

(12)

CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2022 00460

(22) Data de depozit: 29/07/2022

(41) Data publicării cererii:
30/01/2024 BOPI nr. 1/2024

(71) Solicitant:
• UNIVERSITATEA TEHNICĂ DIN
CLUJ-NAPOCA, STR.MEMORANDUMULUI
NR.28, CLUJ- NAPOCA, CJ, RO

(72) Inventatori:
• HANCU OLIMPIU,
STR. MARAMUREȘULUI NR. 151A, AP. 6,
CLUJ-NAPOCA, CJ, RO;
• LĂPUȘAN PETRU CIPRIAN,
STR. FĂNTANELE NR. 1, SC. 8, AP. 89,
CLUJ-NAPOCA, CJ, RO;
• RAD CIPRIAN- RADU, CALEA FLOREȘTI
NR. 62, BL. A1, SC. 2, ET. 1, AP. 35,
CLUJ-NAPOCA, CJ, RO

(54) **METODĂ NUMERICĂ DE PLANIFICARE ÎN TIMP REAL
A FORMEI ROBOȚILOR HIPER-REDUNDANȚI
ÎN ARHITECTURĂ SERIALĂ PRIN INTERMEDIUL
CURBELOR DE GHIDARE PARAMETRIZATE**

(57) Rezumat:

Invenția se referă la o metodă numerică de planificare în timp real a formei roboților hiper- redundanți în arhitectură serială. Metoda, conform invenției, constă în parcurgerea ciclică a trei etape de calcul, prin care, în etapa (1), se preiau datele de intrare ce definesc lungimile elementelor robotului, valorile extreme ale deplasărilor unghiulare, poziția și orientarea pentru efectorul final și modulul de bază, parametrii de performanță ai metodei, în etapa (2), prin algoritmul (A) se generează o curbă parametrică, candidat, de tip Bezier pentru modelarea formei robotului, prin algoritmul (A2) se ajustează iterativ curba candidat, simultan cu construcția unui model echivalent (ME) al robotului reprezentat printr-un set de puncte cheie (PI) și elemente orientate, iar în etapa (3), se determină configurația cinematică a modelului echivalent, respectiv se determină valorile deplasărilor în cuplele robotului, care asigură plierea formei acestuia pe o curbă de ghidare cu o precizie ridicată.

Revendicări: 3
Figuri: 4

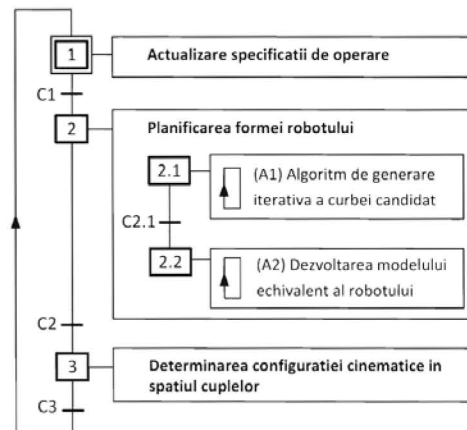


Fig. 1



Metoda numerică de planificare în timp real a formei roboților hiper-redundanți în arhitectură serială prin intermediul curbelor de ghidare parametrizate

OFICIUL DE STAT PENTRU INVENȚII ȘI MĂRCI	
Cerere de brevet de invenție	
Nr.	a 2022 00 460
Data depozit 29-07-2022	

42

DESCRIEREA INVENȚIEI

Invenția se referă la o metodă numerică care permite planificarea în timp real a formei roboților hiper-redundanți în arhitectură serială prin intermediul unei curbe de ghidare, reprezentată în forma analitică parametrizată și în formă numerică, respectiv care determină deplasările în cuplele robotului ce asigură plierea formei acestuia pe curba de ghidare la o precizie ridicată.

Roboții hiper-redundanți (RHR) se bucura de o atenție ridicată în lumea științifică, însă aplicabilitatea lor este frecvent limitată la prototipuri de laborator. Acest lucru se datorează faptului că, în comparație cu roboții industriali tradiționali, controlul mișcării în cazul lor este mai complex. Acesta comportă, printre altele, rezolvarea problemei cinematice directe (PCD) pentru determinări legate de efortul final și a problemei cinematice inverse (PCI) ca fundament pentru planificarea traiectoriei și a algoritmilor de control ai formei [1]. Teoretic, datorită naturii de hiper-redundanță a acestor roboți, PCI admite un număr infinit de soluții [2], respectiv pentru o poziție prescrisă a efortului final există corespondențe multiple de formă care satisfac constrângerile impuse. Metoda propusă vine să ofere o soluție în acest context care să permită controlul formei acestor roboți în procesele de manipulare.

Sunt cunoscute metode cu destinație similară, însă acestea folosesc tehnici diferite de construire a curbei de ghidare, respectiv de reprezentare a formei în spațiul cuplelor. Metoda propusă folosește un model echivalent care permite reducerea complexității robotului la o structură serială simplificată care eficientizează astfel timpul de calcul asociat metodei. Literatura de specialitate propune metode bazate pe algoritmi de învățare care folosesc logica fuzzy [3], algoritmi genetici [4] și rețelele neuronale [5], dar care sunt foarte sensibili la seturile de date utilizate pentru antrenament și necesită resurse de calcul mari. În ultimii ani cele mai apreciate soluții fac apel la curbele de ghidare a formei, referite în literatura de specialitate ca „backbone curves”[6,7], care surprind configurația formei macroscopice a robotului și care apoi se utilizează pentru rezolvarea redundanței cinematice a RHR-urilor. Tipul curbelor, parametrizarea asociată, modul de relaționare cu robotul și metodele utilizate prezintă de asemenea avantaje și dezavantaje specifice.

Dezavantajele principale ale metodelor similare cunoscute sunt determinate de complexitatea soluțiilor și a algoritmilor de implementare și, în consecință, a timpului de calcul aferent acestora [8], respectiv pentru o structura dată nu oferă un mecanism clar de reglare a preciziei metodei în relație cu o variabilă de intrare care să permită utilizatorului o eficientizare a implementării. De asemenea, eroarea de metodă este relaționată cu lungimea robotului.

Aniza F.

Problema tehnică pe care o rezolva invenția constă în soluționarea procesului de planificare a formei roboților hiper-redundanți cu arhitectură serială printr-o metodă de calcul în timp real, caracterizată prin precizie de calcul ridicată (de ordinul micronilor) și independență de lungimea robotului, care permite obținerea și conducerea formei acestei clase de roboți în procesele de manipulare. 41

Metoda numerică de planificare în timp-real a formei roboților hiper-redundanți în arhitectură serială prin intermediul curbelor de ghidare parametrizate constă în parcurgerea a trei etape de calcul în cadrul cărora se preiau datele de intrare, se planifică forma robotului și apoi se determină configurația cinematică în spațiul cuplelor care asigură obținerea, respectiv conducerea formei robotului.

În cadrul metodei forma robotului este descrisă printr-o curbă parametrizată numită curba de ghidare a formei (CGF) care trece printr-un set de puncte cheie P_i asociate robotului a cărui formă se dorește a fi controlată. Punctele P_i sunt determinate prin construirea unei reprezentări echivalente simplificate a robotului, numită model echivalent (ME), constituit sub forma unei structuri seriale virtuale unde articulațiile sunt punctele P_i . Alegerea punctelor P_i trebuie realizată astfel încât să fie posibilă reconstrucția cinematicii robotului pornind de la această reprezentare.

În acest context, modelarea formei robotului constă în construirea unei curbe de ghidare definită pe întregul spațiu de lucru al robotului, respectiv pentru forma descrisă de o astfel de curbă se determină reprezentarea în spațiul cuplelor care asigură obținerea acestei forme. Astfel, controlul formei robotului într-un proces de manipulare poate fi realizat prin controlul parametrilor curbei de ghidare.

Pentru obținerea curbei de ghidare CGF în formă parametrizată se parcurg două secvențe de calcul descrise în metodă prin algoritmi A1 și A2. Algoritmul A1 furnizează o curbă candidat, curbă cubică Bezier în formă parametrizată cu lungimea egală cu cea a robotului. Algoritmul A2 ajustează iterativ curba candidat simultan cu construirea modelului echivalent până când eroarea ce caracterizează potrivirea modelului pe curbă scade sub valoarea prestabilită. Această eroare determină eroarea de metodă și implicit timpul de execuție al algoritmilor, respectiv al metodei.

Trecerea de la reprezentarea formei (CGF) la reprezentarea în spațiul cuplelor se face pe baza modelului echivalent utilizat de metodă, respectiv determinând unghiurile Euler, matricele de rotație ale modelului echivalent și apoi prin revenire la robotul vizat se determină deplasările reale în cuplele robotului care asigură potrivirea formei acestuia pe curba de ghidare.

Se prezintă în continuare un exemplu de realizare a invenției, în legătură cu figurile 1, 2, 3 și 4, care reprezintă:

- Figura 1, Schema unui ciclu de procesare al metodei;
- Figura 2, Schema logică a algoritmului (A1) - Algoritm de generare iterativă a curbei candidat;
- Figura 3, Schema logică a algoritmului (A2) - Dezvoltarea modelului echivalent (ME) al robotului;

Anexa F.

- Figura 4, Schema cinematică a modelului echivalent (ME) utilizat de metodă.

Metoda numerică de planificare în timp-real a formei roboților hiper-redundanți în arhitectură serială prin intermediul curbelor de ghidare parametrizate, conform invenției, constă în parcurgerea ciclică a trei etape de calcul în conformitate cu Figura 1: etapa (1), Actualizare specificații de operare; etapa (2), Planificarea formei robotului; etapa (3), Determinarea configurației cinematice în spațiul cuplelor. La sfârșitul fiecărui ciclu se generează o configurație a formei robotului reprezentată prin: curba de ghidare (CGF) și configurația cinematică în spațiul cuplelor (deplasările în cuple ale robotului).

În etapa (1) se execută următoarea secvență:

- Preluare date ce definesc poziția și orientarea efectorului final $G(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$
- Preluare date ce definesc poziția și orientarea modului de baza $P_0(x_0, y_0, z_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$
- Definire valoare unghi maxim/critic θ_{max} admis între elementele robotului
- Definire număr segmente robot n și lungimea acestora l_i
- Definire parametri performanță metodă: precizie de determinare curbă candidat e_{bz} , precizie de determinare structură echivalentă robot e_{re}

Condiția de ieșire (C1) din etapa (1) și de trecere la etapa (2) este constituită de preluarea tuturor datelor necesare inițierii metodei, respectiv cele solicitate în etapa (1).

Etapa (2) constă în execuția succesivă a doi algoritmi de calcul care au următoarea descriere:

Algoritmul (A1) constă în execuția următoarelor prelucrări, în conformitate cu Figura 2:

- Se calculează lungimea de referință pentru curba candidat:

$$l_t = \sum_{i=1}^n l_i \quad (1)$$

- Se calculează valoarea de discretizare a curbei candidat de tip Bezier:

$$\Delta t \leq \frac{e_{re} \cdot 10}{l_t} \quad (2)$$

- Se determină drepte suport pe care glisează punctele $B1$ și $B2$ ce definesc curba Bezier în baza datelor de intrare
- Se determină punctele P_1 și P_n ce reprezintă capetele curbei candidat
- Se asociază poziția punctelor $B0$ și $B3$ cu punctele P_1 și P_n
- Se determină poziția inițială a punctelor $B1, B2$
- Se determină iterativ curba candidat

- o Se calculează curba Bezier $B(t)$ în baza parametrilor $B0, B1, B2, B3$ și Δt cu relația:

$$B(t) = (1-t)^3 B_0 + 3(1-t)^2 t B_1 + 3(1-t)t^2 B_2 + t^3 B_3 \quad (3)$$

Amig F.

- Se calculează lungimea curbei candidat

$$l_c = \sum_{j=1}^{n_{bez}} \sqrt{\Delta x_j^2 + \Delta y_j^2 + \Delta z_j^2} \quad (4)$$

unde: n_{bez} – număr puncte de discretizare a curbei Bezier

$$n_{bez} = \frac{1}{\Delta t} \quad (5)$$

Δx_j – distanța după axa x dintre două puncte consecutive pe curba $B(t)$

Δy_j – distanța după axa y dintre două puncte consecutive pe curba $B(t)$

Δz_j – distanța după axa z dintre două puncte consecutive pe curba $B(t)$

- Se determină diferența între lungimea curbei candidat și lungimea de referință:

$$e_1 = l_t - l_c \quad (6)$$

- Dacă $|e_1| > e_{bz}$ se ajustează poziția punctelor $B1, B2$ în baza valorii e_1

- Se finalizează iterația dacă $|e_1| < e_{bz}$

Algoritmul (A1) furnizează la ieșire curba Bezier candidat (analitic și numeric), condiția de ieșire din algoritm (C2.1) fiind:

$$|e_1| - e_{bz} < 0 \quad (7)$$

Algoritmul (A2) constă în ajustarea iterativă a curba Bezier candidat (modificând parametrii $B1$ și $B2$) simultan cu dezvoltarea modelului echivalent până când este îndeplinită condiția $|e_2| \leq e_{re}$, în conformitate cu Figura 3:

- Construire model echivalent al robotului prin parcurgerea secvențială a fiecărui segment (de la $i=2$ la $i=n-1$)

Descriere ciclu i

- Se determină punctul P_i' ce aparține curbei Bezier candidat $B(t)$ și formează un segmentul de lungime $\approx l_i$ pe curbă pornind de la punctul P_{i-1}'' , punct ce definește capătul segmentului anterior de pe modelul echivalent al robotului
- Pentru fiecare punct P_i' se determină coordonatele sferice (azimut az_i , elevație el_i și raza r_i) în raport cu un sistem de coordonate cu originea în punctul P_{i-1}'' și cu aceeași orientare ca sistemul de coordonate global
- Utilizând valorile azimut az_i , elevație el_i și valoarea l_i se construiește elementul $i-1$ din modelul echivalent (ME) al robotului (element definit la capete prin punctele P_{i-1}'' și P_i'').

- Se calculează distanța d între punctele P_{n-1}'' și P_n

- Se determină eroarea e_2

anizat.

$$e_2 = d - l_n \quad (8)$$

- Dacă $|e_2| > e_{re}$
 - se ajustează poziția punctelor $B1, B2$ în baza valorii e_2
 - Se recalculează curba Bezier în baza parametrilor $B0, B1, B2, B3$ și Δt cu (3)
- Dacă $|e_2| \leq e_{re}$ se finalizează iterația

Algoritmul (A2) furnizează la ieșire curba de ghidare a formei (CGF) și modelul echivalent definit printr-un set de puncte P_i (poziția carteziană a cuplelor) și coordonatele sferice relative aferente acestor puncte. Condiția de ieșire (C2) din algoritmul (A2), respectiv din etapa (2) este:

$$|e_2| - e_{re} \leq 0 \quad (9)$$

Etapa (3) constă în execuția următoarei secvențe de calcul, plecând de la rezultatele etapei (2):

- Se calculează unghiul θ_i dintre elementele i și $i-1$ de pe ME și se verifică să fie mai mic decât θ_{max} . În situația în care această constrângere este violată atunci robotul nu poate efectua mișcarea impusă și trebuie să se reconsidere modul de deplasare și orientare al efectorului final, algoritmul furnizând un mesaj în acest sens.
- Se determină unghiurile absolute de rotație în raport cu axele Ox respectiv Oy ale fiecărui element al modelului echivalent:

$$\theta_{xi} = \text{asin} \left(\frac{dx_i}{\sqrt{dy_i^2 + dz_i^2}} \right) \quad (10)$$

$$\theta_{yi} = \text{atan2}(dx_i, dz_i)$$

$$\text{unde: } dx_i = P_{xi}'' - P_{xi-1}'' \quad \{i = 1..n\},$$

$$dy_i = P_{yi}'' - P_{yi-1}'' \quad \{i = 1..n\},$$

$$dz_i = P_{zi}'' - P_{zi-1}'' \quad \{i = 1..n\}$$

- Se determină matricea de rotație pentru fiecare segment din modelul robotului echivalent

$${}^0_i R = \begin{bmatrix} \cos\theta_{yi} & 0 & \sin\theta_{yi} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{yi} & 0 & \cos\theta_{yi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{xi} & -\sin\theta_{xi} \\ 0 & \sin\theta_{xi} & \cos\theta_{xi} \end{bmatrix} \quad (11)$$

- Se determină valorile deplasărilor în cuplele robotului prin trecere de la cinematica modelului echivalent la cea a robotului real aplicând metode specifice în domeniu.

Amiga F.

La ieșire din etapa (3) se furnizează configurația robotului în spațiul cuplelor care asigură potrivirea formei acestuia pe curba de ghidare și care constituie în același timp și condiția de ieșire din etapă (C3), respectiv condiția de reluare a unui nou ciclu de calcul al metodei.

34

În comparație cu sistemele similare cunoscute, invenția prezintă următoarele **avantaje**:

- Metoda asigură exprimarea formei și a curbei de ghidare (CGF) la o precizie ridicată, eroarea absolută aferentă metodei fiind de ordinul micronilor;
- Precizia de lucru a metodei poate fi controlată în conformitate cu relația (2), eroarea absolută aferentă metodei fiind independentă de lungimea robotului (RHR) ceea ce conferă un important avantaj în comparație cu alte metode;
- Timpul de execuție al metodei permite utilizarea acesteia în dezvoltarea algoritmilor de control în timp real ai roboților hiper-redundanți (RHR) (exemplu: pentru un robot RHR cu 12 articulații, timpul de procesare aferent unui ciclu este mai mic de 2ms, la o precizie de 10 microni a metodei);
- Metoda poate fi extinsă la roboți hiper-redundanți (RHR) cu alte topologii care pot fi reduse funcțional la modelul echivalent (ME) cu care lucrează metoda.

Dan F.

BIBLIOGRAFIE

1. Zhao, Y.; Jin, L.; Zhang, P. et al. Inverse Displacement Analysis of a Hyper-redundant Elephant's Trunk Robot. *J Bionic Eng* 2018, 15, 397–407. <https://doi.org/10.1007/s42235-018-0030-z>
2. Chibani, A.; Mahfoudi, C.; Chettibi, T.; Merzouk, R.; Zaatri, A. Generating optimal reference kinematic configurations for hyper-redundant parallel robots. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering* 2015, 229(9), 867–882. <https://doi.org/10.1177/0959651815583423>
3. Qi, P.; Liu, C.; Zhang, L.; Wang, S.; Lam, H.-K. and Althoefer, K. Fuzzy logic control of a continuum manipulator for surgical applications, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Bali, Indonesia, 05-10 December 2014, pp. 413-418. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2014.7090366>
4. Runge, G.; Peters, J.; Raatz, A.. Design optimization of soft pneumatic actuators using genetic algorithms. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Macau, Macao, 26 March 2018, pp. 393–400. <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2017.8324449>
5. Melingui, A.; Lakhali, O.; Daachi, B.; Mbede, J. B. and Merzouki, R. Adaptive Neural Network Control of a Compact Bionic Handling Arm. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 2015, 20 (6), 2862-2875. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2015.2396114>
6. Hannan, M. W. and Walker, I. D. Novel kinematics for continuum robots. *In Advances in Robot Kinematics* 2000, 227–238. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4120-8_24
7. Chirikjian, G.S. Conformational Modeling of Continuum Structures in Robotics and Structural Biology: A Review, *Advanced Robotics* 2015, 29(13), 817-829. <https://doi.org/10.1080/01691864.2015.1052848>
8. Andrés Martín, Antonio Barrientos, and Jaime del Cerro, The Natural-CCD Algorithm, a Novel Method to Solve the Inverse Kinematics of Hyper-redundant and Soft Robots, SOFT ROBOTICS Volume 00, Number 00, 2018, DOI: 10.1089/soro.2017.0009.

36

"Amigo F."

Metoda numerică de planificare în timp-real a formei roboților hiper-redundanți în arhitectură serială prin intermediul curbelor de ghidare parametrizate

35

REVENDICĂRI

1. Metoda numerică de planificare în timp-real a formei roboților hiper-redundanți în arhitectură serială prin intermediul curbelor de ghidare parametrizate care asigură plierea formei pe o curbă de ghidare (CGF) la o precizie ridicată **caracterizată prin aceea că** utilizează un model echivalent (ME) ca instrument de lucru al metodei, un algoritm (A1) care furnizează o curbă candidat, curbă cubică Bezier în formă parametrizată cu lungimea egală cu cea a robotului, un algoritm (A2) care ajustează iterativ curba candidat simultan cu construirea modelului echivalent (ME) pe curba candidat până când eroarea ce caracterizează potrivirea modelului pe curbă scade sub o valoare prestabilită, respectiv care determină configurația cinematică în spațiul cuplelor a robotului impusă prin curba (CGF).

2. Metoda numerică de planificare în timp-real a formei roboților hiper-redundanți în arhitectură serială prin intermediul curbelor de ghidare parametrizate, conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că** dezvoltarea modelului echivalent (ME) prin algoritmul (A2) presupune parcurgerea iterativă a următoarelor etape de calcul:

- Construire model echivalent al robotului prin parcurgerea secvențială a fiecărui segment (de la $i=2$ la $i=n-1$)

Descriere ciclu i

- Se determină punctul P_i' ce aparține curbei Bezier candidat $B(t)$ și formează un segmentul de lungime $\approx l_i$ pe curbă pornind de la punctul P_{i-1} , punct ce definește capătul segmentului anterior de pe modelul echivalent al robotului
 - Pentru fiecare punct P_i' se determină coordonatele sferice (azimut az_i , elevație el_i și raza r_i) în raport cu un sistem de coordonate cu originea în punctul P_{i-1} și cu aceeași orientare ca sistemul de coordonate global
 - Utilizând valorile azimut az_i , elevație el_i și valoarea l_i se construiește elementul $i-1$ din modelul echivalent (ME) al robotului (element definit la capete prin punctele P_{i-1} și P_i').
- Se calculează distanța d între punctele P_{n-1} și P_n
 - Se determină eroarea e_2

$$e_2 = d - l_n \quad (8)$$

- Dacă $|e_2| > e_{re}$
 - se ajustează poziția punctelor $B1, B2$ în baza valorii e_2
 - Se recalculază curba Bezier în baza parametrilor $B0, B1, B2, B3$ și Δt cu (3)
- Dacă $|e_2| \leq e_{re}$ se finalizează iterația

Amir F.

3. Metoda numerică de planificare în timp-real a formei roboților hiper-redundanți în arhitectură serială prin intermediul curbelor de ghidare parametrizate, conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că stabilește o legătură** dintre precizia de lucru a metodei, caracteristicile geometrice ale robotului și valoarea de discretizare a curbei Bezier candidat, definită de relația (2).

39

Anişa F.

Metoda numerică de planificare în timp-real a formei roboților hiper-redundanți în arhitectură serială prin intermediul curbelor de ghidare parametrizate

33

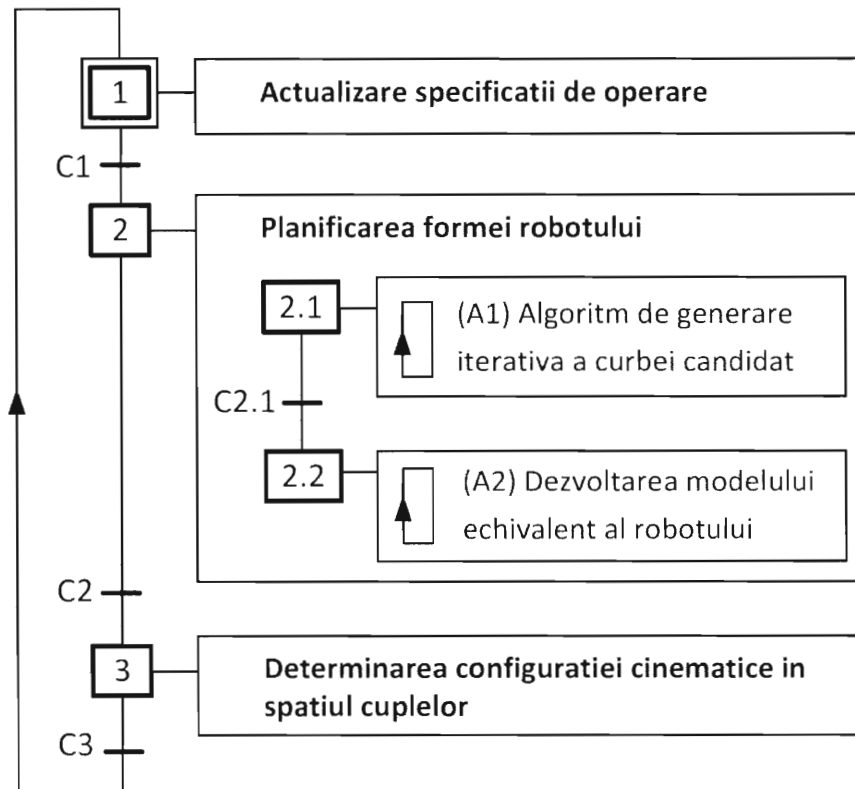


Figura 1

Anița F.

32

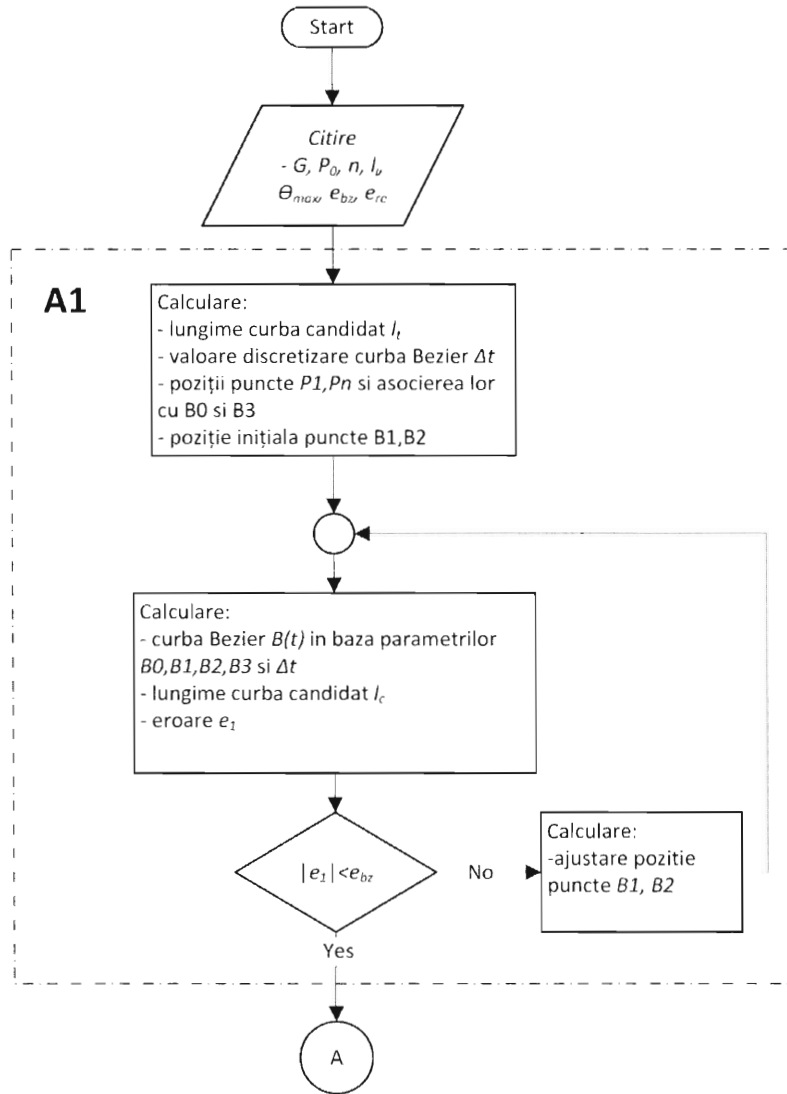


Figura 2

1. August

31

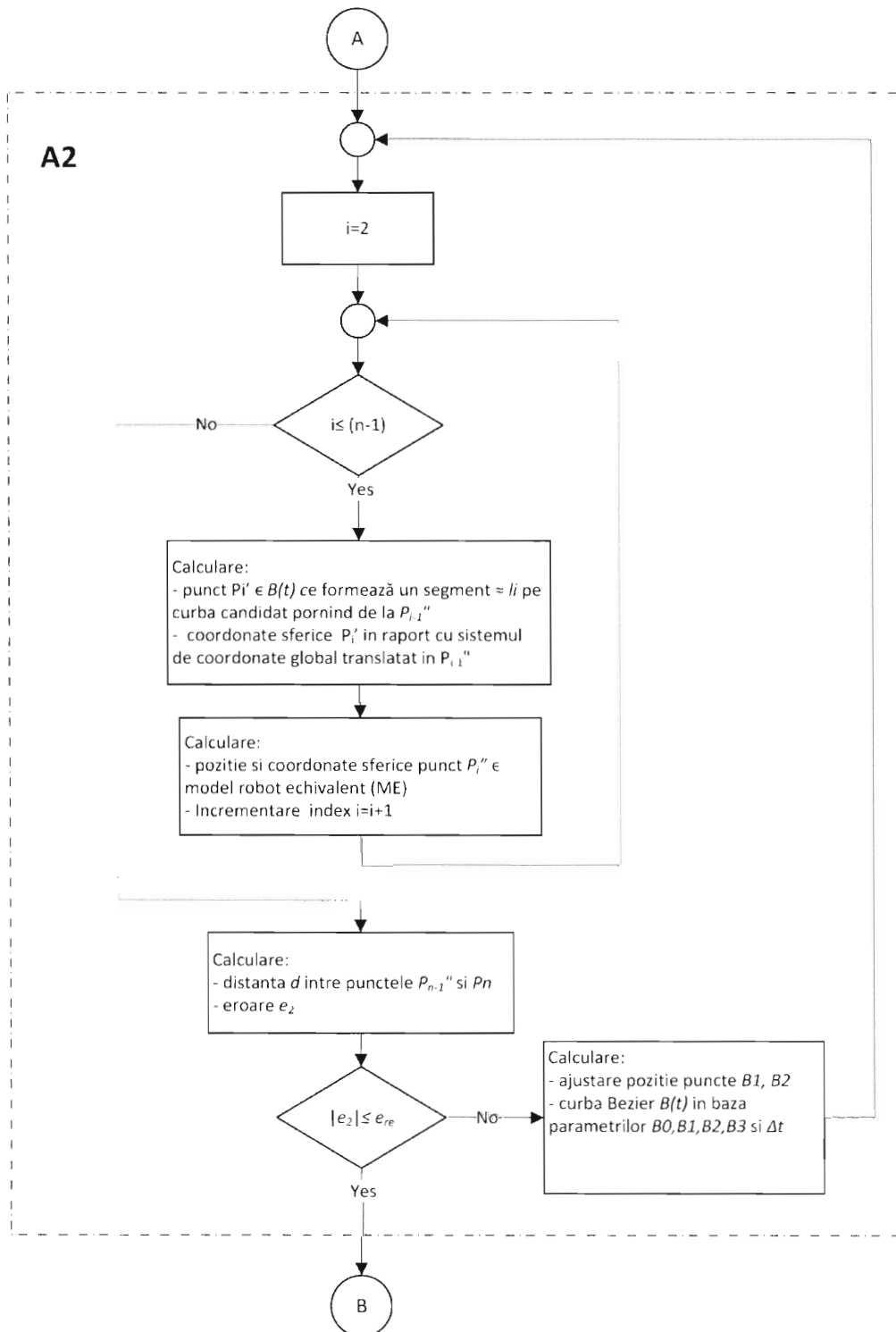


Figura 3

Aniga F.

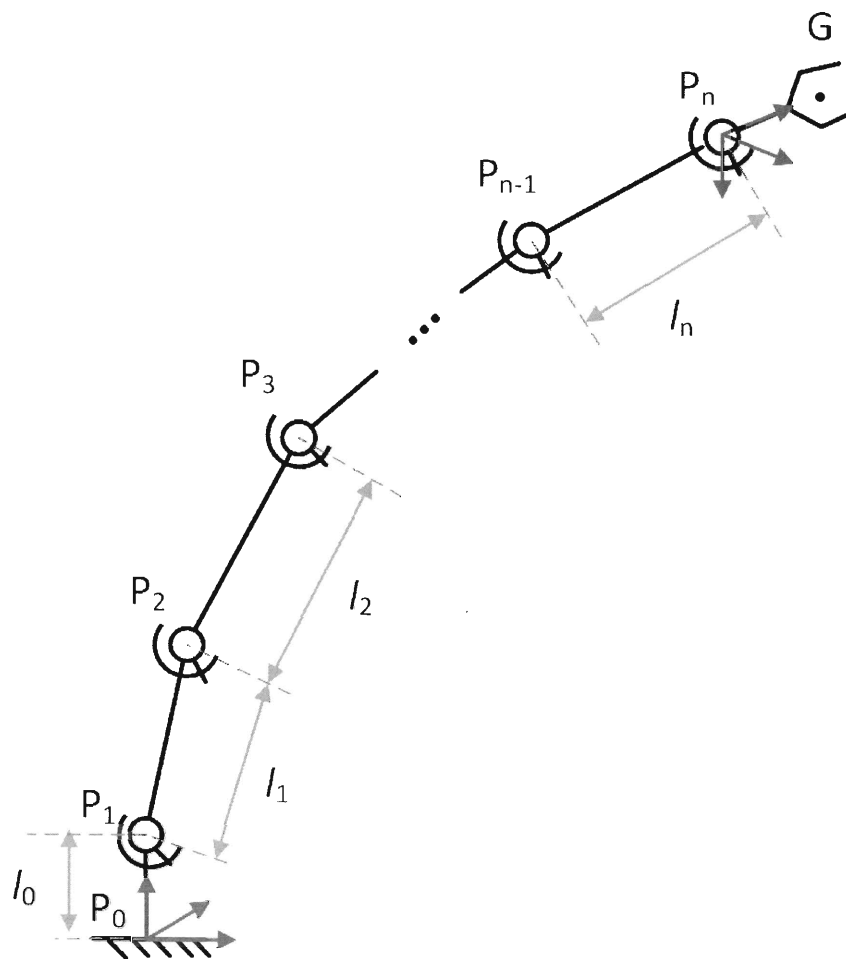


Figura 4