

Ứng dụng thuật giải di truyền trong bài toán động học ngược robot chuỗi và song song

Application of genetic algorithms in inverse kinematics problem of serial and parallel robots

Nguyễn Quang Hoàng¹⁾ và Vũ Đức Vương²⁾

¹⁾Bộ môn Cơ học ứng dụng - Viện Cơ khí - Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

²⁾Bộ môn Cơ điện tử - Khoa Điện tử - Đại học kỹ thuật Công nghiệp Thái Nguyên

e-Mail: hoang.nguyenquang@hust.edu.vn; vuducvuong@tmut.edu.vn

Tóm tắt

Bài toán động học ngược tay máy chuỗi cũng như song song thường được giải ở cấp độ vận tốc dựa trên ma trận Jacobi. Ưu điểm của phương pháp này là chỉ cần giải hệ phương trình đại số tuyến tính để tìm véc tơ vận tốc khớp. Véc tơ tọa độ khớp sau đó nhận được bằng cách tích phân các vận tốc khớp với một điều kiện đầu tương thích. Lời giải theo phương pháp này sẽ được quyết định bởi điểm xuất phát của các tọa độ khớp. Hiện tại, vị trí xuất phát được xác định thô theo phương pháp phác thảo sau đó được hiệu chỉnh đến độ chính xác nhất định bằng phương pháp lặp Newton-Raphson. Bài báo này trình bày việc tìm xấp xỉ ban đầu dưới dạng bài toán tối ưu. Sau đó sử dụng thuật giải di truyền để xác định điểm xuất phát. Mô phỏng số trong phần mềm Matlab được tiến hành để xác minh những hiệu quả của phương pháp đề xuất.

Từ khóa: Động học ngược tay máy, thuật giải di truyền, mô phỏng số, tối ưu số.

Abstract:

Inverse kinematic problem of serial and parallel manipulators is normally solved at a velocity level based on Jacobi matrices. The advantage of this approach is that it requires only solving a system of linear algebraic equations to find the vector of joint velocity. The vector coordinates joints, then, is obtained by integrating the velocity joints with a consistent initial conditions. According to this method the solution of the inverse kinematic problem is determined by the starting point of the coordinates joint. Currently, the starting position is determined by using a rough approximation and is then adjusted to a certain precision by the iterative method Newton-Raphson. This paper presents optimization problems related to the initial position. A genetic algorithm is then applied to determine the starting values of joint variables. Numerical simulations in Matlab software are conducted to verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: serial and parallel manipulators, inverse kinematics, genetic algorithm, numerical simulation.

1. Phần mở đầu

Bài toán động học ngược robot đóng vai trò quan trọng trong việc lập trình quỹ đạo và điều khiển chuyển động của robot theo chương trình. Bài toán này đòi hỏi cần phải giải với độ chính xác và ổn định cao nhất có thể. Bài toán động học thuận tay máy chuỗi đã được giải quyết một cách hiệu quả bằng một số phương pháp như phép biến đổi tọa độ thuần nhất Denavit-Hartenberg và cho kết quả là các biểu thức giải tích [4-8,17,18]. Trái lại, hiện chưa có một phương pháp tổng quát để giải quyết bài toán động học ngược cho tay máy công nghiệp. Phương pháp giải tích chỉ có thể nhận được đối với một số trường hợp đơn giản. Trong các trường hợp khác, các phương pháp số là một công cụ hữu ích. Thông thường, phương pháp ma trận Jacobian thường được sử dụng vì nó cho các mối quan hệ tuyến tính giữa vận tốc của khâu tác động cuối và véc tơ vận tốc suy rộng [7-15]. Các tọa độ suy rộng có thể thu được bằng cách tích phân các vận tốc suy rộng. Phương pháp này có ưu điểm là đơn giản vì chỉ phải giải hệ phương trình đại số tuyến tính. Tuy nhiên, nghiệm của bài toán động học ngược lại được quyết định bởi điều kiện đầu. Nếu điều kiện đầu không được chọn hợp lý, nghiệm của bài toán sẽ cho một cấu hình không mong muốn. Ngoài ra, trong quá trình tích phân các sai số tính toán có thể được tích lũy làm cho khâu cuối di chuyển ra khỏi vị trí mong muốn của nó. Để giảm sai số tích lũy, một số nhà nghiên cứu sử dụng sai lệch này như một phản hồi [6]. Tuy nhiên, phương pháp phản hồi sai lệch yêu cầu một thông số hợp lý mà không phải là đơn giản để lựa chọn.

Bài báo này trình bày việc giải bài toán động học ngược tay máy chuỗi và robot song song dựa trên ma trận Jacobi. Thuật giải di truyền được áp dụng để xác định giá trị xấp xỉ ban đầu cho các biến khớp, sau đó phương pháp lặp Newton-Raphson được dùng để tinh chỉnh các biến khớp ứng với vị trí ban đầu của khâu thao tác cuối. Phần còn lại của bài báo được trình bày như sau: phần 2 trình bày sơ lược về thuật giải di truyền; phần 3 trình bày bài toán động học ngược dựa trên ma trận Jacobi, trong đó ma trận tựa nghịch đảo được áp dụng

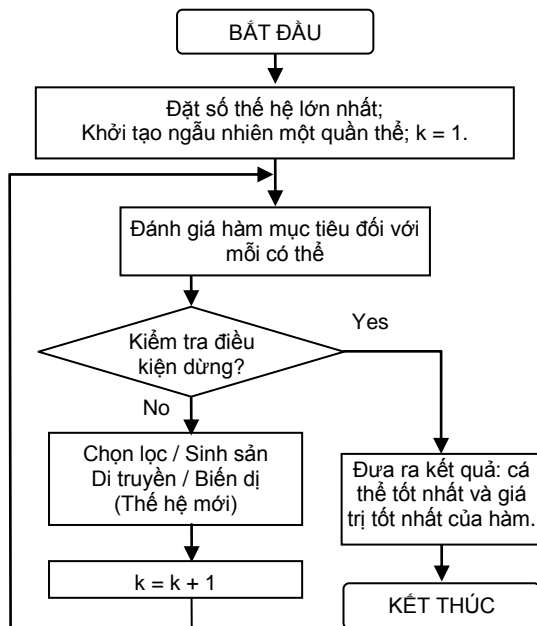
cho bài toán robot dư dẫn động; phần 4 là các kết quả mô phỏng số và cuối cùng là phân kết luận.

2. Thuật giải di truyền

Thuật toán di truyền (GA-Genetic algorithm) đã được phát minh bởi John Holland trong những năm 1960 và được ông cùng với các học trò và đồng nghiệp tại Đại học Michigan phát triển trong thập niên 1960 và 1970 để giải quyết các bài toán tối ưu. Thuật toán di truyền thuộc lớp các thuật toán tiến hóa, trong đó các nghiệm của bài toán tối ưu được tìm bằng cách sử dụng các kỹ thuật lấy cảm hứng từ sự tiến hóa tự nhiên, chẳng hạn như sinh sản, di truyền, đột biến, và chọn lọc [1,2,3]. Phương pháp này có khả năng giải quyết được một lớp lớn các bài toán tối ưu. Khi áp dụng thuật giải di truyền vào xác định giá trị tối ưu của hàm $f(\mathbf{x})$ với biến $\mathbf{x} \in X$, các bước sau được thực hiện:

- 1) Tạo ngẫu nhiên một quần thể với $4n$ cá thể thuộc tập X , $\mathbf{x}_i \in X, i = 1, 2, \dots, 4n$.
- 2) Đánh giá các cá thể thông qua hàm giá trị của nó, $f(\mathbf{x}_i)$.
- 3) Thực hiện quá trình chọn lọc, chọn ra một nửa số cá thể tốt nhất;
- 4) Thực hiện quá trình sinh sản, ta cho mỗi cặp bố-mẹ sinh ra hai con, trong quá trình sinh sản này thể hệ con được kế thừa từ các gen từ bố mẹ, đồng thời sự đột biến sẽ xảy ra ở đây với một xác suất cho trước.
- 5) Sau quá trình sinh sản ta nhận được một quần thể mới với $4n$.
- 6) Lặp lại bước (2) đến khi nhận được giá trị tối ưu chấp nhận được.

Các bước trên được thể hiện dưới dạng sơ đồ khối như trên hình H. 1.



H. 1 Sơ đồ khối thuật giải di truyền

3. Bài toán động học ngược robot

3.1 Động học ngược robot chuỗi

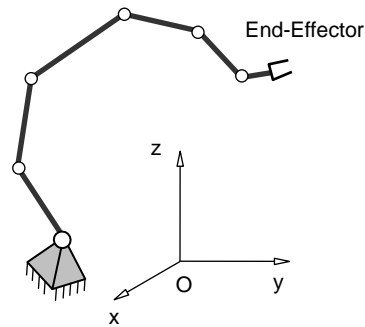
Xét tay máy dạng chuỗi với n bậc tự do (H. 2), gọi $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$ là véc tơ chứa các biến khớp. Vị trí của khâu tác động cuối trong không gian thao tác được ký hiệu bởi véc tơ $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m$ ($m \leq 6$). Kết quả của bài toán động học thuận cho ta

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = 0, \mathbf{x}, \mathbf{f} \in \mathbb{R}^m, \mathbf{q} \in \mathbb{R}^n, \quad (1)$$

trong đó $\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n$ là véc tơ chứa các biến khớp, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m$ là véc tơ chứa vị trí một điểm thuộc bàn kẹp và hướng của bàn kẹp trong một hệ tọa độ cố định:

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_m]^T, \quad \mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T.$$

Tay máy được gọi là đủ dẫn động, nếu $m = n$, trường hợp $m < n$ tay máy được gọi là dư dẫn động. Đối với tay máy dư dẫn động, số bậc tự do của tay máy nhiều hơn số bậc tự do của khâu tác động cuối.



H. 2 Sơ đồ tay máy chuỗi

Nhiệm vụ của bài toán động học ngược là giải phương trình (1) để tìm chuyển động của khớp dẫn động $\mathbf{q}(t)$ (phương pháp giải tích, phương pháp số) để khâu tác động cuối thực hiện chuyển động theo qui luật $\mathbf{x}(t)$ là hàm tron cho trước.

Đạo hàm hai vế của (1) theo thời gian, ta nhận được

$$\frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}} + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{q}} \dot{\mathbf{q}} = 0 \text{ hay}$$

$$\mathbf{J}_x(\mathbf{x}, \mathbf{q})\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{J}_q(\mathbf{x}, \mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (2)$$

trong đó các ma trận jacobian như sau

$$\mathbf{J}_x(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_m} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{J}_q(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \frac{\partial f_m}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \end{bmatrix}.$$

Ma trận Jacobi $\mathbf{J}_q(\mathbf{x}, \mathbf{q})$ cỡ $m \times n$ và $\mathbf{J}_x(\mathbf{x}, \mathbf{q})$ cỡ $m \times m$. Giả sử hạng của $\mathbf{J}_q(\mathbf{x}, \mathbf{q})$ là m . Theo các tài liệu [5,6,7,16] ta chọn

$$\mathbf{J}_q^+(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = \mathbf{J}_q^T (\mathbf{J}_q \mathbf{J}_q^T)^{-1} \quad (3)$$

Ma trận $\mathbf{J}_q^+(\mathbf{x}, \mathbf{q})$ được gọi là ma trận tựa nghịch đảo của ma trận $\mathbf{J}_q(\mathbf{x}, \mathbf{q})$. Từ (2) ta xác định được véc tơ vận tốc suy rộng

$$\dot{\mathbf{q}} = -\mathbf{J}_q^+(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \mathbf{J}_x(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \dot{\mathbf{x}} \quad (4)$$

Hoặc nếu chú ý đến không gian không của $\mathbf{J}_q(\mathbf{x}, \mathbf{q})$

$$\dot{\mathbf{q}} = -\mathbf{J}_q^+(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \mathbf{J}_x(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \dot{\mathbf{x}} + (\mathbf{E} - \mathbf{J}_q^+ \mathbf{J}_q) \mathbf{z}_0 \quad (5)$$

với $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ là ma trận đơn vị và $\mathbf{z}_0 \in \mathbb{R}^n$ là véc tơ sẽ được chọn.

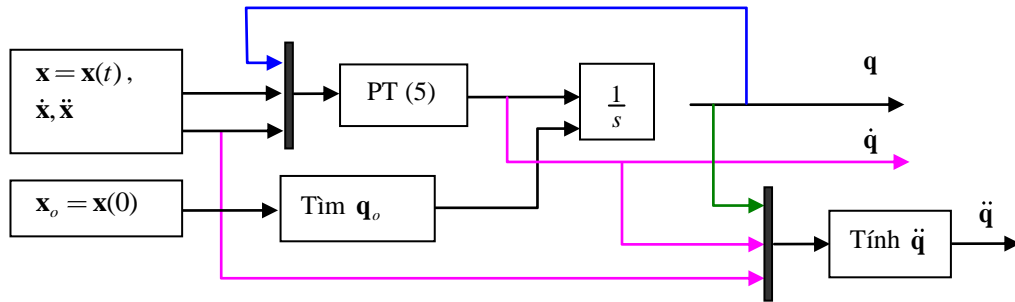
Bằng việc chọn véc tơ \mathbf{z}_0 , ưu điểm của tay máy dư dẫn động sẽ được khai thác (như tránh chướng ngại vật, tránh kỳ dị trong cấu hình, tránh va chạm với các giới hạn khớp). Trong bài báo này \mathbf{z}_0 được chọn

$$\mathbf{z}_0^T = -\alpha \frac{\partial \phi(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \quad (7)$$

với hằng số dương α và hàm tổng bình phương các khoảng cách đến vị trí giữa của các biến khớp được định nghĩa như sau

$$\phi(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n c_i \left(\frac{q_i - \bar{q}_i}{q_{im} - q_{im}} \right)^2, \quad (8)$$

trong đó q_{im} , q_{im} và \bar{q}_i là các giá trị lớn nhất, nhỏ nhất và giá trị giữa của các biến khớp. Sự lựa chọn này cho phép tránh va chạm với các giới hạn khớp.



H.3 Sơ đồ giải bài toán động học ngược ở cấp độ vận tốc

3.2 Vấn đề sai số sau khi tích phân

Các giá trị $\dot{\mathbf{q}}$ tính theo (5) chỉ thỏa mãn (2), sau khi tích phân theo thời gian có thể có những sai số tính toán, tích lũy nên giá trị \mathbf{q} thu được có thể sẽ không còn thỏa mãn (1). Để khắc phục nhược điểm này, ta xét hàm sai số

$$\mathbf{e} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{q}),$$

trường hợp lý tưởng $\mathbf{e} = 0$.

Như thế có

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{J}_x(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{J}_q(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (9)$$

Đưa vào hệ thức

$$\dot{\mathbf{e}} = -\mathbf{Ke}, \quad (10)$$

Gia tốc khớp $\dot{\mathbf{q}}$ được xác định bằng cách đạo hàm (5) theo thời gian:

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{q}} = & -\dot{\mathbf{J}}_q^+ \mathbf{J}_x \dot{\mathbf{x}} - \mathbf{J}_q^+ \dot{\mathbf{J}}_x \dot{\mathbf{x}} - \mathbf{J}_q^+ \ddot{\mathbf{x}} \\ & + [\mathbf{I} - \mathbf{J}_q^+ \mathbf{J}_q] \ddot{\mathbf{z}}_0 - [\dot{\mathbf{J}}_q^+ \mathbf{J}_q + \mathbf{J}_q^+ \dot{\mathbf{J}}_q] \mathbf{z}_0 \end{aligned} \quad (6)$$

với

$$\dot{\mathbf{J}}_q^+ = \frac{d}{dt} \mathbf{J}_q^+, \quad \dot{\mathbf{J}}_x = \frac{d}{dt} \mathbf{J}_x. \quad (7)$$

Về mặt toán học, ta có thể thực hiện đạo hàm ma trận tựa nghịch đảo \mathbf{J}_q^+ , nhưng việc này đòi hỏi số lượng lớn các phép tính. Từ phương trình (3) ta nhận được

$$\mathbf{J}_q^+ [\mathbf{J}_q \mathbf{J}_q^T] = \mathbf{J}_q^T. \quad (8)$$

Đạo hàm hai vế phương trình trên ta nhận được

$$\dot{\mathbf{J}}_q^+ [\mathbf{J}_q \mathbf{J}_q^T] + \mathbf{J}_q^+ [\dot{\mathbf{J}}_q \mathbf{J}_q^T] + \mathbf{J}_q^+ [\mathbf{J}_q \dot{\mathbf{J}}_q^T] = \dot{\mathbf{J}}_q^T.$$

Từ đây ta giải được

$$\dot{\mathbf{J}}_q^+ = \dot{\mathbf{J}}_q^T - \mathbf{J}_q^+ [\dot{\mathbf{J}}_q \mathbf{J}_q^T] - \mathbf{J}_q^+ [\mathbf{J}_q \dot{\mathbf{J}}_q^T] [\mathbf{J}_q \mathbf{J}_q^T]^{-1}$$

Từ các phương trình (5) và (6), với giá trị đã cho $\mathbf{x}(t), \dot{\mathbf{x}}(t), \ddot{\mathbf{x}}(t)$ và nếu có được đại lượng \mathbf{q} tại thời điểm t ta sẽ xác định được véc tơ vận tốc và gia tốc suy rộng $\dot{\mathbf{q}}(t)$ và $\ddot{\mathbf{q}}(t)$.

Sơ đồ giải bài toán động học ngược robot chuỗi được thể hiện như trên hình H. 3. Theo sơ đồ này ta cần phải xác định giá trị $\mathbf{q}(0)$ ứng với vị trí ban đầu của khâu thao tác $\mathbf{x}(0)$. Trong phần tiếp theo trình bày việc áp dụng thuật giải di truyền để xác định giá trị ban đầu này.

với \mathbf{K} là ma trận xác định dương. Ở đây ta chọn \mathbf{K} là ma trận đường chéo, $k_{ii} = \lambda_i > 0$. Nghiệm của phương trình vi phân (10) có dạng

$$e_i(t) = e_i(0) \exp(-\lambda_i t).$$

Như thế nếu ban đầu $e_i(0) = 0 \Rightarrow e_i(t) = 0$, còn nếu $e_i(0) \neq 0 \Rightarrow e_i(t) \rightarrow 0$ khi thời gian t đủ lớn.

Kết hợp (9) và (10) ta được

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{J}_x(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{J}_q(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} = -\mathbf{Ke} \quad (11)$$

Từ đây ta giải được véc tơ vận tốc suy rộng

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{q}} = & -\mathbf{J}_q^+(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \mathbf{J}_x(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{Ke} \\ = & -\mathbf{J}_q^+(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \mathbf{J}_x(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{Kf}(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \end{aligned} \quad (12)$$

Nếu chú ý đến không gian không của ma trận jacobii $\mathbf{J}(\mathbf{q})$, nghiệm của phương trình (11) có thể được viết lại như sau:

$$\dot{\mathbf{q}} = -\mathbf{J}_q^+(\mathbf{x}, \mathbf{q}) \mathbf{J}_x(\mathbf{x}, \mathbf{q})\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{e} + [\mathbf{E} - \mathbf{J}_q^+(\mathbf{x}, \mathbf{q})\mathbf{J}_q(\mathbf{x}, \mathbf{q})]\mathbf{z}_0 \quad (13)$$

trong đó $\mathbf{z}_0 \in \mathbb{R}^n$ là một vectơ tùy ý và $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ là ma trận đơn vị. Để tính véc tơ gia tốc suy rộng, ta chỉ việc đạo hàm biểu thức (13) theo thời gian. Theo cách này trong sơ đồ khối H.2 ta sẽ thay PT (5) bằng PT (13).

3.3 Xác định \mathbf{q}_0 bằng thuật giải di truyền

Để nhận được $\mathbf{q}(t)$ khi tích phân hàm $\dot{\mathbf{q}}$, ta cần phải có giá trị đầu ứng với vị trí ban đầu của khâu tác động cuối, $\mathbf{q}_0 = \mathbf{q}(t_0)$. Phương pháp lặp Newton-Raphson có thể được sử dụng để tìm giá trị ban đầu này. Tuy nhiên, khi áp dụng phương pháp lặp này việc chọn giá trị xấp xỉ ban đầu là rất quan trọng. Nếu lựa chọn không tốt nghiệm sẽ hội tụ về một giá trị không mong muốn và có thể nằm ra ngoài giới hạn khớp. Trong bài báo này, thuật giải di truyền được sử dụng để giải quyết vấn đề này. Bài toán tối ưu được đặt ra như sau: Tìm biến \mathbf{q}_0 thỏa mãn phương trình

$$\mathbf{f}(\mathbf{q}_0, \mathbf{x}_0) = \mathbf{0} \quad (14)$$

và hàm bình phương khoảng cách sau đây đạt giá trị nhỏ nhất

$$S(\mathbf{q}_0) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n c_i \left(\frac{q_i - \bar{q}_i}{q_{im} - q_{im}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (15)$$

với $c_i > 0$ là các trọng số, q_{im}, q_{im} là giới hạn trên và dưới của các biến khớp; $\bar{q}_i = \frac{1}{2}(q_{im} + q_{im})$ là giá trị giữa của các biến khớp.

Để giải bài toán trên bằng thuật giải di truyền, ta đưa bài toán về dạng, tìm giá trị cực tiểu của hàm sau

$$L(\mathbf{q}_0) = \gamma_1 \mathbf{f}^T(\mathbf{q}_0, \mathbf{x}_0)\mathbf{f}(\mathbf{q}_0, \mathbf{x}_0) + \gamma_2 S(\mathbf{q}_0) \rightarrow \min,$$

với các trọng số dương γ_1, γ_2 .

Trường hợp nếu nghiệm tìm được của bài toán trên chưa đạt độ chính xác cần thiết, ta có thể tiếp tục sử dụng phương pháp lặp Newton-Raphson để nhận được nghiệm chính xác hơn [19]. Quá trình lặp được thực hiện như sau:

Bước 1. Giải hệ phương trình đại số tuyến tính

$$\mathbf{J}_q(\mathbf{q}_0, \mathbf{x}_0)\Delta\mathbf{q}_0 \approx -\mathbf{f}(\mathbf{q}_0, \mathbf{x}_0) \quad (22)$$

cho ta

$$\Delta\mathbf{q}_0 = -\mathbf{J}_q^+(\mathbf{q}_0, \mathbf{x}_0)\mathbf{f}(\mathbf{q}_0, \mathbf{x}_0). \quad (23)$$

Bước 2. Lấy

$$\tilde{\mathbf{q}}_0 := \mathbf{q}_0 + \Delta\mathbf{q}_0. \quad (24)$$

Bước 3. Kiểm tra điều kiện dừng

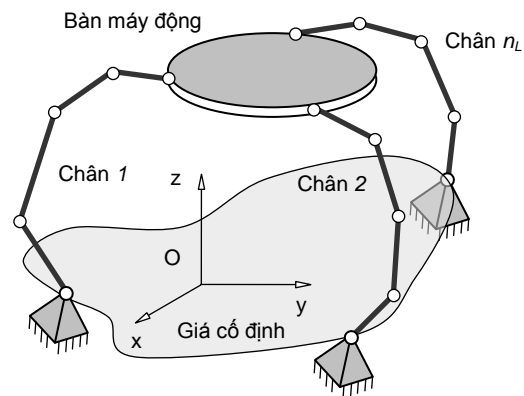
Nếu $\|\mathbf{f}(\tilde{\mathbf{q}}_0, \mathbf{x}_0)\| \leq \varepsilon$, với ε là sai số cho phép, thì chuyển sang bước 4, trái lại lấy $\mathbf{q}_0 := \tilde{\mathbf{q}}_0$ và chuyển về bước 1.

Bước 4. Lấy nghiệm chính xác hơn $\mathbf{q}_0 := \tilde{\mathbf{q}}_0$.

Lưu rằng trong các tính toán trên, nếu robot là không dư dẫn động, $m=n$, ta chỉ việc thay ma trận tựa nghịch đảo \mathbf{J}_q^+ bằng ma trận nghịch đảo \mathbf{J}_q^{-1} khi đó sẽ nhận được lời giải cho bài toán động học ngược robot chuỗi không dư dẫn động.

3.4 Động học ngược robot song song

Cách giải bài toán trình bày trong phần trước có thể được áp dụng cho bài toán động học ngược của tay máy song song, trong đó mỗi chân của robot song song sẽ được coi như là một tay máy dạng chuỗi (H. 4). Vì vậy, bài toán động học ngược tay robot song song n_i chân sẽ tương đương với bài toán động học ngược của n_i robot dạng chuỗi.



H. 4 Cấu trúc robot song song

Các phương trình ràng buộc trong bài toán động học robot song song nhận được có dạng sau:

$$\mathbf{f}_i(\mathbf{q}_i, \boldsymbol{\psi}_i) = \mathbf{l}_i(\mathbf{x}), \quad (16)$$

$\mathbf{l}_i, \mathbf{f}_i \in \mathbb{R}^{m_i}$, $\mathbf{q}_i \in \mathbb{R}^{n_i}$, $\boldsymbol{\psi}_i \in \mathbb{R}^{f_i - n_i}$, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^m$, với \mathbf{x} là véc tơ chứa vị trí và hướng của khâu tác động cuối (bàn máy động), \mathbf{q}_i là véc tơ chứa các biến khớp chủ động và $\boldsymbol{\psi}_i$ là véc tơ chứa các biến phụ trợ (các biến khớp bị động, không có dẫn động) của chân thứ i^{th} , f_i là số bậc tự do của chân thứ i và n_i là số khớp chủ động, ($f_i \geq m_i$).

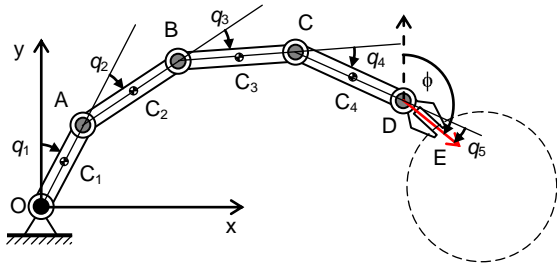
Áp dụng phương pháp đã nêu cho robot chuỗi, hệ các phương trình (16) sẽ được giải một cách tương tự như phương trình (1).

4. Mô phỏng số

Phần này trình bày kết quả mô phỏng số bằng Matlab đối với hai loại tay máy chuỗi và song song. Phương pháp xác định xấp xỉ ban đầu nhờ thuật giải di truyền được thể hiện qua hai ví dụ sau đây.

4.1 Ví dụ 1: Robot phẳng dư dẫn động 5RRRRR

Khảo sát một tay máy phẳng 5 khâu dẫn chuyển động trong mặt phẳng thẳng đứng (H. 5). Chiều dài các khâu và giới hạn các khớp được đưa ra như trong bảng 1.



H. 5 Tay máy phẳng 5 bậc tự do

Bảng 1. Các thông số của tay máy 5 khâu phẳng

Khâu	1	2	3	4	5
l [m]	0.55	0.50	0.45	0.40	0.20
q_M [rad]	0.8π	0.8π	0.8π	0.8π	0.8π
q_m [rad]	-0.8π	-0.8π	-0.8π	-0.8π	-0.8π

Kết quả của bài toán động học thuận cho ta phương trình

$$\mathbf{f}(\mathbf{q}, \mathbf{x}) = \mathbf{x} - \phi(\mathbf{q}) = 0 \quad (17)$$

với

$$\phi(\mathbf{q}) = \left[\sum_{k=1}^5 l_k \sin\left(\sum_{i=1}^k q_i\right), \sum_{k=1}^5 l_k \cos\left(\sum_{i=1}^k q_i\right), \sum_{i=1}^5 q_i \right]^T$$

ở đây $\mathbf{x} = [x, y, \phi]^T$ là véc tơ chứa vị trí (x, y) và hướng ϕ của bàn kẹp, $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3, q_4, q_5]^T$ là véc tơ chứa các góc khớp.

Bài toán đặt ra là cần tìm qui luật chuyển động của các biến khớp tương ứng với chuyển động cho trước của bàn kẹp. Trong mô phỏng này, bàn kẹp – khâu 5 – cần phải chuyển động với vận tốc $v = 0.3$ m/s dọc theo quỹ đạo tròn, trong khi hướng của bàn kẹp được giữ không đổi, $\phi = \pi/2$ rad. Quỹ đạo tròn có tâm tại $(x_c, y_c) = (0.9, 0.0)$ m và bán kính $R = 0.3$ m. Qui luật chuyển động của bàn kẹp được viết ở dạng giải tích như sau:

$$x = x_c + R \cos(vt/R)$$

$$y = y_c + R \sin(vt/R)$$

$$\phi = \pi/2$$

Để tìm các biến khớp ứng với vị trí ban đầu của bàn kẹp, ta đưa vào hàm mục tiêu là hàm bình phương khoảng cách có trọng số đến vị trí giữa của các khớp như sau:

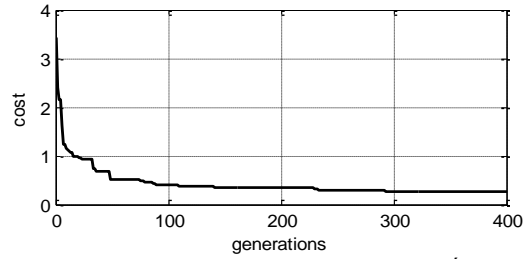
$$S(\mathbf{q}_0) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 c_i \left(\frac{q_i - \bar{q}_i}{q_{iM} - q_{im}} \right)^2 \rightarrow \min \quad (18)$$

với các trọng số được chọn $\mathbf{c} = [5 \ 4 \ 3 \ 2 \ 1]^T$.

Áp dụng thuật giải di truyền nêu trong phần trên ta nhận được điểm xuất phát như sau:

$q_0 =$	$e f = \mathbf{f}(\mathbf{q}_0, \mathbf{x}_0) = \mathbf{x}_0 - \phi(\mathbf{q}_0)$
0.88148	=
0.66653	0.004535
0.54628	-0.018671
-0.03986	-0.007370
-0.47626	

Trong quá trình thực hiện thuật giải di truyền, giá trị hàm mục tiêu nhỏ nhất sau mỗi thế hệ được đưa ra như trên đồ thị hình H. 6.

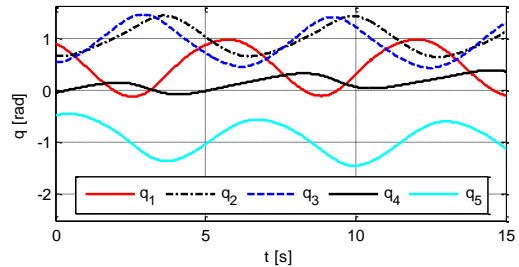


H. 6 Giá trị hàm mục tiêu theo các thế hệ

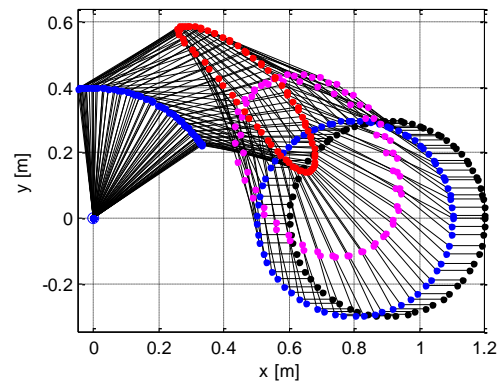
Từ xấp xỉ ban đầu nhận được bằng thuật giải di truyền, áp dụng phương pháp lặp Newton-Raphson cho ta giá trị của các biến khớp tại thời điểm đầu và sai số của vị trí bàn kẹp được đưa ra như sau:

$q_0 =$	$e f = \mathbf{f}(\mathbf{q}_0, \mathbf{x}_0) = \mathbf{x}_0 - \phi(\mathbf{q}_0)$
0.90667	=
0.66514	2.2204e-016
0.53389	1.8931e-016
-0.04978	-4.4409e-016
-0.48513	

Sử dụng sơ đồ tích phân ta nhận được qui luật chuyển động của các biến khớp như trên các hình H. 7. Cấu hình của tay máy được vẽ ra như trên hình H. 8



H. 7 Đồ thị theo thời gian các biến khớp



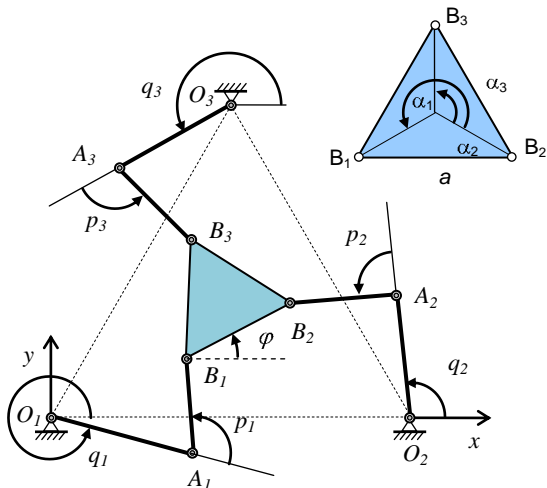
H. 8 Các cấu hình của tay máy

Nhận xét: các biến khớp nằm trong giới hạn của nó. Khâu cuối chạy theo đường tròn, với phương không đổi.

4.2 Ví dụ 2: Robot song song phẳng 3RRR

Trong phần này, một số mô phỏng với một tay máy song song phẳng 3-DOF trong đó di chuyển trong mặt phẳng ngang được thực hiện. Mô hình của robot và

các thông số của nó được hiển thị trong hình H. 9 17 và Bảng 2.



H. 9 Mô hình tay máy song song 3RRR

Bảng 2. Các thông số của tay máy song song 3RRR

		$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
Giá: $L_0 = 1.2$ [m]	x_{O_i} [m]	0	1.20	0.6000
	y_{O_i} [m]	0	0.00	1.0392
Chiều dài chân	$l_{i,1}$ [m]	0.582	0.582	0.582
	$l_{i,2}$ [m]	0.623	0.623	0.623
Bàn máy động	α_i [rad]	$\frac{4}{3}\pi$	0	$\frac{2}{3}\pi$
	a [m]	0.185		
Giới hạn trên	\mathbf{q}_M	2.0944	3.6652	0
Giới hạn dưới	\mathbf{q}_m	-1.0472	0.5236	-3.1416

Các phương trình ràng buộc cho các chân của robot được đưa ra như sau:

$$\begin{aligned} x_{O1} + l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + p_1) &= x_c + b \cos(\varphi + \alpha_1) \\ y_{O1} + l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + p_1) &= y_c + b \sin(\varphi + \alpha_1) \\ x_{O2} + l_1 \cos q_2 + l_2 \cos(q_2 + p_2) &= x_c + b \cos(\varphi + \alpha_2) \\ y_{O2} + l_1 \sin q_2 + l_2 \sin(q_2 + p_2) &= y_c + b \sin(\varphi + \alpha_2) \\ x_{O3} + l_1 \cos q_3 + l_2 \cos(q_3 + p_3) &= x_c + b \cos(\varphi + \alpha_3) \\ y_{O3} + l_1 \sin q_3 + l_2 \sin(q_3 + p_3) &= y_c + b \sin(\varphi + \alpha_3) \end{aligned}$$

hay ở dạng ngắn gọn:

$$\mathbf{f}(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \mathbf{x}) = \mathbf{0}.$$

Đối với mô hình này, các vectơ sau đây đã được sử dụng trong phần 3:

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3]^T, \mathbf{p} = [p_1, p_2, p_3]^T, \mathbf{x} = [x_c, y_c, \varphi]^T.$$

Trong các mô phỏng tâm của bàn máy động di chuyển với vận tốc $v = 0,6$ m / s dọc theo một quỹ đạo tròn, trong khi hướng của nó là hằng số, $\phi = 0$ rad. Quỹ đạo tròn có tâm $(x_c, y_c) = (\frac{1}{2} L_0, \frac{\sqrt{3}}{6} L_0)$ m và bán kính $R = 0,2$ m. Phương trình chuyển động của bàn máy động được cho như sau:

$$x = x_c + R \cos(vt / R)$$

$$y = y_c + R \sin(vt / R)$$

$$\phi = 0$$

Như thế của bàn máy động xuất phát từ vị trí:

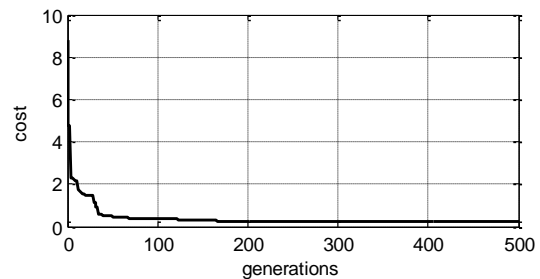
$$\mathbf{x}(0) = [x_c, y_c, 0]^T$$

Hàm mục tiêu đưa vào để tìm cực tiểu là

$$L(\mathbf{q}_0) = 20\mathbf{f}^T \mathbf{f} + S(\mathbf{q}_0) \rightarrow \min,$$

$$\text{với } S(\mathbf{q}_0) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \left(\frac{q_i - \bar{q}_i}{q_{im} - q_{im}} \right)^2.$$

Thực hiện mô phỏng với số cá thể trong quần thể là 60 và lặp sau 500 thế hệ ta nhận được các kết quả bao gồm: giá trị hàm mục tiêu (H. 10), điểm xấp xỉ ban đầu, giá trị của các phương trình liên kết như sau:



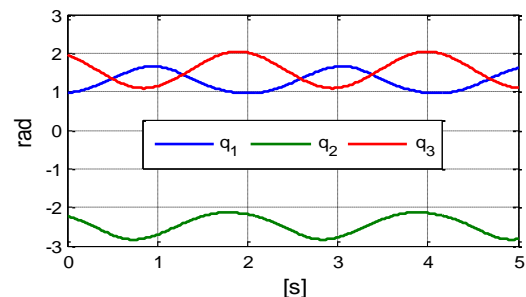
H. 10 Đồ thị hàm mục tiêu theo các thế hệ

$\mathbf{q}_0 =$	$ef = \mathbf{f}(\mathbf{q}_0, \mathbf{x}_0) =$
1.282	0.022088
1.1184	-3.2161e-5
-2.316	-0.014601
-1.7213	-0.0057181
2.412	0.007269
2.0553	-0.0023074

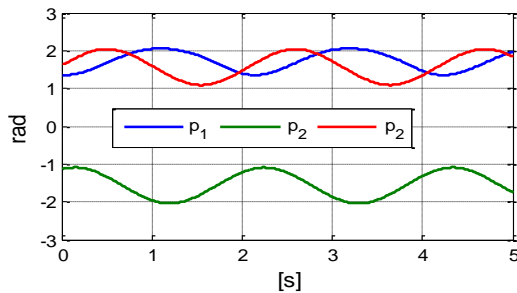
Để nhận được điểm xuất phát chính xác hơn, ta hiệu chỉnh các giá trị nhận được từ thuật giải di truyền nhờ phương pháp lặp Newton-Raphson và nhận được kết quả như sau:

$\mathbf{q}^p =$	$ef = \mathbf{f}(\mathbf{q}_0, \mathbf{x}_0) =$
1.3169	-4.1633e-017
1.0777	6.9389e-018
-2.3309	1.3878e-017
-1.7657	4.8572e-017
2.4242	-1.1756e-016
2.0642	-5.5511e-017

Sử dụng sơ đồ tích phân ta nhận được qui luật chuyển động của các góc khớp chủ động và các góc khớp phụ trợ như trên các hình H. 11 và H. 12.



H. 11 Đồ thị các góc dẫn động



H. 12 Đồ thị các góc phụ trợ

Nhận xét: các biến khớp chủ động nằm trong giới hạn của nó. Các đồ thị trên tuân hoàn tương ứng với chuyển động tịnh tiến tròn đều của bàn máy động.

5. Kết luận

Bài báo đã áp dụng thành công thuật giải di truyền trong việc tìm điều kiện đầu cho bài toán động học ngược tay máy chuỗi cũng như song song. Trước hết, bài toán động học ngược được giải ở cấp độ vận tốc, trong đó ma trận nghịch đảo và tựa nghịch đảo được áp dụng để tìm véc tơ vận tốc khớp. Sau đó chúng được tích phân với điều kiện đầu tương thích để nhận được véc tơ biến khớp. Hiệu quả của phương pháp đề xuất được thể hiện bằng các thí nghiệm số với các tay máy nối tiếp dư dẫn động và tay máy song song đủ dẫn động.

Tài liệu tham khảo

1. David A Coley: An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1997.
2. Holland, John. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Cambridge, MA: MIT Press, 1992.
3. Randy L. Haupt, Sue Ellen Haupt. Practical Genetic Algorithms, 2.Ed., John Wiley & Sons, Inc., 2004.
4. Nguyen Van Khang: *Dynamics of multibody systems*. Science and Technology Publishing House, Hanoi, 2007. (in Vietnamese)
5. M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar: *Robot Modeling and Control*. John Wiley & Sons, New York, 2006.
6. L. Sciavicco and B. Siciliano: *Modelling and Control of Robot Manipulators*, 2nd Edition, Springer-Verlag, London, UK, 2000.
7. R.M. Murray, Z. Li and S.S. Sastry: *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, Boca Raton, Fla., 1994.
8. J. Angeles: *Fundamentals of robotics Mechanical Systems* (2. Edition), Springer Verlag, New York, 2003.
9. Y. Nakamura: *Advanced Robotics/ Redundancy and Optimization*. Addison-Wesley Publishing Company, Reading 1991.
10. R. V. Patel and F. Shadpey: *Control of redundant robot manipulators*. Springer-Verlag, Berlin 2005.
11. Nguyen Van Khang, Do Anh Tuan, Nguyen Phong Dien, Tran Hoang Nam: Influence of Trajectories on the Joint Torques of kinematically Redundant

12. Nguyen Van Khang, Le Duc Dat, Tran Hoang Nam: On an algorithm for solving the inverse kinematics of serial manipulator. Proceedings of the 8th National Conf. on Mechanics, Vol. 1, pp. 250-259, Hanoi 2008 (in Vietnamese).
13. Nguyen Van Khang, Nguyen Quang Hoang, Le Duc Dat, Tran Hoang Nam. On an algorithm of sliding mode control of redundant manipulators. *Journal of Computer Science and Cybernetics*. Vol. 4, No. 3 (2008), pp. 269-280. (in Vietnamese).
14. Nguyen Van Khang, Nguyen Quang Hoang, Tran Hoang Nam: On an efficient method for improving the accuracy of the inverse kinematics of robotic manipulators. Int. Conference on Engineering Mechanics and Automation (ICEMA 2010), Hanoi, July 1-2, 2010, pp 186-194.
15. Nguyen Quang Hoang, Nguyen Van Khang: On kinematic inverse and control of redundant manipulators under consideration of jammed joint. Proceed. Iftomm 1. International Symposium on Robotics and Mechatronics, 2009, Hanoi, Vietnam, pp.201-207.
16. C. R. Rao and S. K. Mitra: *Generalized Inverse of Matrices and its Applications*, John Wiley & Sons New York, 1971.
17. T. Do Thanh, J. Kotlarski, B. Heimann and T. Ortmaier: A new Program to Automatically Generate the Kinematic and Dynamic Equations of General Parallel Robots in Symbolic Form. Proceed. Iftomm 1. International Symposium on Robotics and Mechatronics, 2009, Hanoi, Vietnam, pp. 122-128.
18. A.A. Shabana: *Dynamics of multibody systems*, 2nd Ed. Cambridge Uni. Press, 1998.
19. Nguyen Quang Hoang and Nguyen Van Khang: *On the influence of inverse kinematics algorithms on the driving moment of redundant serial and parallel manipulators*, in proceed. Int. Symposium on Dynamics and Control, pp. 258-272, Science and Technology Publishing House, Hanoi, 2012.



Nguyễn Quang Hoàng nhận bằng Kỹ sư ngành Cơ tin kỹ thuật, bằng Thạc sĩ ngành Cơ học kỹ thuật tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, (HUST); và bằng tiến sĩ Cơ học kỹ thuật (động lực học và điều khiển) tại Trường Đại học kỹ thuật Hamburg-Harburg (TUHH, CHLB Đức)

vào các năm 1997, 1999 và 2006. Từ 9/2012 đến 9/2013, anh làm nghiên cứu viên tại Khoa Cơ khí của Đại học Kyung Hee, Yongin, Hàn Quốc. Hiện anh là giảng viên tại Bộ môn Cơ học ứng dụng - Viện Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Hướng nghiên cứu chính là mô hình hóa, mô phỏng số và điều khiển các hệ động lực; động lực học hệ nhiều vật dư dẫn động, đủ dẫn động và hụt dẫn động.



Vũ Đức Vương nhận bằng Kỹ sư ngành Chế tạo máy, bằng thạc sĩ ngành Kỹ thuật Cơ khí tại trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp Thái Nguyên (TNUT) vào các năm 2009 và 2013. Hiện nay, anh là giảng viên tại Bộ môn Cơ điện tử - Khoa Điện tử, Trường Đại học

Kỹ thuật Công nghiệp Thái Nguyên. Hướng nghiên cứu chính là mô hình hóa, mô phỏng số và điều khiển các hệ động lực; động lực học hệ nhiều vật dư dẫn động, đu dẫn động và huyệt dẫn động.