

MÔ HÌNH HÓA ĐỘNG LỰC HỌC ROBOT TÁC HỢP GIA CÔNG CƠ KHÍ

DYNAMIC MODELING OF A COLLABORATIVE ROBOT IN MECHANICAL PROCESSING

Nguyễn Thế Anh¹, Hà Thanh Hải², Trần Minh Thúy^{3,*}

¹Trường Cao đẳng Xây dựng Công trình đô thị

²Trường Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

³Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

*Email: thuy.tranminh@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Các hệ thống gia công bằng robot mang lại nhiều lợi ích đáng kể, chẳng hạn như sự linh hoạt cao trong việc lập chương trình gia công, dễ dàng điều chỉnh cấu hình robot để đáp ứng sự thay đổi của đối tượng hoặc chi tiết cần chế tạo, cùng với đó là không gian hoạt động rộng và điều chỉnh linh hoạt. Với các chi tiết có hình dạng bề mặt gia công phức tạp, thao tác gia công được thực hiện bởi chuyển động tạo hình phức tạp giữa dụng cụ gia công và chi tiết gia công. Robot tác hợp là một hệ thống gồm các robot phối hợp sẽ là phương án phù hợp cho các thao tác công nghệ như vậy.

Để robot tác hợp có thể hoàn thành các thao tác công nghệ tạo hình phức tạp, bên cạnh việc thiết kế quỹ đạo chuyển động để lập chương trình gia công thì việc tính toán động lực học là một bài toán khó bởi robot tác hợp có cấu trúc phức tạp. Đã có các công trình về tính toán động lực học của robot tác hợp, song cấu trúc robot tác hợp là đa dạng. Trong bài báo này trình bày tính toán động lực học cho mô hình robot tác hợp gồm hai cánh tay robot chuỗi hở ba bậc tự do (Mechanism of Relative Manipulator 3+3 degree of freedom) MRM33. Các cánh tay robot thực hiện chuyển động tương đối giữa dụng cụ và chi tiết để thực hiện thao tác gia công. Thuật toán và chương trình cho kết quả mô phỏng số và áp dụng thuận lợi cho lớp robot tác hợp MRM33.

Từ khóa: Robot tác hợp MRM33; Mô hình hóa động lực học; Gia công cơ khí.

ABSTRACT

Robotic machining systems offer many significant benefits, such as high flexibility in machining programming, easy adjustment of robot configuration to accommodate changes in the object or part to be manufactured, and a vast operating space and flexible adjustment. For parts with complex machined surface shapes, the machining operation is performed by complex forming motions between the machining tool and the machined workpieces. Collaborative robots are a system of coordinated robots that will be a suitable solution for such technological operations. To enable collaborative robots to complete complex forming operations, in addition to designing the motion trajectory for programming the machining, calculating the dynamics is a difficult problem because these robots have complex structures. There have been studies on the dynamics

of collaborative robots, but their structures are diverse. In this paper, the dynamics calculation for the collaborative robot model consisting of two open-chain robot arms with three degrees of freedom (Mechanism of Relative Manipulator 3+3 degrees of freedom, MRM33) is presented. The robot arms' relative motion moves the tool with respect to the workpieces to perform the machining operation. The algorithm and program give numerical simulation results and are conveniently applied to the MRM33 collaborative robot class.

Keywords: Collaborative robots MRM33; Dynamics modelling; Mechanical processing.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

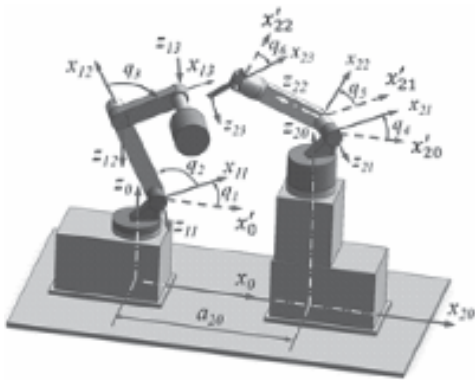
Công nghệ sản xuất thông minh đã mở ra kỷ nguyên mới cho việc triển khai robot vào các quy trình cơ khí tự động hóa. Việc ứng dụng robot trong gia công cơ khí ngày càng được quan tâm nghiên cứu và phát triển [1-6]. Nhiều nghiên cứu về các thành tựu gần đây trong lĩnh vực gia công phay sử dụng robot, đặc biệt là đối với các chi tiết có hình dạng phức tạp được trình bày trong bài tổng quan [1]. Ứng dụng đa dạng của robot công nghiệp trong gia công cắt gọt, đặc biệt trong các lĩnh vực như mài, phay, đánh bóng và xử lý bề mặt được phân tích và tổng hợp trong [2]. Một trong các ưu điểm của gia công tạo hình bằng robot là khả năng linh hoạt về định vị, định hướng của dụng cụ gia công để thực hiện các thao tác công nghệ phức tạp lên đối tượng gia công. Song điều đó dẫn đến vấn đề quan trọng là thiết kế quỹ đạo chuyển động cho robot để tạo chương trình gia công cho robot thực hiện thao tác công nghệ. Đã có các công trình nghiên cứu các phương pháp thiết kế đường dụng cụ cho robot, chẳng hạn trong các công trình [7-9]. Dựa trên đường dụng cụ, quỹ đạo chuyển động của robot được tính toán bằng việc giải bài toán động học robot để tạo chương trình cho robot thực hiện thao tác công nghệ. Trong các công trình [10,11] đã trình bày việc thiết kế quỹ đạo chuyển động cho robot gia công tạo hình bề mặt. Trong [12] đã trình bày việc tính toán động học, thiết kế quỹ đạo chuyển động cho robot tác hợp MRM33 thực hiện gia

công tạo hình bề mặt chi tiết có hình dạng phức tạp. Song song với việc thiết kế quỹ đạo chuyển động, lập chương trình thao tác, bài toán động lực học đóng vai trò quan trọng trong việc cung cấp mô hình động lực học cho việc điều khiển hoạt động của robot cũng như các số liệu cần thiết cho việc tính toán, thiết kế robot. Trong [13, 14] đã dẫn ra phương pháp chung khảo sát tính toán động lực học robot tác hợp. Trong [15] cũng chỉ ra việc khảo sát động lực học của một mô hình robot tác hợp, trong đó, một trong hai robot thành phần có cấu trúc bàn máy với các khớp chuyển động tịnh tiến. Bài báo này trình bày phương pháp mô hình hóa, thực hiện theo một quy trình để nhận được hệ phương trình động lực học robot tác hợp MRM33. Với robot tác hợp nói chung, thông thường tồn tại cấu trúc vòng kín. Với robot MRM33, các cánh tay robot có cấu trúc chuỗi hở, trong quá trình thực hiện thao tác công nghệ sẽ tạo thành chuỗi động học kín. Một cách tổng quát, hệ phương trình động lực học sẽ bao gồm các phương trình vi phân chuyển động của robot và các phương trình ràng buộc bởi cấu trúc vòng kín đảm bảo chuyển động thao tác gia công. Trong dạng đó, việc khảo sát tính toán động lực học là khá khó khăn. Trong trường hợp, với loại hình gia công xác định, các thông số về vật liệu, thông số công nghệ, cho phép áp dụng công thức thực nghiệm để xác định lực tương tác (gọi là lực cắt) giữa dụng cụ và chi tiết gia công, thì có thể tách cấu trúc để thiết lập phương trình vi phân chuyển động cho từng cánh tay robot. Bài

báo dẫn ra phương pháp thiết lập phương trình động lực học cho robot tác hợp MRM33 dựa trên cách thứ hai này. Bài báo trình bày một ví dụ áp dụng để minh họa.

2. MÔ HÌNH ĐỘNG HỌC ROBOT TÁC HỢP

Mô hình robot tác hợp MRM33 là hệ gồm hai cánh tay robot ba bậc tự do cấu trúc nối tiếp chuỗi hở được biểu diễn trên Hình 1, a. Trong MRM33, một robot kẹp chặt và di chuyển chi tiết gia công. Robot này được gọi là robot bàn máy (A), đóng vai trò giống như bàn máy trong các máy công cụ, hoặc máy CNC. Robot thứ hai kẹp chặt và di chuyển dụng cụ gia công, gọi là robot dụng cụ (B).



Hình 1. Robot tác hợp gia công cơ khí

Từ yêu cầu kỹ thuật gia công, các robot được điều khiển chuyển động sao cho dụng cụ chuyển động tương đối đối với chi tiết gia công, tiếp cận và tương tác thao tác công nghệ

lên bề mặt chi tiết gia công.

Mỗi cánh tay robot đều có ba bậc tự do, ba khâu động, toàn khớp quay, tạo thành chuỗi động học hở. Ký hiệu các khâu động của robot bàn máy là L11, L12, L13; của robot dụng cụ là L21, L22, L23.

Gọi hệ tọa độ cơ sở vừa là hệ tọa độ gốc robot bàn máy là $R_0 = x_0 y_0 z_0$ đặt tại gốc robot bàn máy. Gọi các hệ tọa độ khâu của robot bàn máy lần lượt là $R_{11} = x_{11} y_{11} z_{11}$, $R_{12} = x_{12} y_{12} z_{12}$, với khâu cuối là $R_{13} = x_{13} y_{13} z_{13}$. Tương tự, gọi các hệ tọa độ khâu của robot dụng cụ lần lượt là $R_{21} = x_{21} y_{21} z_{21}$, $R_{22} = x_{22} y_{22} z_{22}$, với khâu cuối là $R_{23} = x_{23} y_{23} z_{23}$. Hệ tọa độ gốc của robot dụng cụ ký hiệu $R_{20} = x_{20} y_{20} z_{20}$.

Mặc dù có một số phương pháp xây dựng các hệ tọa độ, ở đây áp dụng quy tắc Denavit-Hartenberg (DH) bởi cấu trúc các khớp quay hoặc tịnh tiến là phù hợp nhất với phương pháp DH.

Dưới đây trình bày việc khảo sát, tính toán động học và động lực học robot tác hợp nói chung cũng như cho mô hình MRM33.

3. BÀI TOÁN ĐỘNG HỌC ROBOT TÁC HỢP

Với việc áp dụng quy tắc DH để gán các hệ tọa độ cho các khâu, các tham số động học được biểu diễn trong bảng 1.

Bảng 1. Các tham số động học DH của robot tác hợp

Robot bàn máy					Robot dụng cụ				
i-1/i	θ_i	d_i	a_i	α_i	i-1/i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	q_1	d_{11}	0	$\pi/2$	R_{20}/R_0	0	0	a_{20}	0
2	q_2	0	a_{22}	0	1	q_4	d_{21}	0	$\pi/2$
3	q_3	0	a_{23}	0	2	q_5	0	0	$-\pi/2$
4(A)	$\pi/2$	0	0	0	3(B)	q_6	d_{23}	a_{23}	$\pi/2$

Đối với robot bàn máy, hệ tọa độ khâu L13 sau khi thực hiện các phép chuyển theo quy tắc DH, thực hiện thêm bước 4(A) để đưa hệ R_{13} đến hệ tọa độ $R_D = x_D y_D z_D$, đặt tại tâm bàn kẹp. Hệ tọa độ R_D vừa biểu diễn vị trí và hướng khâu L13 đối với hệ tọa độ cơ sở, đồng thời được dùng để biểu diễn đối tượng gia công, tức biểu diễn dạng hình học của đối tượng gia công trong R_D .

Các ma trận truyền biến đổi tọa độ thuần nhất của robot bàn máy lần lượt là ${}^0A_{11}$, ${}^{11}A_{12}$, ${}^{12}A_{13}$, ${}^{13}A_D$, được tính theo công thức ma trận DH với các tham số của robot bàn máy được chỉ ra ở Bảng 1.

Để tiện trình bày, gọi hệ R_D là hệ tọa độ bàn kẹp hoặc hệ tọa độ gá, tương ứng, ma trận biểu diễn hệ tọa độ bàn kẹp đối với hệ tọa độ cơ sở là:

$${}^0A_D = {}^0A_{11} {}^{11}A_{12} {}^{12}A_{13} {}^{13}A_D \quad (1)$$

Các ma trận truyền biến đổi tọa độ thuần nhất của robot dụng cụ lần lượt là ${}^0B_{20}$, ${}^{20}B_{21}$, ${}^{21}B_{22}$, ${}^{22}B_E$, được tính theo công thức ma trận DH với các tham số của robot dụng cụ ở Bảng 1.

Để tiện trình bày, ở đây hệ $R_{23} = x_{23} y_{23} z_{23}$ là hệ tọa độ khâu cuối của robot dụng cụ nên gọi là $R_E = x_E y_E z_E$, tương ứng, ma trận biểu diễn hệ tọa độ dụng cụ đối với hệ tọa độ cơ sở theo chuỗi động học robot dụng cụ là:

$${}^0B_E = {}^0B_{20} {}^{20}B_{21} {}^{21}B_{22} {}^{22}B_E \quad (2)$$

Hệ tọa độ dụng cụ thường gắn tại lưỡi cắt. Giả sử robot thực hiện quá trình gia công bề mặt cong bằng phay tinh. Hệ tọa độ dụng cụ được xác định sao cho: gốc tọa độ tại điểm cắt trên lưỡi cắt của dụng cụ; trục x_E pháp tuyến lưỡi cắt, trục z_E tiếp tuyến, trục y_E tạo thành hệ tọa độ thuận, xem Hình 1, b.

Gọi các thông số định vị hệ tọa độ dụng cụ $R_E = x_E y_E z_E$ đối với hệ tọa độ bàn kẹp $R_D = x_D y_D z_D$ là các tọa độ thao tác $x, y, z, \alpha, \beta, \eta$, ký hiệu [12]:

$$\begin{cases} p = [x, y, z, \alpha, \beta, \eta]^T \\ \dot{p} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\eta}]^T \\ \ddot{p} = [\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}, \ddot{\alpha}, \ddot{\beta}, \ddot{\eta}]^T \end{cases} \quad (3)$$

Ma trận biểu diễn hệ tọa độ R_E đối với hệ tọa độ bàn kẹp R_D bởi các tọa độ thao tác được ký hiệu là:

$${}^D A_E(p) = \begin{bmatrix} c_{11}(\alpha, \beta, \eta) & c_{12}(\alpha, \beta, \eta) & c_{13}(\alpha, \beta, \eta) & x \\ c_{21}(\alpha, \beta, \eta) & c_{22}(\alpha, \beta, \eta) & c_{23}(\alpha, \beta, \eta) & y \\ c_{31}(\alpha, \beta, \eta) & c_{32}(\alpha, \beta, \eta) & c_{33}(\alpha, \beta, \eta) & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Ma trận biểu diễn hệ tọa độ dụng cụ đối với hệ tọa độ cơ sở theo chuỗi động học robot bàn máy là:

$${}^0A_E = {}^0A_{11} {}^{11}A_{12} {}^{12}A_{13} {}^{13}A_D {}^D A_E \quad (5)$$

Từ các phương trình (2) và (5), ta có phương trình động học robot dạng ma trận như sau [12]:

$${}^0A_{11} {}^{11}A_{12} {}^{12}A_{13} {}^{13}A_D {}^D A_E = {}^0B_{20} {}^{20}B_{21} {}^{21}B_{22} {}^{22}B_E \quad (6)$$

Hoặc, ký hiệu (7):

$$\begin{cases} q = [q_1, q_2, \dots, q_6]^T \\ \dot{q} = [\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_6]^T \\ \ddot{q} = [\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dots, \ddot{q}_6]^T \end{cases} \quad (7)$$

(6) đưa về dạng (8):

$${}^D A_E(q) = {}^{13}A_D^{-1} {}^{12}A_{13}(q_3) {}^{11}A_{12}(q_2) {}^0A_{11}(q_1) {}^0B_{20} {}^{20}B_{21}(q_4) {}^{21}B_{22}(q_5) {}^{22}B_E(q_6) \quad (8)$$

Từ (8), ma trận biểu diễn hệ tọa độ R_E đối với hệ tọa độ bàn kẹp R_D bởi các tọa độ khớp được ký hiệu là:

$${}^D A_E(q) = \begin{bmatrix} c_{11}(q) & c_{12}(q) & c_{13}(q) & x(q) \\ c_{21}(q) & c_{22}(q) & c_{23}(q) & y(q) \\ c_{31}(q) & c_{32}(q) & c_{33}(q) & z(q) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Từ (4) và (9) nhận được phương trình động học robot dạng ma trận:

$${}^D A_E(q) = {}^D A_E(p) \quad (10)$$

Một cách tổng quát, đưa phương trình ma trận (10) về hệ phương trình động học độc lập là hệ các phương trình đại số phi tuyến [12]:

$$\begin{cases} f_1 = x(q) - x = 0 \\ f_2 = y(q) - y = 0 \\ f_3 = z(q) - z = 0 \\ f_4 = c_{11}(q) - c_{11}(\alpha, \beta, \eta) = 0 \\ f_5 = c_{22}(q) - c_{22}(\alpha, \beta, \eta) = 0 \\ f_6 = c_{33}(q) - c_{33}(\alpha, \beta, \eta) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Các phương trình động học robot dạng ma trận (10) hoặc dạng độc lập (11) cho phép giải bài toán động học, thiết kế quỹ đạo chuyển động và lập chương trình gia công cho robot.

Từ các cảm biến có thể nhận được quy luật chuyển động của các khâu của robot biểu diễn qua các tọa độ khớp và đạo hàm các cấp $q, \dot{q}, \ddot{q}$ của chúng theo thời gian. Giải hệ (11) để nhận được quy luật chuyển động của dụng cụ tức chuyển động của hệ tọa độ R_E đối với hệ tọa độ bàn kẹp R_D , xác định bởi $p, \dot{p}, \ddot{p}$.

Ngược lại, từ yêu cầu robot thực hiện thao tác công nghệ, chuyển động thao tác của dụng cụ đối với chi tiết gia công xác định bởi các $p, \dot{p}, \ddot{p}$, giải hệ (11) để nhận được chuyển động của các khâu của robot.

4. ĐỘNG LỰC HỌC ROBOT TÁC HỢP

Khi hai cánh tay robot MRM33 thực hiện thao tác sẽ tạo thành chuỗi động học kín. Tuy vậy, trong công trình này, lực tác dụng tương hỗ giữa dụng cụ và chi tiết gia công được giả thiết có thể xác định dựa trên công thức thực nghiệm.

Khi đó có thể áp dụng phương pháp tách cấu trúc, đưa mô hình động lực học về hệ hai robot chuỗi hở, với ngoại lực tác dụng lên các robot chính là các lực tác dụng tương hỗ giữa dụng cụ và chi tiết. Áp dụng phương trình Lagrange loại hai, hệ phương trình vi phân chuyển động của robot MRM33 có dạng [13-15]:

$$M(q)\ddot{q} + \psi(q, \dot{q}) + G(q) + Q = \tau \quad (12)$$

$M(q)_{6 \times 6}$ là ma trận khối lượng của robot, được tính theo công thức sau:

$$M(q)_{6 \times 6} = \left[\sum_{i=1}^6 (J_{Ti}^T m_i J_{Ti} + {}^{ci}J_{Ri}^T {}^{ci}\Theta_{ci} {}^{ci}J_{Ri}) \right]_{6 \times 6} \quad (13)$$

Ở đây, m_i là khối lượng khâu thứ i , ${}^{ci}\Theta_{ci}$ là tensor quán tính của khâu i đối với khối tâm C_i , xác định trong hệ tọa độ khối tâm của khâu; ${}^{ci}J_{Ti}$ là ma trận Jacobi của vector tọa độ khối tâm khâu i theo vector tọa độ khớp q ; ${}^{ci}J_{Ri}$ là ma trận Jacobi của vector vận tốc góc của khâu i theo vector đạo hàm của các tọa độ khớp $\dot{q}$ (14).

$${}^{ci}J_{Ti} = \frac{\partial {}^0r_{ci}}{\partial q}; \quad {}^{ci}J_{Ri} = \frac{\partial {}^{ci}\omega_i}{\partial \dot{q}} \quad (14)$$

$\psi(q, \dot{q})_{6 \times 1}$ là vector lực suy rộng của các lực quán tính ly tâm và quán tính Coriolis, xác định dựa trên ma trận khối như sau:

$$\begin{aligned} \psi &= [\psi_1, \dots, \psi_6]^T; \quad \psi_j(q, \dot{q}) = \sum_{i,k=1}^6 (k, i, j) \dot{q}_i \dot{q}_k; \\ (k, i, j) &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial m_{ij}}{\partial q_k} + \frac{\partial m_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial m_{ij}}{\partial q_k} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

$G(q)_{6 \times 1}$ là vector lực suy rộng của các lực bảo toàn, xác định dựa trên ma trận khối lượng $M(q)$ như sau:

$$G = [G_1, \dots, G_6]^T; \quad G_i = \frac{\partial \Pi}{\partial q_i}; \quad i = \overline{1, 6} \quad (16)$$

Π là thế năng của hệ robot.

$\tau_{6 \times 1}$ là vector lực suy rộng của các lực dẫn

động, được tạo bởi các động cơ, của robot.

$Q_{6 \times 1}$ là vector lực suy rộng của các lực không bảo toàn. Có thể có nhiều thành phần ngoại lực tác dụng lên robot. Tuy vậy, với robot gia công cơ khí như MRM33 thì lực cắt là đáng kể so với các loại lực khác. Do vậy, ở đây chỉ xét đến lực cắt mà dụng cụ tác động lên bề mặt chi tiết gia công để bóc tách lớp vật liệu trên bề mặt chi tiết gia công, bỏ qua các lực ma sát trong các khớp, ma sát giữa dụng cụ cắt và bề mặt chi tiết gia công, cũng như các lực có thể có khác.

Như đã chỉ ra, ở đây giả thiết lực cắt được xác định dựa trên công thức thực nghiệm, ký hiệu vector F là lực dụng cụ cắt tác dụng lên chi tiết gia công tại điểm cắt, thì lực tác dụng lên dụng cụ là $-F$:

$$F = [F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T \quad (17)$$

Gọi các vector r_{fi} , r_E là các vector định vị điểm tiếp xúc giữa dụng cụ và chi tiết gia công, xác định lần lượt theo chuỗi động học robot bàn máy, và robot dụng cụ một cách tương ứng. Như vậy, các ma trận Jacobi của các vector này được xác định:

$$J_{T1} = \frac{\partial r_{fi}}{\partial q}; \quad J_{T2} = \frac{\partial r_E}{\partial q}; \quad (18)$$

Một cách tương tự, gọi các vector ω_d , ω_E lần lượt là các vector vận tốc góc của chi tiết gia công (của khâu cuối robot bàn máy) và của dụng cụ (của khâu cuối robot dụng cụ), nhận được các ma trận Jacobi:

$$J_{R1} = \frac{\partial \omega_d}{\partial \dot{q}}; \quad J_{R2} = \frac{\partial \omega_E}{\partial \dot{q}}; \quad (19)$$

Bảng 2. Các thông số cấu trúc chi tiết gia công và thông số công nghệ

z_0	r_0	L	φ	v_c	s_t	b
25mm	40mm	120mm	10°	25m/s	60mm/s	0.01mm

Từ đó, vector lực suy rộng Q của các lực không thể được xác định theo:

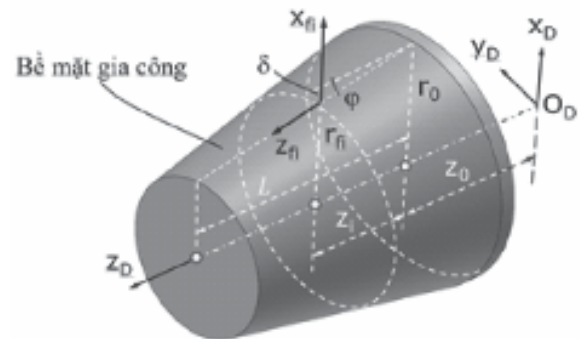
$$J_T = J_{T1} - J_{T2}; \quad J_R = J_{R1} - J_{R2}; \quad J = [J_T, J_R]^T; \quad (20)$$

$$Q = J^T F;$$

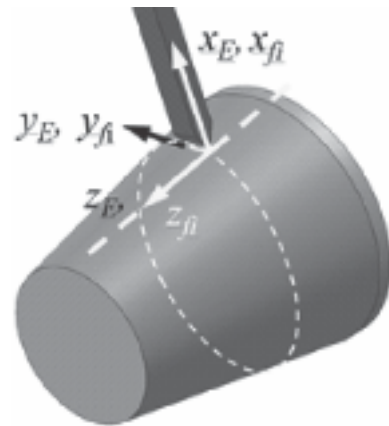
Các phương trình (12)-(20) cho phép giải bài toán động lực học robot MRM33.

5. ỨNG DỤNG

Một ví dụ được thực hiện là robot tiện tinh bề mặt cong hình côn, Hình 2.



Hình 2. Bề mặt gia công bởi MRM33



Hình 3. Tiếp xúc dụng cụ - Bề mặt gia công

Các thông số cấu trúc chi tiết gia công và thông số công nghệ được dẫn ra trong Bảng 2. Trong đó, các thông số cấu trúc được chỉ ra tương ứng trên Hình 2. Các thông số chế độ công nghệ gồm v_c là vận tốc cắt, b là chiều sâu cắt và lượng chạy dao vòng được quy ra lượng chạy dao theo thời gian là s_t .

Quá trình gia công tiện tinh được thực hiện bởi mũi dao di chuyển dọc theo đường dụng cụ là đường sinh của bề mặt gia công sao cho mũi dao tiếp xúc với bề mặt hình côn của chi tiết gia công.

Đặc trưng hình học của bề mặt gia công tại mỗi điểm trên đường dụng cụ có thể biểu diễn bởi một hệ tọa độ $x_{fi}y_{fi}z_{fi}$ sao cho trục x_{fi} pháp tuyến với bề mặt gia công tại điểm fi trên đường dụng cụ. Trục z_{fi} nằm dọc theo đường sinh, trục y_{fi} tạo thành hệ tọa độ thuận.

Hệ tọa độ dụng cụ $R_E = x_E y_E z_E$ đặt tại mũi dao xác định bởi trục x_E pháp tuyến với

lưỡi cắt, trục z_E vuông góc trục x_E và cạnh lưỡi cắt, trục y_E tạo thành hệ tọa độ thuận. Điều kiện kỹ thuật gia công là hệ tọa độ R_E và hệ tọa độ bề mặt gia công $x_{fi}y_{fi}z_{fi}$ trùng nhau, Hình 3:

$$x_B y_B z_B = x_{fi} y_{fi} z_{fi} \quad (21)$$

Từ các thông số đã cho, có thể tính quy luật chuyển động trong không gian thao tác, tức là chuyển động của dụng cụ trong hệ tọa độ bàn kẹp $R_D = x_D y_D z_D$.

Áp dụng phương pháp tính toán đã trình bày cũng như dựa trên phương pháp tính toán với chi tiết gia công đã tính toán trong [12] và nhận được kết quả về quy luật chuyển động của robot.

Trong phần này chỉ đưa ra các thông số động lực học và kết quả tính toán lực dẫn động dựa trên quy luật chuyển động đã biết. Bảng thông số động lực học của MRM33 và chi tiết (được tính cùng khâu L_{13}) được dẫn ra trong Bảng 3.

Bảng 3. Các thông số động lực học robot MRM33 và chi tiết

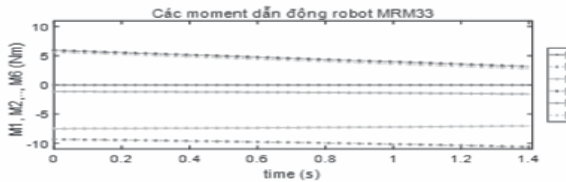
TT	Vị trí khối tâm, trong hệ tọa độ khâu (m)			Khối lượng (kg)	Mômen quán tính khối lượng, trong hệ tọa độ gắn với trọng tâm (kg.m ²)					
	x _{Ci}	y _{Ci}	z _{Ci}		I _{xx}	I _{yy}	I _{zz}	I _{xy}	I _{yz}	I _{zx}
Thông số động lực học của robot bàn máy										
L ₁₁	-0.03041	-0.03812	0	3.63992	0.003604	0.004955	0.004984	0.001443	0	0
L ₁₂	-0.11474	0	0	3.21316	0.000705	0.020394	0.020506	0	0	0
L ₁₄	-0.02487	0	0.10412	7.86931	0.050525	0.067348	0.021537	0	0	0.020374
Thông số động lực học của robot dụng cụ										
L ₂₁	-0.03041	-0.03812	0	3.63992	0.003604	0.004955	0.004984	0.001443	0	0
L ₂₂	0	0.005723	0.072543	3.24218	0.014628	0.014122	0.001339	0	-0.001346	0
L ₂₃	0.10703	-0.01944	0.003997	2.11990	0.000901	0.001094	0.001332	-0.000148	0	0.000001

Không giảm tổng quát, quá trình tiện tinh lực cắt sinh ra khá nhỏ và lượng vật liệu bóc tách (phoi) từ bề mặt gia công được cho là đồng đều nên ta tính sơ bộ lực cắt như sau:

$$F = [10, 20, 20, 0, 0, 0]^T \quad (22)$$

Ở đây, thành phần lực cắt theo hướng xé vật liệu tách từ bề mặt gia công và theo phương pháp tuyến thường lớn hơn so với thành phần theo hướng tiến dao. Các thành phần moment không đáng kể nên cho bằng không.

Hình 4 là các đồ thị biểu diễn kết quả tính toán lực dẫn động các khâu theo thời gian. Hình 5 là hình ảnh từ chương trình mô phỏng quá trình gia công.



Hình 4. Đồ thị lực dẫn động các khâu theo thời gian t .



Hình 5. Mô phỏng robot tác hợp gia công tiện tinh bề mặt chi tiết hình côn;

<https://studio.youtube.com/video/hn0daUFb4lk/edit>

6. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày bài toán động học, động lực học robot tác hợp gồm hai cách tay robot chuỗi hở 3+3 bậc tự do, MRM33. Phương pháp kết hợp phép biến đổi tọa độ và ma trận truyền biến đổi tọa độ thuần nhất cho phép nhận được phương trình động học, tạo thuận lợi cho việc thiết kế quỹ đạo chuyển động, lập chương trình gia công. Phương pháp thiết lập phương trình vi phân chuyển động được trình bày thuận lợi cho việc lập trình tự động và giải bài toán động lực học MRM33. Kết quả tính toán động học, thiết kế quỹ đạo chuyển động cung cấp dữ liệu cho bài toán tính lực dẫn động cho robot. Kết quả mô phỏng hoạt động cung cấp hình ảnh trực quan, củng cố độ tin cậy của kết quả nghiên cứu và tạo cơ sở cho nghiên cứu phát triển. ❖

Ngày nhận bài: 10/11/2025

Ngày phản biện: 15/11/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Wang Wenbo, Guo Qiang, Yang Zhibo, Jiang Yan, Xu Jinting, "A state-of-the-art review on robotic milling of complex parts with high efficiency and precision". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 79 (2023) Article 102436, DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102436.
- [2]. Wei Ji, Lihui Wang, "Industrial robotic machining: a review". Int. J. Adv. Manuf. Technol. 103 (2019) 1239-1255, DOI: 10.1007/s00170-019-03403-z.
- [3]. John Pandremenos, Christos Doukas, Panagiotis Stavropoulos, Giorgos Chrysosouris "Machining with robots: A critical review". In Proceedings of the DET 2011, Athens, Greece, 28-30 September 2011 1-8.
- [4]. Wei Ji, Lihui Wang, "Industrial robotic machining: a review". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 103 (2019) 1239-1255, DOI: 10.1007/s00170-019-03403-z.
- [5]. André F.V. Pedroso, Naiara P.V. Sebbe, Rita C.M. Sales-Contini, Francisco J.G. Silva, Rúben D.F.S. Costa, Iván I. Sánchez, Raul D.S.G. Campilho, "An overview on the recent advances in robot-assisted compensation methods used in machining lightweight materials". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 91 (2025) Article 102844, DOI: 10.1016/j.rcim.2024.102844.
- [6]. Alexander Verl, Anna Valente, Shreyes Melkote, Christian Brecher, Erdem Ozturk, Lutfi Taner Tunc, "Robots in machining". CIRP Annals. 68 (2) (2019) 799-822, DOI: 10.1016/j.cirp.2019.05.009
- [7]. Javad Jahanpour, Mehdi Motallebi, Mojtaba Porghoveh, "A Novel Trajectory Planning Scheme for Parallel Machining Robots Enhanced with NURBS Curves". Journal of Intelligent & Robotic Systems 82 (2016) 257-275, DOI: 10.1007/s10846-015-0239-6
- [8]. Michal Petko, Grzegorz Karpiel, Krzysztof Gac, Grzegorz Góra, Krzysztof Kobus, Janusz Ochoński, "Trajectory tracking controller of the hybrid robot for milling". Mechatronics 37 (2016) 100-111.
- [9]. Souflas, Thanassis; Gerontas, Christos; Bikas, Harry; Stavropoulos, Panagiotis, "On the Optimization of Robot Machining: A Simulation-Based". Process Planning Approach Machines 12 (2024) Article 521, DOI: 10.3390/machines12080521.
- [10]. Hà Thanh Hải, Đỗ Thị Kim Liên, Phan Bùi Khôi, "Thiết kế quỹ đạo và mô phỏng hoạt động của robot tác hợp gia công tạo hình bề mặt cong phức tạp". Hội nghị Cơ học Kỹ thuật toàn quốc kỷ niệm 40 năm thành lập Viện Cơ học, Hà Nội 09/4/2019 211-219.
- [11]. Phan Bùi Khôi, Hà Thanh Hải, Trần Minh Thuyết (2020), "Phân tích động học cho robot gia công phay". Tuyển tập công trình Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ XI, Hà Nội, 02-03/12/2022 648-656.
- [12]. Trần Minh Thuyết, "Mô hình hóa động học robot tác hợp gia công cơ khí". Tạp chí Cơ khí Việt Nam, tháng 6/2025.
- [13]. Phan Bui Khoi (1997), "Applying Principle of Compatibility for Analyzing Forces of Mechanism of Relative Manipulation Robot". Thesis of PhD. IMASH. RAS, Moscow.
- [14]. Phan Bui Khoi, "Dynamical Investigation of Relation Manipulation Mechanism in Mechanical Processing". Proceeding of National Conference on Mechanics, vol. 1, pp. 181-190, 2004.
- [15]. Phan Bùi Khôi, Hà Thanh Hải, Trần Minh Thuyết, "Mô hình hóa động lực học robot gia công cơ khí". Tuyển tập công trình khoa học, Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ 11; NXB. Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, 12/2022, trang 657-665.
- [16]. Hà Thanh Hải, "Inverse dynamic analysis of milling machining robot: application in calibration of cutting force". Vietnam Journal of Science and Technology, 57 (6), 2019, pp. 773-787.