



(12)

BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: **a 2008 00450**

(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:
**JPH 04340603 A; KR 100752098 B1;
KR 1020070072314 A; WO 9317375 A**

(54) **METODĂ DE INSTRUIRE A ROBOȚILOR PENTRU
OCOLIREA OBSTACOLELOR**



RO 125210 B1

1 Invenția se referă la o metodă de instruire a roboților industriali, în vederea ocolirii unor
obstacole din spațiul de lucru, bazată pe modelarea cinematicii robotului cu ajutorul unei rețele
3 neuronale artificiale.

5 Comanda roboților industriali pe o anumită traiectorie se bazează pe două abordări:
analiza cinematică directă și analiza cinematică inversă.

7 În analiza cinematică directă, se consideră cunoscute coordonatele cuplelor motoare
 q_j și se vor determina coordonatele de poziție (X, Y, Z) și unghiurile de orientare (ψ, θ, φ) ale
efectorului.

9 În analiza cinematică inversă se consideră cunoscute coordonatele și orientarea
efectorului ($X, Y, Z, \psi, \theta, \varphi$), și se vor determina coordonatele cuplelor motoare (notate
11 $q_i, i=1, \dots, m$, unde m reprezintă numărul axelor cinematice, egal cu numărul gradelor de
libertate). Deși aparent simplă, problema de determinare a coordonatelor cuplelor motoare se
13 complică atunci când este vorba de roboți cu structură cinematică complexă, cum sunt roboții
paraleli.

15 Comanda propriu-zisă a robotului se face de către echipamentul de comandă al
robotului, prin generarea unei mărimi de comandă pentru fiecare motor (cuplă motoare), astfel
17 ca 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
19 este determinarea coordonatelor cuplelor motoare.

21 Se cunosc metode de ocolire a obstacolelor întâlnite în spațiul de lucru al roboților
industriali, bazate pe modele matematice. Aceste metode prezintă dezavantaje legate de
23 complexitatea modelului matematic și de necesitatea efectuării în timp real a unui volum mare
de calcule, fapt resimțit mai ales la roboții care operează cu viteze mari, de peste 1 m/s.

25 De asemenea, este cunoscută o metodă generală de comandă a roboților, bazată pe
rețele neuronale. Această metodă presupune parcurgerea următoarelor etape: furnizarea
27 coordonatelor unor puncte care definesc o traiectorie directă (T_d), generarea unor puncte de
pe această traiectorie, și determinarea coordonatelor cuplelor motoare utilizând un model
29 neuronal MN implementat în echipamentul de comandă al robotului, transmiterea coordonatelor
cuplelor motoare la un controller care generează mărimile de comandă aferente motoarelor de
acționare ale robotului.

31 Pentru obținerea și implementarea modelului neuronal MN sunt necesari următorii pași:
crearea rețelei neuronale, crearea unei mulțimi de exemple de învățare, instruirea rețelei
33 neuronale având ca rezultat modelul neuronal, testarea modelului neuronal și validarea
acestuia, iar apoi exploatarea modelului neuronal, prin implementarea acestuia în echipamentul
35 de comandă. Mulțimea exemplilor de învățare constă în perechi de date intrare-ieșire care se
determină prin alegerea unui nor de puncte din tot spațiul de lucru al robotului. Ca semnale de
37 intrare se consideră coordonatele de poziție ale punctelor din spațiul de lucru, iar ca semnale
de ieșire, coordonatele cuplelor motoare asociate acestor poziții.

39 Această metodă prezintă dezavantajul că, la programarea unei traiectorii drepte dintre
două puncte, robotul nu poate ocoli un obstacol, chiar dacă volumul acoperit de obstacol a fost
41 exclus din mulțimea exemplilor de instruire. De asemenea, numărul foarte mare de exemple
de învățare necesar pentru a acoperi tot spațiul de lucru al robotului. Un alt dezavantaj al
43 acestei metode este acela că în majoritatea aplicațiilor de manipulare sarcina robotului este de
a efectua deplasări liniare între puncte aparținând spațiului de lucru, puncte din care trebuie
45 preluate sau în care trebuie plasate obiecte, sau în care robotul efectuează operații.

47 Această metodă generală poate fi utilizată și pentru obținerea modelului neuronal, în
cazul deplasării efectorului între două puncte, astfel încât să ocolească un obstacol. În acest
49 caz mulțimea exemplilor de instruire se formează prin asocierea de coordonate ale unor puncte
de pe traiectoria de ocolire, cu coordonatele cuplelor motoare corespunzătoare lor. În această
situație trebuie descrisă traiectoria.

RO 125210 B1

O modalitate de descriere a traiectoriei o constituie expresia matematică a acesteia, ceea ce prezintă dezavantajul determinării ei. Următorul pas constă în determinarea coordonatelor cuplelor motoare pentru o mulțime de puncte aparținând traiectoriei ocolitoare. Pentru structuri complexe de roboți, cum ar fi roboții paraleli cu 6 grade de libertate, expresiile de determinare a coordonatelor cuplelor motoare sunt complicate. Forma generală a expresiilor este $q_i = f_i(x, y, z, \psi, \theta, \phi)$, $i=1, \dots, 6$. În acest caz complexitatea calculului este ridicată, necesitând un număr mare de operații matematice. Acest lucru constituie un alt dezavantaj, mai ales în cazul roboților care lucrează la viteze mari, calculele făcându-se în timp real.

Problema pe care o rezolvă invenția de față constă în elaborarea unei metode de instruire a roboților industriali, bazată pe modelarea și instruirea unei rețele neuronale, astfel încât, la programarea unei traiectorii directe între două puncte prin care trebuie să treacă efectorul robotului, acesta să ocolească un obstacol întâlnit și cunoscut.

Metoda de instruire a roboților pentru ocolirea obstacolelor, conform invenției, înlătură dezavantajele menționate mai sus prin aceea că se bazează pe modelarea, instruirea și exploatarea unei rețele neuronale cu trei straturi având k neuroni în stratul de intrare, corespunzător numărului de grade de libertate, m neuroni în stratul de ieșire, corespunzător numărului de axe cinematice, un număr n cuprins între 9 și 50 de neuroni în stratul intermediar, datele de instruire fiind determinate din modelul matematic sau prin experimentare pe modelul fizic al robotului, prin alegerea unui nor de puncte conținute într-un plan de lucru din spațiul de lucru al robotului, plan în care robotul trebuie să efectueze cel puțin o deplasare între două puncte stabilite, ocolirea obstacolului de pe traiectoria robotului realizându-se prin instruirea rețelei, cu date de intrare aferente coordonatelor unor puncte de pe traiectoria directă a robotului dintre două puncte și cu date de ieșire (coordonatele cuplelor motoare) aferente traiectoriei de ocolire.

Mulțimea exemplilor de instruire va conține, ca semnale de intrare, coordonatele norului de puncte, iar ca semnale de ieșire, coordonatele cuplelor motoare calculate după regula R de mai jos:

R1) pentru un punct din planul de lucru situat în afara obstacolului (punct cu rol de intrare în mulțimea perechilor intrare-ieșire utilizate la instruire), se stabilește ca pereche (având rol de ieșire) coordonatele cuplelor motoare corecte (conform modelului matematic care descrie cinematica robotului, sau conform cu măsurătorile experimentale);

R2) pentru un punct din planul de lucru care aparține obstacolului (la fel, cu rol de intrare în mulțimea perechilor intrare-ieșire utilizate la instruire), se stabilește ca pereche (cu rol de ieșire) coordonatele cuplelor motoare care corespund altui punct, acesta din urmă fiind situat pe suprafața (anvelopa) obstacolului.

Numărul de neuroni din stratul intermediar se alege prin încercări, practică utilizată în calculul neuronal.

Ideea inovativă a metodei constă în modul de formare a mulțimii de instruire a rețelei neuronale care conduce la o instruire „voit eronată”, astfel încât în faza de exploatare nu este necesară cunoașterea traiectoriei de ocolire. Mulțimea exemplilor de instruire este formată din perechi de date intrare-ieșire în care semnalele de intrare corespund unor puncte de pe traiectoria directă a robotului (care nu ocolește obstacolul). Semnalele de ieșire, în faza de instruire, sunt coordonatele cuplelor motoare, dar în mod „voit eronat” nu sunt coordonatele asociate traiectoriei directe care trece prin obstacol, ci sunt asociate cu semnale de ieșire corespunzând unor puncte situate în afara obstacolului, pe o traiectorie de ocolire. Astfel, în faza de exploatare, modelul se va comporta „eronat”. Acest lucru înseamnă că, pentru puncte de pe o traiectorie directă (cel mai frecvent o dreaptă), care nu ocolește obstacolul, transmise ca date de intrare, modelul neuronal va genera, ca ieșiri, coordonate ale cuplelor motoare care vor conduce robotul pe lângă obstacol.

RO 125210 B1

1 Partea inovativă a metodei constă în modul de realizarea a modelului neuronal MN, prin
parcursul pașilor următori:

3 - crearea unei rețele neuronale având un număr de neuroni în stratul de intrare egal cu
numărul gradelor de libertate ale robotului, iar în stratul de ieșire, un număr de neuroni egal cu
5 numărul cuplelor motoare q_i ;

7 - crearea unei mulțimi de exemple de învățare (instruire) formate din perechi de
coordonate a efectorului, aparținând planului de lucru al robotului, și coordonate ale cuplelor
motoare q_i corespunzătoare, determinate conform regulii R descrise mai sus;

9 - instruirea rețelei neuronale cu mulțimea datelor de învățare, rezultatul instruirii
numindu-se modelul neuronal;

11 - testarea modelului neuronal obținut la pasul precedent, și validarea acestuia în cazul
obținerii unor erori admisibile;

13 - exploatarea modelului neuronal, acest lucru însemnând că modelul neuronal primește
doar date de intrare constând în poziții ale efectorului robotului, și generează coordonatele
15 cuplelor motoare.

17 Se dă în continuare un exemplu de aplicare a invenției în legătură cu fig. 1...8, ce
reprezintă:

- fig. 1 - modul de alegere a punctelor de instruire și traiectoriile efectorului;

19 - fig. 2 - un plan din spațiul de lucru al robotului, care include o traiectorie directă între
două puncte (P_1 - P_3 , din fig. 1), care trece printr-un obstacol, și o traiectorie de ocolire a
21 acestuia;

23 - fig. 3 - configurația rețelei neuronale utilizate în modelarea unui robot cu trei grade de
libertate, conform datelor din tabelul 1;

- fig. 4 - organigrama metodei de obținere a modelului neuronal;

25 - fig. 5 - structura unui robot cu trei grade de libertate;

- fig. 6 - reprezentarea schematică a robotului în planul xOz ;

27 - fig. 7 - reprezentarea grafică a planului de lucru;

- fig. 8 - reprezentarea grafică a rezultatelor obținute.

29 Se consideră o zonă din spațiul de lucru al unui robot, de forma unui cub
 $P_1P_2P_3P_4P_5P_6P_7P_8$, care conține un obstacol $ABCD A'B'C'D'$, care trebuie evitat de robot în timpul
31 funcționării. Se presupune că efectorul robotului trebuie să facă o deplasare între punctele P_1 - P_3
sau P_2 - P_4 , dar pe o traiectorie care să ocolească obstacolul $ABCD A'B'C'D'$.

33 Planul punctelor P_1, P_2, P_3, P_4 este denumit plan de lucru, adică un plan în care robotul
trebuie să efectueze anumite operații (preluare de obiecte, alimentarea unor echipamente
35 tehnologice etc.).

37 Se caută o metodă foarte simplă și comodă de conducere a robotului, furnizând, ca și
date de intrare, coordonatele unor puncte de pe traiectoriile directe P_1 - P_3 sau P_2 - P_4 , sau
39 coordonatele unui nor de puncte situate în planul feței $P_1P_2P_3P_4$ a cubului (planul de lucru), iar
robotul să se miște pe traiectorii care să ocolească obstacolul. Acest lucru se realizează printr-o
instruire "voit eronată" a rețelei neuronale care modelează comportarea robotului.

41 Setul datelor de instruire, de forma unor matrice perechi intrare-ieșire, se obține prin
asocierea coordonatelor efectorului robotului X, Y, Z cu coordonatele cuplelor motoare q_1 ,
43 rezultate prin modelare matematică sau pe cale experimentală pe modelul fizic. Generarea
datelor de instruire se face conform tabelului 1.

Nr. crt.	Punctele de instruire	Intrări			Ieșiri dorite	Apartenența q_i
1	P_1	X_1	Y_1	Z_1	$q_{i,1}$	P_1
2	P_2	X_2	Y_2	Z_2	$q_{i,2}$	P_2
3	P_3	X_3	Y_3	Z_3	$q_{i,3}$	P_3
4	P_4	X_4	Y_4	Z_4	$q_{i,4}$	P_4
5	A	X_A	Y_A	Z_A	$q_{i,A'}$	A'
6	B	X_B	Y_B	Z_B	$q_{i,B'}$	B'
7	C	X_C	Y_C	Z_C	$q_{i,C'}$	C'
8	D	X_D	Y_D	Z_D	$q_{i,D'}$	D'
9	O_1	X_{O1}	Y_{O1}	Z_{O1}	$q_{i,O'1}$	O'_1

Pentru instruirea robotului în punctele P_1, P_2, P_3, P_4 se iau ca și intrări coordonatele acestor puncte X_j, Y_j, Z_j , iar ca și ieșiri dorite, coordonatele cuplelor motoare $q_{i,j}, j=1, \dots, 4, i=1, \dots, m$, m fiind numărul gradelor de libertate, în general egal cu numărul axelor cinematice.

Instruirea robotului în punctele A, B, C, D se face considerând ca și intrări coordonatele acestor puncte $X_A, Y_A, Z_A, \dots, X_D, Y_D, Z_D$, iar ca și ieșiri, coordonatele cuplelor motoare $q_{i,j}, j=A', B', C', D'$, aferente punctelor de ocolire a obstacolului A', B', C', D'. Astfel, în faza de exploatare a modelului neuronal obținut prin instruirea rețelei cu această metodă, la programarea unor puncte P(X, Y, Z) de pe o traiectorie directă T_d care intersectează obstacolul ABCDA'B'C'D', modelul va oferi coordonate ale cuplelor motoare care vor conduce efectorul robotului pe o traiectorie T_o de ocolire a obstacolului.

Ocolirea se realizează cu o precizie mai bună și pe o traiectorie mai potrivită dacă instruirea se face și într-un punct $O_1(X_{O1}, Y_{O1}, Z_{O1})$, din centrul bazei obstacolului, cu ieșirile (coordoanatele cuplelor motoare) aferente punctului $O'_1(X_{O'1}, Y_{O'1}, Z_{O'1})$, situat deasupra obstacolului, cu 5...10% din înălțimea obstacolului AA'.

O altă utilizare a metodei, în situațiile în care nu există un obstacol, dar se dorește evitarea contactului dintre efectorul robotului și un plan care conține punctele de lucru, cum ar fi punctele P_1, P_4, P_8, P_5 , se face o instruire a robotului și într-un punct $O_2(X_{O2}, Y_{O2}, Z_{O2})$, situat în centrul feței $P_1P_4P_8P_5$, pentru care se iau ca ieșiri coordonatele cuplelor motoare aferente unui punct $O'_2(X_{O'2}, Y_{O'2}, Z_{O'2})$, situat la o distanță $O_2-O'_2$ față de planul respectiv. Astfel, la programarea unei traiectorii directe dintre punctele P_4 și P_5 , modelul va oferi coordonate ale cuplelor motoare care conduc efectorul pe o traiectorie T_e , de evitare a contactului cu planul punctelor de lucru.

Într-un exemplu de aplicare a metodei, se consideră robotul cu trei grade de libertate din fig. 5. Cele trei grade de libertate constau din trei mișcări de translație pe axele Ox, Oy și Oz . Robotul lucrează în coordonate carteziene, având trei module de translație. Deplasarea pe axa Ox se face de către modulul 1 care se deplasează pe ghidajul 2 paralel cu axa Ox și este asigurată de către motorul Mx care acționează modulul 1 printr-un mecanism de transformare Tx .

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

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 Mz care, prin mecanismul de transformare Tz , acționează modulul 5.

RO 125210 B1

1 Mâna mecanică **7** cu efectorul final **8** este fixată de modulul **3**.

2 Poziția efectorului **8**, reprezentată prin punctul $P(X, Y, Z)$, este dată de către coordona-
3 tele cuplelor motoare q_1, q_2 și q_3 . Astfel, coordonata q_1 a motorului **Mx** determină coordonata
4 **X** a efectorului **8**, coordonata q_2 a motorului **My** determină coordonata **Y** a efectorului, iar coor-
5 donata q_3 a motorului **Mz** determina coordonata **Z** a efectorului.

6 În fig. 6 se prezintă o vedere simplificată a robotului din fig. 5, care trebuie să efectueze
7 o deplasare din punctul P_1 în punctul P_3 , cu ocolirea obstacolului **9**. Punctele **A**, **B** și O_1
8 corespund intersecției traiectoriei directe **Td** cu obstacolul **9**.

9 Pentru a ocoli obstacolul **9**, efectorul **8** al robotului trebuie să se deplaseze pe o
10 traiectorie ocolitoare **To**. Această ocolire se realizează prin combinarea mișcării de translație
11 pe axa **Ox** realizată de modulul **1** cu o mișcare de translație pe axa **Oz** realizată de modulul **5**.
12 Pentru deplasarea pe traiectoria de ocolire $P_1A'O_1C'P_3$, echipamentul de comandă al robotului
13 trebuie să primească informații privind aspectul traiectoriei, sub forma unor coordonate ale unor
14 puncte de pe traiectorie.

15 O modalitate de descriere a traiectoriei o constituie expresia matematică a acesteia,
16 ceea ce prezintă inconvenientul determinării ei. Următorul pas constă în determinarea
17 coordonatelor cuplelor motoare, în exemplul dat acestea fiind q_1 și q_3 , (q_2 fiind o constantă)
18 pentru o mulțime de puncte aparținând traiectoriei ocolitoare **To**.

19 Pentru robotul prezentat în fig. 5, legătura dintre coordonatele punctelor de pe traiectoria
20 robotului și coordonatele cuplelor motoare se determină prin sisteme de ecuații liniare de forma
21 (1) sau (2), completate cu constantele din relația (3):

$$23 \quad X = q_1 \cdot i_{Tx} + X_0; Y = q_2 \cdot i_{Ty} + Y_0; Z = q_3 \cdot i_{Tz} + Z_0 \quad (1)$$

$$25 \quad q_1 = \frac{X - X_0}{i_{Tx}}; \quad q_2 = \frac{Y - Y_0}{i_{Ty}}; \quad q_3 = \frac{Z - Z_0}{i_{Tz}} \quad (2)$$

$$29 \quad i_{Tx} = i_{Ty} = i_{Tz} = 10; X_0 = 0; Y_0 = 0; Z_0 = 300 \quad (3)$$

31 unde i_{Tx}, i_{Ty}, i_{Tz} reprezintă funcțiile de transfer ale mecanismelor de transformare ce generează
32 mișcările respective, iar X_0, Y_0, Z_0 reprezintă valorile inițiale obținute pentru $q_1 = 0$.

33 Relațiile (1) constituie modelul matematic pentru cinematica directă, iar modelul
34 matematic pentru cinematica inversă constă în sistemul de relații (2).

35 În invenția propusă, traiectoria de ocolire se aproximează printr-o mulțime restrânsă de
36 puncte, fără a cunoaște expresia matematică a traiectoriei, iar determinarea coordonatelor
37 cuplelor motoare se face cu ajutorul unui model neuronal.

38 Considerând cunoscute coordonatele de poziție (**X, Y, Z**) și utilizând valorile din relația
39 (3), cu ajutorul relației (2) se determină coordonatele cuplelor motoare q_1, q_2, q_3 .

40 Pentru completarea datelor din tabelul 1, în cazul robotului din fig. 5, s-au ales pentru
41 început punctele $P_1(260, 200, 600)$, $P_2(500, 200, 600)$, $P_3(500, 500, 600)$, $P_4(200, 500, 600)$.
42 Obstacolul **9** se consideră încadrat într-un paralelipiped definit de punctele de coordonate
43 **A(300, 300, 600)**, **B(400, 300, 600)**, **C(400, 400, 600)**, **D(300, 400, 600)**, situate în planul de
44 lucru, și punctele **A'(300, 300, 700)**, **B'(400, 300, 700)**, **C'(400, 400, 700)**, **D'(300, 400, 700)**
45 situate într-un plan paralel cu planul de lucru, la distanța de 100 mm.

46 Înălțimea relativă a obstacolului față de planul de lucru (planul ABCD) este mai mică
47 decât segmentul **AA'** cu cota h (fig. 6).

48 Punctul O_1 are coordonatele (350, 350, 600), iar punctul O_1' are coordonatele (350, 350,
49 710), distanța O_1O_1' fiind mai mare cu 10% decât segmentul **AA'**.

RO 125210 B1

Pentru această aplicație se constată că planul de lucru este un plan paralel cu planul XOY și este situat la cota $Z=600$ mm.

Pentru punctele din planul de lucru care nu aparțin obstacolului (punctele P_1, P_2, P_3, P_4 din tabelele 1 și 2), coordonatele cuplelor motoare se calculează pe baza coordonatelor X_j, Y_j, Z_j care definesc aceste puncte.

Pentru celelalte puncte din planul de lucru, care aparțin obstacolului, adică acelea care se află în intersecția dintre planul de lucru și obstacol, coordonatele cuplelor motoare se calculează pe baza coordonatelor unor puncte corespondente de pe anvelopa obstacolului. Cu alte cuvinte, în cazul exemplului particular al robotului din fig. 5, coordonatele cuplelor motoare asociate punctelor A, B, C, D s-au calculat folosind în mod "voit eronat" coordonatele punctelor corespondente A', B', C', D' , de pe anvelopa obstacolului, iar cele ale punctului O_1 s-au calculat folosind coordonatele punctului O_1' .

Instruirea rețelei neuronale s-a făcut având ca semnale de intrare coordonatele X_j, Y_j, Z_j ale punctelor (coloanele 2, 3, 4, din tabelul 2), iar ca semnale de ieșire, coordonatele cuplelor motoare $q_{i,j}$ (coloanele 6, 7, 8, din tabelul 2) corespunzătoare punctelor X_j, Y_j și $Z_{To,j}$ (coloanele 2, 3, 5, din tabelul 2) aferente planului de lucru sau anvelopei de ocolire a obstacolului A', B', C', D', O_1' .

Tabelul 2

Nr. crt.	Punctele de instruire	Poziția și orientarea efectorului (X,Y,Z) - Puncte din planul de lucru; (X,Y,Z _{To}) - Puncte de pe anvelopa obstacolului (traectoria ocolitoare To)				Coordonatele cuplelor motoare ($q_{i,j}$ $i=1, \dots, 3; j=1, \dots, 9$)		
		X_j	Y_j	Z_j	$Z_{To,j}$	$q_{1,j}$	$q_{2,j}$	$q_{3,j}$
j	P	X_j	Y_j	Z_j	$Z_{To,j}$	$q_{1,j}$	$q_{2,j}$	$q_{3,j}$
0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	P1	200	200	600	600	20	20	30
2	P2	500	200	600	600	50	20	30
3	P3	500	500	600	600	50	50	30
4	P4	200	500	600	600	20	50	30
5	A	300	300	600	700	30	30	40
6	B	400	300	600	700	40	30	40
7	C	400	400	600	700	40	40	40
8	D	300	400	600	700	30	40	40
9	O_1	350	350	600	710	35	35	41

Pentru validarea modelului neuronal, s-au considerat ca date de intrare coordonatele punctelor X_j, Y_j, Z_j corespunzătoare deplasării efectorului pe traiectoriile directe P_1-P_3 și P_2-P_4 (coloanele 2, 3 și 4, din tabelul 3). Simularea pe modelul neuronal a oferit valorile coordonatelor cuplelor motoare q_y prezentate în coloanele 6, 7 și 8, din tabelul 3.

Pe baza coordonatelor cuplelor motoare $q_{i,j}$ simulate de modelul neuronal, cu ajutorul relațiilor (1) și (3) s-au calculat coordonatele de poziție realizate de efector Xr_j, Yr_j, Zr_j (coloanele 9, 10, 11, din tabelul 3).

Eroarea obținută prin simulare pe modelul neuronal (coloanele 12, 13 și 14, din tabelul 3) s-a determinat ca diferență între coordonatele de intrare (X_j, Y_j, Z_j), programate a fi realizate, și coordonatele atinse de efector (Xr_j, Yr_j, Zr_j).

RO 125210 B1

Tabelul 3

Nr. Crt.	Punctele de testare	Poziția și orientarea efectorului (X,Y,Z) - Puncte din planul de lucru; (traectoria ocolitoare T_o)				Coordonatele cuplelor motoare simulate de modelul neuronal (q_{ij} ; $i=1,\dots,3$; $j=1,\dots,9$)			Coordonatele de poziție ale efectorului realizate conform coordonatelor simulate			Eroarea e [mm]		
		X_j	Y_j	Z_j	Z_{toj}	q_{1j}	q_{2j}	q_{3j}	X_{rj}	Y_{rj}	Z_{rj}	x_j-x_q	y_j-y_{rj}	$Z_{T_{oj}}-Z_{rj}$
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	P1	200	200	600	600	20.00	20.00	30.00	200.00	200.00	600.00	0.00	0.00	0.00
2	A	300	300	600	700	30.00	30.00	40.00	300.00	300.00	700.00	0.00	0.00	0.00
3	C	400	400	600	700	40.00	40.00	40.00	400.00	400.00	700.00	0.00	0.00	0.00
4	P3	500	500	600	600	49.99	50.11	30.03	499.90	501.08	600.25	0.10	-1.08	-0.25
5	P2	500	200	600	600	50.00	20.00	30.00	500.00	200.00	600.00	0.00	0.00	0.00
6	B	400	300	600	700	40.00	30.00	40.00	400.00	300.00	700.00	0.00	0.00	0.00
7	O1	350	350	600	710	35.19	35.54	40.78	351.85	355.45	707.77	-1.85	-5.45	2.23
8	D	300	400	600	700	30.00	40.00	40.00	300.00	400.00	700.00	0.00	0.00	0.00
9	P4	200	500	600	600	20.00	50.00	30.00	200.00	500.00	600.00	0.00	0.00	0.00

RO 125210 B1

Se constată că efectorul ocolește obstacolul și realizează o precizie bună în punctele de oprire P_1, P_2, P_3, P_4 .

Pentru îmbunătățirea preciziei de poziționare, și pentru generarea unei traiectorii optimizate, lucru necesar în special în situația unor roboți care conferă spații de lucru mari, se consideră un nor de puncte egal dispersate în planul de lucru al robotului (planul punctelor P_1, P_2, P_3, P_4 , fig. 7).

Se descrie această abordare în continuare.

În cazul acesta, pentru instruirea rețelei neuronale, se vor considera ca semnale de intrare coordonatele X, Y, Z , iar ca semnale de ieșire, coordonatele cuplelor motoare aferente fiecărui punct.

Coordonatele cuplelor motoare se vor calcula pe baza modelului matematic pentru analiza cinematică inversă, sau prin experimentare pe modelul fizic al robotului. La calcularea coordonatelor cuplelor motoare se aplică regula R, descrisă anterior. Pentru punctele care intersectează obstacolul în planul de lucru, se vor considera două coordonate (X și Y) din planul de lucru, iar a treia coordonată (Z) se va lua deasupra obstacolului, pe anvelopa acestuia (regula R2). Pentru punctele care nu intersectează obstacolul în planul de lucru, se vor adopta coordonatele corecte ale acestor puncte (regula R1).

O ilustrare a acestui caz în care se utilizează un număr mai mare de exemple de învățare, specifice unui robot cu șase grade de libertate, se prezintă în tabelul 4.

Cu exemplele de instruire din tabelul 4, considerându-se ca intrări coordonatele de poziție și de orientare ale efectorului (coloanele 1-3 și 5-7), iar ca ieșiri, coordonatele cuplelor motoare $q_{i,j}$ (coloanele 8-13), s-a instruit o rețeaua neuronală având 6 neuroni în stratul de intrare, 6 neuroni în stratul de ieșire și 20 de neuroni în stratul intermediar. În urma instruirii rețelei s-a obținut un model neuronal specific acestui caz.

Testarea și validarea acestui model neuronal s-a făcut cu datele din tabelul 5. Pentru generarea datelor s-a considerat deplasarea robotului pe traiectorii directe, sub forma unor segmente drepte între punctele $T_1-T_2-T_3-T_4-T_5-T_6-T_1$ (fig. 7). Punctele $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6$ sunt puncte în care robotul trebuie să efectueze operații (puncte de lucru), și în care efectorul trebuie să se poziționeze cu precizie corespunzătoare aplicației. Toate punctele T_1, \dots, T_6 sunt situate în planul de lucru W_p .

Tabelul 4

Punctele de instruire	Poziția și orientarea efectorului (X_j, Y_j, Z_j) - Puncte din planul de lucru; (X, Y, Z_{To}) - Puncte de pe anvelopă obstacolului							Coordonatele cuplelor motoare ($q_{i,j}$, $i=1, \dots, 6; j=1, \dots, 48$)					
	j	X_j	Y_j	Z_j	Z_{Toj}	ψ_j	θ_j	ϕ_j	$q_{1,j}$	$q_{2,j}$	$q_{3,j}$	$q_{4,j}$	$q_{5,j}$
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	200	200	600	600	0	0	0	20	20	30	20	20	20
2	250	200	600	600	0	0	0	25	20	30	20	20	20
3	300	200	600	600	0	0	0	30	20	30	20	20	20
4	350	200	600	600	0	0	0	35	20	30	20	20	20
5	400	200	600	600	0	0	0	40	20	30	20	20	20
6	450	200	600	600	0	0	0	45	20	30	20	20	20

RO 125210 B1

Tabelul 4 (continuare)

1
3
5
7
9
11
13
15
17
19
21
23
25
27
29
31
33
35

Punctele de instruire	Poziția și orientarea efectorului (X_j, Y_j, Z_j) - Puncte din planul de lucru; (X, Y, Z_{T_0}) - Puncte de pe anvelopă obstacolului							Coordonatele cuplelor motoare ($q_{i,j}$, $i=1, \dots, 6; j=1, \dots, 48$)					
	7	500	200	600	600	0	0	0	50	20	30	20	20
8	200	350	600	600	0	0	0	20	35	30	20	20	20
9	250	350	600	600	0	0	0	25	35	30	20	20	20
10	300	350	600	700	0	0	0	30	35	40	20	20	20
11	350	350	600	710	0	0	0	35	35	41	20	20	20
12	400	350	600	700	0	0	0	40	35	40	20	20	20
13	450	350	600	600	0	0	0	45	35	30	20	20	20
14	500	350	600	600	0	0	0	50	35	30	20	20	20
15	200	500	600	600	0	0	0	20	50	30	20	20	20
16	250	500	600	600	0	0	0	25	50	30	20	20	20
17	300	500	600	600	0	0	0	30	50	30	20	20	20
18	350	500	600	600	0	0	0	35	50	30	20	20	20
19	400	500	600	600	0	0	0	40	50	30	20	20	20
20	450	500	600	600	0	0	0	45	50	30	20	20	20
21	500	500	600	600	0	0	0	50	50	30	20	20	20
22	200	200	600	600	0	0	0	20	20	30	20	20	20
23	200	250	600	600	0	0	0	20	25	30	20	20	20
24	200	300	600	600	0	0	0	20	30	30	20	20	20
25	200	350	600	600	0	0	0	20	35	30	20	20	20
26	200	400	600	600	0	0	0	20	40	30	20	20	20
27	200	450	600	600	0	0	0	20	45	30	20	20	20
28	200	500	600	600	0	0	0	20	50	30	20	20	20
29	350	200	600	600	0	0	0	35	20	30	20	20	20
30	350	250	600	600	0	0	0	35	25	30	20	20	20
31	350	300	600	700	0	0	0	35	30	40	20	20	20
32	350	350	600	710	0	0	0	35	35	41	20	20	20
33	350	400	600	700	0	0	0	35	40	40	20	20	20
34	350	450	600	600	0	0	0	35	45	30	20	20	20
35	350	500	600	600	0	0	0	35	50	30	20	20	20
36	500	200	600	600	0	0	0	50	20	30	20	20	20
37	500	250	600	600	0	0	0	50	25	30	20	20	20

Tabelul 4 (continuare)

Punctele de instruire	Poziția și orientarea efectorului (X_j, Y_j, Z_j) - Puncte din planul de lucru; (X, Y, Z_{T_0}) - Puncte de pe anvelopă obstacolului							Coordonatele cuplelor motoare ($q_{i,j}$, $i=1, \dots, 6; j=1, \dots, 48$)					
38	500	300	600	600	0	0	0	50	30	30	20	20	20
39	500	350	600	600	0	0	0	50	35	30	20	20	20
40	500	400	600	600	0	0	0	50	40	30	20	20	20
41	500	450	600	600	0	0	0	50	45	30	20	20	20
42	500	500	600	600	0	0	0	50	50	30	20	20	20
43	250	250	600	600	0	0	0	25	25	30	20	20	20
44	300	300	600	700	0	0	0	30	30	40	20	20	20
45	350	350	600	710	0	0	0	35	35	41	20	20	20
46	400	400	600	700	0	0	0	40	40	40	20	20	20
47	450	450	600	600	0	0	0	45	45	30	20	20	20
48	500	500	600	600	0	0	0	50	50	30	20	20	20

Se pune problema de a verifica dacă la programarea unor traiectorii directe T_d între punctele de lucru T_1, \dots, T_6 (fig. 7), modelul neuronal MN, obținut prin instruirea rețelei neuronale cu datele din tabelul 4, va furniza date care să conducă efectorul pe traiectorii ocolitoare T_0 .

Ca intrări s-au folosit coordonatele de poziție ($X, Y, Z, \psi, \theta, \phi$) ale efectorului (coloanele 1-6), iar modelul neuronal MN a furnizat, ca ieșiri, coordonatele cuplelor motoare $q_{i,j}$ (coloanele 7-12). Cu valorile coordonatelor cuplelor motoare $q_{i,j}$ (coloanele 7-12) s-au determinat coordonatele $X_{r_j}, Y_{r_j}, Z_{r_j}$ realizate de efector. Valorile unghiurilor de orientare realizate în urma simulării (ψ_r, θ_r, ϕ_r) nu s-au mai completat în tabelul 5, acestea având valoarea 0.

Rezultatele din tabelul 5 sunt ilustrate grafic în fig. 8.

Se constată că, la programarea robotului pe traiectoriile directe dintre punctele $T_3 - T_4$ și $T_6 - T_1$, acestea întâlnesc obstacolul 9, iar traiectoriile dintre celelalte puncte nu intersectează obstacolul.

Analizând rezultatele din tabelul 5 și din fig. 8, se constată că, deși datele de intrare constau în coordonate ale unor puncte de pe traiectoriile directe T_d (din planul de lucru W_p), modelul neuronal oferă coordonate ale cuplelor motoare care fac ca robotul să ocolească obstacolul 9 atunci când traiectoria directă T_d intersectează acest obstacol. Când traiectoria directă T_d nu intersectează obstacolul 9, modelul neuronal MN oferă date care conduc efectorul robotului pe traiectoria directă T_d .

RO 125210 B1

Tabelul 5

Punctele de testare J	Poziția și orientarea efectorului în planul de lucru						Coordonatele cuplelor motoare ($q_{1,j}$ $i=1,\dots,6$; $j=1,\dots,29$) obținute prin simulare pe modelul neuronal						Coordonatele realizate		
	X_j	Y_j	Z_j	ψ_j	θ_j	ϕ_j	$q_{1,j}$	$q_{2,j}$	$q_{3,j}$	$q_{4,j}$	$q_{5,j}$	$q_{k,j}$	X_{r_j}	Y_{r_j}	Z_{r_j}
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	200	200	600	0	0	0	20.075	19.831	30.028	20	20	20	200.75	198.31	600.28
2	275	200	600	0	0	0	26.728	17.130	26.437	20	20	20	267.28	171.30	564.37
3	350	200	600	0	0	0	34.989	19.973	29.988	20	20	20	349.89	199.73	599.88
4	425	200	600	0	0	0	41.301	19.915	30.927	20	20	20	413.01	199.15	609.27
5	500	200	600	0	0	0	49.986	20.049	30.022	20	20	20	499.86	200.49	600.22
6	500	275	600	0	0	0	49.224	28.079	30.670	20	20	20	492.24	280.79	606.70
7	500	350	600	0	0	0	49.993	35.098	29.994	20	20	20	499.93	350.98	599.94
8	425	350	600	0	0	0	43.459	36.414	33.441	20	20	20	434.59	364.14	634.41
9	400	350	600	0	0	0	39.977	35.016	40.006	20	20	20	399.77	350.16	700.06
10	350	350	600	0	0	0	35.002	35.005	40.988	20	20	20	350.02	350.05	709.88
11	305	350	600	0	0	0	30.900	35.038	40.705	20	20	20	309.00	350.38	707.05
12	275	350	600	0	0	0	27.489	35.597	36.845	20	20	20	274.89	355.97	668.45
13	200	350	600	0	0	0	20.004	34.971	29.984	20	20	20	200.04	349.71	599.84

RO 125210 B1

Tabelul 5 (continuare)

Punctele de testare J	Poziția și orientarea efectorului în planul de lucru						Coordonatele cuplelor motoare ($q_{1,j}$ $i=1,\dots,6$; $j=1,\dots,29$) obținute prin simulare pe modelul neuronal						Coordonatele realizate		
	X_j	Y_j	Z_j	ψ_j	θ_j	ϕ_j	$q_{1,j}$	$q_{2,j}$	$q_{3,j}$	$q_{4,j}$	$q_{5,j}$	$q_{k,j}$	X_{r_j}	Y_{r_j}	Z_{r_j}
14	200	425	600	0	0	0	20.477	42.375	29.887	20	20	20	204.77	423.75	598.87
15	200	500	600	0	0	0	20.020	49.953	29.988	20	20	20	200.20	499.53	599.88
16	275	500	600	0	0	0	28.693	47.613	28.120	20	20	20	286.93	476.13	581.20
17	350	500	600	0	0	0	35.043	50.022	29.988	20	20	20	350.43	500.22	599.88
18	425	500	600	0	0	0	41.589	50.510	30.923	20	20	20	415.89	505.10	609.23
19	500	500	600	0	0	0	49.999	50.001	29.999	20	20	20	499.99	500.01	599.99
20	425	425	600	0	0	0	42.782	44.232	38.054	20	20	20	427.82	442.32	680.54
21	410	410	600	0	0	0	42.979	42.177	39.693	20	20	20	409.79	421.77	696.93
22	400	400	600	0	0	0	40.033	39.997	40.004	20	20	20	400.33	399.97	700.04
23	390	390	600	0	0	0	39.703	38.126	40.361	20	20	20	397.03	381.26	703.61
24	350	350	600	0	0	0	35.002	35.005	40.988	20	20	20	350.02	350.05	709.88
25	310	310	600	0	0	0	31.444	30.404	41.228	20	20	20	314.44	304.04	712.28
26	300	300	600	0	0	0	30.038	29.980	39.974	20	20	20	300.38	299.80	699.74
27	290	290	600	0	0	0	29.392	28.232	38.076	20	20	20	293.92	282.32	680.76
28	225	225	600	0	0	0	20.869	24.148	28.554	20	20	20	208.69	241.48	585.54
29	200	200	600	0	0	0	20.075	19.831	30.028	20	20	20	200.75	198.31	600.28

RO 125210 B1

- 1 Prin aplicarea invenției se obțin următoarele avantaje:
 - obținerea unui model de conducere eficient, care generează automat traiectorii de
- 3 ocolire a obstacolelor;
 - generarea unor traiectorii de evitare a contactului cu planul punctelor de lucru, utilă în
- 5 cazul unor roboți care manevrează scule sau manipulează obiecte;
 - simplificarea programării robotului.

RO 125210 B1

Revendicări

1. Metodă de instruire a roboților pentru ocolirea obstacolelor, constând în următoarele etape: furnizarea coordonatelor a două puncte care definesc o traiectorie directă (T_d), generarea unor puncte de pe această traiectorie, și determinarea coordonatelor cuplelor motoare utilizând un model neuronal MN implementat în echipamentul de comandă al robotului, transmiterea coordonatelor cuplelor motoare la un controller care generează mărimile de comandă aferente motoarelor de acționare ale robotului, **caracterizată prin aceea că**, în scopul evitării unui obstacol care intersectează traiectoria programată sub forma unei drepte între două puncte (T_d), și deplasarea pe o traiectorie ocolitoare (T_o), modelul neuronal MN se obține prin instruirea unei rețele neuronale cu trei straturi, având un număr (k) de neuroni în stratul de intrare, corespunzător numărului de grade, de libertate, un număr (m) de neuroni în stratul de ieșire, corespunzător numărului de axe cinematice, un număr (n) cuprins între 9 și 50 de neuroni în stratul intermediar, mulțimea exemplelor de instruire având ca semnale de intrare coordonatele norului de puncte, iar ca semnale de ieșire, coordonatele cuplelor motoare calculate astfel:
- coordonatele cuplelor motoare corecte, pentru acele puncte din planul de lucru (W_p) care sunt situate în afara obstacolului (9) (regula R1);
 - coordonatele cuplelor motoare care corespund unor puncte corespondente (A', B', C', D') situate pe suprafața obstacolului, pentru acele puncte (A, B, C, D) din planul de lucru (W_p) care aparțin obstacolului (9) (regula R2).
2. Metodă de instruire a roboților pentru ocolirea obstacolelor, conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că** traiectoria directă (T_d) poate fi compusă din unul sau mai multe segmente de dreaptă ($P1-P3; P2-P4; T1-T2-T3-T4-T5-T6-T1$) conținute într-unul sau mai multe planuri de lucru (W_p).
3. Metodă de instruire a roboților pentru ocolirea obstacolelor, conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că** punctele care delimitează obstacolul (9) sunt alese în afara obstacolului propriu-zis, ca o anvelopă a acestuia.
4. Metodă de instruire a roboților pentru ocolirea obstacolelor, constând în următoarele etape: furnizarea coordonatelor unor puncte de lucru situate într-un plan de lucru în care efortul robotului efectuează operații, stabilirea unor traiectorii directe (T_d) între punctele de lucru, generarea unor puncte pe aceste traiectorii, și determinarea coordonatelor cuplelor motoare utilizând un model neuronal MN implementat în echipamentul de comandă al robotului, transmiterea coordonatelor cuplelor motoare la un controller care generează mărimile de comandă aferente motoarelor de acționare ale robotului, **caracterizată prin aceea că**, în cazul în care nu există un obstacol, pentru evitarea contactului dintre efortul robotului și planul de lucru (W_p), și deplasarea pe o traiectorie de evitare (T_e), mulțimea exemplelor de instruire este formată din coordonatele de poziție ale tuturor punctelor de lucru, ca intrări, și coordonatele cuplelor motoare aferente acestora, ca ieșiri, la care se mai adaugă perechea în care intrarea constă în coordonatele unui punct (O_2) situat în centrul de greutate al poligonului descris de punctele de lucru, iar ieșirea este formată din coordonatele cuplelor motoare corespunzătoare unui punct (O'_2), situat deasupra planului de lucru, pe o dreaptă ($O_2O'_2$) perpendiculară pe acesta.

(51) Int.Cl.

B25J 9/16 (2006.01),

G05B 13/02 (2006.01)

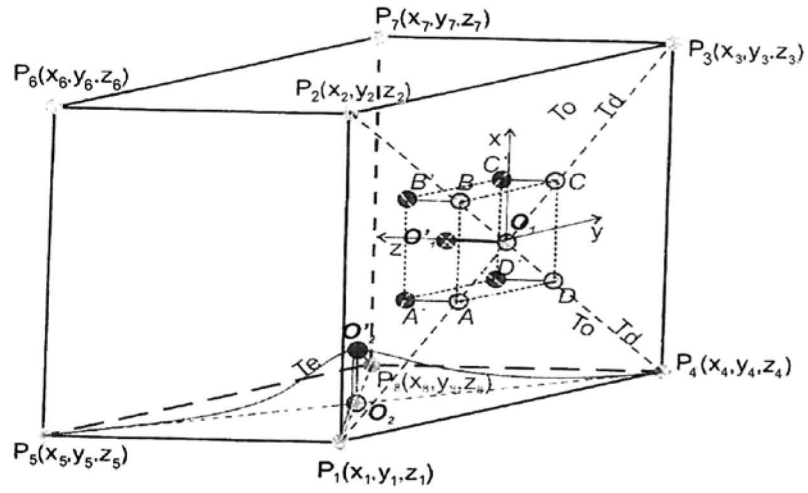


Fig. 1

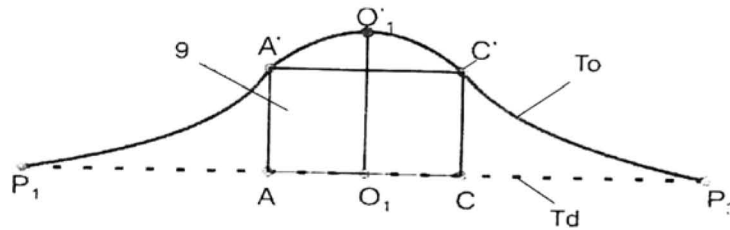


Fig. 2

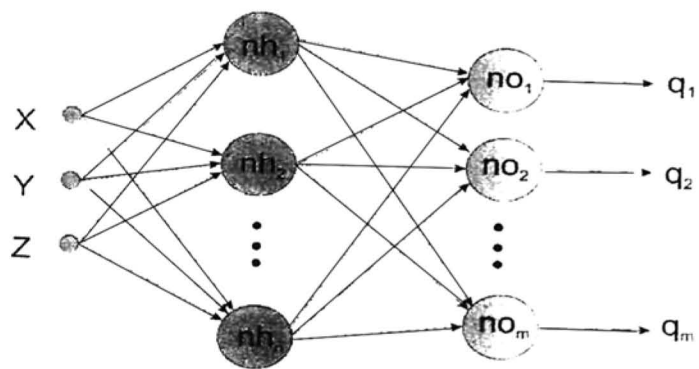


Fig. 3

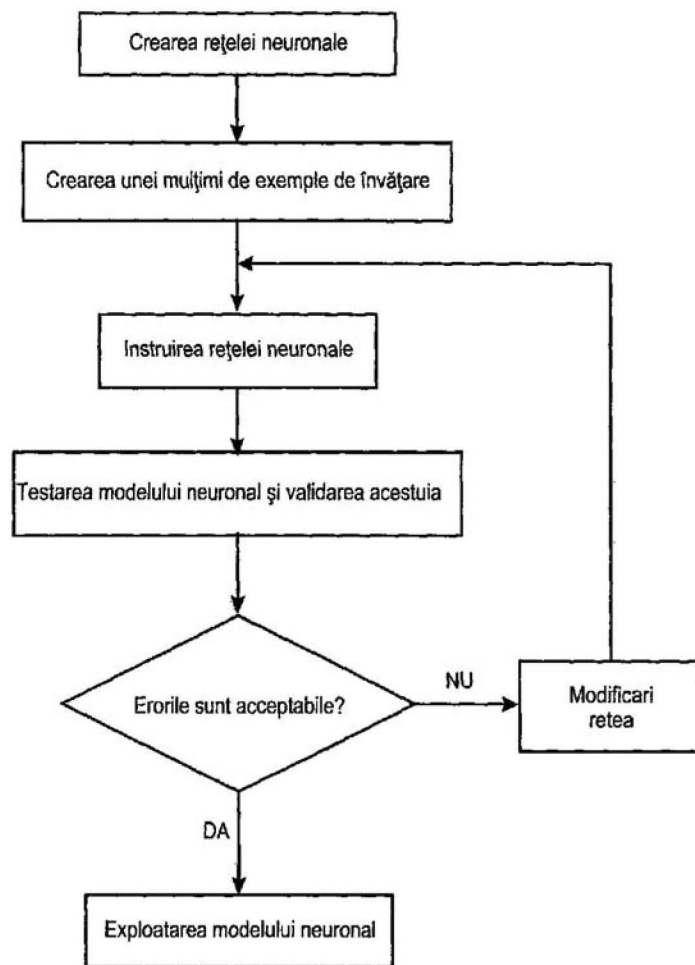


Fig. 4

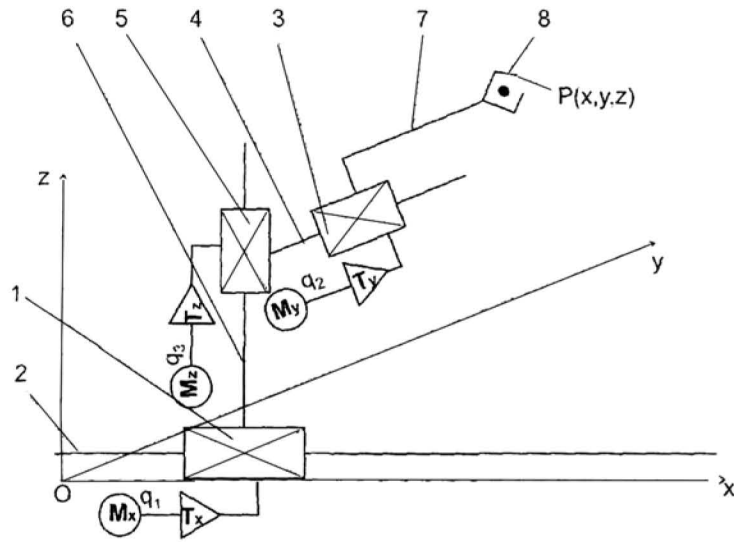


Fig. 5

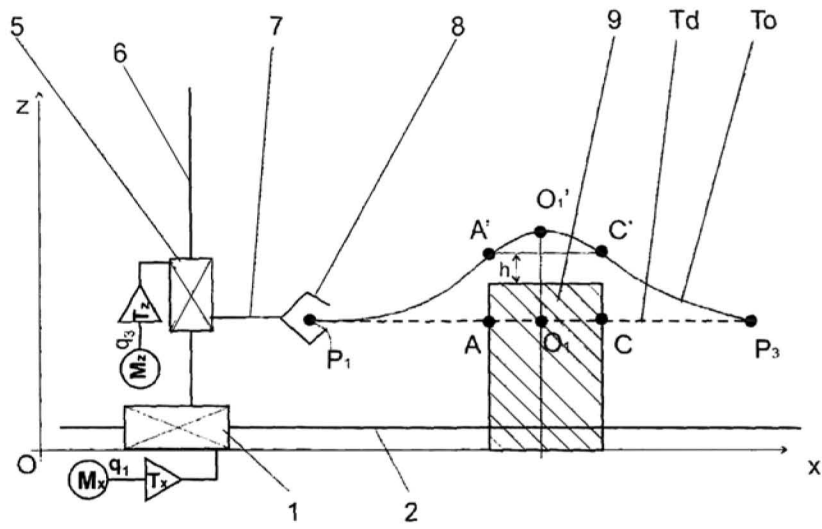


Fig. 6

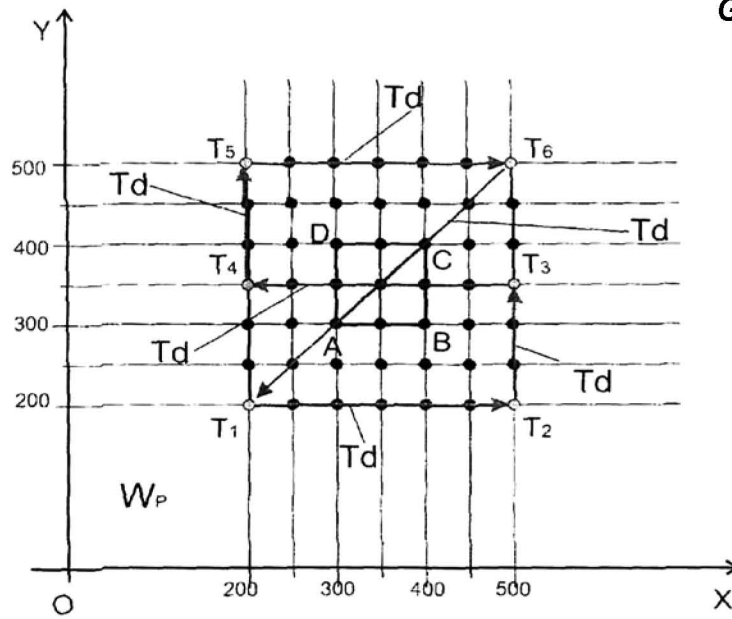


Fig. 7

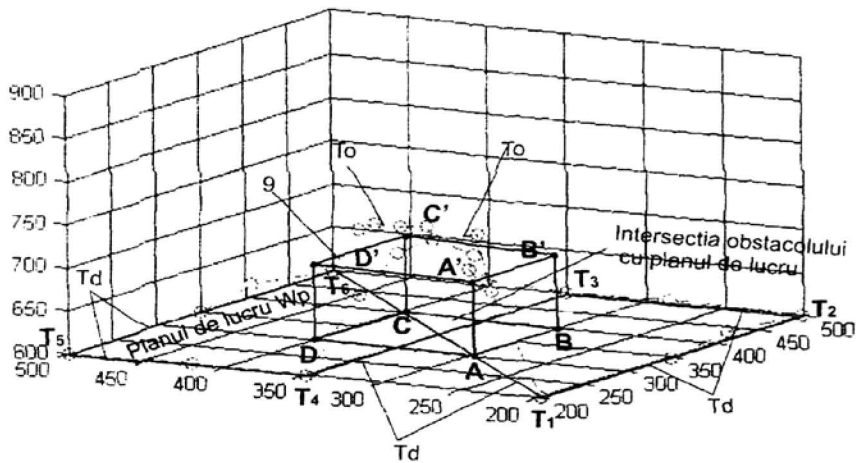


Fig. 8

