unei instruiți eficiente a rețelei cu un număr relativ mic de date de învățare, se  
7 propune un algoritm de generare a mulțimii exemplilor de instruire, care presupune  
parcursarea a 30 de faze, exprimate sintetic în tabelul 1. O fază, în accepțiunea de aici, nu  
9 corespunde, de regulă, unui sextet de valori  $(q_i, i=1, \dots, 6)$ , ci unei mulțimi de sextete, câte unul  
pentru fiecare factor  $z$  de multiplicare a pasului  $p$ , așa cum este evidențiat în mod explicit la faza  
11 1 din tabel.

În fiecare fază se incrementează cel puțin o coordonată a unei cuple motoare, fie aceasta  
13  $q_k$ , în domeniul de variație al acesteia, între  $q_{k \min}$  și  $q_{k \max}$ .

În continuare se prezintă fazele de desfășurare a etapei de generare a unei mulțimi de  
15 exemple de instruire și testare a rețelei neuronale.

În fazele 1-6 se generează datele de instruire prin modificări succesive ale coordonatelor  
17 cuplelor motoare  $q_i, i=1, \dots, 6$ , astfel încât, la modificarea unei coordonate  $q_k, 1 \leq k \leq 6$ ,  
coordonatele  $q_i, i \neq k$  rămân fixate la valorile minime  $q_{i \min}$ .

În fazele 7-12, respectiv, 13-18, generarea datelor de instruire se realizează în mod similar  
19 cu fazele 1-6, cu mențiunea că, în timp ce o coordonată  $q_i$  se modifică, toate celelalte  
coordonate rămân la valorile medii  $q_{i \text{ med}} = (q_{i \min} + q_{i \max})/2$ , pentru fazele 7-12, respectiv, la  
21 valorile maxime  $q_{i \max}$ , pentru fazele 13-18.

În fazele 19-20-21 se generează datele de instruire prin modificarea simultană a câte două  
23 coordonate ale cuplelor motoare,  $q_1$  și  $q_2$ , apoi  $q_3$  și  $q_4$ , iar în final  $q_5$  și  $q_6$ , restul coordonatelor  
rămânând fixate la valorile medii  $q_{i \text{ med}}$ .

Datele generate în faza 22 se obțin prin modificarea simultană a coordonatelor  $q_1, q_2$  și  $q_3$ ,  
27 iar cele din faza 23 rezultă prin modificarea simultană a coordonatelor  $q_4, q_5$  și  $q_6$ , celelalte trei  
coordonate fiind fixate la valorile medii  $q_{i \text{ med}}$ .

Faza 24 oferă date de instruire generate prin modificarea simultană a câte patru coordonate  
29 ale cuplelor motoare  $q_1, q_2, q_3$  și  $q_4$ , coordonatele  $q_5$  și  $q_6$  fiind fixate la valorile medii, iar faza  
31 25 furnizează date prin modificarea simultană a coordonatelor cuplelor motoare  $q_3, q_4, q_5$  și  $q_6$ ,  
 $q_1$  și  $q_2$  fiind fixate la valorile medii.

Datele generate în faza 26 rezultă prin modificarea simultană, cu aceeași valoare, a  
33 coordonatelor tuturor cuplelor motoare  $q_i, i=1, \dots, 6$ .

În fazele 27 și 28 se modifică simultan coordonatele cuplelor  $q_1, q_3$  și  $q_5$ , celelalte trei  
35 coordonate fiind fixate la valorile minime, în faza 27, și la valorile maxime, în faza 28.

Datele din fazele 29 și 30 rezultă prin modificarea simultană a coordonatelor cuplelor  $q_2, q_4$   
37 și  $q_6$ , celelalte fiind fixate la valorile minime, pentru faza 29, și la valorile maxime, pentru  
39 faza 30.

# RO 125211 B1

Tabelul 1

Nr. Fază f	Coordonatele cuplelor motoare ( $q_i, i=1..6$ )						Poziția și orientarea efecteurului $P_{f,z}(X,Y,Z,\psi, \theta, \phi), f=1,...,30$ , iar $z=0,...,j$ pentru toate fazele cu excepția fazelor 2-6, unde $z=1,...,j$					
	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	X	Y	Z	$\psi$	$\theta$	$\phi$
1	$q_{1min} + z \cdot p$	$q_{2min}$	$q_{3min}$	$q_{4min}$	$q_{5min}$	$q_{6min}$	$X_{1,0}$	$Y_{1,0}$	$Z_{1,0}$	$\psi_{1,0}$	$\theta_{1,0}$	$\phi_{1,0}$
							...	...	...	...	...	...
							$X_{1,z}$	$Y_{1,z}$	$Z_{1,z}$	$\psi_{1,z}$	$\theta_{1,z}$	$\phi_{1,z}$
							...	...	...	...	...	...
							$X_{1,j}$	$Y_{1,j}$	$Z_{1,j}$	$\psi_{1,j}$	$\theta_{1,j}$	$\phi_{1,j}$
2	$q_{1min}$	$q_{2min} + z \cdot p$	$q_{3min}$	$q_{4min}$	$q_{5min}$	$q_{6min}$	$X_{2,z}$	$Y_{2,z}$	$Z_{2,z}$	$\psi_{2,z}$	$\theta_{2,z}$	$\phi_{2,z}$
3	$q_{1min}$	$q_{2min}$	$q_{3min} + z \cdot p$	$q_{4min}$	$q_{5min}$	$q_{6min}$	$X_{3,z}$	$Y_{3,z}$	$Z_{3,z}$	$\psi_{3,z}$	$\theta_{3,z}$	$\phi_{3,z}$
4	$q_{1min}$	$q_{2min}$	$q_{3min}$	$q_{4min} + z \cdot p$	$q_{5min}$	$q_{6min}$	$X_{4,z}$	$Y_{4,z}$	$Z_{4,z}$	$\psi_{4,z}$	$\theta_{4,z}$	$\phi_{4,z}$
5	$q_{1min}$	$q_{2min}$	$q_{3min}$	$q_{4min}$	$q_{5min} + z \cdot p$	$q_{6min}$	$X_{5,z}$	$Y_{5,z}$	$Z_{5,z}$	$\psi_{5,z}$	$\theta_{5,z}$	$\phi_{5,z}$
6	$q_{1min}$	$q_{2min}$	$q_{3min}$	$q_{4min}$	$q_{5min}$	$q_{6min} + z \cdot p$	$X_{6,z}$	$Y_{6,z}$	$Z_{6,z}$	$\psi_{6,z}$	$\theta_{6,z}$	$\phi_{6,z}$
7	$q_{1min} + z \cdot p$	$q_{2med}$	$q_{3med}$	$q_{4med}$	$q_{5med}$	$q_{6med}$	$X_{7,z}$	$Y_{7,z}$	$Z_{7,z}$	$\psi_{7,z}$	$\theta_{7,z}$	$\phi_{7,z}$
8	$q_{2med}$	$q_{2min} + z \cdot p$	$q_{3med}$	$q_{4med}$	$q_{5med}$	$q_{6med}$	$X_{8,z}$	$Y_{8,z}$	$Z_{8,z}$	$\psi_{8,z}$	$\theta_{8,z}$	$\phi_{8,z}$
9	$q_{1med}$	$q_{2med}$	$q_{3min} + z \cdot p$	$q_{4med}$	$q_{5med}$	$q_{6med}$	$X_{9,z}$	$Y_{9,z}$	$Z_{9,z}$	$\psi_{9,z}$	$\theta_{9,z}$	$\phi_{9,z}$
10	$q_{1med}$	$q_{2med}$	$q_{3med}$	$q_{4min} + z \cdot p$	$q_{5med}$	$q_{6med}$	$X_{10,z}$	$Y_{10,z}$	$Z_{10,z}$	$\psi_{10,z}$	$\theta_{10,z}$	$\phi_{10,z}$
11	$q_{1med}$	$q_{2med}$	$q_{3med}$	$q_{4med}$	$q_{5min} + z \cdot p$	$q_{6med}$	$X_{11,z}$	$Y_{11,z}$	$Z_{11,z}$	$\psi_{11,z}$	$\theta_{11,z}$	$\phi_{11,z}$
12	$q_{1med}$	$q_{2med}$	$q_{3med}$	$q_{4med}$	$q_{5med}$	$q_{6min} + z \cdot p$	$X_{12,z}$	$Y_{12,z}$	$Z_{12,z}$	$\psi_{12,z}$	$\theta_{12,z}$	$\phi_{12,z}$
13	$q_{1min} + z \cdot p$	$q_{2max}$	$q_{3max}$	$q_{4max}$	$q_{5max}$	$q_{6max}$	$X_{13,z}$	$Y_{13,z}$	$Z_{13,z}$	$\psi_{13,z}$	$\theta_{13,z}$	$\phi_{13,z}$
14	$q_{1max}$	$q_{2min} + z \cdot p$	$q_{3max}$	$q_{4max}$	$q_{5max}$	$q_{6max}$	$X_{14,z}$	$Y_{14,z}$	$Z_{14,z}$	$\psi_{14,z}$	$\theta_{14,z}$	$\phi_{14,z}$
15	$q_{1max}$	$q_{2max}$	$q_{3min} + z \cdot p$	$q_{4max}$	$q_{5max}$	$q_{6max}$	$X_{15,z}$	$Y_{15,z}$	$Z_{15,z}$	$\psi_{15,z}$	$\theta_{15,z}$	$\phi_{15,z}$
16	$q_{1max}$	$q_{2max}$	$q_{3max}$	$q_{4min} + z \cdot p$	$q_{5max}$	$q_{6max}$	$X_{16,z}$	$Y_{16,z}$	$Z_{16,z}$	$\psi_{16,z}$	$\theta_{16,z}$	$\phi_{16,z}$
17	$q_{1max}$	$q_{2max}$	$q_{3max}$	$q_{4max}$	$q_{5min} + z \cdot p$	$q_{6max}$	$X_{17,z}$	$Y_{17,z}$	$Z_{17,z}$	$\psi_{17,z}$	$\theta_{17,z}$	$\phi_{17,z}$

*Tabelul 1 (continuare)*

Nr. Fază f	Coordonatele cuplelor motoare ( $q_i, i=1...6$ )						Poziția și orientarea efortului $P_{f,z}(X,Y,Z,\psi, \theta, \phi)$ , $f=1,...,30$ , iar $z=0,...,j$ pentru toate fazele cu excepția fazelor 2-6, unde $z=1,...,j$					
	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	X	Y	Z	$\psi$	$\theta$	$\phi$
18	$q_1 \text{ max}$	$q_2 \text{ max}$	$q_3 \text{ max}$	$q_4 \text{ max}$	$q_5 \text{ max}$	$q_6 \text{ min} + z \cdot p$	$X_{18,z}$	$Y_{18,z}$	$Z_{18,z}$	$\psi_{18,z}$	$\theta_{18,z}$	$\phi_{18,z}$
19	$q_1 \text{ min} + z \cdot p$	$q_2 \text{ min} + z \cdot p$	$q_3 \text{ med}$	$q_4 \text{ med}$	$q_5 \text{ med}$	$q_6 \text{ med}$	$X_{19,z}$	$Y_{19,z}$	$Z_{19,z}$	$\psi_{19,z}$	$\theta_{19,z}$	$\phi_{19,z}$
20	$q_1 \text{ med}$	$q_2 \text{ med}$	$q_3 \text{ min} + z \cdot p$	$q_4 \text{ min} + z \cdot p$	$q_5 \text{ med}$	$q_6 \text{ med}$	$X_{20,z}$	$Y_{20,z}$	$Z_{20,z}$	$\psi_{20,z}$	$\theta_{20,z}$	$\phi_{20,z}$
21	$q_1 \text{ med}$	$q_2 \text{ med}$	$q_3 \text{ med}$	$q_4 \text{ med}$	$q_5 \text{ min} + z \cdot p$	$q_6 \text{ min} + z \cdot p$	$X_{21,z}$	$Y_{21,z}$	$Z_{21,z}$	$\psi_{21,z}$	$\theta_{21,z}$	$\phi_{21,z}$
22	$q_1 \text{ min} + z \cdot p$	$q_2 \text{ min} + z \cdot p$	$q_3 \text{ min} + z \cdot p$	$q_4 \text{ med}$	$q_5 \text{ med}$	$q_6 \text{ med}$	$X_{22,z}$	$Y_{22,z}$	$Z_{22,z}$	$\psi_{22,z}$	$\theta_{22,z}$	$\phi_{22,z}$
23	$q_1 \text{ med}$	$q_2 \text{ med}$	$q_3 \text{ med}$	$q_4 \text{ min} + z \cdot p$	$q_5 \text{ min} + z \cdot p$	$q_6 \text{ min} + z \cdot p$	$X_{23,z}$	$Y_{23,z}$	$Z_{23,z}$	$\psi_{23,z}$	$\theta_{23,z}$	$\phi_{23,z}$
24	$q_1 \text{ min} + z \cdot p$	$q_2 \text{ min} + z \cdot p$	$q_3 \text{ min} + z \cdot p$	$q_4 \text{ min} + z \cdot p$	$q_5 \text{ med}$	$q_6 \text{ med}$	$X_{24,z}$	$Y_{24,z}$	$Z_{24,z}$	$\psi_{24,z}$	$\theta_{24,z}$	$\phi_{24,z}$
25	$q_1 \text{ med}$	$q_2 \text{ med}$	$q_3 \text{ min} + z \cdot p$	$q_4 \text{ min} + z \cdot p$	$q_5 \text{ min} + z \cdot p$	$q_6 \text{ min} + z \cdot p$	$X_{25,z}$	$Y_{25,z}$	$Z_{25,z}$	$\psi_{25,z}$	$\theta_{25,z}$	$\phi_{25,z}$
26	$q_1 \text{ min} + z \cdot p$	$q_2 \text{ min} + z \cdot p$	$q_3 \text{ min} + z \cdot p$	$q_4 \text{ min} + z \cdot p$	$q_5 \text{ min} + z \cdot p$	$q_6 \text{ min} + z \cdot p$	$X_{26,z}$	$Y_{26,z}$	$Z_{26,z}$	$\psi_{26,z}$	$\theta_{26,z}$	$\phi_{26,z}$
27	$q_1 \text{ min} + z \cdot p$	$q_2 \text{ min}$	$q_3 \text{ min} + z \cdot p$	$q_4 \text{ min}$	$q_5 \text{ min} + z \cdot p$	$q_6 \text{ min}$	$X_{27,z}$	$Y_{27,z}$	$Z_{27,z}$	$\psi_{27,z}$	$\theta_{27,z}$	$\phi_{27,z}$
28	$q_1 \text{ min} + z \cdot p$	$q_2 \text{ max}$	$q_3 \text{ min} + z \cdot p$	$q_4 \text{ max}$	$q_5 \text{ min} + z \cdot p$	$q_6 \text{ max}$	$X_{28,z}$	$Y_{28,z}$	$Z_{28,z}$	$\psi_{28,z}$	$\theta_{28,z}$	$\phi_{28,z}$
29	$q_1 \text{ min}$	$q_2 \text{ min} + z \cdot p$	$q_3 \text{ min}$	$q_4 \text{ min} + z \cdot p$	$q_5 \text{ min}$	$q_6 \text{ min} + z \cdot p$	$X_{29,z}$	$Y_{29,z}$	$Z_{29,z}$	$\psi_{29,z}$	$\theta_{29,z}$	$\phi_{29,z}$
30	$q_1 \text{ max}$	$q_2 \text{ min} + z \cdot p$	$q_3 \text{ max}$	$q_4 \text{ min} + z \cdot p$	$q_5 \text{ max}$	$q_6 \text{ min} + z \cdot p$	$X_{30,z}$	$Y_{30,z}$	$Z_{30,z}$	$\psi_{30,z}$	$\theta_{30,z}$	$\phi_{30,z}$

Modificarea coordonatelor cuplelor motoare se face pe baza relației:

$$q_i = q_{i \text{ min}} + z \cdot p, \quad (3)$$

unde  $z=0,...,j$  pentru toate cele 30 de faze, cu excepția fazelor 2-6, unde  $z=1,...,j$ , iar  $p$  reprezintă pasul de incrementare dat de relația:

$$p = \frac{q_{i \text{ max}} - q_{i \text{ min}}}{j} \quad (4)$$

iar  $j$  este numărul de pași.



# RO 125211 B1

- O parte din mulțimea datelor de instruire poate fi utilizată pentru testare, acestea nefiind folosite în procesul de instruire. 1
- În mod similar cu generarea mulțimii datelor de instruire, se poate genera o altă mulțime, utilizând fazele prezentate în tabelul 1, cu diferențierea că incrementarea coordonatelor cuplelor motoare  $q_i$  se va face între intervalele de variație folosite în tabelul 1. În acest caz, modificarea coordonatelor cuplelor motoare se poate face pe baza relației:  $q_i = q_{i \min} + (z-0,5) \cdot p$ , unde  $z=1, \dots, j$ ,  $p$  reprezintă pasul de incrementare, dat de relația  $p=(q_{i \max} - q_{i \min})/j$ , iar  $j$  este numărul de pași. 3 5 7
- Măsurarea pe modelul fizic se face pentru roboți cu structuri complicate, ce necesită modele matematice complexe, sau atunci când nu se cunosc datele necesare obținerii modelului matematic. 9 11
- În situația în care datele din tabelul 1 se determină pe modelul fizic al robotului, modificarea coordonatelor cuplelor motoare  $q_i$  se face prin acționarea motoarelor specifice fiecărei axe cinematice. În acest caz se introduc valori ale coordonatelor cuplelor motoare  $q_i$ ,  $i = 1, \dots, 6$ , și se măsoară mărimile  $X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi$ . 13 15
- Cu setul de date de instruire generate pe baza tabelului 1 se va instrui rețeaua, pentru cinematica inversă, adică se vor considera ca și intrări coordonatele efectorului, iar ca și ieșiri, coordonatele cuplelor motoare. 17
- După instruire și validare, urmează faza de exploatare a rețelei, în care se consideră cunoscute coordonatele și orientarea efectorului ( $X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi$ ), conform programului de operare a robotului în spațiul de lucru, iar rețeaua va oferi valorile coordonatelor cuplelor motoare  $q_i$ ,  $i=1, \dots, 6$ . 19 21
- Validarea funcționalității rețelei se face prin introducerea coordonatelor cuplelor motoare  $q_i$  oferite de rețea în modelul matematic direct, și determinarea coordonatelor efectorului ( $X_r, Y_r, Z_r, \psi_r, \theta_r, \varphi_r$ ). Eroarea rezultată se determină prin diferența între coordonatele programate ( $X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi$ ) și cele rezultate ( $X_r, Y_r, Z_r, \psi_r, \theta_r, \varphi_r$ ). Eroarea acceptabilă depinde de precizia robotului și de aplicația concretă. Se recomandă ca aceasta să fie cu un ordin de mărime mai mică decât precizia robotului. Reducerea erorii se poate face prin reducerea pasului  $p$ , respectiv, prin creșterea numărului de pași  $z$ . 23 25 27 29
- În tabelul 2 se prezintă un exemplu de generare a mulțimii de exemple de instruire a rețelei neuronale. Datele din tabelul 2 s-au obținut pe baza algoritmului prezentat în tabelul 1, și a modelului pentru analiza cinematică directă. În relațiile (1) s-au considerat: 31 33
- $$\begin{aligned} i_{Tx} = i_{Ty} = i_{Tz} = 10; i_{T\psi} = i_{T\theta} = i_{T\varphi} = 3 \\ X_0 = 0; Y_0 = 0; Z_0 = 300; \psi_0 = \theta_0 = \varphi_0 = -60^\circ \end{aligned} \quad (5) \quad 35$$
- Pentru obținerea unei precizii ridicate cu număr redus de exemple de instruire, pentru completarea datelor din tabelul 2, s-au ales următoarele valori: 37 39
- $$q_{i \min} = 20; q_{i \max} = 26; i = 6; j = 3; p = 2. \quad (6) \quad 41$$
- Spațiul de lucru în care s-a instruit robotul este un cub cu latura de 300 mm. 43
- Pe baza arhitecturii din fig. 3 s-a creat o rețea neuronală având șase neuroni în stratul de intrare, șase neuroni în stratul de ieșire și 20 de neuroni în stratul intermediar. S-a instruit rețeaua neuronală cu datele prezentate în tabelul 2. 45
- Instruirea s-a făcut cu aplicația Matlab, prin metoda Levenberg-Marquardt, cu parametrii de instruire implicați (număr de treceri 1000, eroarea țintă 0, gradient minim  $10^5$ , factor de multiplicare maxim  $10^{10}$ ). Cea mai bună performanță atinsă pe parcursul procesului de instruire, exprimată prin eroarea medie pătratică, a fost de ordinul  $10^5$ . 47 49

# RO 125211 B1

Tabelul 2

Nr. Fază	Coordonatele cuplelor motoare ( $q_i, i=1, \dots, 6$ )						Poziția și orientarea efectorului $P_{f,z}(X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi), f=1, \dots, 30$ , iar $z=0, \dots, j$ Pentru toate fazele, cu excepția fazelor 2-6, unde $z=1, \dots, j; j=3$					
f	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$	X	Y	Z	$\psi$	$\theta$	$\varphi$
1	20	20	20	20	20	20	200	200	500	0	0	0
	30	20	20	20	20	20	300	200	500	0	0	0
	40	20	20	20	20	20	400	200	500	0	0	0
	50	20	20	20	20	20	500	200	500	0	0	0
2	20	30	20	20	20	20	200	300	500	0	0	0
	20	40	20	20	20	20	200	400	500	0	0	0
	20	50	20	20	20	20	200	500	500	0	0	0
3	20	20	30	20	20	20	200	200	600	0	0	0
	20	20	40	20	20	20	200	200	700	0	0	0
	20	20	50	20	20	20	200	200	800	0	0	0
4	20	20	20	30	20	20	200	200	500	30	0	0
	20	20	20	40	20	20	200	200	500	60	0	0
	20	20	20	50	20	20	200	200	500	90	0	0
5	20	20	20	20	30	20	200	200	500	0	30	0
	20	20	20	20	40	20	200	200	500	0	60	0
	20	20	20	20	50	20	200	200	500	0	90	0
6	20	20	20	20	20	30	200	200	500	0	0	30
	20	20	20	20	20	40	200	200	500	0	0	60
	20	20	20	20	20	50	200	200	500	0	0	90
7	20	35	35	35	35	35	200	350	650	45	45	45
	30	35	35	35	35	35	300	350	650	45	45	45
	40	35	35	35	35	35	400	350	650	45	45	45
	50	35	35	35	35	35	500	350	650	45	45	45
8	35	20	35	35	35	35	350	200	650	45	45	45
	35	30	35	35	35	35	350	300	650	45	45	45
	35	40	35	35	35	35	350	400	650	45	45	45
	35	50	35	35	35	35	350	500	650	45	45	45

# RO 125211 B1

*Tabelul 2 (continuare)*

Nr. Fază	Coordonatele cuplelor motoare ( $q_i, i=1, \dots, 6$ )						Poziția și orientarea efectorului $P_{f,z}(X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi), f=1, \dots, 30$ , iar $z=0, \dots, j$ Pentru toate fazele, cu excepția fazelor 2-6, unde $z=1, \dots, j; j=3$						
9	35	35	20	35	35	35	350	350	500	45	45	45	1
	35	35	30	35	35	35	350	350	600	45	45	45	3
	35	35	40	35	35	35	350	350	700	45	45	45	5
	35	35	50	35	35	35	350	350	800	45	45	45	7
10	35	35	35	20	35	35	350	350	650	0	45	45	9
	35	35	35	30	35	35	350	350	650	30	45	45	11
	35	35	35	40	35	35	350	350	650	60	45	45	13
	35	35	35	50	35	35	350	350	650	90	45	45	15
11	35	35	35	35	20	35	350	350	650	45	0	45	17
	35	35	35	35	30	35	350	350	650	45	30	45	19
	35	35	35	35	40	35	350	350	650	45	60	45	21
	35	35	35	35	50	35	350	350	650	45	90	45	23
12	35	35	35	35	35	20	350	350	650	45	45	0	25
	35	35	35	35	35	30	350	350	650	45	45	30	27
	35	35	35	35	35	40	350	350	650	45	45	60	29
	35	35	35	35	35	50	350	350	650	45	45	90	31
13	20	50	50	50	50	50	200	500	800	90	90	90	33
	30	50	50	50	50	50	300	500	800	90	90	90	35
	40	50	50	50	50	50	400	500	800	90	90	90	37
	50	50	50	50	50	50	500	500	800	90	90	90	39
14	50	30	50	50	50	50	500	300	800	90	90	90	41
	50	40	50	50	50	50	500	400	800	90	90	90	43
	50	50	50	50	50	50	500	500	800	90	90	90	45
15	26	26	30	26	26	26	260	260	600	18	18	18	47
	26	26	40	26	26	26	260	260	700	18	18	18	49
	26	26	50	26	26	26	260	260	800	18	18	18	51
15	26	26	30	26	26	26	260	260	600	18	18	18	53
	26	26	40	26	26	26	260	260	700	18	18	18	55
	26	26	50	26	26	26	260	260	800	18	18	18	57

# RO 125211 B1

*Tabelul 2 (continuare)*

Nr. Fază	Coordonatele cuplelor motoare ( $q_i, i=1, \dots, 6$ )						Poziția și orientarea efortului $P_{f,z}(X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi), f=1, \dots, 30$ , iar $z=0, \dots, j$ Pentru toate fazele, cu excepția fazelor 2-6, unde $z=1, \dots, j; j=3$					
16	50	50	50	30	50	50	500	500	800	30	90	90
	50	50	50	40	50	50	500	500	800	60	90	90
	50	50	50	50	50	50	500	500	800	90	90	90
17	50	50	50	50	30	50	500	500	800	90	30	90
	50	50	50	50	40	50	500	500	800	90	60	90
	50	50	50	50	50	50	500	500	800	90	90	90
18	50	50	50	50	50	30	500	500	800	90	90	30
	50	50	50	50	50	40	500	500	800	90	90	60
	50	50	50	50	50	50	500	500	800	90	90	90
19	20	20	35	35	35	35	200	200	650	45	45	45
	30	30	35	35	35	35	300	300	650	45	45	45
	40	40	35	35	35	35	400	400	650	45	45	45
	50	50	35	35	35	35	500	500	650	45	45	45
20	35	35	20	20	35	35	350	350	500	0	45	45
	35	35	30	30	35	35	350	350	600	30	45	45
	35	35	40	40	35	35	350	350	700	60	45	45
	35	35	50	50	35	35	350	350	800	90	45	45
21	35	35	35	35	20	20	350	350	650	45	0	0
	35	35	35	35	30	30	350	350	650	45	30	30
	35	35	35	35	40	40	350	350	650	45	60	60
	35	35	35	35	50	50	350	350	650	45	90	90
22	20	20	20	35	35	35	200	200	500	45	45	45
	30	30	30	35	35	35	300	300	600	45	45	45
	40	40	40	35	35	35	400	400	700	45	45	45
	50	50	50	35	35	35	500	500	800	45	45	45
23	35	35	35	20	20	20	350	350	650	0	0	0
	35	35	35	30	30	30	350	350	650	30	30	30
	35	35	35	40	40	40	350	350	650	60	60	60
	35	35	35	50	50	50	350	350	650	90	90	90

*Tabelul 2 (continuare)*

Nr. Fază	Coordonatele cuplelor motoare ( $q_i, i=1, \dots, 6$ )						Poziția și orientarea efectorului $P_{f,z}(X,Y,Z, \psi, \theta, \varphi), f=1, \dots, 30$ , iar $z=0, \dots, j$ Pentru toate fazele, cu excepția fazelor 2-6, unde $z=1, \dots, j; j=3$					
24	20	20	20	20	35	35	200	200	500	0	45	45
	30	30	30	30	35	35	300	300	600	30	45	45
	40	40	40	40	35	35	400	400	700	60	45	45
	50	50	50	50	35	35	500	500	800	90	45	45
25	35	35	20	20	20	20	350	350	500	0	0	0
	35	35	30	30	30	30	350	350	600	30	30	30
	35	35	40	40	40	40	350	350	700	60	60	60
	35	35	50	50	50	50	350	350	800	90	90	90
26	30	30	30	30	30	30	300	300	300	30	30	30
	50	50	50	50	50	50	500	500	500	90	90	90
27	30	20	30	20	30	20	300	200	600	0	30	0
	40	20	40	20	40	20	400	200	700	0	60	0
	50	20	50	20	50	20	500	200	800	0	90	0
28	30	50	30	50	30	50	300	500	600	90	30	90
	40	50	40	50	40	50	400	500	700	90	60	90
	50	50	50	50	50	50	500	500	800	90	90	90
29	20	30	20	30	20	30	200	300	500	30	0	30
	20	40	20	40	20	40	200	400	500	60	0	60
	20	50	20	50	20	50	200	500	500	90	0	90
30	50	30	50	30	50	30	500	300	800	30	90	30
	50	40	50	40	50	40	500	400	800	60	90	60
	50	50	50	50	50	50	500	500	800	90	90	90

Modelul neuronal obținut după instruirea rețelei a fost validat cu un set de date care nu aparțin datelor de training. Pentru obținerea datelor de validare a modelului neuronal, s-a considerat deplasarea efectorului pe o diagonală a cubului, între punctele  $P_1$  (200,200,500) și  $P_2$  (500,500,800), iar pentru orientarea efectorului, s-a considerat o rotire cu  $\varphi = 90^\circ$ .

Pe diagonala  $P_1 P_2$  s-au ales 11 puncte echidistante, pentru care s-au calculat datele de intrare în modelul neuronal ( $P_n(X,Y,Z,\psi,\theta,\varphi, n=1, \dots, 11)$ , tabelul 3). Cu aceste date modelul neuronal a simulat coordonatele cuplelor motoare  $q_i, i=1, \dots, 6$ , din tabelul 3. Cu ajutorul relațiilor (1) și (5) și coordonatelor cuplelor motoare simulate s-a determinat poziția realizată de efector ( $P_m(X_r, Y_r, Z_r, \psi_r, \theta_r, \varphi_r, n=1, \dots, 11)$ , tabelul 4). Eroarea de poziționare s-a determinat ca diferență între coordonatele punctelor  $P_n(X,Y,Z, \psi, \theta, \varphi)$ , din tabelul 3, și coordonatele punctelor  $P_m(X_r, Y_r, Z_r, \psi_r, \theta_r, \varphi_r)$ , din tabelul 4.

Se constată că modelul neuronal obținut în acest exemplu de aplicare a invenției oferă o eroare maximă de poziționare  $\varepsilon_{\max} < 0,154\text{mm}$ . Această eroare poate fi considerată acceptabilă pentru majoritatea roboților de manipulare.

# RO 125211 B1

Tabelul 3

Nr. Punct $P_n$	Poziția și orientarea efectorului (Sarcina robotului)						Coordonatele cuplelor motoare simulate ( $q_i, i=1, \dots, 6$ )					
	$P_n(X, Y, Z, \psi, \theta, \phi), n=1, \dots, 11$											
n	X	Y	Z	$\psi$	$\theta$	$\phi$	$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$q_5$	$q_6$
1	200	200	500	0	0	0	19.9998	20.0002	20	20	20.0002	19.9997
2	230	230	530	0	0	9	22.9996	22.9996	22.9993	20	19.9997	23.0003
3	260	260	560	0	0	18	25.9994	25.9994	25.9988	19.9992	19.9994	25.9999
4	290	290	590	0	0	27	28.999	28.9994	28.9983	19.9983	19.9992	28.9988
5	320	320	620	0	0	36	31.9986	31.9997	31.9973	19.9982	19.9988	31.9978
6	350	350	650	0	0	45	34.9982	35.0008	34.9967	19.9991	19.998	34.9977
7	380	380	680	0	0	54	37.9979	38.0027	37.9963	20.0012	19.9971	37.998
8	410	410	710	0	0	63	40.9971	41.0051	40.9956	20.0046	19.9961	40.9983
9	440	440	740	0	0	72	43.9954	44.0068	43.994	20.0099	19.9951	43.9988
10	470	470	770	0	0	81	46.992	47.0059	46.9907	20.0175	19.9944	46.9992
11	500	500	800	0	0	90	49.9857	49.9998	49.9846	20.0274	19.9945	49.9985

# RO 125211 B1

Tabelul 4 1

Nr. Punct $P_n$	Poziția și orientarea efectorului (Sarcina robotului)						Coordonatele cuplelor motoare simulate ( $q_i, i=1, \dots, 6$ )					
	$P_n(X_r, Y_r, Z_r, \psi_r, \theta_r, \phi_r), n=1, \dots, 11$ [mm]						[mm]					
n	$X_r$	$Y_r$	$Z_r$	$\psi_r$	$\theta_r$	$\phi_r$	$X-X_r$	$Y-Y_r$	$Z-Z_r$	$\psi-\psi_r$	$\theta-\theta_r$	$\phi-\phi_r$
1	199.998	200.002	500.000	0.000	0.001	-0.001	0.002	-0.002	0.000	0.000	-0.001	0.001
2	229.996	229.996	529.993	0.000	-0.001	9.001	0.004	0.004	0.007	0.000	0.001	-0.001
3	259.994	259.994	559.988	-0.002	-0.002	18.000	0.006	0.006	0.012	0.002	0.002	0.000
4	289.990	289.994	589.983	-0.005	-0.002	26.996	0.010	0.006	0.017	0.005	0.002	0.004
5	319.986	319.997	619.973	-0.005	-0.004	35.994	0.014	0.003	0.027	0.005	0.004	0.006
6	349.982	350.008	649.967	-0.003	-0.006	44.993	0.018	-0.008	0.033	0.003	0.006	0.007
7	379.979	380.027	679.963	0.003	-0.009	53.994	0.021	-0.027	0.037	-0.003	0.009	0.006
8	409.971	410.051	709.956	0.014	-0.012	62.995	0.029	-0.051	0.044	-0.014	0.012	0.005
9	439.954	440.068	739.940	0.030	-0.015	71.996	0.046	-0.068	0.060	-0.030	0.015	0.004
10	469.920	470.059	769.907	0.052	-0.017	80.997	0.080	-0.059	0.093	-0.052	0.017	0.003
11	499.857	499.998	799.846	0.082	-0.017	89.996	0.143	0.002	0.154	-0.082	0.017	0.004

# RO 125211 B1

1 Metoda poate fi aplicată și pentru comanda roboților care au mai puțin de 6 grade de  
libertate, care oferă posibilitatea de poziționare în spațiul de lucru (X,Y,Z) și, eventual, una sau  
3 două mișcări de orientare.

În cazul unui robot cu un număr N de grade de libertate,  $3 \leq N < 6$ , mulțimea datelor de  
5 instruire redate în tabelul 1, prin fazele 1-30, se restrânge datorită scăderii numărului de grade  
de libertate (unele coloane din tabel dispar, rămânând fără obiect).

7 Spre exemplu, în cazul unui robot cu patru grade de libertate, date de coordonatele de  
poziție X,Y,Z și de unghiul de orientare  $\psi$ , coloanele aferente coordonatelor  $q_5$  și  $q_6$  din tabelul  
9 1 se elimină. Odată cu această eliminare se restrânge și numărul fazelor, prin dispariția fazelor  
5, 6, 11, 12, 17, 18, 21, 25.

11 De asemenea, în cazul unui robot cu mai puțin de șase grade de libertate, arhitectura rețelei  
neuronale poate fi simplificată prin reducerea numărului de neuroni în stratul de ieșire și de  
13 intrare la N.

Prin aplicarea invenției se obțin următoarele avantaje:

15 - instruirea rețelei cu un număr relativ redus de date de instruire, și obținerea unor erori mici  
pentru întreg spațiul de lucru al robotului, erori acceptabile pentru majoritatea aplicațiilor  
17 robotizate;

- optimizarea modului de generare a datelor de instruire, astfel încât să se ia în considerare  
19 influența variației succesive și combinate a tuturor coordonatelor cuplelor motoare și, respectiv,  
a tuturor axelor cinematice;

21 - uniformizarea erorilor și obținerea unei dispersii mici a erorii în oricare dintre punctele  
aferente spațiului de lucru al robotului.



1. Metodă de conducere a roboților industriali, constând în următoarele etape: furnizarea 3  
 datelor de intrare conform sarcinii de lucru a robotului, date care constau în poziția și orientarea 5  
 efectorului ( $X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi$ ) în anumite puncte din spațiul de lucru al robotului, determinarea 5  
 coordonatelor cuplelor motoare  $q_i, i=1, \dots, 6$ , utilizând un model neuronal MN implementat în 7  
 echipamentul de comandă al robotului, transmiterea coordonatelor cuplelor motoare  $q_i, i=1, \dots, 6$ , 7  
 unui controler care generează mărimile de comandă  $c_i, i=1, \dots, 6$ , pentru variatoarele electronice 9  
 ale axelor robotului, care, la rândul lor, generează mărimile de execuție  $e_i, i=1, \dots, 6$ , pentru 9  
 fiecare dintre motoarele de acționare a axelor robotului; modelul neuronal MN se obține prin 11  
 instruirea unei rețele neuronale cu trei straturi, având 6 neuroni în stratul de intrare, 11  
 corespunzător poziției și orientării efectorului ( $X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi$ ), 6 neuroni în stratul de ieșire, 13  
 corespunzător coordonatelor cuplelor motoare  $q_i, i=1, \dots, 6$ , și un număr cuprins între 9 și 50 de 13  
 neuroni în stratul intermediar, iar datele de instruire se determină cu modelul matematic pentru 15  
 analiza cinematică directă, în care se introduc seturi de valori ale coordonatelor cuplelor 15  
 motoare  $q_i, i=1, \dots, 6$  și se obțin parametrii de poziție ( $X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi$ ) ai efectorului, **caracterizată** 17  
**prin aceea că**, pentru obținerea unui model neuronal MN care oferă precizia dorită cu un număr 17  
 redus de exemple de instruire, sau o precizie ridicată, utilizând același număr de exemple de 19  
 instruire ca și metodele cu distribuție uniformă a punctelor de învățare în spațiul de lucru al 19  
 robotului, alegerea coordonatelor cuplelor motoare utilizate pentru generarea exemplilor de 21  
 instruire se face după următorul algoritm (tabelul 1):
- în fazele 1-6 se fac modificări succesive ale coordonatelor cuplelor motoare  $q_i, i=1, \dots, 6$ , 23  
 astfel încât, la modificarea unei coordonate  $q_k$ , coordonatele  $q_i, i \neq k$ , rămân fixate la valorile 23  
 minime  $q_{i \min}$ ;
  - în fazele 7-12 se fac modificări succesive ale coordonatelor cuplelor motoare  $q_i, i=1, \dots, 6$ , 25  
 astfel încât, la modificarea unei coordonate  $q_k$ , coordonatele  $q_i, i \neq k$ , rămân fixate la valorile 25  
 medii  $q_{i \text{ med}}$ ; 27
  - în fazele 13-18 se fac modificări succesive ale coordonatelor cuplelor motoare  $q_i, i=1, \dots, 6$ , 29  
 astfel încât, la modificarea unei coordonate  $q_k$ , coordonatele  $q_i, i \neq k$ , rămân fixate la valorile 29  
 maxime  $q_{i \max}$ ;
  - în fazele 19-20-21 are loc modificarea simultană a câte două coordonate ale cuplelor 31  
 motoare,  $q_1$  și  $q_2$  apoi  $q_3$  și  $q_4$ , iar în final  $q_5$  și  $q_6$ , restul coordonatelor rămânând fixate la valorile 31  
 medii  $q_{i \text{ med}}$ ; 33
  - în faza 22 se modifică simultan coordonatele  $q_1, q_2$  și  $q_3$ , celelalte trei coordonate fiind 35  
 fixate la valorile medii  $q_{i \text{ med}}$ ;
  - în faza 23 se modifică simultan coordonatele  $q_4, q_5$  și  $q_6$ , celelalte trei coordonate fiind 37  
 fixate la valorile medii  $q_{i \text{ med}}$ ;
  - în faza 24 se modifică simultan coordonatele  $q_1, q_2, q_3$  și  $q_4$ , coordonatele  $q_5$  și  $q_6$  fiind 39  
 fixate la valorile medii;
  - în faza 25 se modifică simultan coordonatele  $q_3, q_4, q_5$  și  $q_6$ ,  $q_1$  și  $q_2$  fiind fixate la valorile 41  
 medii;
  - în faza 26 se modifică simultan, cu aceeași cantitate, toate coordonatele cuplelor motoare 43  
 $q_i, i=1, \dots, 6$ ;
  - în fazele 27 și 28 se modifică simultan coordonatele cuplelor  $q_1, q_3$  și  $q_5$ , celelalte trei 45  
 coordonate fiind fixate la valorile minime, în faza 27, și la valorile maxime, în faza 28;
  - în fazele 29 și 30 se modifică simultan coordonatele cuplelor  $q_2, q_4$  și  $q_6$ , celelalte fiind 47  
 fixate la valorile minime, pentru faza 29, și la valorile maxime, pentru faza 30.

# RO 125211 B1

- 1           2. Metodă de conducere a roboților industriali, conform revendicării 1, **caracterizată prin**  
2 **aceea că**, în cazul unui robot cu un număr  $N$  de grade de libertate,  $3 \leq N < 6$ , valorile din tabelul  
3 1, aferente coordonatelor cuplelor motoare dispărute prin reducerea numărului de grade de  
4 libertate, se consideră 0.
- 5           3. Metodă de conducere a roboților industriali, conform revendicării 1, **caracterizată prin**  
6 **aceea că**, în cazul unui robot cu un număr  $N$  de grade de libertate,  $3 \leq N < 6$ , modelul neuronal  
7 MN se obține prin instruirea unei rețele neuronale cu trei straturi, având  $N$  neuroni în stratul de  
8 intrare și  $N$  neuroni în stratul de ieșire, și un număr cuprins între 9 și 50 de neuroni în stratul  
9 intermediar, iar datele de instruire se determină cu modelul matematic pentru analiza cinematică  
10 directă, în care se introduc seturi de valori ale coordonatelor cuplelor motoare  $q_i$ ,  $i=1, \dots, N$ , și se  
11 obțin parametri de poziție  $(X, Y, Z)$  completați, în funcție de numărul de grade de libertate, cu  
12 unul sau două dintre unghiurile de orientare  $(\psi, \theta, \varphi)$  ale efectorului, alegerea coordonatelor  
13 cuplelor motoare utilizate pentru generarea exemplurilor de instruire făcându-se după algoritmul  
din tabelul 1, prin reducerea numărului de faze datorat reducerii numărului de grade de libertate.

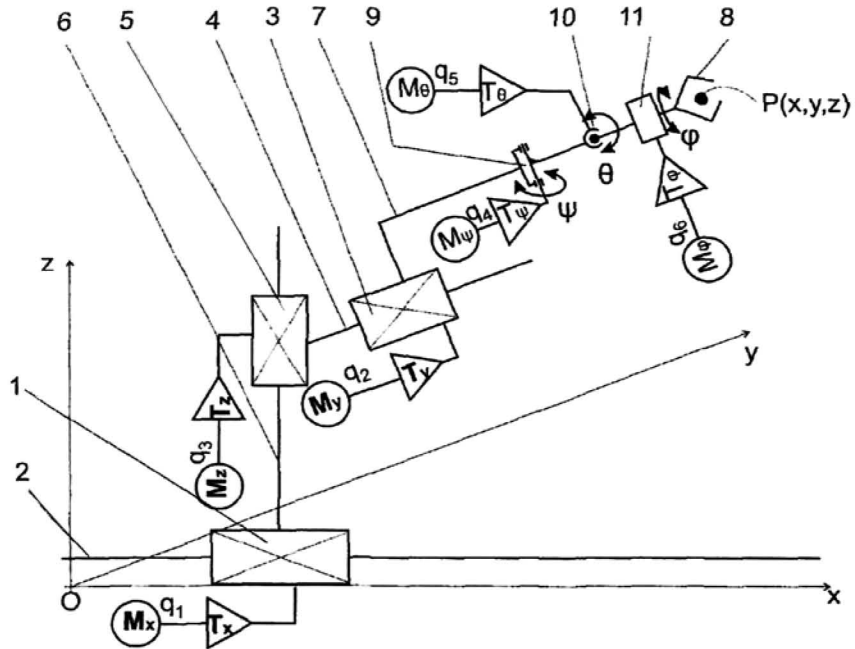


Fig. 1

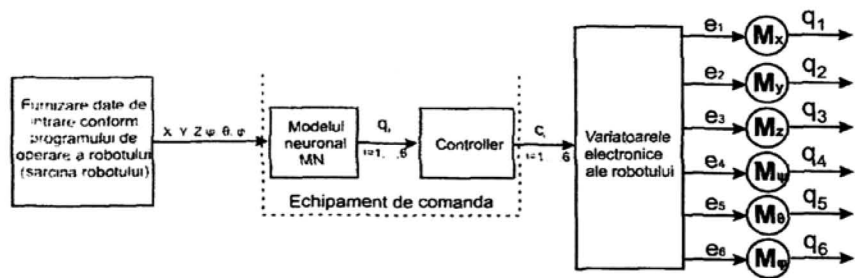


Fig. 2

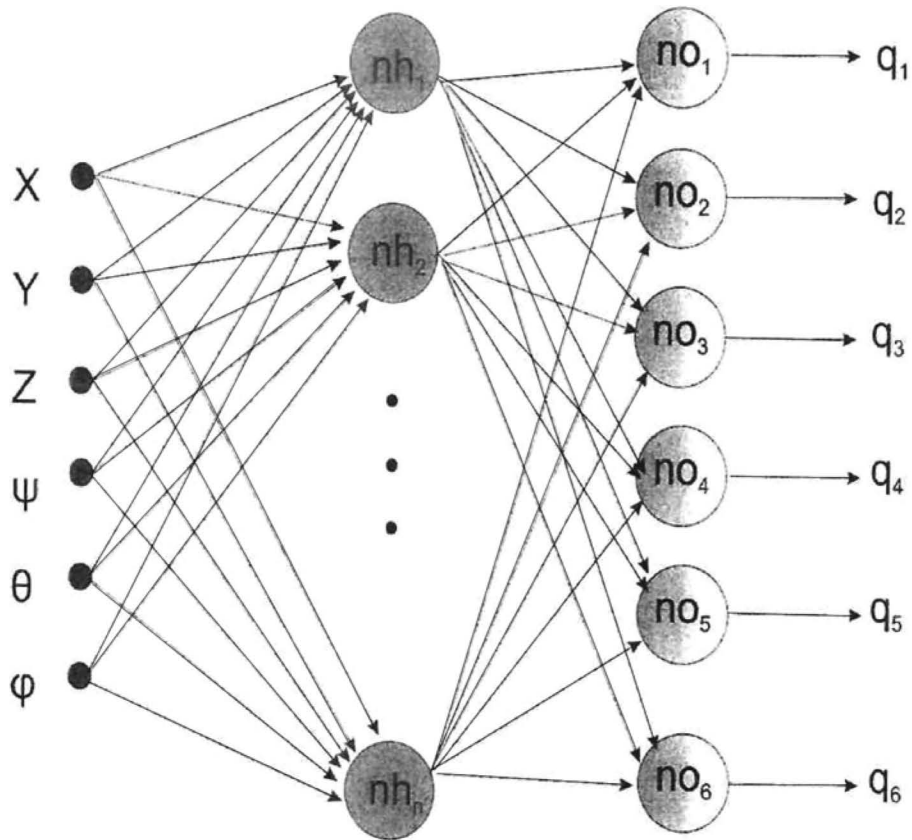


Fig. 3

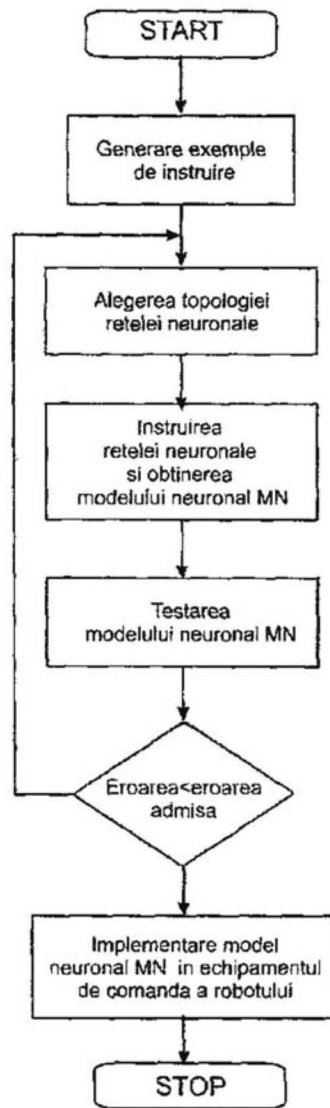


Fig. 4

