

**LIÊN NGÀNH ĐIỆN - ĐIỆN TỬ - TỰ ĐỘNG HÓA**

Phân tích động học ngược cho tay máy robot hàn 6 bậc tự do	5	Dương Văn Toàn Ninh Nguyễn Tấn Tại Nguyễn Văn Cường Nguyễn Trọng Các
Điều khiển bền vững thích nghi trên cơ sở mờ Neron điều khiển cho tay máy robot	13	Nguyễn Phương Ty Vũ Thị Yến Nguyễn Thị Thảo Nguyễn Thị Phương
Điều khiển truyền động động cơ không đồng bộ ba pha theo phương pháp tựa theo vectơ từ thông rôto (foc)	20	Phạm Văn Tuấn Hoàng Thị Phượng Đặng Văn Tuệ

**LIÊN NGÀNH CƠ KHÍ - ĐỘNG LỰC**

Nghiên cứu đặc tính tốc độ của động cơ diesel hiện đại	28	Vũ Thành Trung Ngô Thị Mỹ Bình
Nghiên cứu ảnh hưởng của tốc độ đến khả năng hồi phục mòn của phụ gia nano $TiO_2$ trong dầu bôi trơn	34	Nguyễn Đình Cường
Nghiên cứu sự ảnh hưởng của phương pháp lấy mẫu đến chất lượng của phương pháp Monte Carlo	40	Đào Đức Thụ
Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ miết ép đến ứng suất dư của chi tiết máy	45	Nguyễn Văn Hình

**NGÀNH TOÁN HỌC**

Điều kiện đủ tối ưu cho bài toán điều khiển tối ưu của hệ phương trình g-Navier-Stokes hai chiều	51	Nguyễn Viết Tuấn Lưu Trọng Đại Lê Thị Liễu
--	----	--

**NGÀNH KINH TẾ**

Giải pháp nâng cao hiệu quả thực thi các công cụ chính sách tiền tệ trong giai đoạn hiện nay	58	Nguyễn Thị Quỳnh Vũ Thị Lý
Nguồn nhân lực Việt Nam - góc nhìn từ thực trạng giáo dục phổ thông	67	Phạm Thị Hồng Hoa Nguyễn Thị Tình

**TẠP CHÍ**  
**NGHIÊN CỨU KHOA HỌC**  
**ĐẠI HỌC SAO ĐỎ**

**TRONG SỐ NÀY**  
**SỐ 1(76) 2022**

**NGÀNH KINH TẾ**

- Tác động của đại dịch COVID-19 đến hoạt động sản xuất kinh doanh và báo cáo tài chính của doanh nghiệp 76 Đinh Thị Kim Thiết
- Các nhân tố ảnh hưởng đến thu nhập của các hộ trồng chè: Nghiên cứu trường hợp tỉnh Thái Nguyên, Việt Nam 84 Trần Thị Quý Chinh  
Nguyễn Thị Ngọc Mai

**NGÀNH GIÁO DỤC HỌC**

- Áp dụng các hoạt động ngoại khóa trong dạy học Tiếng Anh nhằm nâng cao kỹ năng giao tiếp cho sinh viên Trường Đại học Sao Đỏ 92 Vũ Thị Lương  
Trịnh Thị Chuyên

**LIÊN NGÀNH TRIẾT HỌC - XÃ HỘI HỌC - CHÍNH TRỊ HỌC**

- Giảng dạy Triết học Mác - Lênin trong bối cảnh Cách mạng công nghiệp 4.0 100 Nguyễn Thị Nhan
- Tư tưởng Hồ Chí Minh về xây dựng Đảng và sự vận dụng của Đảng bộ thành phố Chí Linh hiện nay 106 Phạm Xuân Đức
- Xây dựng và phát triển con người theo tinh thần Đại hội XIII của Đảng - liên hệ trong giảng dạy học phần Triết học Mác - Lênin tại Trường Đại học Sao Đỏ 113 Đỗ Thị Thùy  
Đặng Thị Dung
- Tác động của chính sách an sinh xã hội đến lao động và việc làm trong đại dịch COVID-19 tại Việt Nam 120 Nguyễn Minh Tuấn  
Phạm Xuân Đức

**TITLE FOR ELECTRICITY - ELECTRONICS - AUTOMATION**

Inverse kinematics analysis of six degrees of freedom of a welding robot arm	5	Duong Van Toan Ninh Nguyen Tan Tai Nguyen Van Cuong Nguyen Trong Cac
Adaptive robust control based on fuzzy neural network control robot manipulator	13	Nguyen Phuong Ty Vu Thi Yen Nguyen Thi Thao Nguyen Thi Phuong
The controlling methods for three-phase asynchronous mô tơ models based on foc roto	20	Pham Van Tuan Hoang Thi Phuong Dang Van Tue

**TITLE FOR MECHANICAL AND DRIVING POWER ENGINEERING**

Research on performance characteristics of modern diesel engine	28	Vu Thanh Trung Ngo Thi My Binh
Research influence of speed on self-repair of TiO <sub>2</sub> nanoparticles as lubricating	34	Nguyen Dinh Cuong
Study on the effects of sampling method on the quality of Monte Carlo method	40	Dao Duc Thu
Research on the influence of mode oscillating smoothing on the residual stresses of machine parts	45	Nguyen Van Hinh

**TITLE FOR MATHEMATICS**

Sufficient optimality conditions for the optimal control problem of 2D g-Navier-Stokes equations	51	Nguyen Viet Tuan Luu Trong Dai Le Thi Lieu
--	----	--

**TITLE FOR ECONOMICS**

Solutions to improve the effectiveness of monetary policy tools in the current period	58	Nguyen Thi Quynh Vu Thi Ly
Vietnam's human resources in terms of achievement in general education	67	Pham Thi Hong Hoa Nguyen Thi Tinh

**TITLE FOR ECONOMICS**

- |   |    |   |
|---|----|---|
| The impact of the COVID-19 pandemic on enterprises's business activities and presentation of financial statements | 76 | Dinh Thi Kim Thiet                        |
| Factors Affecting to Tea-growing Household's Income: A Case Study in Thai Nguyen Province                         | 84 | Tran Thi Quy Chinh<br>Nguyen Thi Ngoc Mai |

**TITLE FOR STUDY OF EDUCATION**

- |   |    |                                  |
|---|----|----------------------------------|
| Applying extracurricular activities in teaching English to improve communication ability for Sao Do University's students | 92 | Vu Thi Luong<br>Trinh Thi Chuyen |
|---|----|----------------------------------|

**TITLE FOR PHILOSOPHY - SOCIOLOGY - POLITICAL SCIENCE**

- |  |     |                                   |
|--|-----|-----------------------------------|
| Teaching Marxist-Leninist Philosophy in the context of Industrial Revolution 4.0   | 100 | Nguyen Thi Nhan                   |
| Ho Chi Minh's thought on Party building and the application of the Party Committee of Chi Linh City today  | 106 | Pham Xuan Duc                     |
| Teaching the Marxist-Leninist Philosophy module at Sao Do University on human construction and development in the light of the XIII Party Congress | 113 | Do Thi Thuy<br>Dang Thi Dung      |
| Impacts of social security policies on labor and employment during the COVID-19 pandemic in Vietnam  | 120 | Nguyen Minh Tuan<br>Pham Xuan Duc |

# Phân tích động học ngược cho tay máy robot hàn 6 bậc tự do

## Inverse kinematics analysis of six degrees of freedom of a welding robot arm

Dương Văn Toàn Ninh<sup>1</sup>, Nguyễn Tấn Tại<sup>1</sup>, Nguyễn Văn Cường<sup>2</sup>, Nguyễn Trọng Các<sup>3</sup>

Email: toanninh@gmail.com

<sup>1</sup>Trường Cao đẳng Kỹ nghệ Dung Quất, Quảng Ngãi

<sup>2</sup>Trường Đại học Công nghiệp TP. HCM

<sup>3</sup>Trường Đại học Sao Đỏ

Ngày nhận bài: 05/01/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 21/3/2022

Ngày chấp nhận đăng: 31/3/2022

### Tóm tắt

Bài báo sử dụng phương pháp giải tổng quát cho bài toán động học ngược của tay máy robot 6 bậc tự do của Raghavan và Roth phát triển để lập trình, phân tích và thiết kế động học cho tay máy robot hàn hồ quang. Kết quả mô phỏng từ lập trình được kiểm chứng bằng đường hàn mô phỏng trên máy tính. Sau khi được kiểm chứng với kết quả mô phỏng, chương trình được dùng để thực nghiệm điều khiển tay máy do nhóm chế tạo hàn. Kết quả thí nghiệm cho thấy robot có thể hàn theo đường thẳng với chiều dài gần 380 mm.

*Từ khóa:* Động học; động học ngược; robot hàn; tay máy; robot.

### Abstract

In this study, a general method for inverse kinematics of a 6R robot arm, which proposed by Raghavan and Roth, is used to design, program and analyze the kinematics of an arc welding robot. The program was validated by simulation. After validation with the simulation, the program was used to control a prototype designed and fabricated by the authors. The experimental results show that the robot can perform a horizontal straight line welding with the length approximate 300 mm.

*Keywords:* Kinematics; inverses kinematics; welding robot; robot arm; robot.

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cánh tay robot được sử dụng ngày càng phổ biến trong sản xuất công nghiệp. Do đó, các nghiên cứu liên quan đến tay máy robot đang thu hút sự quan tâm của nhiều người. Một số nghiên cứu có thể kể đến như tối ưu hóa năng lượng của robot trong quá trình vận hành thông qua việc phân tích và tối ưu hóa đáp ứng động học của các khâu trong suốt quá trình vận hành đó dựa trên nền tảng mô phỏng số Matlab [1]. Bằng thuật toán di truyền (Genetic Algorithm) lựa chọn được quỹ đạo vận hành của khâu thao tác mà cánh tay robot phải bám theo, sao cho quỹ đạo này phải thỏa mãn điều kiện tối ưu được cho trước là công suất tiêu thụ để thực hiện quỹ đạo đó phải đạt cực tiểu [2]. Mô hình hóa cánh tay máy robot với mô hình dầm biến dạng công xôn và thiết kế bộ điều khiển thích nghi trong bài toán điều khiển vị trí và vận tốc của tay máy với hồi tiếp lực [3]. Mô phỏng và dự đoán lực tác dụng

vào dao khi tay máy robot tự động cắt rau củ [4]. Điều khiển bền vững cho mô hình tay máy robot đàn hồi bằng phương pháp thiết kế tối ưu toàn phương tuyến tính [5]. Bằng phương pháp phần tử hữu hạn, phân tích ứng xử của vật liệu thuộc các khâu thao tác của tay máy 5 bậc tự do trong một số điều kiện làm việc cụ thể, để dựa vào đó tối ưu hóa kết cấu của tay máy [6].

Để giải quyết các bài toán kể trên được, thì việc giải được bài toán động học cho tay máy là hết sức cần thiết. Giải bài toán động học cho phép ta xác định vị trí, vận tốc, gia tốc của một điểm bất kỳ thuộc một khâu nào đó của tay máy trong một hệ quy chiếu cố định đã được chọn trước. Động học của cánh tay máy robot bao gồm hai bài toán chính, đó là bài toán động học thuận và động học ngược.

Bài toán động học thuận sẽ cho chúng ta biết mối quan hệ của vị trí và hướng của một khâu bất kỳ thuộc tay máy trong hệ quy chiếu cố định với tọa độ suy rộng của tay máy; thông thường tọa độ suy rộng được chọn là các góc quay tương đối hoặc độ dời tương đối giữa các khâu liên kề.

Người phản biện: 1. GS. TSKH. Thân Ngọc Hoàn

2. PGS. TS. Nguyễn Tùng Lâm

Ngược lại, bài toán động học ngược cho chúng ta biết mối quan hệ của các tọa độ suy rộng của tay máy theo vị trí và hướng của khâu đang xét (thường là khâu công tác) trong hệ quy chiếu cố định.

Đối với bài toán động học thuận của cánh tay máy robot có kết cấu dạng chuỗi, hay kết cấu mà có khâu trước và khâu sau được kết nối liên tiếp với nhau thông qua khớp bậc 1 và khâu cuối cùng hở, thì việc thực hiện là không gặp khó khăn với phương pháp thông dụng như phương pháp ma trận Devit - Hatenberg [7]. Tính toán tốc độ chuyển động của khối tâm và vận tốc góc của các khâu tay máy bằng phương pháp ma trận Jacobi [7].

So với bài toán động học thuận, bài toán động học ngược khó khăn hơn về mọi mặt. Có 3 phương pháp chính để giải bài toán động học ngược: Phương pháp phân tích cấu trúc hình học của tay máy, phương pháp số, phương pháp kết hợp.

Điểm thuận lợi ở phương pháp phân tích cấu trúc hình học của tay máy là cung cấp được một hàm số tường minh mô tả được mối quan hệ giải tích giữa các biến ở không gian Descartes và các biến không gian khớp [8]. Đối với một số ứng dụng đòi hỏi điều khiển ở tốc độ cao hoặc thời gian thực thì phương pháp này cho kết quả nhanh. Tuy nhiên, với tay máy không gian ba chiều, phương pháp này gặp nhiều khó khăn.

Khác với phương pháp phân tích cấu trúc hình học, phương pháp số tiếp cận được với hầu hết các cơ cấu cánh tay máy dù phức tạp đến đâu, và không cần tốn quá nhiều thời gian và công sức để cài đặt các giải thuật giải. Một số phương pháp số nổi bật có thể kể đến như phương pháp Newton-Raphson [9], phương pháp ma trận tựa nghịch đảo [10]. Gần đây, mạng thần kinh nhân tạo cũng được sử dụng để giải các bài toán động học ngược [12]. Tuy nhiên, phương pháp số cũng có điểm yếu so với phương pháp phân tích cấu trúc hình học như: Thời gian tính toán lâu hơn, không dự báo được việc có sự xuất hiện của một số điểm kỳ dị, không tìm được phương án nếu ma trận Jacobian là không khả nghịch, có thể không hội tụ đến phương án cần tìm.

Cuối cùng, phương pháp kết hợp là phương pháp kết hợp cả hai phương pháp vừa kể trên. Cụ thể, là sẽ lựa chọn gom nhóm một cách hợp lý các biến khớp để sử dụng phương pháp phân tích cấu trúc hình học, và các biến khớp còn lại sẽ sử dụng phương pháp số.

Một số công trình trong nước có thể kể đến [13] giải bài toán động học ngược của robot Puma bằng phương pháp hình học; công trình [14] sử dụng phương pháp biến đổi đại số cụ thể là nhân chuỗi ma trận nghịch đảo của ma trận thuần nhất; đặc biệt trong [15] áp dụng phương pháp kết hợp, giải quyết bài toán ngược cho mỗi cụm ba khâu liên kế, trong đó ba khâu đầu là điều khiển vị trí, ba khâu sau điều khiển hướng của robot.

Đối với bài toán động học ngược của cánh tay máy 6 bậc tự do, Raghavan và Roth đã nghiên cứu tìm cách giải tổng quát cho mọi cấu trúc hình học [16]. Dựa trên lời giải của Raghavan và Roth, Manocha đã cải tiến tốc độ thực thi của thuật toán thông qua công cụ tính toán số và đạt được kết quả tính toán chính xác với một tốc độ rất nhanh [17]. Chính vì vậy, bài báo này sẽ sử dụng lời giải tổng quát cho tay máy robot 6 bậc tự do có cấu trúc dạng chuỗi do Raghavan và Roth đề xuất để thiết kế và phân tích động học cho tay máy. Tay máy được thiết kế để phục vụ cho việc hàn hồ quang, tầm với của tay máy là 500 mm. Trước khi thiết kế động học cho tay máy, cơ sở lý thuyết về động học tay máy và phương pháp giải tổng quát của Raghavan và Roth được trình bày một cách vắn tắt, tiếp theo sẽ là kết quả phân tích động học ngược của tay máy.

## 2. ĐỘNG HỌC THUẬN TAY MÁY ROBOT VỚI 6 KHỚP XOAY

Quy tắc đặt hệ trục tọa độ của Devit - Hatenberg được sử dụng để mô hình hóa động học của cánh tay robot dạng chuỗi. Các khâu được đánh số từ 0 đến 6. Khâu số 0 là khâu cố định, khâu số 6 là khâu cuối của tay máy. Ta gắn cứng trên khâu thứ  $i$  ( $i = 0 - 6$ ) một hệ trục tọa độ thứ  $i$ . Hệ tọa độ gắn lên khâu 0 là hệ tọa độ chuẩn, hệ tọa độ gắn lên các khâu động  $i$  ( $i = 1 - 6$ ) là hệ tọa độ suy rộng. Khi đó, động học của vật rắn thứ  $i$  có thể được mô tả gián tiếp thông qua phép biến đổi từ hệ tọa độ động thứ  $i$  sang hệ tọa độ động thứ  $i - 1$ . Lúc này, thông qua 4 thông số và cơ sở của hệ tọa độ thứ  $i - 1$  ( $R_{i-1}$ ) biến đổi thành cơ sở của hệ tọa độ thứ  $i$  ( $R_i$ ) thông qua:

$$R_{i-1} = A_i \times R_i$$

Trong đó:

$A_i$  là ma trận vuông cấp 4 còn được gọi là ma trận Devit - Hatenberg. Ma trận  $A_i$  có các thành phần cụ thể như sau:

$$A_i = \begin{bmatrix} c_i & -s_i \lambda_i & s_i \mu_i & a_i c_i \\ s_i & c_i \lambda_i & -c_i \mu_i & a_i s_i \\ 0 & \mu_i & \lambda_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Trong đó:

$$c_i = \cos \theta_i;$$

$$s_i = \sin \theta_i;$$

$$\lambda_i = \cos \alpha_i;$$

$$\mu_i = \sin \alpha_i.$$

Gọi  $R_0$  là cơ sở của hệ trục tọa độ cố định,  $R_6$  là cơ sở của hệ trục tọa độ động gắn chặt vào khâu thao tác cuối cùng của cánh tay robot. Ta có:

$$R_0 = A_{hand} \times R_6$$

Trong đó:

$$A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4 \times A_5 \times A_6 = A_{hand} \quad (1)$$

### 3. PHƯƠNG PHÁP TỔNG QUÁT GIẢI BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC NGƯỢC TAY MÁY ROBOT 6 BẬC TỰ DO

Dưới đây là tóm lược phương pháp giải tổng quát do M. Raghavan và B. Roth đề xuất [16]. Xét bài toán tổng quát tay máy robot 6 bậc tự do gồm 6 khớp xoay 6R với mọi cấu hình. Để thuận tiện cho việc tối ưu chi phí tính toán, ma trận hoàn toàn có thể phân rã thành tích của hai ma trận như sau [16]:

$$A_i = A_{iv} \times A_{is} \quad (2)$$

Trong đó:

$$A_{iv} = R_z(\theta_i) = \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 & 0 \\ s_i & c_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_{is} = T_z(d_i) \cdot T_x(a_i) \cdot R_z(\alpha_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & \lambda_i & -\mu_i & 0 \\ 0 & \mu_i & \lambda_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Bằng cách thay (2) vào (1) và khử ta thu được phương trình [16]:

$$P \cdot \begin{bmatrix} s_4 s_5 \\ s_4 c_5 \\ c_4 s_5 \\ c_4 c_5 \\ s_4 \\ c_4 \\ s_5 \\ c_5 \\ 1 \end{bmatrix} = Q \cdot \begin{bmatrix} s_1 s_2 \\ s_1 c_2 \\ c_1 s_2 \\ c_1 c_2 \\ s_1 \\ c_1 \\ s_2 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Trong đó:

$P$  là ma trận có kích thước  $14 \times 9$  mà các thành phần của nó là tổ hợp tuyến tính của  $c_3, s_3$  và  $Q$  là ma trận có kích thước  $14 \times 8$  mà các thành phần của nó đều là hằng số.

Từ (3), ta tiếp tục khử  $\theta_1, \theta_2$ , ta sẽ thu được [16]:

$$\Sigma \cdot \begin{bmatrix} s_4 s_5 \\ s_4 c_5 \\ c_4 s_5 \\ c_4 c_5 \\ s_4 \\ c_4 \\ s_5 \\ c_5 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

Trong đó:

$\Sigma$  là ma trận có kích thước  $6 \times 9$  mà các thành phần của nó là tổ hợp tuyến tính của  $c_3, s_3$ . Bằng cách đổi biến  $c_i = \frac{1 - x_i^2}{1 + x_i^2}, s_i = \frac{2x_i}{1 + x_i^2}, i = 3, 4, 5$ , biến đổi (4) và áp dụng phép khử Sylvester [17], [18] ta được:

$$\begin{bmatrix} \Sigma' & 0 \\ 0 & \Sigma' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_4^3 \cdot x_5^2 \\ x_4^3 \cdot x_5 \\ x_4^3 \\ x_4^2 \cdot x_5^2 \\ x_4^2 \cdot x_5 \\ x_4^2 \\ x_4 \cdot x_5^2 \\ x_4 \cdot x_5 \\ x_4 \\ x_5^2 \\ x_5 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

Phương trình (5) là 12 phương trình độc lập tuyến tính. Để (5) có nghiệm không tầm thường thì:

$$\det \left( \begin{bmatrix} \Sigma' & 0 \\ 0 & \Sigma' \end{bmatrix} \right) = 0 \quad (6)$$

Phương trình (6) là phương trình đa thức bậc 24 theo ẩn  $x_3$ . Khai triển đa thức (6) và giải tìm nghiệm  $x_3$ , ta sẽ thu được  $\theta_3$ , sau đó từ (5) ta giải hệ phương trình bậc nhất ta sẽ thu được  $\theta_4, \theta_5$ . Sau khi đã có  $\theta_3, \theta_4, \theta_5$  từ (3) ta sẽ thu được  $\theta_1, \theta_2$ . Cuối cùng từ (2) và các góc đã tìm được ta thu được  $\theta_6$ .

### 4. TÌM NGHIỆM $X_3$

Để tìm nghiệm  $x_3$ , ta cần tìm  $\lambda$ , sau đó thay vào (6), sau đó sẽ giải tìm nghiệm  $x_3$ . Dưới đây, các bước giải sẽ được trình bày một cách tóm lược.

#### 4.1. Cách thành lập $\Sigma'$

Theo cách giải của M. Raghavan và B. Roth [16] đề xuất ở mục 3, từ (3) phải qua nhiều bước xử lý tính toán hình thức phức tạp mới có thể đến được phương trình (5). Đặc biệt, việc khai triển định thức cấp 12 trong (6) bằng tính toán hình thức sẽ mất nhiều thời gian, tính toán phức tạp và tài nguyên bộ nhớ.

Để tránh việc tính toán phức tạp kể trên, Manocha trình bày một phương pháp tính  $\Sigma'$  bằng cách phân rã ma trận  $P$  ở (3) về dạng [17]:

$$P = P_1 \times c_3 + P_2 \times s_3 + P_3 \quad (7)$$

Trong đó:

$P_1, P_2, P_3$ : là các ma trận hằng số có cùng kích thước với  $P$ . Bằng cách thay ba cặp giá trị khác nhau ( $c_3, s_3$ ) vào (7) rồi giải ra, ta sẽ thu được  $P_1, P_2, P_3$ .

Để thu được  $\Sigma$ , ta xây dựng ma trận phụ trợ CM như sau: [17]

$$CM = [Q \ P_1 \ P_2 \ P_3]$$

Áp dụng phương pháp khử Gauss đưa CM về dạng ma trận bậc thang rút gọn  $CM^*$  với các phần tử cơ sở ở  $Q$ : [17]

$$CM^* = \begin{bmatrix} I & P_1^* & P_2^* & P_3^* \\ 0 & P'_1 & P'_2 & P'_3 \end{bmatrix}$$

Trong đó:

$I$  là ma trận đơn vị cấp 8;

$O$  là ma trận có kích thước  $6 \times 8$  mà các thành phần đều là 0,  $P_1^*, P_2^*, P_3^*$  có kích thước  $8 \times 9$ ,  $P'_1, P'_2, P'_3$  có kích thước  $6 \times 9$ . Khi đó, ta có [17]:

$$\Sigma = P'_1 \times c_3 + P'_2 \times s_3 + P'_3.$$

Từ đó, ta có thể xây dựng ma trận  $\Sigma'$  có dạng như sau [17]:

$$\Sigma' = A \times x_3 + B \times x_3 + C. \quad (8)$$

#### 4.2. Tìm nghiệm $x_3$

Theo cách thành lập ma trận  $\Sigma'$  [16], ta có dạng ma trận  $\Sigma'$  như sau:

$$\Sigma' = \begin{bmatrix} 1 + x_3^2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 + x_3^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 + x_3^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 + x_3^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \Sigma$$

Khi đó, phương trình (6) là phương trình đa thức bậc 16. Giải phương trình bậc 16, ta sẽ có được nghiệm  $x_3$ . Thay  $x_3$  vào (4) để tìm  $\theta_3, \theta_4$ . Tiếp tục, thay các giá trị  $\theta_3, \theta_4, \theta_5$  vào (3) để tìm ra  $\theta_1, \theta_2$ .

### 5. PHƯƠNG PHÁP RAGHAVAN VỚI ROBOT CÓ CẤU HÌNH ĐẶC BIỆT

Xét cánh tay robot 6 bậc tự do có khâu cổ tay (wrist) là 3 khâu cuối có trục quay luôn giao nhau tại một điểm chung nào đó và loại robot này có điểm chung là  $a_4 = a_5 = d_6 = 0$ . Loại tay máy này được xem là tay máy có cấu hình đặc biệt. Chính vì đặc điểm đặc biệt này, mà một số cột của  $\Sigma$  sẽ phụ thuộc tuyến tính với nhau và làm cho ma trận  $\Sigma$  bị suy biến cụ thể lúc này hạng của  $\Sigma$  bé hơn 6. Điều này dẫn đến (6) hiển nhiên đúng, do đó ta không thể dùng điều kiện này để tìm  $x_3$ . Để khắc phục hệ quả này, [16] chỉ ra cách thu nhỏ không gian cột của  $\Sigma$  bằng cách nhóm các cột phụ thuộc tuyến tính thành các cột mới quan sát khai triển của  $P_1, P_2, P_3$ , gọi  $c_1, c_2, \dots, c_9$  là các cột của nó, ta có:

$$c_4 = -\lambda_4 \times c_1; \quad c_6 = \frac{\lambda_5 \times \mu_4}{\mu_5} \times c_1;$$

$$c_4 = \lambda_4 \times c_3; \quad c_5 = \frac{\lambda_5 \times \mu_4}{\mu_5} \times c_3; \quad c_7 = 0$$

Như vậy,  $P_1, P_2, P_3$  sẽ chỉ còn lại 4 cột và vectơ ẩn chỉ còn 3 ẩn được nhóm lại như sau:

$$X_1 = s_4 \times s_5 - \lambda_4 \times c_4 \times c_5 + \frac{\lambda_5 \times \mu_4}{\mu_5} \times c_4$$

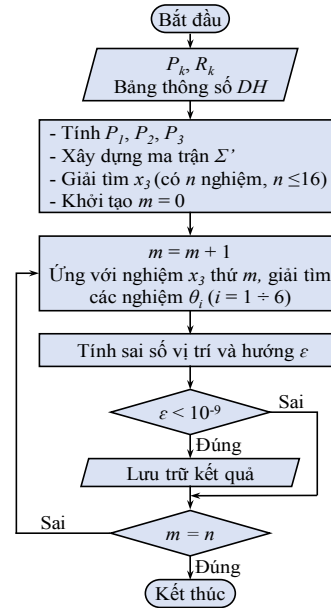
$$X_2 = c_4 \times s_5 + \lambda_4 \times s_4 \times c_5 + \frac{\lambda_5 \times \mu_4}{\mu_5} \times s_4$$

$$X_3 = c_5$$

Sau đó áp dụng thuật toán tương tự như đã trình bày ở mục trên, tuy nhiên khi tìm đến ma trận  $A, B, C$  ta bỏ tùy ý hai hàng bất kỳ, lúc này định thức chỉ còn lại là cấp bốn.

### 6. LƯU ĐỒ GIẢI THUẬT GIẢI BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC NGHỊCH

Lý thuyết được trình bày ở trên được áp dụng để lập trình giải bài toán động học ngược cho tay máy robot. Lưu đồ giải thuật để lập trình giải bài toán được trình bày như trên Hình 1.



Hình 1. Lưu đồ giải thuật lập trình giải bài toán động học ngược

Mỗi đường hàn mong muốn được chia ra nhiều điểm khác nhau. Các điểm này chính là vị trí của khâu cuối của tay máy robot. Bên cạnh việc tay máy chạm đến đúng vị trí cần hàn, hướng của mỏ hàn cũng phải hợp với đường hàn theo một góc nhất định theo yêu cầu của người vận hành. Chương trình cần dựa vào vị trí và hướng của mỏ hàn theo yêu cầu, cần tính ra được các góc quay cần thiết tương ứng của các khớp. Trên Hình 1, dữ liệu đầu vào của chương trình gồm: Vị trí ( $P_k$ ), hướng ( $R_k$ ) của khâu cuối ở vị trí thứ  $k$  trên đường hàn và các thông số của ma trận DH của tay máy robot. Đầu ra của chương trình là giá trị của các góc quay  $\theta_i (i = 1 \div 6)$  của sáu khớp xoay tương ứng. Dựa vào các giá trị đầu vào, ta xác định được: giá trị của  $P_1, P_2$  và  $P_3$ , ma trận  $\Sigma'$  dựa theo các phương trình (3), (7) và (8). Tiếp theo, giải phương trình đa thức đặc trưng của (8), ta được  $x_3$ . Khi giải tìm  $x_3$ , ta có thể thu được tối đa 16 nghiệm. Từ kết quả của  $x_3$ , sử dụng các phương trình (1), (3) và (5) để tìm các góc quay  $\theta_i$  còn lại. Kết quả của các góc  $\theta_i$  được làm đầu vào cho bài toán động học thuận tìm vị trí  $P_k$  và hướng  $R_k$  của khâu cuối, nhằm kiểm tra tính chính xác của lời giải bài toán động học ngược. Nếu độ lớn  $\epsilon$  của sai khác



tương ứng giữa kết quả về hướng và vị trí của bài toán động học thuận và giá trị của vị trí và hướng đầu vào ban đầu (vị trí và hướng mong muốn) nhỏ hơn  $10^{-9}$  thì kết quả các góc quay được ghi nhận lại để dùng cho việc điều khiển tay máy. Nếu sai số lớn thì nghiệm  $x_3$  tương ứng sẽ bị loại và tiếp tục kiểm tra cho nghiệm  $x_3$  tiếp theo nếu còn. Nếu tất cả các nghiệm  $x_3$  đã được rà soát thì dừng chương trình. Như vậy, việc giải bài toán động học ngược cho tay máy robot ở vị trí thứ  $k$  đã được giải quyết.

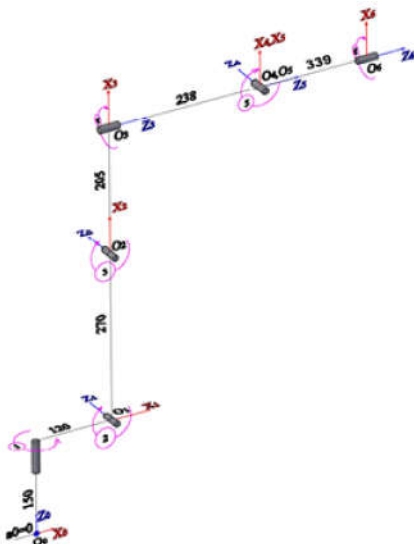
Tổng kết lại, dựa vào cơ sở lý thuyết đã trình bày ở các mục trước, ta có thể giải bài toán động học nghịch với mọi cấu hình hình học của cánh tay robot sáu bậc tự do thông qua “Lưu đồ giải thuật động học nghịch” ở trên. Lưu đồ giải thuật này được sử dụng để lập trình trên Matlab nhằm giải bài toán động học ngược cho tay máy robot. Chương trình này được tích hợp vào chương trình điều khiển của tay máy do nhóm tác giả phát triển.

**7. BÀI TOÁN ÁP DỤNG**

Bài báo này vận dụng cơ sở lý thuyết trên đây để giải cho bài toán tay máy 6 bậc tự do dùng cho việc hàn hồ quang do nhóm tác giả thiết kế và chế tạo. Tay máy được thiết kế để hàn các đường hàn trong không gian ba chiều. Tuy nhiên, trong khuôn khổ bài báo hiện tại, nhóm tác giả chỉ xét thực nghiệm với các đường hàn dạng thẳng. Chiều dài đường hàn tối đa được thiết kế là 500 mm.

**7.1. Mô hình của tay máy**

Sơ đồ động học của tay máy được trình bày trên Hình 2. Trong đó,  $X_0, Y_0, Z_0$  là hệ trục tọa độ cố định gắn cứng với tâm của đế tay máy. Các khớp xoay được đánh số từ 1 đến 6 như trên hình, góc quay  $\theta_i (i = 1 - 6)$  của các khớp tương ứng với các bậc tự do của tay máy. Hệ trục tọa độ  $X_i, Y_i, Z_i$  của các khớp được định nghĩa sao cho trục  $Z_i$  là trục quay của các khớp.



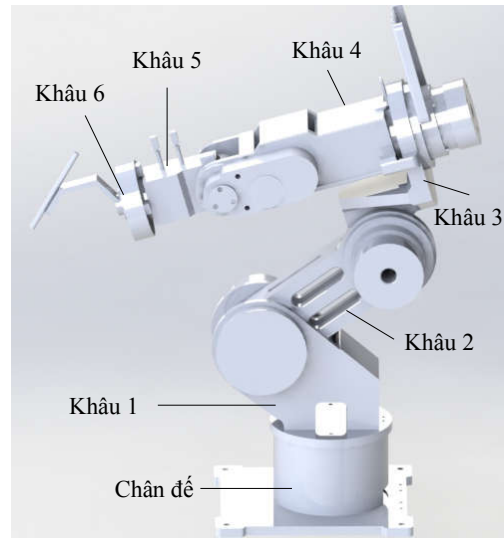
Hình 2. Sơ đồ động học của tay máy

Với sơ đồ động học như trên Hình 2, ta có bảng thông số Denavit - Hartenberg của tay máy như trong Bảng 1.

Bảng 1. Bảng thông số Denavit - Hartenberg

Khâu	$\theta_i$	$d_0$ (m)	$a_i$ (m)	$\alpha_i$ (rad)
1	$\theta_1$	0.150	0.120	$-\frac{\pi}{2}$
2	$\frac{\pi}{2} - \theta_2$	0.000	0.270	0
3	$\theta_3$	0.000	0.205	$-\frac{\pi}{2}$
4	$\theta_4$	0.238	0.000	$-\frac{\pi}{2}$
5	$\theta_5$	0.000	0.000	
6	$\theta_6$	0.339	0.000	0

Dựa trên sơ đồ động học, mô hình 3D của tay máy được thiết kế như trên Hình 3. Khâu 6 dùng để mang mỏ hàn. Các khâu 4, 5, 6 quay quanh các trục quay giao nhau.



Hình 3. Mô hình 3D của tay máy

Sau khi thiết kế, mô hình robot được gia công chế tạo và lắp ráp như trên Hình 4. Các khâu được làm bằng vật liệu nhôm để việc gia công được dễ dàng hơn so với thép và giúp giảm nhẹ khối lượng của các khâu giúp việc điều khiển được dễ dàng hơn. Chân đế máy được thiết kế cao lên như trên hình để tay máy có không gian bên dưới nhằm bố trí các mẫu để hàn.

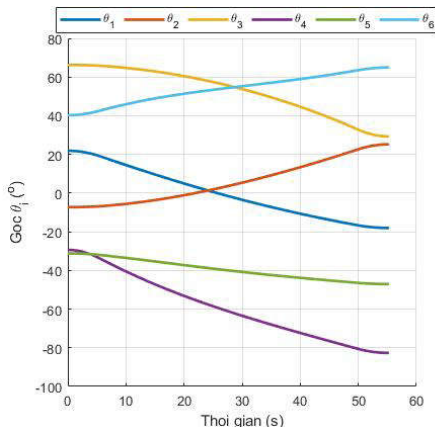


Hình 4. Tay máy hoàn thiện

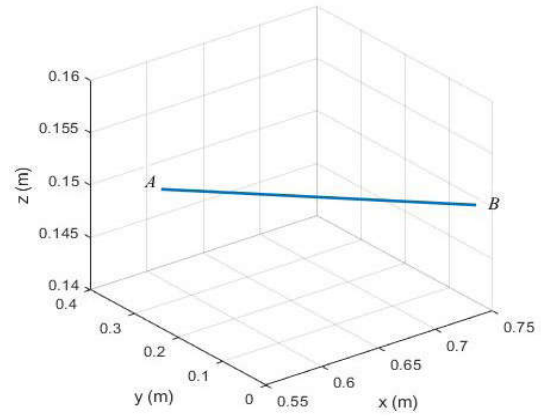
7.2. Kết quả bài toán động học ngược

Chương trình được lập trình trên Matlab ở Mục 6 được dùng để giải bài toán động học ngược cho tay máy và dựa vào kết quả bài toán động học ngược để điều khiển tay máy hàn theo quỹ đạo được chỉ định trước.

Trước khi dùng để điều khiển tay máy, chương trình giải bài toán động học ngược được thử hàn giả lập đường hàn từ A đến B với chiều dài khoảng 380 mm với tốc độ 7 mm/s. Kết quả các góc quay của các khớp được cho trên Hình 5a và quỹ đạo đường hàn được vẽ trên Hình 5b. Kết quả mô phỏng cho thấy mỏ hàn đi theo đúng đường thẳng mong muốn, các góc xoay của các khớp thay đổi một cách trơn, không thay đổi đột ngột. Điều đó chứng tỏ việc tự động chọn nghiệm trong quá trình giải bài toán động học ngược là hợp lý và kết quả giải là chính xác. Các góc xoay của các khớp như trên Hình 5a nằm trong giới hạn về cơ khí thực tế trên mô hình robot do nhóm thiết kế và chế tạo.



a. Các góc xoay của các khớp



b. Quỹ đạo mô phỏng của đường hàn

Hình 5. Kết quả mô phỏng động học ngược

Sau khi, kiểm tra trên bài toán mô phỏng, chương trình động học ngược được dùng vào việc điều khiển tay máy. Khi tiến hành hàn thực tế, mỏ hàn được điều khiển đến vị trí điểm A, vị trí của điểm A được lưu lại trên phần mềm. Tiếp theo, mỏ hàn được dịch chuyển đến điểm B, tọa độ của điểm B được lưu lại. Dựa vào tọa độ của hai điểm A, B và hướng của mỏ hàn tại A, và vận tốc di chuyển mong muốn của mỏ hàn, chương trình động học ngược sẽ tính ra các góc theo thời gian để truyền xuống mạch điều khiển mỏ hàn.

Có 6 thí nghiệm được thực hiện để kiểm tra khả năng làm việc tay máy dựa trên kết quả của bài toán động học ngược. Chiều dài của các đường hàn trong các thí nghiệm tương ứng là 200 mm, 330 mm, 350 mm và 380 mm. Trong đó đường hàn 380 mm được lặp lại 3 lần ( $A_1B_1$ ,  $A_2B_2$  và  $A_3B_3$ ) ở vị trí gần nhau. Kết quả hàn thực tế được cho như trên Hình 6. Kết quả hàn thực tế cho thấy đường hàn tương đối thẳng và chạm đúng điểm A, B đã chọn khi tiến hành thí nghiệm.



a. Đường hàn dài 200 mm (Từ điểm A đến điểm B)



b. Đường hàn dài 330 mm (Từ điểm A đến điểm B)



c. Đường hàn dài 350 mm (Từ điểm A đến điểm B)



d. Ba đường hàn có cùng chiều dài 380 mm (Từ điểm  $A_1$  đến điểm  $B_1$ ; Từ điểm  $A_2$  đến điểm  $B_2$ ; Từ điểm  $A_3$  đến điểm  $B_3$ )

Hình 6. Kết quả hàn thực tế

## 8. KẾT LUẬN

Bài báo sử dụng phương pháp do Raghavan và Roth đề xuất để giải bài toán động học ngược cho tay máy hàn 6 bậc tự do. Chương trình Matlab dựa trên phương pháp giải trên đã được xây dựng và được kiểm chứng hàn theo đường thẳng trong không gian. Bên cạnh kết quả mô phỏng, kết quả hàn thực nghiệm cũng được tiến hành trên tay máy do nhóm thiết kế và chế tạo. Kết quả thực nghiệm cho thấy tính hợp lý của lời giải bài toán động học ngược của tay máy. Tuy nhiên, chương trình cần được thử nghiệm với nhiều dạng đường hàn hơn, các kết quả bổ sung này, nhóm tác giả sẽ cập nhật trong tương lai gần.

## LỜI CẢM ƠN

Bài báo này được thực hiện dựa trên công trình nghiên cứu được hỗ trợ bởi Sở Khoa học và Công nghệ tỉnh Quảng Ngãi, mã số đề tài 02/2019/HĐ-ĐTKHCN.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Mohammed, A., Schmidt, B., Wang, L., & Gao, L (2014), *Minimizing Energy Consumption for Robot Arm Movement*, Procedia CIRP, Vol. 25, pp. 400-405.
- [2]. Givehchi, M., Ng, A. H. C., & Wang, L (2011), *Spot-welding sequence planning and optimization using a hybrid rule-based approach and genetic algorithm*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 27, Issue. 4, pp. 714-722.
- [3]. T.Suehiro, F.Ohkawa, K.Kurosu, T.Yamashita (1991), *Adaptive Control for a Robot Arm and a Robot Drive System with Elasticity*, IFAC Proceedings, Vol. 24, Issue 1, pp. 199-204.
- [4]. Eric Heiden, Miles Macklin, Yashraj Narang, Dieter Fox, Animesh Garg, Fabio Ramos (2021), *DiSEct - A Differentiable Simulation Engine for Autonomous Robotic Cutting*, Robotics: Science and Systems, July 12-16, 20 pages.
- [5]. J. Daafouz, G. Garcia and J. Bernussou (1998), *Robust control of a flexible robot arm using the quadratic d-stability approach*, In IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 6, no. 4, pp. 524-533.
- [6]. Shanmugasundar, G., Sivaramakrishnan, R., Meganathan, S., & Balasubramani, S (2019), *Structural Optimization of an Five Degrees of Freedom (T-3R-T) Robot Manipulator Using Finite Element Analysis*, Materials Today: Proceedings, Vol. 16, pp. 1325-1332.
- [7]. Nguyen Van Khang (2007), *Động lực học hệ nhiều vật*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
- [8]. Gupta, Ayush & Chourika, Sameer & Agrawal, Sankalp & Deshmukh, Ankur & Bhargava, Prasham (2018), *A Geometric Approach to Inverse Kinematics of a 3 DOF Robotic Arm*, International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), Vol.6, Issue. 1, pp. 352-357.
- [9]. Goldenberg, Andrew A. & Benhabib, B.&Fenton, Robert (1985), *A Complete Generalized Solution to the Inverse Kinematics of Robots*, IEEE Journal on Robotics and Automation, Vol. 1, No. 1, pp. 14 - 20.
- [10]. Samuel R. Buss (2004), *Introduction to Inverse Kinematics with Jacobian Transpose, Pseudoinverse and Damped Least Squares method*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 1, pp. 1-19.
- [11]. S. Kumar, N. Sukavanam, and R. Balasubramanian (2010), *An optimization approach to solve the inverse kinematics of redundant manipulator*, International journal of Information and Systems Sciences, Vol. 6, No. 4, pp. 414-423.
- [12]. Adrian-Vasile Duka (2014), *Neural Network based Inverse Kinematics Solution for Trajectory Tracking of a Robotic Arm*, Procedia Technology, Vol. 12, pp. 20-27.
- [13]. Nguyễn Thiện Phúc (1999), *Phát triển phương pháp các nhóm 3 để giải bài toán động học ngược*, Tuyển tập các báo cáo khoa học hội nghị cơ học Việt Nam.
- [14]. Nguyen Thien Phuc (1998), *On the problem of controlling robot motion along a prescribed trajectory*, Preprint of the RESCCE 98.
- [15]. Nguyễn Thiện Phúc (2006), *Giáo trình Robot công nghiệp*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
- [16]. Raghavan, M., and Roth, B (1993), *Inverse Kinematics of the General 6R Manipulator and Related Linkages*, Journal of Mechanical Design, Vol. 115, Issue 3, pp. 502-508.

[17]. Dinesh Manocha and John F. Canny (1994), *Efficient Inverse Kinematics for General 6R Manipulators*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 10, No. 5, pp. 648-657.

[18]. Geogre Salmon (2010, *Lessons introductory to the modern higher algebra*, Nabu Press, 326 pages.

## THÔNG TIN TÁC GIẢ



### Dương Văn Toàn Ninh

- Năm 2012: Tốt nghiệp Thạc sĩ ngành Công nghệ chế tạo máy, Trường Đại học Bách khoa Đà Nẵng.
- Tóm tắt công việc hiện tại: Trưởng phòng Tổ chức - Hành chính, Trường Cao đẳng Kỹ nghệ Dung Quất.
- Lĩnh vực quan tâm: Robot công nghiệp.
- Điện thoại: 0915302279                      Email: toanninh@gmail.com



### Nguyễn Tấn Tại

- Năm 2012: Tốt nghiệp Thạc sĩ ngành Công nghệ chế tạo máy, Trường Đại học Bách khoa Đà Nẵng.
- Tóm tắt công việc hiện tại: Giảng viên khoa Cơ khí động lực, Trường Cao đẳng Kỹ nghệ Dung Quất.
- Lĩnh vực quan tâm: Robot công nghiệp.
- Điện thoại: 0914741276                      Email: nguyentantai@gmail.com



### Nguyễn Văn Cường

- Năm 2017: Tốt nghiệp Tiến sĩ ngành Kỹ thuật điện tử, Đại học Bách khoa Hà Nội.
- Đơn vị công tác: Trường Đại học Công nghiệp TP. HCM.
- Lĩnh vực quan tâm: Hệ thống trên Chíp, hệ thống nhúng, điều khiển thông minh.
- Điện thoại: 0912233677                      Email: nguyenvancuong@iuh.edi.vn



### Nguyễn Trọng Các

- Năm 2015: Tốt nghiệp Tiến sĩ ngành Kỹ thuật điện tử, chuyên ngành Kỹ thuật điện tử, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.
- Tóm tắt công việc hiện tại: Giảng viên khoa Điện, Chủ tịch Hội đồng Trường Đại học Sao Đỏ.
- Lĩnh vực quan tâm: DCS, SCADA, hệ thống nhúng.
- Điện thoại: 0904369421                      Email: cacdhsd@gmail.com