

# Nghiên cứu cấu trúc động học của một tay máy công nghiệp dư dẫn động dạng chuỗi

- Vũ Minh Hùng
- Trịnh Quang Trung
- Võ Quốc Thắng

Trường Đại học Dầu khí Việt Nam (PVU)

(Bản nhận ngày 19 tháng 10 năm 2015, hoàn chỉnh sửa chữa ngày 17 tháng 03 năm 2016)

## TÓM TẮT

Bài báo này đề xuất một cấu trúc động học mới cho một tay máy công nghiệp dư dẫn động dạng chuỗi. Đây là một cơ cấu tay máy mới được phát triển dựa trên ý tưởng cải tiến rôbốt công nghiệp 6 trục IRB 2400 của ABB. Tay máy được đề xuất gồm 6 khớp quay và 2 khớp chuyển động tịnh tiến. Do có hai khớp quay bị phụ thuộc cơ khí với nhau làm cho hệ chỉ có 7 bậc tự do. Hai khớp tịnh tiến sẽ giúp cho cơ cấu tay máy có thể thu nhỏ hoặc phóng to cấu hình nhằm tạo ra một không gian làm việc linh hoạt. Bài báo thực hiện các phân tích động học thuận và ngược của cơ cấu tay máy. Động học thuận của tay máy được phân tích dựa trên lý thuyết Denavit-Hartenberg,

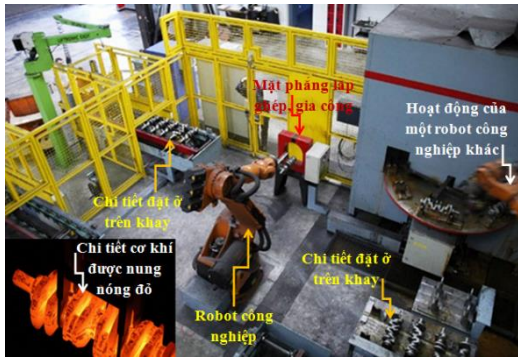
trong khi đó động học ngược được tính toán dựa trên một hàm tối ưu để tối thiểu hóa chuyển động của một khớp quay và hai khớp tịnh tiến nhằm tiết kiệm năng lượng và giữ cho cơ cấu tay máy hoạt động cứng chắc, an toàn. Phương pháp số Newton Raphson được ứng dụng để giải bài toán tối ưu này. Kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab đối với một quỹ đạo của tay máy trong hệ tọa độ Đề các tương ứng với các góc quay và độ dịch chuyển của các khớp trong hệ tọa độ suy rộng. Đây là một cơ cấu mới với rất nhiều tiềm năng ứng dụng, đặc biệt trong gia công lắp ghép cơ khí bằng phương pháp nhiệt.

**Từ khóa:** Tay máy dư dẫn động; Rôbốt dư dẫn động; Rôbốt 7 bậc tự do; tay máy 7 bậc tự do; động học ngược; động học robot chuỗi; phương pháp số Newton Raphson; rôbốt IRB 2400.

## 1. GIỚI THIỆU

Hiện nay trong thực tiễn sản xuất có rất nhiều đơn vị thực hiện việc gia công, chế tạo và lắp ghép cơ khí. Trong đó việc gia công lắp ghép các chi tiết kim loại bằng phương pháp nhiệt đang được sử dụng hiệu quả. Phương pháp này được thực hiện bằng cách nung nóng các chi tiết kim loại rồi gia công, ép chúng vào nhau bằng một lực ép mạnh. Hình 1 minh họa một ứng dụng của

phương pháp này. Ở đó các chi tiết cơ khí sẽ được nung nóng ở nhiệt độ cao và sau đó được robot gấp để ghép với một chi tiết khác đặt trên mặt phẳng vuông góc với mặt đất. Việc di chuyển chi tiết từ vị trí nung đến vị trí ghép thường tốn thời gian với nhiều công đoạn tháo lắp phức tạp dẫn đến làm giảm nhiệt độ của chi tiết và năng suất. Hơn nữa việc gá lắp các chi tiết thiếu



**Hình 1.** Một ứng dụng của robot trong gia công lắp ghép bằng phương pháp nhiệt

chính xác có thể dẫn đến lệch tâm và phá hỏng sản phẩm. Vì vậy đối với ứng dụng gia công lắp ghép bằng phương pháp nhiệt thường sử dụng các tay máy công nghiệp như robot sáu trục IRB 2400 của ABB. Tuy nhiên trong một số trường hợp đòi hỏi cấu hình robot và không gian làm việc linh hoạt hơn. Ví dụ như trong một phân xưởng sản xuất trên Hình 1, các chi tiết cơ khí được để trên những cái khay gần phạm vi hoạt động của robot sáu trục. Tuy nhiên do kích thước của các khâu trên robot là cố định nên không gian làm việc (tầm với của cánh tay robot) bị hạn chế. Vì thế đôi khi người vận hành phải dịch chuyển các chi tiết trên khay hoặc dịch chuyển khay để đưa chi tiết vào đúng không gian làm việc.

Vì thế tác giả đã nghiên cứu và đề xuất một cấu trúc tay máy công nghiệp phù hợp hơn với ứng dụng này. Cấu trúc động học của tay máy này được phát triển dựa trên ý tưởng cải tiến tay máy công nghiệp sáu trục IRB 2400 của ABB. Cấu trúc tay máy mới này sẽ có bảy bậc tự do và làm việc như một rôbốt công nghiệp để gắp chi tiết được nung nóng và gắp vào một chi tiết khác với độ chính xác cao và thời gian gắp lắp nhanh. Ngoài ra cơ cấu này cũng có thể được ứng dụng trong các lĩnh vực công nghiệp khác như đóng tàu, gia công cơ khí, lắp ráp máy móc và vận chuyển sản phẩm.

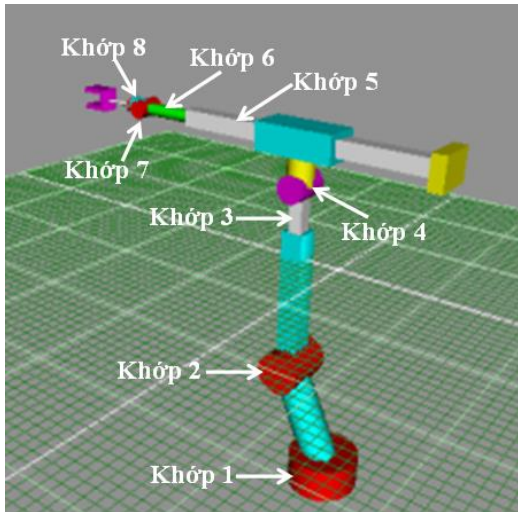
Đối với các cơ cấu dư bậc tự do thì động học ngược khó có thể tính được bằng các phương pháp thông thường vì số phương trình độc lập ít hơn số ẩn hoặc các phương trình lượng giác quá phức tạp. Vì thế phương pháp số thường được dùng để tìm nghiệm cho bài toán dạng này (theo [1-9]). Trong đó, lựa chọn hàm tối ưu là một vấn đề quan trọng liên quan đến quỹ đạo chuyển động của cơ cấu và tính tối ưu trong việc sử dụng năng lượng. Bài toán động học ngược là một mẫu chốt quan trọng để có thể mô phỏng chuyển động vị trí của cơ cấu. Do vậy các tác giả đặt trọng tâm vào việc giải bài toán động học ngược và mô phỏng chuyển động của cơ cấu trên phần mềm Matlab.

## 2. ĐỀ XUẤT MỘT CƠ CẤU TAY MÁY DƯ DẪN ĐỘNG MỚI

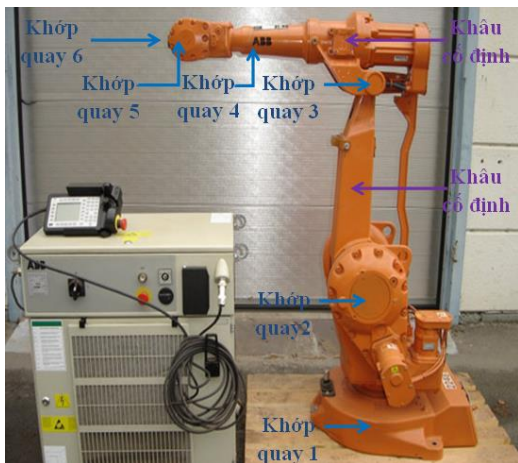
Hình 2 miêu tả một cơ cấu tay máy dạng chuỗi với 6 khớp quay (theo thứ tự là các khớp 1, 2, 4, 6, 7 và 8) và 2 khớp chuyển động tịnh tiến (khớp 3 và 5). Do các khớp quay 2, 4 bị phụ thuộc cơ khí với nhau làm cho hệ chỉ có 7 bậc tự do và giúp cho khớp 5 luôn song song với mặt đất để phù hợp với ứng dụng trong gia công lắp ghép bằng phương pháp nhiệt. Hai khớp tịnh tiến còn giúp cho cơ cấu có thể thu nhỏ hoặc phóng to cấu hình để tạo ra một không gian làm việc linh hoạt.

Cơ cấu robot trên Hình 2 được cải tiến từ robot IRB 2400 của ABB khi đưa vào thêm hai khớp chuyển động tịnh tiến số 3 và 5 để thay đổi chiều cao và chiều dài tay máy (robot IRB 2400 trên Hình 3 có 6 khớp quay và tất cả các khâu là cố định). Vì vậy cấu trúc động học trên Hình 2 sẽ giống với tay máy công nghiệp IRB 2400 (Hình 3) khi hai khớp tịnh tiến 3 và 5 được cố định, đồng thời không có ràng buộc giữa khớp 2 và 4

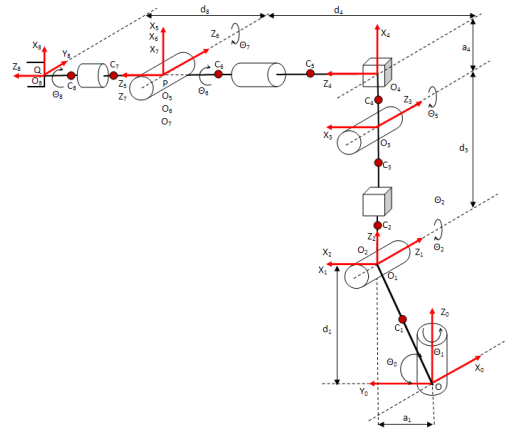
Hệ tọa độ của cơ cấu tay máy và các khớp cũng được thể hiện trên Hình 4. Khớp 1 chuyển động quanh



Hình 2. Một cấu trúc tay máy dư dẫn động mới



Hình 3. Robot IRB 2400 của ABB



Hình 4. Hệ tọa độ của cơ cấu tay máy dạng chuỗi 7 bậc tự do

một trục thẳng đứng  $Z_0$  với góc quay  $\theta_1$ , trong khi đó khâu 1 ( $OO_1$ ) nghiêng một góc  $\theta_0$  so với hình chiếu của nó xuống mặt phẳng đất. Khớp 2 quay quanh trục  $Z_1$  với góc quay  $\theta_2$  và khớp 3 dịch chuyển lên xuống dọc theo trục  $Z_2$  với độ dịch chuyển  $d_3$ . Riêng khớp 4 mặc dù vẫn quay quanh trục  $Z_3$  với góc quay  $\theta_5$  nhưng bị ràng buộc với khớp 2 sao cho  $\theta_5 + \theta_2 = \pi/2$  và khớp 5 dịch chuyển ngang theo trục  $Z_4$  với độ dịch chuyển  $d_4$ . Các khớp 6, 7, 8 lần lượt quay quanh các trục tương ứng với góc quay là  $\theta_6, \theta_7, \theta_8$ . Tên các góc quay được định nghĩa sao cho phù hợp với bảng tham số động học DH (Denavit Hartenberg) nên thứ tự có khác nhau.

### 3. NGHIÊN CỨU ĐỘNG HỌC THUẬN

Tham số động học DH của cơ cấu tay máy 7 bậc tự do được miêu tả cụ thể ở Bảng 1. trong đó,  $a_i$  là khoảng cách giữa hai trục  $Z$  (trục khớp);  $d_i$  là khoảng cách giữa hai trục khâu (trục  $X$ );  $\alpha_i$  là góc giữa các trục khớp đo từ trục khâu thứ  $Z_{i-1}$  tới  $Z_i$  theo hướng dương là trục  $X_i$ ;  $\theta_i$  là góc giữa hai trục khâu từ  $X_{i-1}$  tới  $X_i$  theo hướng dương là trục  $Z_{i-1}$ .

Từ đó có thể tìm được ma trận chuyển vị từ trục tọa độ thứ i đến trục tọa độ thứ i-1 là:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dựa theo cách chuyển này thì vị trí và hướng của khâu thao tác có thể được xác định từ các thành phần của ma trận sau:

$$T = {}^0A_8 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 {}^6A_7 {}^7A_8 = [u \ v \ w \ q; 0 \ 0 \ 0 \ 1] \quad (2)$$

Trong đó,  $u^T = [u_x \ u_y \ u_z]$ ,  $v^T = [v_x \ v_y \ v_z]$ ,  $w^T = [w_x \ w_y \ w_z]$  là các véc tơ xác định hướng và  $q^T = [q_x \ q_y \ q_z]$  là véc tơ xác định vị trí của khâu thao tác;

**Bảng 1.** Tham số DH của cơ cấu tay máy 7 bậc tự do

Khâu	$a_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$	Giá trị đầu
1	$a_1$ (0.22m)	$90^\circ$	$d_1$ (0.420m)	$\theta_1$	$90^\circ$
2	0	$-90^\circ$	0	$\theta_2$	0
3	0	$90^\circ$	$d_3$ (thay đổi)	0	1.025m
4	0	0	$d_4$ (thay đổi)	0	0.5645m
5	$a_4$ (0.207m)	$90^\circ$	0	$\theta_5 = 90^\circ - \theta_2$	$90^\circ$
6	0	$-90^\circ$	0	$\theta_6$	0
7	0	$90^\circ$	0	$\theta_7$	0
8	0	0	$d_8$ (0.018m)	$\theta_8$	0

$$u_x = -\cos\theta_1 \sin\theta_7 \cos\theta_8 + \sin\theta_1 (\sin\theta_6 \cos\theta_7 \cos\theta_8 + \cos\theta_6 \sin\theta_8) \quad (3)$$

$$u_y = -\sin\theta_1 \sin\theta_7 \cos\theta_8 - \cos\theta_1 (\sin\theta_6 \cos\theta_7 \cos\theta_8 + \cos\theta_6 \sin\theta_8) \quad (4)$$

$$u_z = \cos\theta_6 \cos\theta_7 \cos\theta_8 - \sin\theta_6 \sin\theta_8 \quad (5)$$

$$v_x = \cos\theta_1 \sin\theta_7 \sin\theta_8 + \sin\theta_1 (-\sin\theta_6 \cos\theta_7 \sin\theta_8 + \cos\theta_6 \cos\theta_8) \quad (6)$$

$$v_y = \sin\theta_1 \sin\theta_7 \sin\theta_8 - \cos\theta_1 (-\sin\theta_6 \cos\theta_7 \sin\theta_8 + \cos\theta_6 \cos\theta_8) \quad (7)$$

$$v_z = -\cos\theta_6 \cos\theta_7 \sin\theta_8 - \sin\theta_6 \cos\theta_8 \quad (8)$$

$$w_x = \cos\theta_1 \cos\theta_7 + \sin\theta_1 \sin\theta_6 \sin\theta_7 \quad (9)$$

$$w_y = \sin\theta_1 \cos\theta_7 - \cos\theta_1 \sin\theta_6 \sin\theta_7 \quad (10)$$

$$w_z = \cos\theta_6 \sin\theta_7 \quad (11)$$

$$q_x = \cos\theta_1 (a_1 - d_3 \sin\theta_2 + d_4 + d_8 \cos\theta_7) + d_8 \sin\theta_1 \sin\theta_6 \sin\theta_7 \quad (12)$$

$$q_y = \sin\theta_1 (a_1 - d_3 \sin\theta_2 + d_4 + d_8 \cos\theta_7) - d_8 \cos\theta_1 \sin\theta_6 \sin\theta_7 \quad (13)$$

$$q_z = d_1 + d_3 \cos\theta_2 + a_4 + d_8 \cos\theta_6 \sin\theta_7 \quad (14)$$

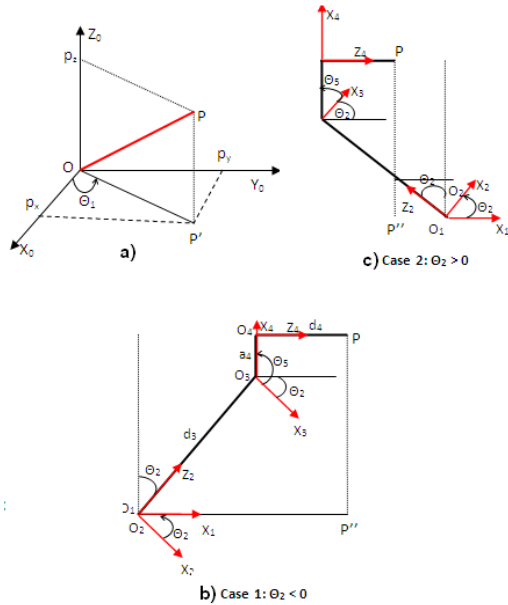
#### 4. NGHIÊN CỨU ĐỘNG HỌC NGƯỢC

Trong vấn đề động học ngược thì vị trí và hướng của khâu thao tác sẽ được cho trước để tính toán vị trí của các khớp (góc quay đối với khớp quay và độ dịch chuyển đối với khớp tịnh tiến). Đối với cơ cấu 7 bậc tự do này thì các véc tơ chỉ hướng  $u$ ,  $v$ ,  $w$  và véc tơ vị trí  $q$  của khâu thao tác được cho để tìm năm góc quay  $\theta_1, \theta_2, \theta_6, \theta_7, \theta_8$  (do ràng buộc cơ khí nên  $\theta_5 = \pi/2 - \theta_2$ ) và hai khớp tịnh tiến  $d_3, d_4$ .

Đây là một cơ cấu dư dẫn động 7 bậc tự do nên việc tìm vị trí các khớp bằng phương pháp thông thường là rất khó khăn. Giải pháp được đề xuất ở đây là tìm vị trí của một số khớp dựa vào biến đổi phương trình động học nếu có thể, sau đó sử dụng phương pháp số với các hàm ràng buộc phù hợp để tìm vị trí các khớp còn lại.

Đầu tiên vị trí của điểm P (được gọi là điểm tâm cổ tay) có thể được tính như sau,

$$P^T = [p_x \quad p_y \quad p_z] = [q_x - d_8 w_x \quad q_y - d_8 w_y \quad q_z - d_8 w_z] \quad (15)$$



**Hình 5.** Vị trí điểm P trong mặt phẳng đứng

Từ Hình 5 ở trên thì góc quay của khớp 1 có thể dễ dàng tìm được như sau:

$$\theta_1 = \tan^{-1}(p_y / p_x) \quad (16)$$

Cũng từ Hình 3 dẫn đến quan hệ  $p_z = d_1 + d_3 \cos \theta_2 + a_4$  và

$\sqrt{p_x^2 + p_y^2} = a_1 - d_3 \sin \theta_2 + d_4$ . Từ đó có thể tìm được  $\cos \theta_2 = (p_z - d_1 - a_4) / d_3$  và

$\sin \theta_2 = (a_1 + d_4 - \sqrt{p_x^2 + p_y^2}) / d_3$ . Như vậy góc quay của khớp 2 có thể tính được như sau:

$$\theta_2 = a \tan 2(\sin \theta_2, \cos \theta_2) \quad (17)$$

Do có ràng buộc để khớp tịnh tiến  $d_4$  luôn chuyển động theo phương ngang song song với mặt đất nên góc quay của khớp 5,

$$\theta_5 = \pi / 2 - \theta_2, \quad \pi = 3.14 \quad (18)$$

Tiếp theo nhân hai vế của phương trình (7) với  $\cos \theta_1$  và phương trình (8)  $\sin \theta_1$  rồi cộng lại để được quan hệ sau:  $w_x \cos \theta_1 + w_y \sin \theta_1 = \cos \theta_7$ .

Từ đó tìm được góc quay của khớp 7,

$$\theta_7 = \pm a \cos(w_x \cos \theta_1 + w_y \sin \theta_1) \quad (19)$$

Do có hai nghiệm bằng nhau về độ lớn nhưng khác dấu nên việc lựa chọn giá trị nào phụ thuộc vào điều kiện đầu và giá trị góc quay trước đó. Tương tự cũng từ phương trình (9) và (10) dẫn đến quan hệ sau,  $\sin \theta_6 = (w_x \sin \theta_1 - w_y \cos \theta_1) / \sin \theta_7$ .

Mặt khác từ phương trình (11) tìm được,  $\cos \theta_6 = w_x / \sin \theta_7$ . Do vậy góc quay của khớp 6 là,

$$\theta_6 = a \tan 2(\sin \theta_6, \cos \theta_6) \quad (20)$$

Góc quay khớp 8 gắn với khâu thao thác cũng có thể được tính thông qua các phương trình động học ở trên. Từ phương trình (3) và (4) dẫn đến  $\cos \theta_8 = -(u_x \cos \theta_1 + u_y \sin \theta_1) / \sin \theta_7$  và từ (6) and (7) dẫn đến  $\sin \theta_8 = (v_x \cos \theta_1 + v_y \sin \theta_1) / \sin \theta_7$ . Cuối cùng góc quay của khớp 8 được tính bằng một công thức lượng giác đơn giản như sau,

$$\theta_8 = a \tan 2(\sin \theta_8, \cos \theta_8) \quad (21)$$

Như vậy là thông qua biến đổi toán học các phương trình động học, các góc quay  $\theta_1, \theta_6, \theta_7, \theta_8$  có thể được xác định. Vị trí của các khớp còn lại,  $\theta_2, d_3, d_4$  có thể tìm được bằng phương pháp số. Trong rất nhiều phương pháp thì phương pháp số Newton Raghson đã được sử dụng phổ biến để tìm nghiệm các phương trình phi tuyến.

Vị trí các khớp cần tối ưu,  $\theta_2, d_3, d_4$  được xem xét trong một miền xác định phụ thuộc vào không gian làm việc thực tế của cơ cấu tay máy. Ở đây có thể giả sử  $\theta_2 \in [\theta_{2min}, \theta_{2max}]$ ,  $d_3 \in [d_{3min}, d_{3max}]$ ,  $d_4 \in [d_{4min}, d_{4max}]$ , trong đó chỉ số *min* và *max* thể hiện giá trị nhỏ nhất và lớn nhất của miền xác định đó.

Giả sử vị trí ban đầu của các khớp được cho như sau,  $\theta_2 = \theta_{20}, d_3 = d_{30}, d_4 = d_{40}$ . Đây là vị trí mà cơ cấu tay máy dịch chuyển các bước đầu tiên và hàm tối ưu được định nghĩa sao cho sự dịch chuyển của các khớp chính  $\theta_2, d_3, d_4$  là ít nhất. Việc này cũng dẫn đến tiêu hao năng lượng của cơ cấu được tối thiểu hóa. Như vậy hàm tối ưu được định nghĩa là,

$$f = (\theta_2 - \theta_{20})^2 + (d_3 - d_{30})^2 + (d_4 - d_{40})^2 \quad (22)$$

Hàm ràng buộc được lựa chọn sao cho có sự xuất hiện của đầy đủ 3 biến  $\theta_2, d_3, d_4$  và thể hiện được quan hệ chính giữa các khớp. Như vậy hàm ràng buộc được lựa chọn như sau,

$$\begin{aligned} g_1 &= d_1 + d_3 \cos \theta_2 + a_4 - p_z \\ g_2 &= a_1 - d_3 \sin \theta_2 + d_4 - \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \end{aligned} \quad (23)$$

Phương trình Lagrange được định nghĩa dựa trên hàm tối ưu và hàm ràng buộc như sau,

$$\begin{aligned} L &= f + \lambda_1 g_1 + \lambda_2 g_2 \\ &= (\theta_2 - \theta_{20})^2 + (d_3 - d_{30})^2 + (d_4 - d_{40})^2 + \\ &\quad \lambda_1 (d_1 + d_3 \cos \theta_2 + a_4 - p_z) + \\ &\quad \lambda_2 (a_1 - d_3 \sin \theta_2 + d_4 - \sqrt{p_x^2 + p_y^2}) \end{aligned} \quad (24)$$

trong đó,  $\lambda_1, \lambda_2$  là các nhân tử Lagrange và cũng đóng vai trò là các biến được xem xét. Lấy đạo hàm phương trình Lagrange theo năm biến  $\theta_2, d_3, d_4, \lambda_1, \lambda_2$  thu được năm hàm phi tuyến sau,

$$f_1 = \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = 2\theta_2 - \lambda_1 d_3 \sin \theta_2 - \lambda_2 d_3 \cos \theta_2 \quad (25)$$

$$f_2 = \frac{\partial L}{\partial d_3} = 2d_3 - 2.108 + \lambda_1 \cos \theta_2 - \lambda_2 \sin \theta_2 \quad (26)$$

$$f_3 = \frac{\partial L}{\partial d_4} = 2d_4 - 2d_{40} + \lambda_2 \quad (27)$$

$$f_4 = \frac{\partial L}{\partial \lambda_1} = d_1 + d_3 \cos \theta_2 + a_4 - p_z \quad (28)$$

$$f_5 = \frac{\partial L}{\partial \lambda_2} = a_1 - d_3 \sin \theta_2 + d_4 - \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (29)$$

Lấy đạo hàm của năm hàm phi tuyến  $f_i, i = 1, \dots, 5$  theo năm biến  $\theta_2, d_3, d_4, \lambda_1, \lambda_2$  để thu được ma trận đạo hàm riêng như sau:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_1}{\partial d_3} & \frac{\partial f_1}{\partial d_4} & \frac{\partial f_1}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \lambda_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_2}{\partial d_3} & \frac{\partial f_2}{\partial d_4} & \frac{\partial f_2}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \lambda_2} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_3}{\partial d_3} & \frac{\partial f_3}{\partial d_4} & \frac{\partial f_3}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial f_3}{\partial \lambda_2} \\ \frac{\partial f_4}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_4}{\partial d_3} & \frac{\partial f_4}{\partial d_4} & \frac{\partial f_4}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial f_4}{\partial \lambda_2} \\ \frac{\partial f_5}{\partial \theta_2} & \frac{\partial f_5}{\partial d_3} & \frac{\partial f_5}{\partial d_4} & \frac{\partial f_5}{\partial \lambda_1} & \frac{\partial f_5}{\partial \lambda_2} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Như vậy nghiệm tối ưu được tìm là:

$$X^{i+1} = X^i - J^{-1} F^i, \quad i = 0, \dots, n \quad (31)$$

trong đó,  $i = 0$  tương ứng với giá trị ban đầu của các biến,  $i = n$  tương ứng với giá trị nghiệm tối ưu,  $X^{i+1} = [\theta_2^{i+1} \quad d_3^{i+1} \quad d_4^{i+1} \quad \lambda_1^{i+1} \quad \lambda_2^{i+1}]^T$ ,

$$X^i = [\theta_2^i \quad d_3^i \quad d_4^i \quad \lambda_1^i \quad \lambda_2^i]^T \quad \text{và}$$

$F^i = [f_1^i \quad f_2^i \quad f_3^i \quad f_4^i \quad f_5^i]^T$ . Giá trị  $n$  được xác định khi nào nghiệm hội tụ, có nghĩa là sai lệch giữa nghiệm hiện tại và trước đó nhỏ tới mức có thể chấp nhận được, cụ thể như sau,

$$\varepsilon[k] = (X^{i+1}[k] - X^i[k]) / X^{i+1}[k] \quad (32)$$

trong đó,  $k = 1, 2, \dots, 5$  là chỉ số đại diện cho các biến  $\theta_2, d_3, d_4, \lambda_1, \lambda_2$  và  $\varepsilon[k]$  là một giá trị được tính để so sánh với một giá trị  $\varepsilon_0$  đặt trước. Nghiệm sẽ được xác định khi  $|\varepsilon| < \varepsilon_0$ .

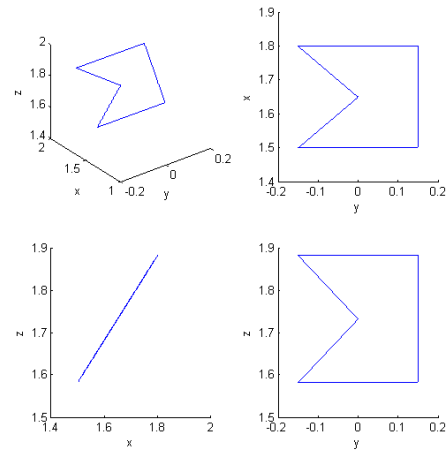
Các giá trị ban đầu  $X^0 = [\theta_2^0 \ d_3^0 \ d_4^0 \ \lambda_1^0 \ \lambda_2^0]^T$  thường được chọn sao cho vị trí các khớp  $\theta_2, d_3, d_4$  trùng với cấu hình mặc định của cơ cấu tay máy.

**5. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG**

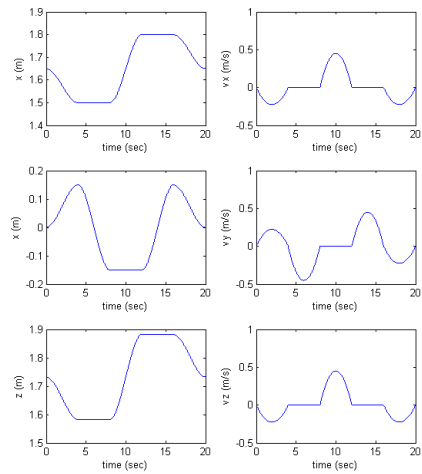
Để kiểm chứng các kết quả phân tích động học ngược ở trên, trước tiên tác giả tạo ra một quỹ đạo trong hệ tọa độ không gian Đề các với ba thành phần vị trí và ba góc quay  $\sigma$  le. Sau đó sử dụng kết quả phân tích động học ngược để tìm tám vị trí của các khớp trong hệ tọa độ suy rộng (hệ tọa độ khớp). Quỹ đạo của cơ cấu tay máy trong hệ tọa độ Đề các được hiểu là quỹ đạo của điểm làm việc trên khâu thao tác (*end effector*) hay còn được gọi là tâm kẹp.

Hình 6 minh họa quỹ đạo chuyển động của tâm kẹp trong hệ tọa độ Đề các sao cho hướng của khâu thao tác luôn vuông góc với mặt phẳng quỹ đạo. Vị trí và vận tốc của tâm kẹp theo ba trục tọa độ x, y, z cũng được thể hiện trên Hình 7. Như vậy tại mỗi vị trí trên quy đạo chuyển động của tâm kẹp sẽ xác định được một ma trận T ở phương trình (2) với các thành phần chỉ hướng là  $u^T = [u_x \ u_y \ u_z]$ ,  $v^T = [v_x \ v_y \ v_z]$ ,  $w^T = [w_x \ w_y \ w_z]$  và vị trí là  $q^T = [q_x \ q_y \ q_z]$ . Từ đó có thể tìm góc của các khớp quay ( $\theta_1, \theta_2, \theta_6, \theta_7, \theta_8, \theta_5 = \pi/2 - \theta_2$ ) và độ dịch chuyển của các khớp tịnh tiến ( $d_3, d_4$ ) bằng các phương trình động học ngược đã trình bày ở trên. Kết quả mô phỏng vị trí và vận tốc của các khớp được thể hiện ở trên hình 8 và 9 với các ghi chú:

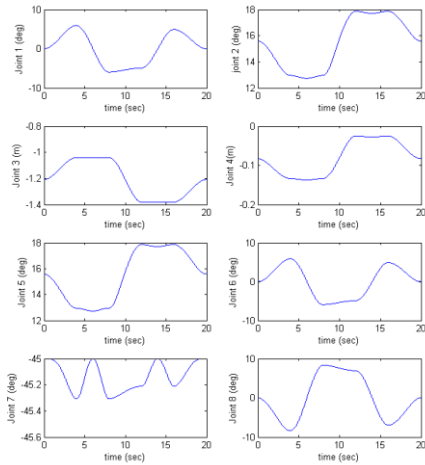
*joint 1, joint 2, joint 3, joint 4, joint 5, joint 6, joint 7* và *joint 8* tương ứng với  $\theta_1, \theta_2, d_3, \theta_5, d_4, \theta_6, \theta_7, \theta_8$ . Bằng việc kiểm tra một số điểm đặc biệt có thể thấy rằng kết quả mô phỏng vị trí và vận tốc của các khớp rất hợp lý với quỹ đạo trong hệ tọa độ Đề các.



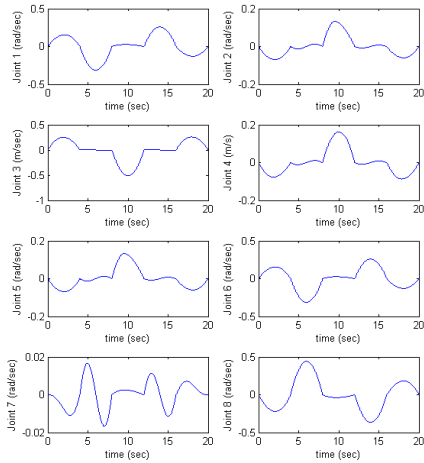
**Hình 6.** Quỹ đạo chuyển động của tâm kẹp trên khâu thao tác trong hệ tọa độ Đề các



**Hình 7.** Vị trí và vận tốc theo 3 trục tọa độ Đề các của tâm kẹp trên khâu thao tác



**Hình 8.** Vị trí của 8 khớp (6 quay và 2 tịnh tiến) trong hệ tọa độ suy rộng



**Hình 9.** Vận tốc của 8 khớp (6 quay và 2 tịnh tiến) trong hệ tọa độ suy rộng

Hơn nữa, mô phỏng cũng chỉ ra rằng khớp 2 ( $\theta_2$ ) có góc quay nhỏ. Xét về mặt động lực học thì đây là khớp chịu tác dụng của trọng lực lớn nhất nên động cơ điện gắn vào điều khiển khớp này sẽ cần một giá trị mô men lớn nhất. Vì thế việc tối thiểu hóa chuyển động của khớp 2 sẽ không những tiết kiệm năng lượng mà còn đảm bảo độ an toàn cho cơ cấu tay máy.

## 6. KẾT LUẬN

Bài báo này đã trình bày một nghiên cứu về tay máy dạng chuỗi 7 bậc tự do có cấu hình linh hoạt. Đây là một cấu trúc động học mới được phát triển dựa trên rôbot IRB 2400 của ABB. Cấu trúc mới này có hai khớp chuyển động tịnh tiến và sáu khớp quay nhưng do có ràng buộc cơ khí để một phần của tay máy hoạt động song song với mặt đất để phù hợp với ứng dụng gia công lắp ghép cơ khí bằng phương pháp nhiệt. Với hai khớp chuyển động tịnh tiến giúp cho tay máy không những nâng chiều cao dễ dàng mà có thể kéo dài để mở rộng cũng như thu hẹp không gian làm việc. Vì thế đây là một cấu hình rất linh hoạt có thể được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực công nghiệp, đặc biệt là lắp ghép cơ khí bằng phương pháp nhiệt.

Hơn nữa bài báo đã đưa ra một hàm tối ưu dựa trên việc tối thiểu hóa chuyển động của một khớp quay chính (khớp 2) và hai khớp tịnh tiến để giải bài toán động học ngược. Phương pháp số Newton Raphson được sử dụng để giải bài toán tối ưu này. Kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab đã chỉ ra rằng tất cả các nghiệm (vị trí khớp quay và tịnh tiến) đều phù hợp với quỹ đạo chuyển động của khâu thao tác. Việc tối thiểu hóa chuyển động của khớp 2 và các khớp tịnh tiến giúp cho tay máy tiết kiệm năng lượng trong hoạt động và đảm bảo độ an toàn, cứng chắc của cơ cấu.

Tuy nhiên bài báo này mới chỉ giải quyết được các vấn đề động học thuận và ngược. Một vấn đề quan trọng khác là phân tích động lực học để tìm mô men và lực của các khớp, từ đó có căn cứ để lựa chọn động cơ điện cho phù hợp và mô phỏng hệ điều khiển.



# Research on kinematic structure of a redundant serial industrial robot arm

- Vu Minh Hung
- Trinh Quang Trung
- Vo Quoc Thang

PetroVietnam University (PVU)

## ABSTRACT

*This paper proposes a new kinematic structure of a redundant serial robot arm and presents forward and inverse kinematic analysis. This is a new structure developed based on the robot IRB 2400 of ABB. The new structure consists of six revolute joints and two prismatic joints. The proposed robot arm has only seven degrees of freedom because the structure has a constraint between two revolute joints. Two prismatic joints help to expand workspaces of*

*manipulator from small to very large. The paper describes in details about forward and inverse kinematics. Forward kinematics is derived based on DH Convention while inverse kinematics is calculated based on an objective function to minimize motions of a revolute joint and two prismatic joints. The simulation results on Matlab software indicated that the joint positions and velocities of a redundant serial robot arm matched well the trajectories in Cartesian Space.*

**Key Words:** Redundant serial robot; redundant arm; redundant manipulator; kinematics of redundant robot; inverse kinematics; kinematic structure.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Sichen Yuan, Haiqing Zhang, Nei Wang and Nan luan, "Motion study of a redundant 7-DOF operation robot", *International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE)*, pp.3056 – 3060, 6-18 Sept. 2011.
- [2] Jayoung Kim, Minyoung Sin and Jihong Lee, "Kinematics analysis and motion planning for a 7-DOF redundant industrial robot manipulator", *11th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 522 – 527, 26-29 Oct. 2011.
- [3] Klanke, Lebedev, Haschke, Steil, Ritter, "Dynamic Path Planning for a 7-DOF Robot Arm", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3879 – 3884, 9-15 Oct. 2006.
- [4] Kircanski, M.V.; Petrovic, T.M., "Inverse kinematic solution for a 7 DOF robot with minimal computational complexity and singularity avoidance", *IEEE International*

- Conference on Robotics and Automation*, pp. 2664 - 2669 vol.3, 9-11 Apr 1991.
- [5] Tie-jun Zhao; Jing Yuan; Ming-yang Zhao; Da-long Tan, “Research on the Kinematics and Dynamics of a 7-DOF Arm of Humanoid Robot”, *ROBIO '06. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1553 – 1558, 17-20 Dec. 2006.
- [6] An, H.H.; Clement, W.I.; Reed, B., “Analytical inverse kinematic solution with self-motion constraint for the 7-DOF restore robot arm”, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 1325 – 1330, 8-11 July 2014.
- [7] Sariyildiz, E.; Ucak, K.; Oke, G.; Temeltas, Hakan; Ohnishi, K., “Support Vector Regression based inverse kinematic modeling for a 7-DOF redundant robot arm”, *International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, pp. 1 – 5, 2-4 July 2012.
- [8] Tarokh, M.; Mikyung Kim, “Inverse Kinematics of 7-DOF Robots and Limbs by Decomposition and Approximation”, *IEEE Transactions on Robotics*, pp. 595 – 600, Vol. 23 , No. 3, 2007.
- [9] Trần Hoàng Nam, “Giải bài toán ngược động học, động lực học và điều khiển trượt rôbot dư dẫn động dựa trên thuật toán hiệu chỉnh gia lượng véc tơ tọa độ suy rộng”, *Luận án tiến sỹ*, Viện Cơ học, 2010.