

PHÂN TÍCH ĐỘNG HỌC ROBOT CÔNG NGHIỆP BẰNG LÝ THUYẾT TRỤC VÍT

KINEMATIC ANALYSIS OF AN INDUSTRIAL ROBOT USING SCREW THEORY

Nguyễn Phú Sinh, Nguyễn Thị Hải Vân

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng

TÓM TẮT

Phương pháp mô hình hóa khâu và khớp dựa trên thông số Denavit – Hartenberg (DH) được đề xuất bởi hai nhà khoa học Denavit và Hartenberg, Đại học Chicago thường được sử dụng để giải các bài toán về động học của cánh tay robot nối tiếp. Phương pháp mô hình hóa này cho phép xác định được mối liên hệ giữa các hệ tọa độ gắn trên khớp của robot. Một trong những điểm khó khăn trong việc xác định thông số Denavit - Hartenberg là đặt các hệ trục tọa độ và xác định cấu hình robot ở ban đầu. Nếu vị trí ban đầu này thay đổi, thì việc đặt lại hệ trục tọa độ và tham số DH sẽ thay đổi theo. Chính vì vậy, bài báo này trình bày phương pháp giải bài toán động học thuận robot nối tiếp bằng phương pháp tính tích các hàm mũ tự nhiên PoE (Products of Exponentials) dựa trên cơ sở lý thuyết trục vít (Screw theory). Mặc dù lý thuyết toán học của phương pháp này phức tạp hơn so với phương pháp mô hình hóa khâu và khớp theo thông số DH, nhưng việc đặt hệ trục tọa độ của robot thì đơn giản hơn khá nhiều.

Từ khóa: Robot công nghiệp; Mô hình hóa; Lý thuyết trục vít; Động học thuận; Mô phỏng.

ABSTRACT

The Denavit – Hartenberg parameter method proposed by two scientists Denavit and Hartenberg of the University of Chicago is widely used for solving the kinematics of manipulator. This method allows to determine relationship between coordinate frames attached to the joints of the mechanism. One of the disadvantage of this method is determining the initial configuration of the manipulator and its initial posture changes will cause the motion range of joints and parameters will be changed accordingly. In this work, the Product of Exponentials based on the Screw theory is investigated to solve the kinematics of the serial manipulator. Although this method is a bit more difficult to understand than the DH parameter method, it provides a simple process to determine the coordinate frames and robot configuration.

Keywords: Industrial robot; Modeling; Screw theory; Forward kinematics; Simulation.



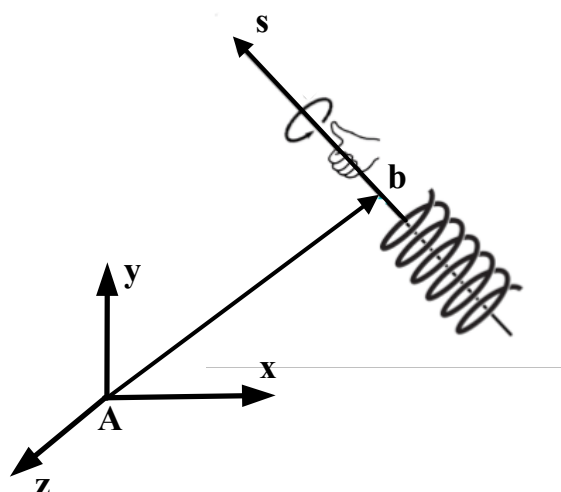
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Theo thống kê trên thế giới, thị trường robot công nghiệp có tỷ lệ tăng trưởng rất cao, do chi phí sản xuất tay máy ngày nay đã giảm nhiều so với trước đây và nhu cầu sử dụng robot để thay thế con người trong các nhiệm vụ phức tạp đòi hỏi kỹ năng, độ chính xác cao hoặc làm việc trong môi trường độc hại càng tăng. Chính vì vậy, vấn đề hiểu bài toán động học robot để hỗ trợ trong việc tiếp cận và vận hành robot của mỗi kỹ sư, cử nhân kỹ thuật là rất quan trọng nhằm đáp ứng được nhu cầu của doanh nghiệp về nhân sự điều khiển và vận hành robot. Để làm được việc đó, người vận hành phải nắm vững mô hình động học của cánh tay robot. Hiện nay, nhiều phương pháp giải bài toán động học robot đã được giới thiệu như phương pháp hình học [1], phương pháp số như mạng nơron nhân tạo [2] và phổ biến nhất là phương pháp mô hình hóa thông số Denavit – Hartenberg (DH) được đề xuất bởi hai nhà khoa học của Trường Đại học Chicago, Mỹ vào năm 1955 [3]. Sau này, phương pháp mô hình hóa DH này được nhiều nhà khoa học nghiên cứu hoàn thiện hơn và được áp dụng rộng rãi. Tuy nhiên, việc đặt hệ trục tọa độ cho cánh tay robot và xác định bộ thông số DH vẫn còn nhiều phức tạp. Chính vì vậy, phương pháp “tích các hàm mũ tự nhiên” (Products of Exponentials) dựa trên lý thuyết trục vít đã được nghiên cứu và áp dụng vào giải các bài toán động học robot. Năm 1984, Roger W. Brockett [4] là người đầu tiên sử dụng phương pháp này để giải bài toán robot lần đầu tiên. Trong phần dưới đây của bài báo, nhóm tác giả trình bày tóm tắt cơ sở lý thuyết và áp dụng để phân tích động học cánh tay robot ABB IRB120.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT TRỤC VÍT

Lý thuyết trục vít hay lý thuyết vít

(Screw theory) là một công cụ toán học dùng để giải các bài toán về động học và động lực học các hệ truyền động cơ khí. Năm 1763, Mozzi là người đầu tiên đề xuất lý thuyết này nhưng đến năm 1900, Ball mới hệ thống hóa thành lý thuyết [5]. Năm 1999 và năm 2004, Tsai và Hunt đã phát triển lý thuyết này trong việc giải các bài toán động học hình học. Theo định lý Chales thì bất cứ chuyển động của vật rắn có thể xem là chuyển động quay quanh một trục và tịnh tiến song song với trục đó (Hình 1), chuyển động này được gọi là sự dịch chuyển trục vít (Screw displacement). Trước tiên, chúng ta tìm hiểu về lý thuyết trục vít đối với hệ vật rắn tuyệt đối.



Hình 1. Cơ sở lý thuyết trục vít – Screw theory

Giả sử vật rắn A cố định có hệ tọa độ cơ sở là Axyz và một vật rắn B chuyển động có hệ tọa độ Bxyz, khi đó ma trận biểu diễn vị trí và hướng của vật rắn B đối với vật rắn A có thể biểu diễn như sau:

$$SE(3) = \left\{ \begin{bmatrix} R & b \\ 0 & 1 \end{bmatrix} : R \in SO(3), b \in R^3 \right\} \quad (1)$$

Trong đó, R là ma trận quay của hệ tọa độ Bxyz đối với hệ tọa độ Axyz, b là véc tơ biểu

diễn tọa độ của của hệ tọa độ B đối với hệ tọa độ A, SE(3) được gọi là nhóm Euclid đặc biệt thuộc nhóm Lie, SO(3) là nhóm trực giao đặc biệt.

Giả sử trên vật rắn B, có tọa độ điểm P biểu diễn bởi véc tơ B_p , khi đó tọa độ của điểm P đối với hệ tọa độ Axyz là:

$$A_p = RB_p + b \quad (2)$$

Đạo hàm theo thời gian phương trình (2), ta được:

$$\begin{aligned} V_p &= \dot{\hat{A}}p + \dot{b} - \dot{\hat{A}}b = \omega \times \hat{A}p + \dot{b} - \omega \times b \\ &= \omega \times \hat{A}p + \dot{b} + b \times \omega \end{aligned} \quad (3)$$

Trong đó, $\hat{\omega}$ là ma trận vận tốc góc, ω là véc tơ vận tốc góc.

Khi đó, một trục vít (Screw) $\xi = (\omega, \dot{b} + b \times \omega) = (\omega, V)$ được gọi là Twist, trong đó V là vận tốc của một điểm trên vật rắn chuyển động.

Nếu b là hằng số, nghĩa là vật rắn B chỉ chuyển động quay, lúc đó $V = \dot{b} + b \times \omega = b \times \omega$ nên Twist trong trường hợp này là $\xi = (\omega, b \times \omega)$.

Nếu vật rắn B chỉ chuyển động tịnh tiến, không có chuyển động quay thì $\omega = 0$ và Twist trong trường hợp này là $\xi = (0, \dot{b})$. Một twist $\xi = (\omega, V)$ có thể biểu diễn dưới dạng ma trận như sau:

$$\hat{\xi} = \begin{bmatrix} \hat{\omega} & V \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Theo lý thuyết trục vít, ma trận biến đổi của vật rắn B có thể biểu diễn dưới dạng ma trận thuần nhất dưới dạng hàm số mũ:

$$e^{\hat{\xi}\theta} = \begin{bmatrix} I & \theta V \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ với trường hợp } \omega = 0 \quad (5)$$

Hoặc

$$e^{\hat{\xi}\theta} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\omega}\theta} & (I - e^{\hat{\omega}\theta})(\omega \times V) + \theta \omega \omega^T V \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

với trường hợp $\omega \neq 0$ (6)

Trong đó:

$$e^{\hat{\omega}\theta} = I + \hat{\omega} \sin(\theta) + \hat{\omega}^2 (1 - \cos(\theta)),$$

đây là công thức Euler-Rodrigues.

Giả sử ban đầu hệ tọa độ Bxyz có tọa độ tương đối đối với hệ tọa độ Axyz biểu diễn theo ma trận $g_{ab}(0)$. Sau đó, hệ tọa độ Bxyz di chuyển tịnh tiến một đoạn θ hoặc quay quanh một trục một góc θ . Khi đó, tọa độ tương đối của hệ Bxyz đối với hệ tọa độ Axyz là:

$$g_{ab}(\theta) = e^{\hat{\xi}\theta} g_{ab}(0) \quad (7)$$

Nếu chúng ta áp dụng công thức (7) cho một chuỗi động học n khâu liên tiếp nhau như cánh tay robot nối tiếp thì ta xác định được phương trình động học robot như sau:

$$g_{ab}(\theta) = e^{\hat{\xi}_1\theta_1} e^{\hat{\xi}_2\theta_2} e^{\hat{\xi}_3\theta_3} \dots e^{\hat{\xi}_n\theta_n} g_{ab}(0) \quad (8)$$

Trong một số tài liệu thì ma trận tọa độ ban đầu của hệ Bxyz đối với hệ Axyz $g_{ab}(0)$ còn

được ký hiệu là $e^{\hat{\xi}_{ab}}$, trong đó $\hat{\xi}_{ab}$ là Twist của hệ Bxyz đối với hệ Axyz ở vị trí ban đầu.

3. PHÂN TÍCH ĐỘNG HỌC ROBOT CÔNG NGHIỆP ABB-IRB120

Trong phần này, nhóm tác giả áp dụng lý thuyết trình bày ở mục 2 để phân tích robot 

ABB-IRB120 có kích thước như hình 2. Ta tìm được tọa độ các điểm trên trục khớp:

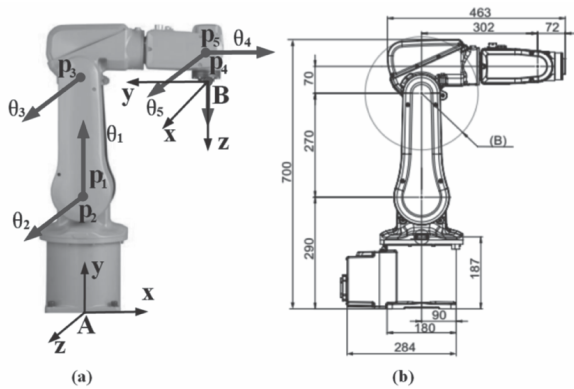
$$\mathbf{p}_1 = [0, 290, 0]^T; \mathbf{p}_2 = [0, 290, 0]^T; \mathbf{p}_3 = [0, 560, 0]^T;$$

$$\mathbf{p}_4 = [302, 630, 0]^T; \mathbf{p}_5 = [302, 630, 0]^T; \mathbf{p}_6 = [302, 558, 0]^T$$

Véc tơ chỉ hướng của các trục vít:

$$\mathbf{s}_1 = [0, 1, 0]^T; \mathbf{s}_2 = [0, 0, 1]^T; \mathbf{s}_3 = [0, 0, 1]^T$$

$$\mathbf{s}_4 = [1, 0, 0]^T; \mathbf{s}_5 = [0, 0, 1]^T; \mathbf{s}_6 = [0, -1, 0]^T$$



Hình 2. Hệ tọa độ và kích thước của robot ABB IRB120 (hình b cung cấp bởi nhà sản xuất)

Khi đó, chúng ta xác định được Twist của các khớp như sau:

$$\xi_1 = [0, 0, 0, 0, 1, 0]^T; \xi_2 = [290, 0, 0, 0, 0, 1]^T; \xi_3 = [560, 0, 0, 0, 0, 1]^T$$

$$\xi_4 = [0, 0, -560, 1, 0, 0]^T; \xi_5 = [630, -302, 0, 0, 0, 1]^T; \xi_6 = [0, 0, -302, 0, -1, 0]^T$$

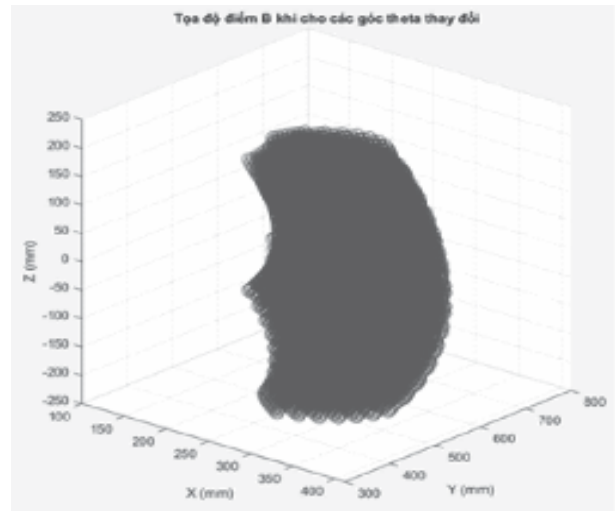
Và xác định được ma trận $\mathbf{g}_{AB}(\theta)$:

$$\mathbf{g}_{AB}(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 302 \\ 0 & 0 & -1 & 558 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Từ đó, hệ phương trình động học robot được xác định như sau:

$$\mathbf{g}_{AB}(\theta) = e^{\hat{\xi}_1 \theta_1} e^{\hat{\xi}_2 \theta_2} e^{\hat{\xi}_3 \theta_3} \dots e^{\hat{\xi}_6 \theta_6} \mathbf{g}_{AB}(0) \quad (9)$$

Sau khi giải phương trình (9), tọa độ của cơ cấu chấp hành sẽ được xác định. Nhóm tác giả kiểm nghiệm bằng cách thay đổi giá trị góc quay của các khớp θ_i ($i = 1-6$) và xác định chính xác tọa độ của robot như thể hiện trên hình 3.



Hình 3. Kết quả mô phỏng robot

4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày cơ sở lý thuyết trục vít và phương pháp tính tích các hàm mũ tự nhiên PoE để giải bài toán động học của cánh tay robot nối tiếp. Cơ sở lý thuyết đã được áp dụng để giải bài toán động học thuận robot công nghiệp ABB-IRB 120 của hãng ABB. Kết quả được kiểm nghiệm và so sánh với dữ liệu của nhà sản xuất. Lý thuyết trình bày trong bài báo là cơ sở để nhóm cùng các nhà khoa học tiếp tục nghiên cứu và áp dụng lý thuyết này để giải các bài toán về mô hình vận tốc, gia tốc và động lực học robot.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ kinh phí bởi Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng trong đề tài có Mã số T2022-06-26. ❖

Ngày nhận bài: 20/7/2023

Ngày phản biện: 02/8/2023

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Jamali, Annisa & Khan, Md Raisuddin & Rahman, Md Mozasser (2011). *A new geometrical approach to solve inverse kinematics of hyper redundant robots with variable link length*. 1 - 5. 10.1109/ICOM.2011.5937183.
- [2]. Moosavi, S.K.R.; Zafar, M.H.; Sanfilippo, F. Forward. *Kinematic Modelling with Radial Basis Function Neural Network Tuned with a Novel Meta-Heuristic Algorithm for Robotic Manipulators*. Robotics 2022, 11, 43.
- [3]. Denavit, Jacques; Hartenberg, Richard Scheunemann (1955). *A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices*. Journal of Applied Mechanics. 22 (2): 215–221.
- [4]. Brockett, R.W. (1984). *Robotic manipulators and the product of exponentials formula*. In: Fuhrmann, P.A. (eds) *Mathematical Theory of Networks and Systems*. Lecture Notes in Control and Information Sciences, vol 58. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [5]. Ball, R.S. The theory of screws: *A study in the dynamics of a rigid body*. Math. Ann. 9, 541–553 (1876).