



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2011 00767

(22) Data de depozit: 01.08.2011

(41) Data publicării cererii:
30.01.2012 BOPI nr. 1/2012

(71) Solicitant:
• UNIVERSITATEA "TRANSILVANIA" DIN
BRAȘOV, BD.EROILOR NR.29, BRAȘOV,
BV, RO

(72) Inventatori:
• PUIU DAN, STR. ALBATROSULUI NR. 9,
AP. 8, BRAȘOV, BV, RO;
• MOLDOVEANU FLORIN, BD. VICTORIEI
NR. 6, SC. B, AP. 14, BRAȘOV, BV, RO

(54) SISTEM DE CONTROL DISTRIBUIT ȘI STRATEGIE DE
PLANIFICARE ȘI CONTROL A MIȘCĂRII PENTRU EVITAREA
COLIZIUNILOR ÎN TIMP-REAL DESTINATE BRAȚELOR
ROBOTICE REDUNDANTE CARE FUNCȚIONEAZĂ ÎN SPAȚII
DE LUCRU DINAMICE

(57) Rezumat:

Invenția se referă la un sistem de control distribuit și la o metodă de planificare și control a mișcării pentru evitarea coliziunilor în timp real, destinate brațelor robotice redundante, care funcționează în spații de lucru dinamice. Sistemul conform invenției este alcătuit dintr-o cameră video (5) care comunică cu un modul (3) de procesare de imagini, pentru detectarea poziției unor obstacole într-un spațiu de lucru al unui braț robotic redundant, un modul (4) de planificare a mișcării pentru a genera, în timp real, o traiectorie a articulațiilor brațului robotic, pentru comunicarea între cele două module (3 și 4) fiind utilizată o rețea (2) de comunicație industrială. Metoda utilizată pentru planificarea și controlul mișcării cuprinde o etapă de determinare a configurației brațului robotic redundant, care permite să evite starea de coliziune dintre acesta și un obstacol mobil, determinând tangenta la suprafața obstacolului în punctul de coliziune, determinând originile sistemelor de coordonate asociate celor două articulații care încadrează punctul de coliziune, determinând articulațiile brațului robotic ce modifică distanța dintre tangenta la suprafața obiectului și dreapta care trece prin cele două puncte menționate anterior, fără să modifice distanța dintre punctul de destinație al prehensorului și originea reperului de coordonate asociat articulației care se învecinează cu punctul de coliziune spre prehensor și modificând poziția articulațiilor obținute la pasul anterior, pentru a crește distanța dintre tangenta la suprafața obiectului și dreapta care trece prin cele două puncte menționate anterior, și pentru a menține constantă distanța dintre punctul de destinație al prehensorului și originea sistemului de coordonate asociat articulației care se învecinează cu punctul de coliziune spre prehensor și un algoritm care modifică, în timp real, traiectoria articulațiilor brațului robotic când un obstacol se apropie de acesta.

Revendicări: 3
Figuri: 10

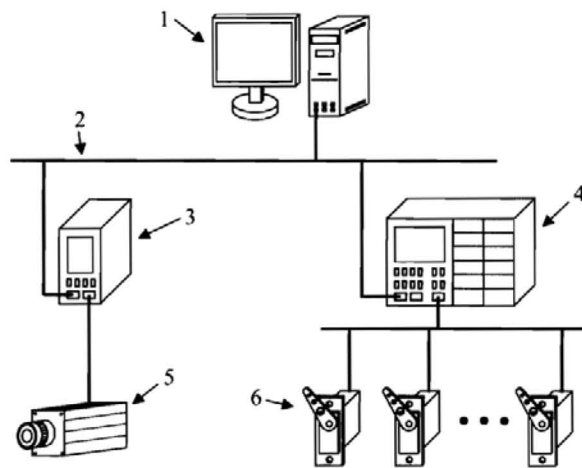


Fig. 1

Cu începere de la data publicării cererii de brevet, cererea asigură, în mod provizoriu, solicitantului, protecția conferită potrivit dispozițiilor art.32 din Legea nr.64/1991, cu excepția cazurilor în care cererea de brevet de invenție a fost respinsă, retrasă sau considerată ca fiind retrasă. Întinderea protecției conferite de cererea de brevet de invenție este determinată de revendicările conținute în cererea publicată în conformitate cu art.23 alin.(1) - (3).



Nr. int. API: 122/27.04.11

| |
|--|
| OFICIUL DE STAT PENTRU INVENȚII ȘI MĂRCI |
| Cerere de brevet de invenție |
| Nr. a 2011 00767 |
| Data depozit 01-08-2011 |

57

SISTEM DE CONTROL DISTRIBUIT ȘI STRATEGIE DE PLANIFICARE ȘI CONTROL A MIȘCĂRII PENTRU EVITAREA COLIZIUNILOR ÎN TIMP-REAL DESTINATE BRAȚELOR ROBOTICE REDUNDANTE CARE FUNCȚIONEAZĂ ÎN SPAȚII DE LUCRU DINAMICE

Propunerea de invenție se referă la structura de control distribuit și la algoritmi care sunt implementați pe aceasta și care permit operarea unui braț robotic redundant într-un spațiu de lucru unde se află diferite obstacole în mișcare. În momentul în care structura de control determină situația în care un obstacol se apropie de una dintre componentele robotului (articulații sau legături) aceasta modifică configurația brațului în așa fel încât să se evite o eventuală coliziune și în același timp să se asigure menținerea poziției, respectiv traiectoriei prehensurului. Invenția se încadrează în domeniul comenzii brațelor robotice și permite creșterea siguranței funcționării brațelor robotice redundante. Soluția tehnică se poate aplica liniilor de fabricație unde mai mulți roboți trebuie să opereze în același spațiu de lucru. De asemenea, algoritmi propuși se pretează spre aplicare și la roboții mobili autonomi care au în dotare braț cu prehensur, care funcționează în medii necunoscute.

O necesitate stringentă în domeniul structurilor de comandă ale brațelor robotice o reprezintă detecția și evitarea în timp-real a obstacolelor dintr-o scenă complexă [A1]. În acest context, au fost raportate, în literatura de specialitate, o serie de studii care vizează domeniul controlului și planificării traiectoriei brațelor robotice redundante. Cu toate acestea subiectul este deschis, existând necesitatea realizării de noi algoritmi mai performanți care să permită evitarea în timp-real a obstacolelor pentru roboții autonomi [A11].

Pentru planificarea mișcării brațelor robotice în spații de lucru complexe sunt foarte mult utilizați algoritmi aleatori (RA – *Randomized Algorithms*). În această categorie se pot enumera metodele PRM (*Probabilistic RoadMap*) [A6] și RRT (*Rapid Exploring Random Tree*) [A7], care determină în mod eficient traiectoria fără coliziuni a brațului robotic, dar în condiții offline.

Metoda PRM are două etape distincte. Într-o primă etapă se realizează o hartă probabilistică a tuturor traseelor posibile care este salvată într-un graf unidirecțional. În momentul în care robotul trebuie să execute o mișcare structura de control a acestuia trebuie să aleagă traseul optim. Metoda RRT utilizează un arbore în locul grafului, iar procedura de selecție a traseului este similară cu cea a metodei PRM. Ambele metode dau rezultate foarte bune atâta timp cât obstacolele care formează scena complexă nu își modifică poziția. În caz contrar se poate întâmpla ca brațul robotic, în timpul unei tranziții, să intre în coliziune cu unul dintre

Pi

obiectele care și-au schimbat poziția sau este posibil ca un obstacol aflat în mișcare să între în coliziune cu brațul robotic staționar.

În cazul manipuloarelor care sunt montate pe roboți mobili, metoda propusă de Brock în lucrarea [A3] permite modificarea poziției bazei robotului pentru evitarea coliziunii. În același timp se modifică și configurația manipulatorului pentru a se menține neschimbată traiectoria prehensurului. Spre deosebire de Brock, Tan în lucrarea [A10], oprește baza robotului mobil în momentul în care se apropie un obstacol de acesta și modifică traiectoria manipulatorului pentru a menține constantă poziția prehensurului. Ambele metode previn o eventuală coliziune a bazei manipulatorului cu un obstacol fix sau mobil dar nu oferă nicio soluție în cazul în care obstacolul se apropie de brațul robotului. Pentru situația în care obstacolul se apropie de brațul robotic se poate utiliza metoda lui Strandberg, care oprește brațul robotic în momentul în care structura de control a acestuia realizează că timpul estimat până la coliziune este egal cu timpul de oprire al robotului [B4]. După oprire structura de control recalculează traiectoria brațului robotic. Metoda elaborată de Strandberg prezintă dezavantajul că nu se realizează în timp-real recalcularea traiectoriei.

O categorie aparte de module de planificare a traiectoriei este reprezentată de structurile de control ale mai multor roboți care lucrează în același spațiu de lucru [B1, B2, A8]. În acest caz se cunoaște poziția fiecărui manipulator și se realizează planificarea acestora în așa fel încât să nu între în coliziune. Chang și McGee [B1] propun ca structurile de control ale brațelor robotice să fie conectate între ele prin intermediul unor interfețe de comunicație iar acestea să fie controlate cu ajutorul unei unități master. Această unitate va permite doar unui robot să opereze la un moment dat în spațiul comun. În această situație se pot preveni coliziunile dintre roboți dar nu și o eventuală coliziune cu un obstacol din spațiul de lucru aflat în mișcare.

O altă metodă de generare a traiectoriei brațelor robotice redundante în medii necunoscute folosește tehnica manipulării reactive [B3, B5, A9]. În lucrările menționate se consideră spațiul de lucru al brațului robotic ca un câmp de potențial. În timpul mișcării robotul trebuie să execute tranziția prehensurului și în același timp să mențină articulațiile și legăturile într-o zonă de potențial cât mai scăzut (considerând că în jurul obstacolelor potențialul este ridicat). Tot pe același principiu de bază funcționează și sistemul de evitare a coliziunilor elaborat de Hasegawa și Okuma [B5]. Metoda presupune generarea traiectoriei brațului robotic, în condiții offline, luând în considerare restricțiile impuse de potențialul obstacolelor fixe și mobile și apoi controlul acestuia. Metoda prezintă dezavantajul că, dacă se modifică poziția obstacolelor în timpul unei tranziții, se produce o coliziune.

Toate metodele de control și planificare a traiectoriei brațelor robotice redundante,

prezentate anterior, sunt implementate pe un sistem de control centralizat. Prin urmare, sistemul centralizat trebuie să utilizeze o unitate de procesare cu o putere foarte mare de calcul care este costisitoare. De asemenea, proiectantul unui astfel de sistem trebuie să utilizeze strategii de programare avansate deoarece în același timp un singur procesor trebuie să detecteze poziția obstacolului și să genereze traiectoriile articulațiilor brațului robotic.

Scopul invenției constă în realizarea unei structuri de control pentru un braț robotic redundant care să fie capabilă să modifice în timp-real traiectoria acestuia în momentul în care un obstacol mobil se apropie de una dintre componentele robotului. Structura de control trebuie să funcționeze în următoarele situații posibile, în funcție de starea în care se află robotul în momentul în care se constată o posibilă coliziune:

- dacă robotul este în tranziție, atunci structura de control a robotului trebuie să evite starea de coliziune și să mențină traiectoria impusă pentru prehensor;
- dacă robotul este staționar, atunci structura de control a robotului trebuie să evite starea de coliziune și să mențină neschimbată poziția prehensorului.

Sistemul de control distribuit, conform invenției, realizează următoarele sarcini:

- generează traiectoria prehensorului brațului robotic redundant;
- generează, de asemenea, pe baza traiectoriei prehensorului, traiectoriile articulațiilor brațului robotic;
- monitorizează, în timpul tranziției, poziția obstacolelor din spațiul de lucru al robotului și dacă determină că un obstacol mobil se apropie de una din componentele brațului robotic modifică traiectoriile articulațiilor, generate la pasul anterior, pentru a evita coliziunea și pentru a menține nemodificată traiectoria prehensorului;
- monitorizează, în timpul staționării brațului robotic redundant, poziția obstacolelor din spațiul de lucru al robotului și dacă determină că un obstacol mobil se apropie de una din componentele brațului robotic modifică configurația acestuia pentru a evita coliziunea și pentru a menține nemodificată poziția prehensorului.

Sistemul de control distribuit propus în invenție înlătură dezavantajele prezentate mai sus, **prin aceea că**, în vederea evitării coliziunilor dintre obstacolele aflate în mișcare și brațele robotice redundante care funcționează în spații de lucru dinamice utilizează:

- o cameră video și un modul de procesare de imagini pentru detecția poziției obstacolelor din spațiu de lucru destinat brațului robotic redundant;
- un modul de planificare a mișcării pentru a genera, în timp-real, traiectoria articulațiilor brațului robotic;
- o rețea de comunicație industrială pentru ca modulul de procesare de imagini să

transmită poziția obstacolului mobil modulului de planificare a mișcării;

- un algoritm de determinare a configurației brațului robotic redundant care permite să se evite starea de coliziune dintre acesta și un obstacol mobil;
- un algoritmul care modifică, în timp-real, traiectoria articulațiilor brațului robotic când un obstacol se apropie de acesta.

Algoritmul de determinare a configurației care evită starea de coliziune pentru un braț robotic redundant, **caracterizat prin aceea că**, în vederea obținerii, în timp-real, a configurației brațului robotic redundant, indiferent de forma obstacolului mobil sau de direcția din care se apropie acesta, efectuează următoarele operații:

- determină, în prima etapă, tangenta la suprafața obstacolului în punctul de coliziune;
- determină, în a doua etapă, originile sistemelor de coordonate asociate celor două articulații care încadrează punctul de coliziune;
- determină, în a treia etapă, articulațiile brațului robotic care modifică semnificativ distanța dintre tangenta la suprafața obiectului și dreapta care trece prin cele două puncte menționate la etapa anterioară și nu modifică distanța dintre punctul de destinație al prehensorului și originea reperului de coordonate asociat articulație care se învecinează cu punctul de coliziune înspre prehensor;
- modifică, în ultima etapă, poziția articulațiilor obținute la pasul anterior pentru a crește distanța dintre tangenta la suprafața obiectului și dreapta care trece prin cele două puncte menționate anterior și pentru a menține constantă distanța dintre punctul de destinație al prehensorului și originea sistemului de coordonate asociat articulație care se învecinează cu punctul de coliziune înspre prehensor.

Algoritmul care modifică în timp-real traiectoria articulațiilor brațului robotic când un obstacol se apropie de acesta **se caracterizează prin aceea că**:

- determină pozițiile următoare ale articulațiilor folosind algoritmul de determinare a configurației care evită starea de coliziune pentru un braț robotic redundant pentru situația în care brațul robotic este în tranziție și de el se apropie un obstacol mobil; algoritmul calculează poziția curentă a prehensorului având în vedere poziția următoare a acestuia din traiectoria impusă inițial;
- determină pozițiile următoare ale articulațiilor folosind modelul cinematic invers al brațului robotic redundant, pentru situația în care brațul robotic este în tranziție și de el nu se apropie un obstacol mobil; algoritmul calculează poziția curentă a prehensorului având în vedere poziția următoare a acestuia din traiectoria impusă inițial;

- determină pozițiile următoare ale articulațiilor folosind algoritmul de determinare a configurației care evită starea de coliziune pentru un braț robotic redundant pentru situația în care brațul robotic este staționar și de el se apropie un obstacol mobil; algoritmul consideră că poziția prehensurului este dată de poziția curentă a acestuia;
- determină pozițiile următoare ale articulațiilor ca fiind pozițiile curente ale acestora, dacă brațul robotic este staționar și de el nu se apropie un obstacol mobil.

Invenția prezintă următoarele avantaje:

- determinarea în timp-real a configurației brațului robotic care evită starea de coliziune, indiferent de forma obstacolului și indiferent de direcția din care se apropie acesta;
- modificarea traiectoriei brațului robotic în timpul tranziției în vederea evitării unei coliziuni cu un obstacol mobil;
- menținerea neschimbată a poziției prehensurului și evitarea unei coliziuni cu un obstacol mobil în situația în care robotul este staționar.

Se prezintă în continuare un exemplu de realizare a invenției în legătură cu figurile 1...9 care au următoarea semnificație:

- figura 1, schema-bloc a structurii de control distribuit utilizată pentru detecția și evitarea unei coliziuni;
- figura 2, strategia de determinare a stării de coliziune;
- figurile 3 și 4, variația pozițiilor unghiulare și a distanțelor menționate mai sus, în timpul rulării algoritmului de determinare a configurației care evită starea de coliziune pentru un braț robotic redundant;
- figura 5, configurația brațului robotic în timpul tranziției prehensurului din punctul $A(0; 500; 100)$ ¹ până în punctul $B(200; 500; 100)$, fără coliziune;
- figura 6, pozițiile articulațiilor brațului robotic în timpul tranziției prehensurului din punctul $A(0; 500; 100)$ până în punctul $B(200; 500; 100)$, fără coliziune;
- figura 7, configurația brațului robotic în timpul tranziției prehensurului din punctul $A(0; 500; 100)$ până în punctul $B(200; 500; 100)$, în situația în care un obstacol mobil se deplasează din punctul $C(-150; 300; 300)$ până în punctul $D(200; 300; 300)$;
- figura 8, pozițiile articulațiilor brațului robotic în timpul tranziției prehensurului din punctul $A(0; 500; 100)$ până în punctul $B(200; 500; 100)$, în situația în care un obstacol mobil se deplasează din punctul $C(-150; 300; 300)$ până în punctul $D(200; 300; 300)$;

¹ Toate mărimile sunt exprimate în milimetri.

- figura 9, eroarea de poziție a prehensorului în timpul tranziției prehensorului din punctul A(0; 500; 100) până în punctul B(200; 500; 100), în situația în care un obstacol mobil se deplasează din punctul C(-150; 300; 300) până în punctul D(200;300; 300);
- figura 10, timpul maxim de execuție și timpul de execuție al algoritmul care modifică, în timp-real, traiectoria articulațiilor brațului robotic când se aproprie un obstacol de acesta.

De la început trebuie făcută precizarea că existența unei soluții depinde de configurația inițială a brațului robotic redundant și de poziția obstacolului. Luându-se în considerare cele precizate, se poate întâmpla ca brațul robotic, în anumite situații, să nu aibă destulă libertate de mișcare și prin urmare să nu existe o configurație a acestuia care să evite starea de coliziune. De asemenea, se va considera că robotul este în coliziune cu un obstacol aflat în mișcare dacă distanța dintre oricare componentă a brațului robotic (articulație sau legătură) și obstacol este mai mică de d_1^* , valoare stabilită de la început de către utilizator.

Problema evitării coliziunilor are două etape distincte:

- detecția poziției obstacolului și a stării de coliziune;
- reconfigurarea în timp-real a traiectoriei brațului robotic.

Figura 1 prezintă schema-bloc a unei structuri de control distribuit care implementează cele două etape prezentate anterior. Detecția poziției obstacolului și a stării de coliziune sunt realizate de modulul de procesare de imagini 3. Acesta trebuie să aibă implementat un sistem de vedere artificială care să detecteze forma și poziția obiectelor din scena complexă. Există mai multe tipuri de astfel de sisteme [A2, A12].

În continuare, modulul de procesare de imagini realizează modelul OBB (*Oriented Bounding Boxes*) [A5] al obstacolului (v. fig. 2 (a)). Modelul conține o mulțime de triunghiuri care definesc suprafața obstacolului. Pentru a se determina starea de coliziune s-a considerat că modelul OBB al obstacolului este mai mare cu valoarea distanței d_1^* față de suprafața reală a acestuia.

De asemenea, modulul de procesare de imagini dispune de modelele OBB ale componentelor brațului robotic (v. fig. 2 (b)). Cu ajutorul informațiilor primite prin intermediul rețelei de comunicație industrială 2, cu privire la poziția curentă a articulațiilor, modulul de procesare determină dispunerea în spațiu a modelele OBB ale brațului robotic.

În etapa următoare modulul de procesare de imagini determină numărul de triunghiuri ale celor două modele OBB (obstacol, respectiv braț robotic) care au puncte comune și care sunt

acestea, cu ajutorul metodei de detecție a interfețelor² [A5].

Ultima etapă a procedurii de detecție a stării de coliziune se realizează doar dacă s-au determinat triunghiuri care au puncte comune, adică dacă există posibilitatea unei coliziuni. În această situație se calculează suma vectorilor normali la suprafața triunghiurilor obținute pentru a se determina vectorul normal rezultat la suprafața obstacolului în punctul de coliziune. Cu ajutorul acestuia se determină tangenta la suprafața obstacolului în punctul de coliziune, care va fi reprezentată în continuare prin intermediul punctelor distincte P_{s1} și P_{s2} (v. fig 2 (c)). Coordonatele celor două puncte sunt transmise în mod continuu către modulul de planificare a mișcării 4.

Etapă de reconfigurare în timp-real a traiectoriei brațului robotic este efectuată de modulul de planificare a mișcării. Inițial, acesta determină cele două articulații ale brațului robotic redundant care învecinează punctul de coliziune. În continuare se va considera că punctul O_k reprezintă originea sistemului de coordonate asociat articulației care se învecinează cu punctul de coliziune către baza acestuia. De asemenea, punctul O_{k+1} reprezintă originea sistemului de coordonate asociat articulației care se învecinează cu punctul de coliziune către prehsorul robotului (v. fig 2 (c)).

Pentru a se determina configurația brațului robotic care să evite starea de coliziune trebuie modificate pozițiile articulațiilor acestuia în așa fel încât să fie îndeplinite simultan următoarele două constrângeri:

- să crească distanța dintre cele două drepte care trec prin perechile de puncte P_{s1} și P_{s2} , respectiv O_k și O_{k+1} , până când aceasta devine egală cu d_1^* (pentru a se evita starea de coliziune);
- să se mențină constantă distanța dintre punctul O_{k+1} și punctul curent al prehsorului P_d (pentru ca în configurația finală să existe posibilitatea menținerii nemodificate a poziției, respectiv orientării prehsorului).

Se va considera că d_1 reprezintă cea mai scurtă distanță dintre dreptele oblice din spațiu $P_{s1}P_{s2}$ și O_kO_{k+1} , respectiv d_2 distanța dintre punctele O_{k+1} și P_d . Cea mai scurtă distanță dintre două drepte oblice din spațiu s-a calculat utilizându-se metoda dezvoltată de Eberly [A4], iar distanța d_2 s-a obținut cu ajutorul formulei lui Euclid.

În continuare, algoritmul caută cele două articulații care, prin variația pozițiilor lor, modifică semnificativ distanța d_1 și mențin constantă distanța d_2 . Acest lucru se obține

² Eng. Interface detection method

calculându-se derivatele funcțiilor pe baza cărora se calculează distanțele d_1 și d_2 în raport cu poziția fiecărei articulații. Această etapă permite obținerea celor două articulații a și b (dintre toate articulațiile), care determină valorile cele mai mari pentru modulul derivatei funcției distanței d_1 și o valoare foarte apropiată de 0 pentru derivata distanței d_2 .

Configurația brațului robotic care respectă cele două constrângeri inițiale trebuie, de fapt, să verifice următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} d_1(\theta_a, \theta_b) = d_1^*; \\ d_2(\theta_a, \theta_b) = d_2^*; \end{cases} \quad (1)$$

unde, θ_a și θ_b sunt pozițiile unghiulare ale celor două articulații alese la pasul anterior iar d_2^* este distanța inițială dintre punctele O_{k+1} și P_d . Soluția sistemului de ecuații se obține utilizându-se metoda *Newton-Rapson*. Pentru acesta se folosește următoarea ecuație iterativă:

$$\mathbf{q}^{(i+1)} = \mathbf{q}^{(i)} + \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{q}^{(i)}) \delta \mathbf{F}(\mathbf{q}^{(i)}), \quad (2)$$

unde:

$$\mathbf{q}^{(i)} = [\theta_a^{(i)} \quad \theta_b^{(i)}]^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{q}^{(i)}) = [d_1(\mathbf{q}^{(i)}) \quad d_2(\mathbf{q}^{(i)})]^T, \quad (4)$$

$$\mathbf{F}^* = [d_1^* \quad d_2^*]^T, \quad (5)$$

$$\delta \mathbf{F}(\mathbf{q}^{(i)}) = \mathbf{F}(\mathbf{q}^{(i)}) - \mathbf{F}^*, \quad (6)$$

iar $\delta \mathbf{F}$ este rezidiul vectorului distanțelor \mathbf{F} și:

$$\mathbf{J}(\mathbf{q}^{(i)}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial d_1}{\partial \theta_a} & \frac{\partial d_2}{\partial \theta_a} \\ \frac{\partial d_1}{\partial \theta_b} & \frac{\partial d_2}{\partial \theta_b} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

După ce au fost calculate valorile pozițiilor articulațiilor a și b modulul de planificare al mișcării determină valorile pozițiilor celorlalte articulații, cu ajutorul modelului cinematic invers. Algoritmul 1 prezintă pe scurt etapele care trebuie parcurse pentru a se găsi configurația brațului robotic care evită starea de coliziune. În cadrul algoritmului s-a considerat că l reprezintă numărul maxim de iterații necesar obținerii soluției iar ε_θ reprezintă precizia de obținere a

soluției sistemului, ambele valori fiind specificate de la început de utilizator.

Algoritm 1 – Determinarea configurației brațului robotic redundant care evită starea de coliziune.

determină: $P_{s1}, P_{s2}, P_d, d_1^*, d_2^*$;

determină punctul de coliziune de pe suprafața brațului robotic și punctele: O_k, O_{k+1} ;

determină pozițiile inițiale ale articulațiilor brațului robotic: $\theta_1^{(0)}, \theta_2^{(0)}, \dots, \theta_n^{(0)}$;

determină articulațiile: a și b ;

setează: $q^{(0)} \leftarrow [\theta_a^{(0)} \ \theta_b^{(0)}]^T$;

setează: $F^* \leftarrow [d_1^* \ d_2^*]^T$;

$i \leftarrow 0$;

repetă

calculează: $F(q^{(i)}) \leftarrow [d_1(q^{(i)}) \ d_2(q^{(i)})]^T$;

calculează: $\delta F(q^{(i)}) \leftarrow F(q^{(i)}) - F^*$;

calculează: $q^{(i+1)} \leftarrow q^{(i)} + J^{-1}(q^{(i)}) \delta F(q^{(i)})$;

$i \leftarrow i + 1$;

până când $i > l$ sau $\delta F < \epsilon_0$;

dacă $i < l$ atunci

calculează soluția finală: $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ ($\theta_a \leftarrow \theta_a^{(i)}, \theta_b \leftarrow \theta_b^{(i)}$ și restul articulațiilor cu ajutorul modelului cinematic invers);

altfel

soluția nu există.

Pentru simularea și testarea experimentală a algoritmului s-a utilizat un braț robotic redundant cu 7 grade de libertate. În figurile 3 și 4 sunt reprezentate rezultatele simulării algoritmului 1 în cazul în care un obstacol se apropie de articulația 2 a robotului. Se poate observa că pozițiile articulațiilor 1 și 2 ale brațului robotic (v. fig 4) sunt modificate în așa fel încât să se mențină constantă distanța d_2 și să se crească distanța d_1 (v. fig. 3).

Algoritmul 1 determină doar configurația brațului robotic care evită starea de coliziune când un obstacol se află în spațiul său de lucru. Acesta trebuie utilizat pentru corecția traiectoriei brațului robotic în momentul în care se apropie un obstacol. În această situație brațul robotic se poate afla în două stări de funcționare distincte, staționară sau în tranziție. Dacă brațul robotic este într-un regim staționar atunci trebuie să evite coliziunea și să mențină prehensorul nemișcat. În cealaltă situație modulul de planificare trebuie să modifice în așa fel referințele de poziție ale articulațiilor încât să se urmărească traiectoria prehensorului și să se evite coliziunea.

Deoarece se lucrează în timp-real modulul de planificare a traiectoriei trebuie să transmită elementelor de execuție ale articulațiilor (6) (v. fig. 1) la fiecare 25 ms referințele de poziție ale acestora³. În aceste condiții, indiferent de starea robotului, modulul de planificare trebuie să se încadreze în constrângerea de timp. Algoritmul 2 prezintă procedura pe care trebuie să o execute modulul de planificare a traiectoriei la fiecare 25 ms. În cadrul algoritmului 2 s-au

³ În cadrul testării experimentale a fost utilizat un braț robotic redundant cu articulații produse de firma SCHUNK a căror poziții unghiulare trebuie resetate la fiecare 25 ms.

luat în considerare următoarele elemente:

- $\theta^{(k)}$ reprezintă pozițiile unghiulare următoare ale articulațiilor brațului robotic;
- $\theta^{(k-1)}$ reprezintă pozițiile unghiulare curente ale articulațiilor brațului robotic;
- P_m reprezintă poziția următoare a prehensorului din traiectoria impusă inițial;
- P_d reprezintă poziția din spațiu în care staționează prehensorul brațul robotic;
- **invKine** reprezintă modelul cinematic invers al brațului robotic.

Algoritm 2 – Procedura de generare a traiectoriilor articulațiilor componente brațului robotic redundant.

```

dacă stare robot=tranziție atunci
  dacă obstacol în coliziune cu brațul robotic atunci
     $\theta^{(k)} \leftarrow \text{algoritm1}(\theta^{(k-1)}, P_m)$ ;
  altfel
     $\theta^{(k)} \leftarrow \text{invKine}(\theta^{(k-1)}, P_m)$ ;
altfel
  dacă obstacol în coliziune cu brațul robotic atunci
     $\theta^{(k)} \leftarrow \text{algoritm1}(\theta^{(k-1)}, P_d)$ ;
  altfel
     $\theta^{(k)} \leftarrow \theta^{(k-1)}$ .

```

Pentru exemplificare s-a considerat că prehensorul robotului trebuie să se deplaseze în linie dreaptă din punctul A (0; 500; 100) până în punctul B (200; 500; 100) în 3 s. În figura 5 este reprezentată configurația brațului robotic în timpul tranziției prehensorului iar în figura 6 sunt reprezentate traiectoriile articulațiilor brațului robotic. Ambele reprezentări grafice surprind situația în care niciun obstacol nu se afla în spațiul de lucru al robotului. În figura 6 au fost reprezentată doar traiectoriile primelor 4 articulații ale brațului robotic deoarece ultimele 3 sunt utilizate pentru orientarea prehensorului.

Din punctul C (-150; 300; 300) pleacă un obstacol către punctul D (200, 300, 300). După aproximativ 1 s obstacolul intră în raza de acțiune a brațului robotic iar structura de control a acestuia începe procedura de evitare (v. fig. 7). În figura 8 se poate observa că în prima parte a tranziției structura de control comandă articulațiile brațului robotic conform planificării inițiale. În momentul în care obstacolul intră în raza de acțiune a robotului structura de control modifică traiectoria în așa fel încât să se evite coliziunea. Figura 9 prezintă eroarea de poziție ϵ_p a prehensorului față de traiectoria prevăzută inițial pentru acesta. Din figură se poate trage concluzia că eroarea maximă de poziționare este 0,1% (aprox. 3 mm).

În timpul efectuării tranziției a fost monitorizat timpul de execuție al algoritmului 2. În figura 10 este reprezentat timpul de obținere a soluției în cursul tranziției (t_1). În figură se poate observa că structura de control determină soluția în mai puțin de 25 ms (t_2) și prin urmare transmite în timp-real noua configurație către articulațiile brațului robotic.

REVEDICĂRI

1. Sistemul de control distribuit pentru evitarea în timp-real a coliziunilor destinat brațelor robotice redundante care funcționează în spații de lucru dinamice, **caracterizat prin aceea că:** utilizează o cameră video (5) și un modul de procesare de imagini (3) pentru detecția poziției obstacolelor din spațiu de lucru al brațului robotic redundant; utilizează un modul de planificare a mișcării (4) pentru a genera, în timp-real, traiectoria articulațiilor brațului robotic; utilizează o rețea de comunicație industrială (2) pentru ca modulul de procesare de imagini (3) să transmită poziția obstacolului mobil modulului de planificare a mișcării (4).

2. Algoritm de determinare a configurației care evită starea de coliziune pentru un braț robotic redundant, **caracterizat prin aceea că,** în vederea obținerii, în timp-real, a configurației brațului robotic redundant, indiferent de forma obstacolului mobil sau de direcția din care se apropie acesta, efectuează următoarele operații: determină, în prima etapă, tangenta la suprafața obstacolului în punctul de coliziune cu ajutorul modelelor OBB ale obstacolului mobil și brațului robotic redundant; determină, în a doua etapă, originile sistemelor de coordonate asociate celor două articulații care încadrează punctul de coliziune; determină, în a treia etapă, articulațiile brațului robotic care modifică semnificativ distanța dintre tangenta la suprafața obiectului și dreapta care trece prin cele două puncte menționate la etapa anterioară și nu modifică distanța dintre punctul de destinație al prehensorului și originea reperului de coordonate asociat articulației care se învecinează cu punctul de coliziune înspre prehensor; modifică, în ultima etapă, poziția articulațiilor obținute la pasul anterior pentru a crește distanța dintre tangenta la suprafața obiectului și dreapta care trece prin cele două puncte menționate anterior și pentru a menține constantă distanța dintre punctul de destinație al prehensorului și originea sistemului de coordonate asociat articulației care se învecinează cu punctul de coliziune înspre prehensor.

3. Algoritm care modifică în timp-real traiectoriile articulațiilor brațului robotic când un obstacol se apropie de acesta, **caracterizat prin aceea că:** determină pozițiile următoare ale articulațiilor, folosind algoritmul de determinare a configurației (pentru calculul poziției curente a prehensorului se utilizează poziția următoare a acestuia din traiectoria impusă inițial), în situațiile în care brațul robotic este în tranziție și de el se apropie un obstacol mobil; determină pozițiile următoare ale articulațiilor, folosind modelul cinematic invers al brațului robotic redundant (pentru calculul poziției curente a prehensorului se utilizează poziția următoare a

acestui din traiectoria impusă inițial), pentru situațiile în care brațul robotic este în tranziție și de el nu se apropie un obstacol mobil; determină pozițiile următoare ale articulațiilor, folosind algoritmul de determinare a configurației (pentru calculul poziției curente a prehensorului se utilizează poziția curentă a acestuia), pentru situațiile în care brațul robotic este staționar și de el se apropie un obstacol mobil; determină pozițiile următoare ale articulațiilor ca fiind pozițiile curente ale acestora, dacă brațul robotic este staționar și de el nu se apropie un obstacol mobil.

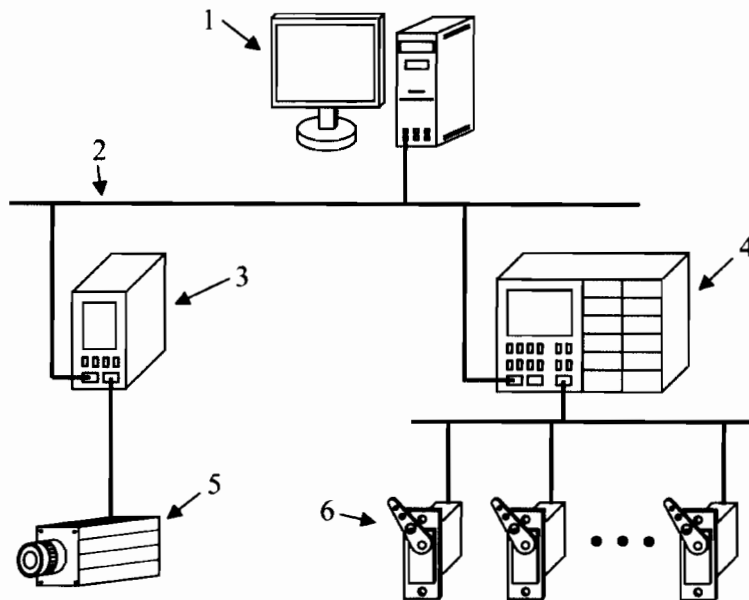


Figura 1 Schema-bloc a structurii de control distribuit utilizată pentru detecția și evitarea unei coliziuni

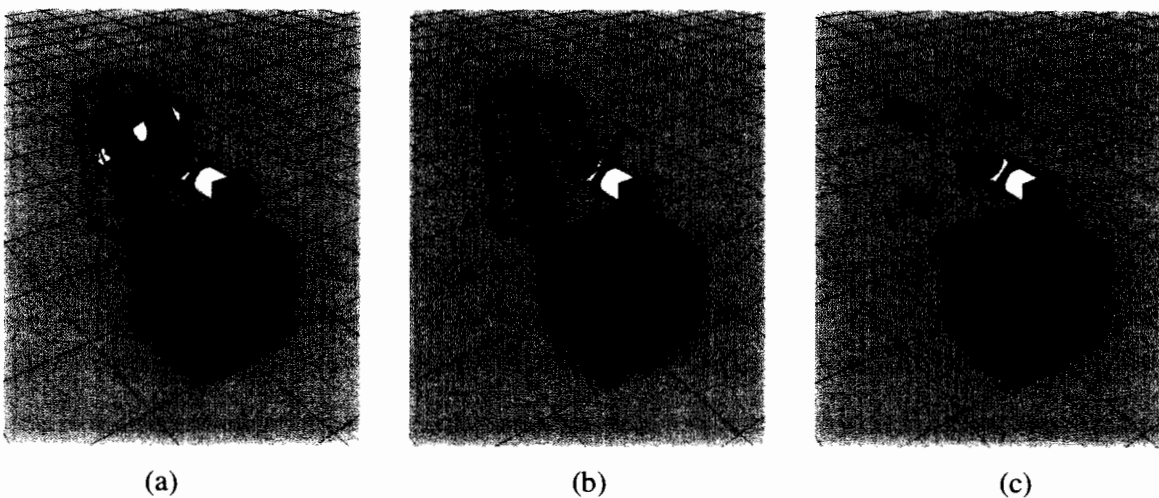


Figura 2 Strategia de determinare a stării de coliziune: (a) modelul OBB al obstacolului mobil; (b) modelul OBB al legăturii brațului robotic care este în coliziune cu obstacolul aflat în mișcare; (c) dreapta $P_{s1}P_{s2}$ (albastru) și dreapta O_kO_{k+1} (roșu).

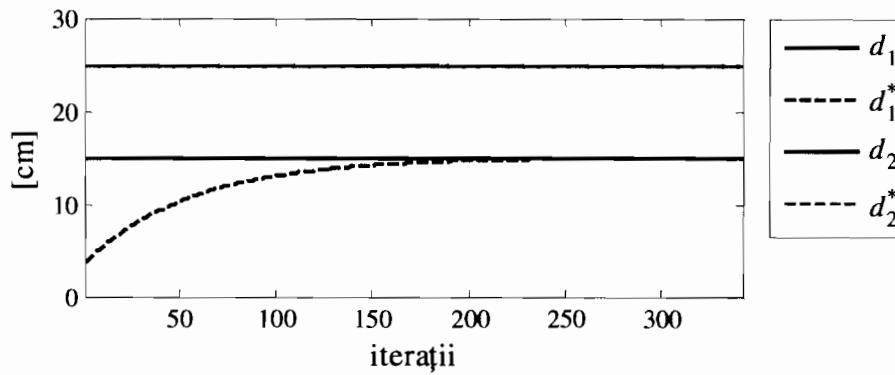


Figura 3 Variația distanțelor d_1 și d_2 , în timpul rulării algoritmului de determinare a configurației care evită starea de coliziune pentru un braț robotic redundant.

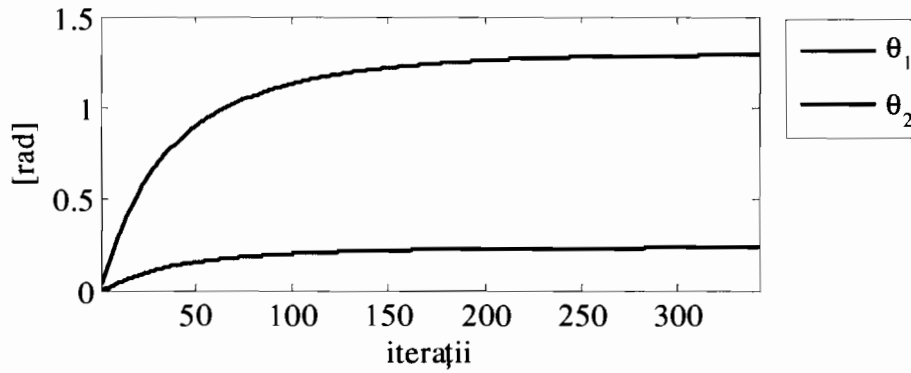


Figura 4 Variația pozițiilor unghiulare, în timpul rulării algoritmului de determinare a configurației care evită starea de coliziune pentru un braț robotic redundant.

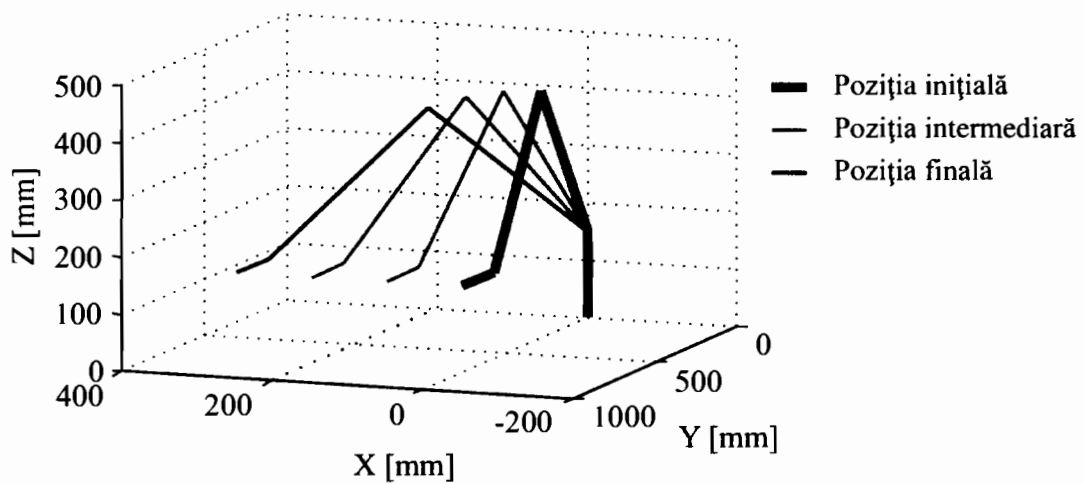


Figura 5 Configurația brațului robotic în timpul tranziției prehensorului din punctul A(0; 500; 100) până în punctul B(200; 500; 100), fără coliziune.

Puh

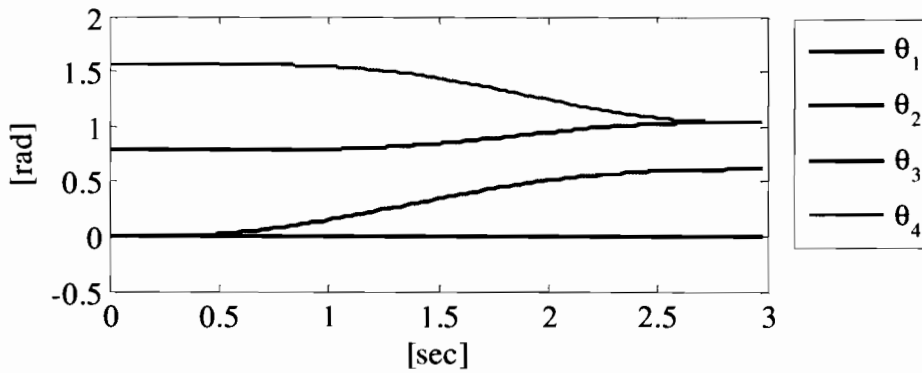


Figura 6. Pozițiile articulațiilor brațului robotic în timpul tranziției prehensorului din punctul A(0; 500; 100) până în punctul B(200; 500; 100), fără coliziune.

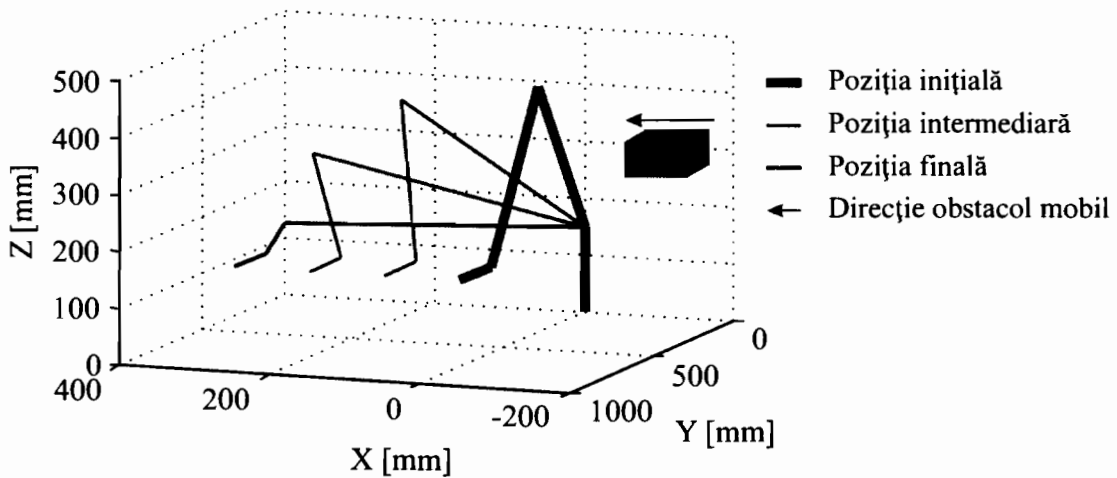


Figura 7 Configurația brațului robotic în timpul tranziției prehensorului din punctul A(0; 500; 100) până în punctul B(200; 500; 100), când un obstacol mobil se deplasează între punctele C(-150; 300; 300) și D(200; 300; 300).

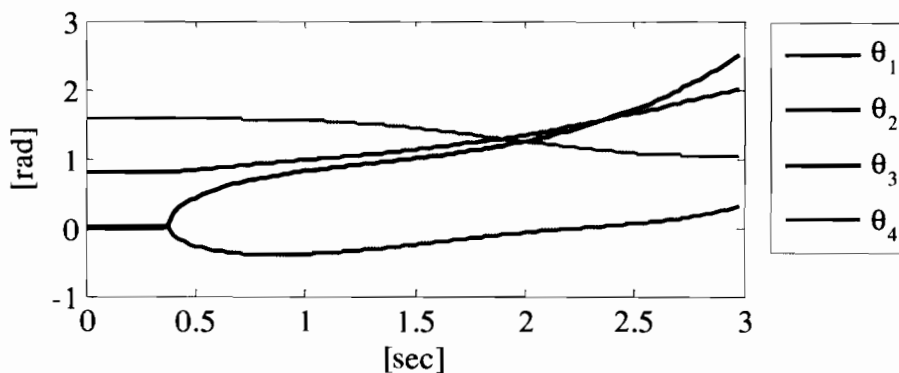


Figura 8 Pozițiile articulațiilor brațului robotic în timpul tranziției prehensorului din punctul A(0; 500; 100) până în punctul B(200; 500; 100), în situația în

Prin

care un obstacol mobil se deplasează din punctul C(-150; 300; 300) până în punctul D(200;300; 300).

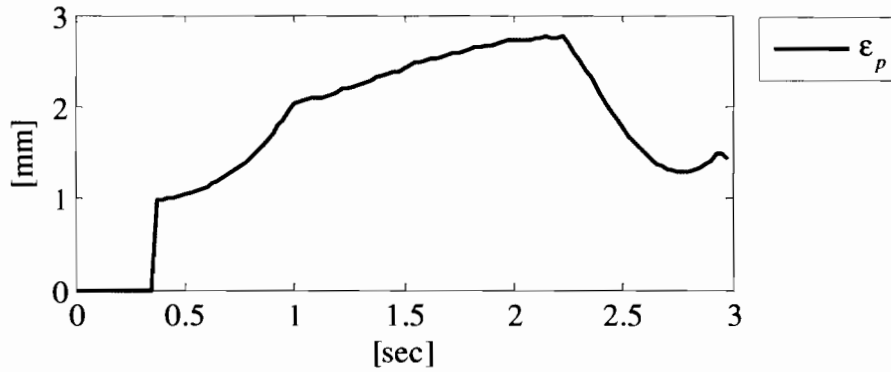


Figura 9 Eroarea de poziție a prehsorului în timpul tranziției prehsorului din punctul A(0; 500; 100) până în punctul B(200; 500; 100), în situația în care un obstacol mobil se deplasează din punctul C(-150; 300; 300) până în punctul D(200;300; 300).

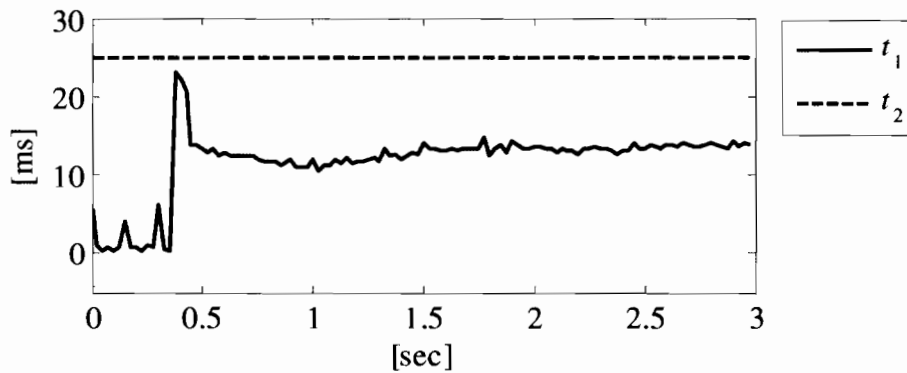


Figura 10 Timpul maxim de execuție (t_2) și timpul de execuție (t_1) al algoritmului care modifică, în timp-real, traiectoria articulațiilor brațului robotic când se aproprie un obstacol de acesta.

Pau

