

MÔ HÌNH HÓA ĐỘNG LỰC HỌC RÔ BỐT SONG SONG 3RRR

Vũ Thế Trung Giáp^{1,*}, Nguyễn Quang Văn¹

¹Khoa Hàng không - Vũ trụ, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v18.n01.583

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu về mô hình hóa động lực học rô bốt song song 3RRR. Trên cơ sở phân tích, tổng hợp kết quả từ các nghiên cứu trong và ngoài nước, bài báo đưa ra bài toán phân tích mô hình cơ học, mô hình toán học mô tả chuyển động của rô bốt song song 3RRR làm cơ sở để phân tích động học và động lực học. Quá trình tính toán, phân tích được thực hiện trên Maple cho kết quả trực quan, tường minh và mô tả các đại lượng bằng đồ thị mô phỏng sinh động. Từ kết quả đó, nghiên cứu phát triển thiết kế mô hình trên phần mềm SolidWorks cùng với sự trợ giúp của công cụ Simscape Multibody trong MATLAB để tiến hành mô phỏng chuyển động của rô bốt theo các quỹ đạo xác định. Do đó, nghiên cứu thu được đồ thị tín hiệu mô men tại các khớp chủ động theo hai phương pháp giống nhau chứng minh kết quả phân tích, tính toán là đúng. Nghiên cứu còn phát triển thiết kế, chế tạo mô hình rô bốt thực và thực hiện điều khiển mô hình theo các quỹ đạo cho trước. Các kết quả nghiên cứu này sẽ làm công cụ tham khảo hữu ích cho ứng dụng cho tính toán, thiết kế mô hình rô bốt song song 3RRR trong các trường hợp thực tế.

Từ khóa: Simscape multibody; động lực học; rô bốt song song 3RRR.

1. Mở đầu

Rô bốt song song 3RRR là loại rô bốt song song có một tấm di động hình tam giác đều được kết nối với bộ cố định thông qua 3 chuỗi động học sử dụng các khớp quay theo cặp động học như hình 1. Với cấu trúc này, giữa các khâu liên kết với nhau bằng khớp quay, ta thấy rằng một tấm dịch chuyển liên kết với bộ cố định bởi ba chuỗi động học có chuyển động độc lập trong đó mỗi chuỗi có một khớp chủ động và một khớp thụ động. Có rất nhiều hướng ứng dụng rô bốt song song 3RRR, tiêu biểu là khả năng chọn và đặt các cơ cấu thao tác trên một bề mặt phẳng và để di động để cải thiện hiệu suất như không gian làm việc, độ cứng vững và sự khéo léo của cơ cấu song song có thể thao tác trong không gian làm việc phẳng.

Các kết quả phân tích trong các nghiên cứu trước đây [1-4] đã đạt được những kết quả nhất định trong việc phân tích động học, động lực học của cơ cấu rô bốt. Cụ thể: Trong nghiên cứu [1] đã chỉ ra được quá trình nghiên cứu mô hình cơ học, phân tích động học,

* Email: vuthetronggiap@lqdtu.edu.vn

động lực học của cơ cấu với các tham số đầu vào lý tưởng nhưng chưa tiến hành xây dựng mô hình mô phỏng, kiểm nghiệm thực tế để kiểm chứng thuật toán đưa ra. Bài báo [2] đã tiếp cận theo phương pháp hình học với sự trợ giúp của một kỹ thuật giải quyết từ ma trận Jacobian chỉ ra mối quan hệ giữa độ dài và góc liên kết để giải quyết bài toán động học. Bài báo [3] áp dụng phương trình Lagrange để xây dựng được mô hình vi phân chuyển động của cơ cấu rô bốt, từ đó làm cơ sở thiết kế bộ điều khiển. Tuy nhiên, phương pháp này lại hạn chế trong việc khảo sát động học, động lực học của rô bốt, cụ thể về vận tốc, gia tốc, quán tính của các khâu, các khớp. Bài báo [4] đã tiến hành thiết kế và cung cấp công cụ mô phỏng cơ cấu rô bốt song song 3RRR nhưng chưa phân tích kỹ động học, động lực học của cơ cấu, chỉ dừng lại ở việc đã tích hợp được kết quả động học thuận, động học ngược vào ứng dụng mô phỏng vị trí thực tế mong muốn.



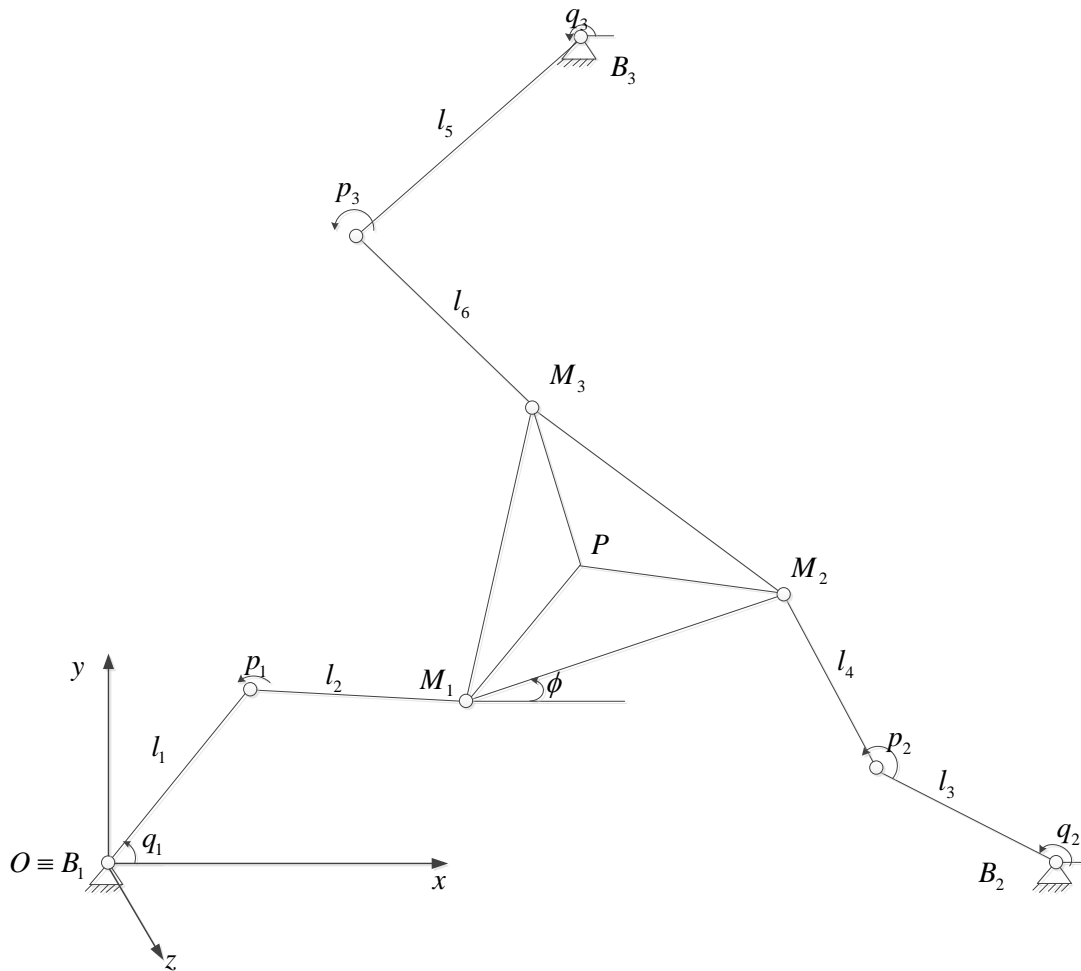
Hình 1. Mô hình rô bốt song song 3RRR.

Trên cơ sở phân tích và tổng hợp những kết quả đạt được từ các nghiên cứu trong và ngoài nước, dựa trên hướng phân tích trong nghiên cứu [1], nhóm tác giả nghiên cứu mô hình cơ học, mô hình toán học mô tả chuyển động của rô bốt song song 3RRR làm cơ sở để phát triển các mô hình rô bốt song song phức tạp hơn. Kết quả của các công trình nghiên cứu trước [1-4] đã giải quyết được bài toán động học và động lực học nhưng chưa tiến hành mô phỏng cơ cấu rô bốt trên một môi trường nhất định nào đó để kiểm chứng những kết quả tính toán được đã chính xác chưa. Trong bài báo này, các tác giả trình bày nghiên cứu chi tiết quá trình phân tích, tính toán động học, động lực học, tiến hành kiểm chứng và mô phỏng chuyển động của rô bốt trên phần mềm Matlab-Simulink theo các quỹ đạo cho trước để chứng minh tính đúng đắn của phương pháp và kết quả nghiên cứu.

Sau đó, tiến hành thiết kế, chế tạo mô hình thực để kiểm chứng các kết quả đã tính toán, mô phỏng.

2. Mô hình nghiên cứu

2.1. Mô hình vật lý - toán học rô bốt song song 3RRR



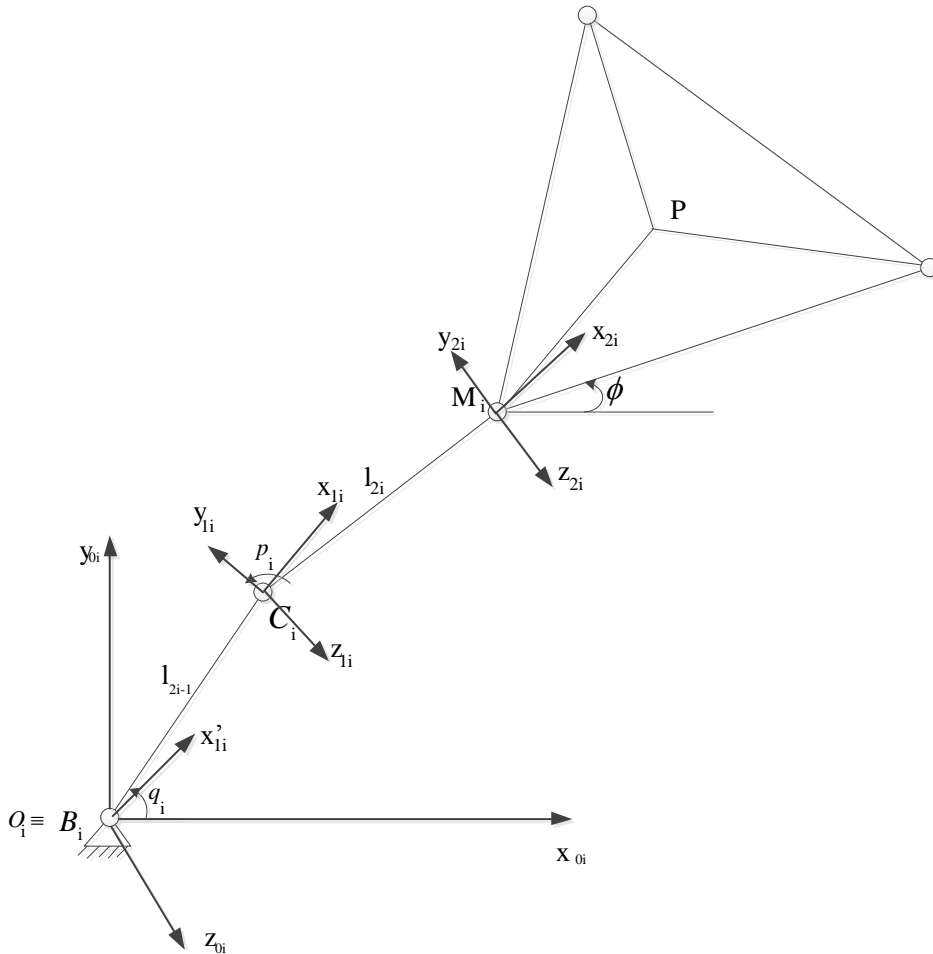
Hình 2. Hệ tọa độ đặt trên rô bốt song song 3RRR.

Rô bốt song song 3RRR trong nghiên cứu này có tâm di động liên kết với bộ cố định bằng ba chuỗi động học độc lập. Các ký hiệu q_i và p_i lần lượt là các góc quay chủ động và bị động tương ứng của ba chuỗi động học độc lập ($i = 1, 2, 3$). Các độ dài khâu và góc xoay định hướng của tâm di động được ký hiệu là l_{2i-1} và ϕ . Các điểm B_1, B_2, B_3 và M_1, M_2, M_3 lần lượt là các ký hiệu hình học của bộ cố định và tâm di động như hình 2. Các hệ tọa độ (x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}) và (x_{Mi}, y_{Mi}, z_{Mi}) lần lượt được gắn vào các chân bộ cố định và tâm di động

của các tay máy tương ứng. O_i và M_i lần lượt là các gốc tọa độ của các hệ tọa độ (x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}) và (x_{Mi}, y_{Mi}, z_{Mi}) tương ứng. Điểm $P(x_P, y_P)$ và ϕ là vị trí và góc xoay định hướng của khâu chấp hành cuối di chuyển dựa theo tọa độ (x, y) .

2.2. Động học rô bốt song song 3RRR

Sử dụng phương pháp ma trận Denavit - Hartenberg - Craig giải bài toán động học cho mô hình rô bốt song song 3RRR với tập hợp các thông số $(\alpha_{j-1}, a_{j-1}, \theta_j, d_j)$ để mô tả sự thay đổi vị trí của hai khâu liên tiếp nhau trong ba chân của cơ cấu rô bốt song song phẳng 3RRR [1-4]. Thiết lập các hệ trục tọa độ khớp địa phương gắn với mỗi khâu của các chân bất kỳ trên rô bốt song song phẳng 3RRR theo phương pháp Denavit - Hartenberg - Craig chuyển từ gốc cố định O_i đến M_i thông qua khớp B_i và C_i (Hình 3):



Hình 3. Hệ trục tọa độ khớp ứng với mỗi khâu rô bốt song song phẳng 3RRR.

Sử dụng đồng nhất hình học $OB_i + B_iC_i + C_iM_i = OP + PM_i$ từ hình 3 thu được hệ phương trình:

$$\begin{aligned} & x_i^2 + y_i^2 + x_p^2 + y_p^2 + u_i^2 + v_i^2 + l_{2i-1}^2 - l_{2i}^2 - 2y_p y_i - 2x_p x_i + \\ & + 2y_p v_i \cos(\phi) + 2y_p u_i \sin(\phi) - 2l_{2i-1} y_p \sin(q_i) + 2x_p u_i \cos(\phi) - 2u_i x_i \cos(\phi) - \\ & - 2v_i y_i \cos(\phi) - 2x_p v_i \sin(\phi) - 2u_i y_i \sin(\phi) + 2v_i x_i \sin(\phi) - 2l_{2i-1} x_p \cos(q_i) + \\ & + 2l_{2i-1} y_i \sin(q_i) + 2l_{2i-1} x_i \cos(q_i) - 2l_{2i-1} u_i \cos(\phi - q_i) + 2l_{2i-1} v_i \sin(\phi - q_i) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

với $u_i = n_i \cos \gamma_i, v_i = n_i \sin \gamma_i$ vì n_i, γ_i không thay đổi theo thời gian.

Nghiệm tổng quát của phương trình (1) có dạng:

$$q_i(t) = \arctan 2(A_i, B_i) \mp \arctan 2\left(\sqrt{A_i^2 + B_i^2 - R_i^2}, R_i\right) \quad (2)$$

trong đó:

$$\begin{aligned} A_i &= -2l_{2i-1} (\cos(\phi)v_i + \sin(\phi)u_i + y_p - y_i) \\ B_i &= -2l_{2i-1} (\cos(\phi)u_i - \sin(\phi)v_i + x_p - x_i) \\ R_i &= -2y_p \cos(\phi)v_i - 2y_p \sin(\phi)u_i - 2\cos(\phi)x_p u_i + 2\cos(\phi)u_i x_i + \\ & + 2\cos(\phi)v_i y_i + 2\sin(\phi)x_p v_i + 2\sin(\phi)u_i y_i - 2\sin(\phi)v_i x_i - \\ & - (y_p)^2 + 2y_p y_i - (x_p)^2 + 2x_p x_i + l_{2i}^2 - l_{2i-1}^2 - u_i^2 - v_i^2 - x_i^2 - y_i^2 \end{aligned}$$

Thay (2) vào (1) thu được biểu thức góc quay $p_i(t)$ của khớp bị động C_i :

$$p_i = -q_i + \arccos\left(\frac{\cos(\phi)u_i - \sin(\phi)v_i - \cos(q_i)l_{2i-1} + x_p - x_i}{l_{2i}}\right) \quad (3)$$

Lấy đạo hàm phương trình (1) theo thời gian thu được mô hình động học vi phân mô tả chuyển động của rô bốt song song 3RRR có dạng $\mathbf{J}_2 \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_1 \dot{\mathbf{x}}$:

$$\begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 \\ 0 & 0 & d_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}$$

với $a_i = 2(\cos(\phi)u_i + \sin(\phi)v_i + \cos(q_i)l_{2i-1} - x_p + x_i)$

$$b_i = 2(\cos(\phi)v_i - \sin(\phi)u_i + \sin(q_i)l_{2i-1} - y_p + y_i)$$

$$\begin{aligned}
 c_i &= 2(\sin(q_i)\cos(\phi)u_i l_{2i-1} - \sin(q_i)\sin(\phi)v_i l_{2i-1} - \cos(\phi)\cos(q_i)v_i l_{2i-1} - \\
 &\quad - \sin(\phi)\cos(q_i)u_i l_{2i-1} - y_p \cos(\phi)u_i + \cos(\phi)x_p v_i + \cos(\phi)u_i y_i - \\
 &\quad - \cos(\phi)v_i x_i + y_p \sin(\phi)v_i + \sin(\phi)x_p u_i - \sin(\phi)u_i x_i - \sin(\phi)v_i y_i) \\
 d_i &= 2l_{2i-1}(\sin(q_i)\cos(\phi)u_i - \sin(q_i)\sin(\phi)v_i - \cos(\phi)\cos(q_i)v_i - \\
 &\quad - \sin(\phi)\cos(q_i)u_i + \sin(q_i)x_p - \sin(q_i)x_i - y_p \cos(q_i) + \cos(q_i)y_i)
 \end{aligned}$$

Từ đây thu được ma trận Jacobian tổng hợp có dạng:

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\chi}} \quad (4)$$

với $\dot{\boldsymbol{\chi}} = [\dot{x}_p \quad \dot{y}_p \quad \dot{\phi}]^T$ và $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1 \quad \dot{q}_2 \quad \dot{q}_3]^T$ là các vector vận tốc trong hệ tọa độ khớp và hệ tọa độ gốc cố định tương ứng:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_2^{-1}\mathbf{J}_1 \quad (5)$$

Như vậy, sau khi tiến hành phân tích động học ngược của rô bốt song song phẳng 3RRR, xuất phát từ mô hình cấu trúc song song phẳng 3RRR, dựa trên phương pháp ma trận Denavit - Hartenberg - Craig và sử dụng đồng nhất hình học, ta thiết lập được hệ tọa độ khớp cho từng chân của rô bốt, xây dựng phương trình liên hệ giữa khâu chấp hành cuối trên tâm di động là $P(x_p, y_p)$ và ϕ với vector góc chủ động và vector góc bị động của tay máy rô bốt lần lượt là $q = [q_1, q_2, q_3]^T$, $p = [p_1, p_2, p_3]^T$. Từ đó, ta tìm được q, p biến đổi theo thời gian t .

2.3. Động lực học rô bốt song song 3RRR

Lấy vi phân phương trình (4), ta có mối quan hệ giữa gia tốc trong hệ tọa độ khớp và gia tốc trong hệ tọa độ công tác:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\chi}} + \dot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\chi}} \quad (6)$$

Căn cứ ma trận Craig chuyển từ O_i đến C_i xác định được vector vị trí của điểm C_i :

$$\mathbf{R}_{C_i} = \begin{bmatrix} l_{2i-1} \cos(q_i) + x_i \\ l_{2i-1} \sin(q_i) + y_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

Áp dụng giải hệ phương trình (6) tính toán lực quán tính và mô men của các khâu và tâm di động đối với khối tâm của mô hình rô bốt song song 3RRR, với m_{2i-1}, m_{2i}, m_p và c_{2i-1}, c_{2i}, c_p lần lượt là khối lượng và khối tâm của các khâu l_{2i-1}, l_{2i} và tâm di động ứng với các chân $i = 1, 2, 3$. Lực và mô men tác dụng lên các khâu l_{2i-1} có khối lượng m_{2i-1} được xác định theo công thức [5-7]:

$$\mathbf{F}_{2i-1} = -m_{2i-1}(\mathbf{a}_{c_{2i-1}} - \mathbf{g}) = -m_{2i-1} \cdot \begin{bmatrix} -r_{2i-1} \left(\cos(q_i)(\dot{q}_i)^2 + (\ddot{q}_i) \sin(q_i) \right) \\ r_{2i-1} \left(-\sin(q_i)(\dot{q}_i)^2 + (\ddot{q}_i) \cos(q_i) \right) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$M_{2i-1} = - \left(\ddot{q}_i \cdot I_{2i-1z} + m_{2i-1} \cdot \left(\frac{d}{dq_i} \mathbf{r}_{c_{2i-1}} \right)^T \cdot \mathbf{a}_{B_i} \right) = -\ddot{q}_i \cdot I_{2i-1z}$$

với \ddot{q}_i là gia tốc góc của trục quay B_i , I_{2i-1} là mô men quán tính của khâu l_{2i-1} , vì trục B_i chỉ quay theo trục Oz nên $I_{2i-1} = I_{2i-1z}$, \mathbf{a}_{B_i} là gia tốc dài của các điểm B_i .

Lực và mô men của các khâu l_{2i} có khối lượng m_{2i} được xác định theo công thức:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{2i} &= -m_{2i}(\mathbf{a}_{c_{2i}} - \mathbf{g}) \\ &= -m_{2i} \cdot \begin{bmatrix} -\cos(\delta_i)(\dot{\delta}_i)^2 r_{2i} - \sin(\delta_i)(\ddot{\delta}_i) r_{2i} - \cos(q_i)(\dot{q}_i)^2 l_{2i-1} - \sin(q_i)(\ddot{q}_i) l_{2i-1} \\ -\sin(\delta_i)(\dot{\delta}_i)^2 r_{2i} + \cos(\delta_i)(\ddot{\delta}_i) r_{2i} - \sin(q_i)(\dot{q}_i)^2 l_{2i-1} + \cos(q_i)(\ddot{q}_i) l_{2i-1} \end{bmatrix} \\ M_{2i} &= - \left(\ddot{\delta}_i \cdot I_{2iz} + m_{2i} \cdot \left(\frac{d}{dq_i} \mathbf{r}_{c_{2i}} \right)^T \cdot \mathbf{a}_{C_i} \right) \\ &= -\ddot{\delta}_i \cdot I_{2iz} + m_{2i} l_{2i-1} r_{2i} \cdot \left(\sin(\delta_i - q_i)(\dot{q}_i)^2 + \cos(\delta_i - q_i)(\ddot{q}_i) \right) \end{aligned} \quad (9)$$

với I_{2i} là mô men quán tính của khâu l_{2i} , vì C_i chỉ quay theo trục Oz nên $I_{2i} = I_{2iz}$, \mathbf{a}_{C_i} là gia tốc dài của các điểm C_i .

Lực và mô men của tấm di động có khối lượng m_p được xác định theo công thức:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_p &= -m_p(\mathbf{a}_{m_p} - \mathbf{g}) \\ &= -m_p \cdot \begin{bmatrix} -\cos(\phi)(\dot{\phi})^2 u_3 - \sin(\phi)(\ddot{\phi}) u_3 + \sin(\phi)(\dot{\phi})^2 v_3 - \cos(\phi)(\ddot{\phi}) v_3 + \ddot{x}_p \\ -\cos(\phi)(\dot{\phi})^2 v_3 - \sin(\phi)(\ddot{\phi}) v_3 - \sin(\phi)(\dot{\phi})^2 u_3 + \cos(\phi)(\ddot{\phi}) u_3 + \ddot{y}_p \end{bmatrix} \\ M_p &= - \left(\ddot{\phi} \cdot I_p + m_p \cdot \left(\frac{d}{dq_i} \mathbf{r}_{M_3} \right)^T \cdot \mathbf{a}_{c_p} \right) \\ &= -\ddot{\phi} \cdot I_{p_z} + m_p \cdot \left(-\ddot{x}_p (\cos(\phi) v_3 + \sin(\phi) u_3) + \ddot{y}_p (\cos(\phi) u_3 - \sin(\phi) v_3) \right) \end{aligned} \quad (10)$$

với I_p là mô men quán tính của tấm dịch chuyển, vì trục M_3 chỉ quay theo trục Oz nên $I_p = I_{p_z}$, \mathbf{a}_{c_p} là gia tốc dài của điểm C_p .

Trên cơ sở phân tích, tính toán các yếu tố động học (vận tốc, gia tốc của các khâu), yếu tố động lực học (lực quán tính và mô men của các khâu và tầm dịch chuyển) và các thông số hình học của rô bốt (kích thước, khối lượng,...) có thể xác định trên SolidWorks [8-10], động lực học ngược của rô bốt song song 3RRR dựa trên nguyên lý công ảo được cho bởi phương trình:

$$\mathbf{J}^T \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{Q} = 0 \quad (11)$$

trong đó: \mathbf{J}^T là ma trận Jacobi chuyển vị được lấy từ (4),

$$\mathbf{Q} = \sum_{i=1}^3 \left(\begin{bmatrix} v_{2i-1}^T & \omega_{2i-1}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{2i-1} \\ \mathbf{M}_{2i-1} \end{bmatrix} \right) + \sum_{i=1}^3 \left(\begin{bmatrix} v_{2i}^T & \omega_{2i}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{2i} \\ \mathbf{M}_{2i} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} v_{mp}^T & \omega_{mp}^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{F}_P \\ \mathbf{M}_P \end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]^T$ là mô men dẫn động của rô bốt song song 3RRR.

Công thức (11) được xây dựng từ kết quả của phương trình động lực học mô tả chuyển động của cơ hệ theo phương pháp Newton - Euler, giúp thuận tiện hơn đối với mô hình đang xây dựng.

Từ phương trình (11) ta thu được kết quả:

$$\boldsymbol{\tau} = -(\mathbf{J}^T)^{-1} \cdot \mathbf{Q} \quad (12)$$

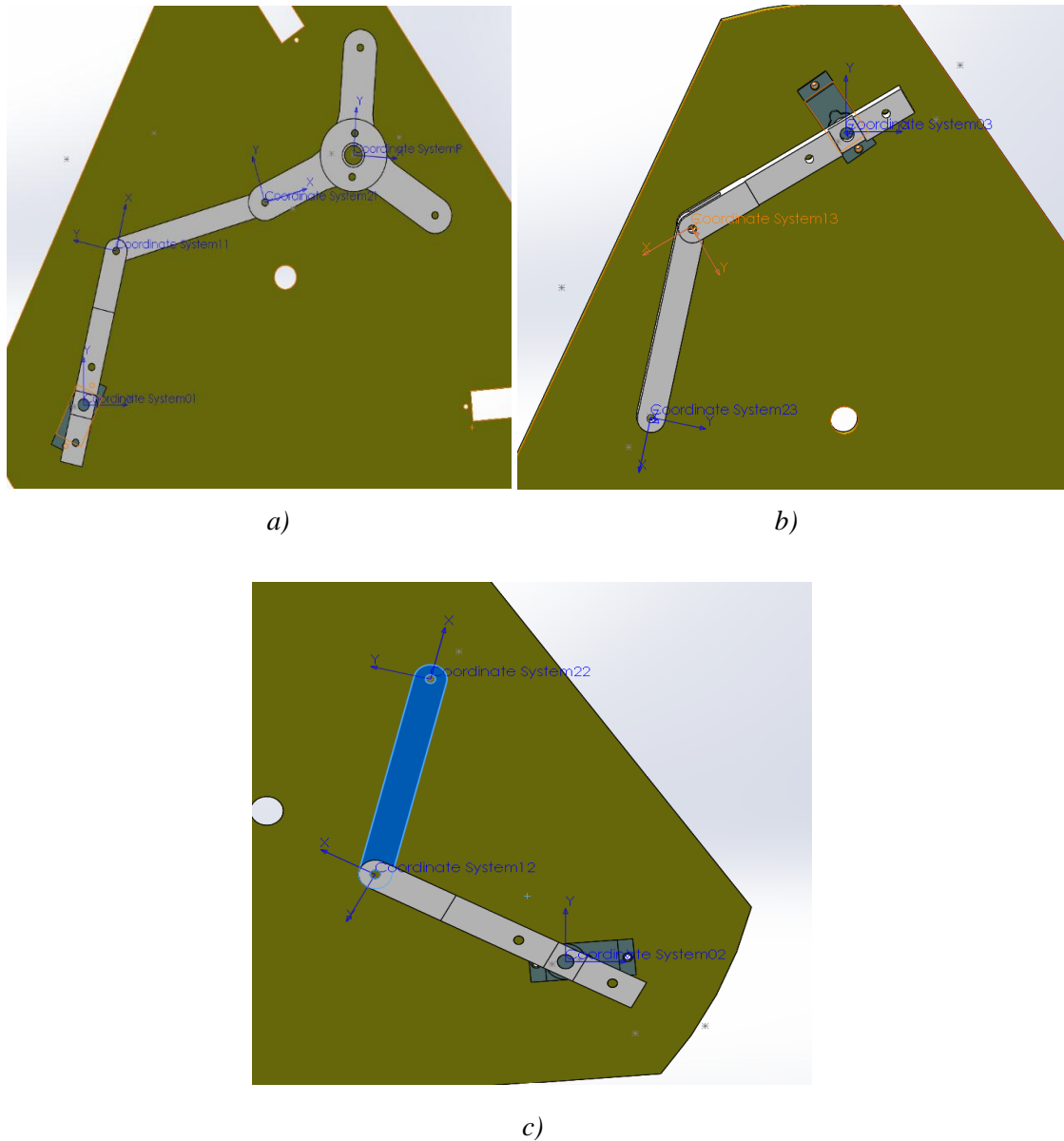
Sau khi tiến hành phân tích động lực rô bốt song song 3RRR, xác định được biểu thức của mô men dẫn động $\boldsymbol{\tau}$ theo như công thức (12). Đây là tín hiệu đầu vào của ba động cơ trên bộ cố định để điều chỉnh các góc khớp chủ động q .

2.4. Mô phỏng rô bốt song song 3RRR

2.4.1. Mô hình rô bốt song song 3RRR trên SolidWorks

Sử dụng phần mềm SolidWorks và công cụ Simscape Multibody để xây dựng mô hình cơ khí của rô bốt song song 3RRR qua các bước:

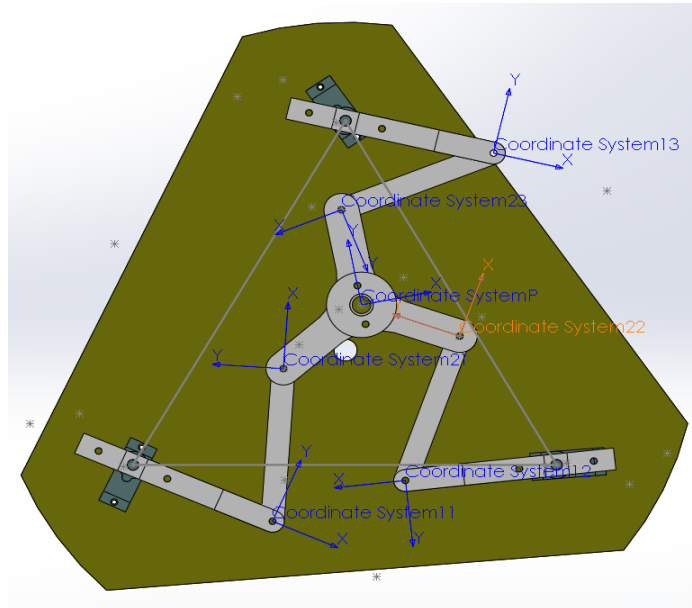
Bước 1: Thiết kế các thành phần của rô bốt là đế, động cơ, thanh l_1 , thanh l_2 , bàn làm việc và cơ cấu chấp hành cuối. Lắp ghép các thành phần của rô bốt lại với nhau thành một mô hình hoàn chỉnh. Để có cơ sở khi điều khiển các góc chủ động của động cơ theo góc quay tương ứng và chính xác, ta tiến hành đặt hệ tọa độ toàn cục cho cả mô hình tại điểm O và hệ tọa độ địa phương trên các khâu dẫn của rô bốt theo phương pháp Denavit - Hartenberg - Craig được biểu diễn như hình 4.



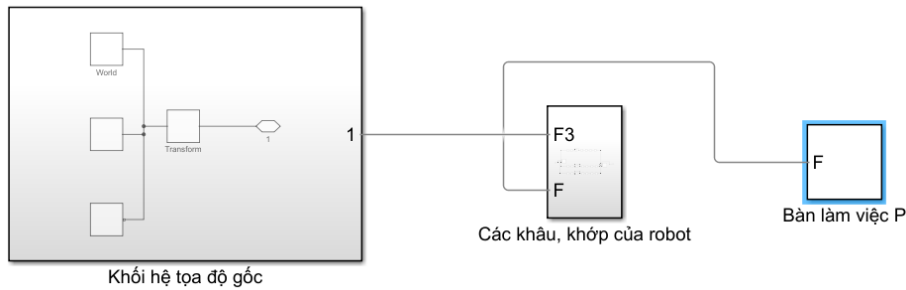
Hình 4. Đặt hệ tọa độ trong SolidWorks.

Bước 2: Sử dụng tiện ích Simscape Multibody để nhập mô hình vào Matlab.

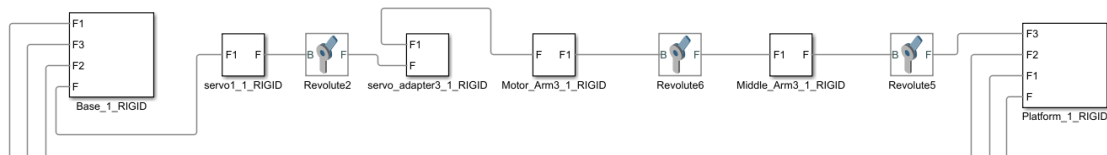
Quá trình lắp ghép hoàn tất như hình 5, chúng ta vào mục SimMechanics Link chọn Export, sau đó chọn mục Simscape Multibody. Lúc này phần mềm tự động chuyển mô hình rô bốt từ SolidWorks sang Matlab như hình 6. Có thể thấy mô hình trong hình 7 gồm các khối mô phỏng các thành phần của cơ cấu rô bốt được sắp xếp một cách trình tự đúng theo nguyên tắc lắp ráp và thiết kế trước đó [11-13].



Hình 5. Mô hình rô bốt được lắp ghép hoàn tất.



Hình 6. Mô hình rô bốt song song 3RRR từ SolidWorks đã tích hợp trong Simscape Multibody.



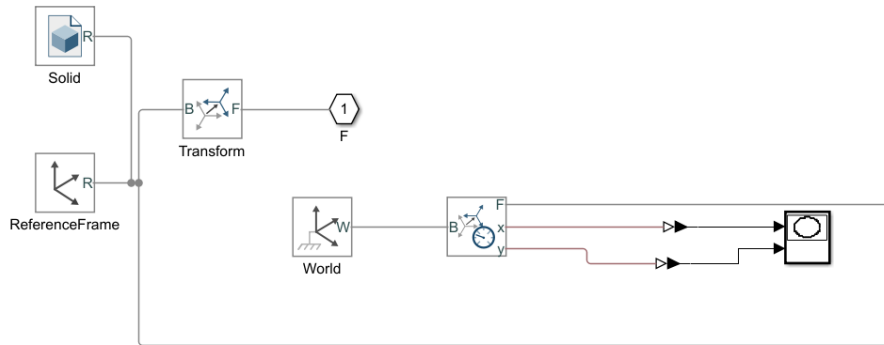
Hình 7. Mô hình biểu diễn đặc trưng của một chuỗi động học trong rô bốt.

2.4.2. Thiết lập điều khiển và mô phỏng trên Simscape Multibody

Trong mô hình mô phỏng, các tham số của rô bốt song song phẳng 3 bậc tự do được xác định từ phần mềm SolidWorks. Ta mong muốn xây dựng được các quỹ đạo hình tròn, hình số 8 và hình cánh hoa.

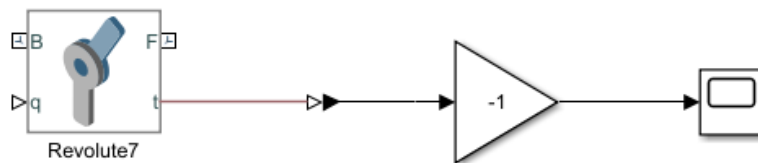
Cho trước quỹ đạo tằm di động theo các quỹ đạo hình tròn, hình số 8 và hình cánh hoa. Để biểu diễn quỹ đạo chuyển động của khâu chấp hành cuối trong sơ đồ sử dụng thêm khối

XY Graph trong Library Browser như hình 8. Khối này được nối tới điểm công tác trong tấm dịch chuyển P.

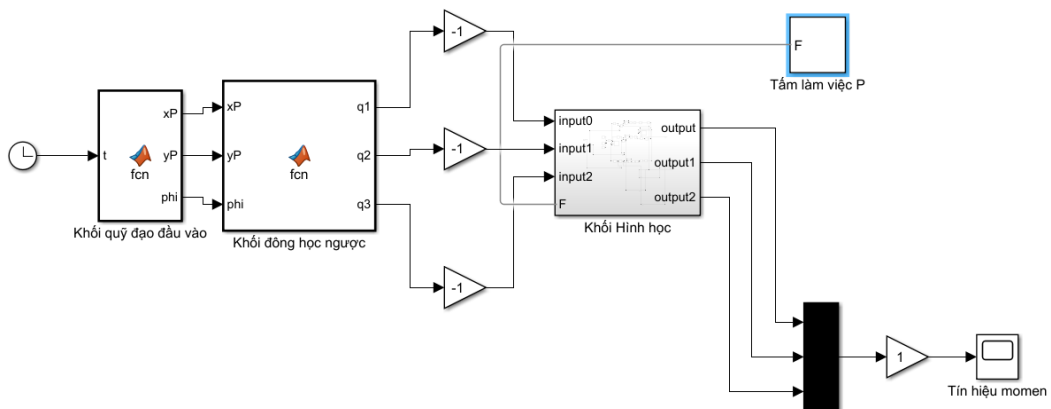


Hình 8. Sơ đồ biểu diễn quỹ đạo chuyển động của khâu chấp hành cuối.

Trên cơ sở mô phỏng quỹ đạo chuyển động của tấm di động P, mục tiêu đặt ra là xác định được tín hiệu mô men cần thiết đặt vào các động cơ để đáp ứng quỹ đạo đầu ra. Để làm được điều đó, một đầu ra được định cấu hình cho khối quay để kết nối hệ thống giám sát như hình 9 bao gồm PS-S Converter, một khối khuếch đại để đổi chiều tín hiệu và xuất tín hiệu ra màn hình Scope như hình 10.



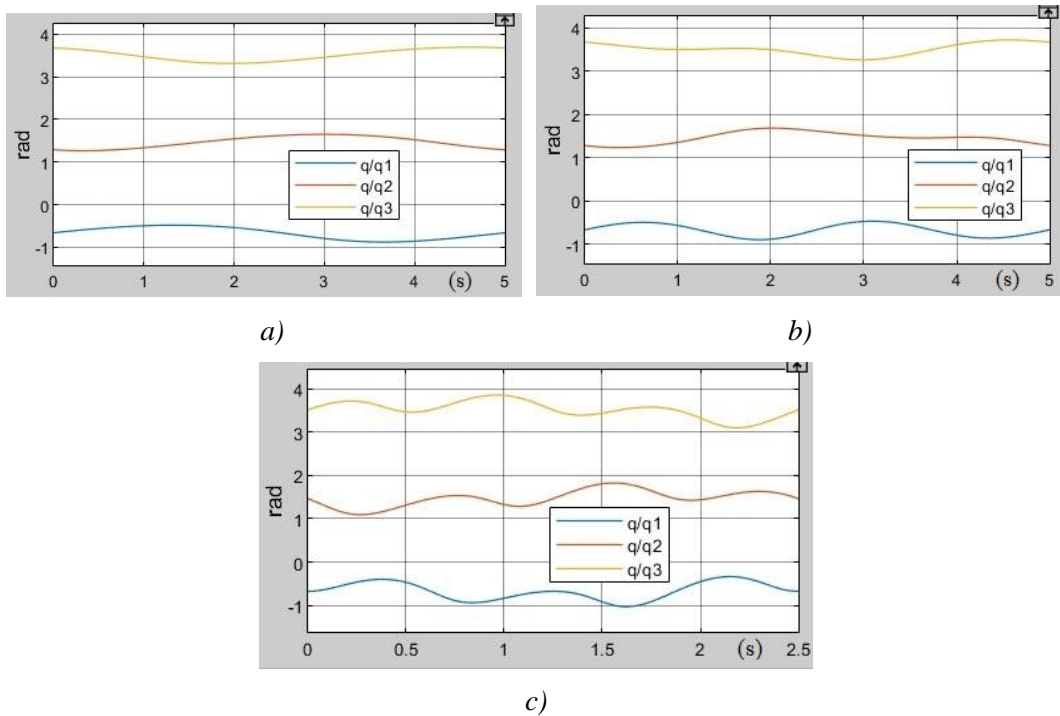
Hình 9. Sơ đồ khối xuất tín hiệu mô men các động cơ.



Hình 10. Sơ đồ mô phỏng và xuất tín hiệu mô men các động cơ.

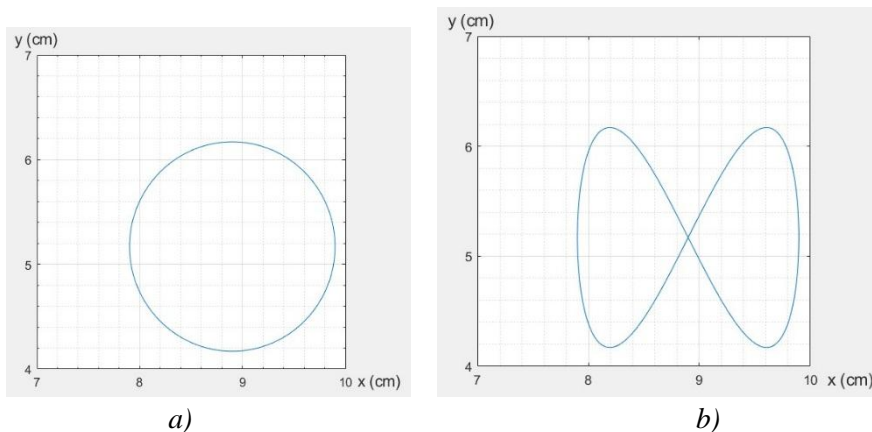
3. Kết quả mô phỏng

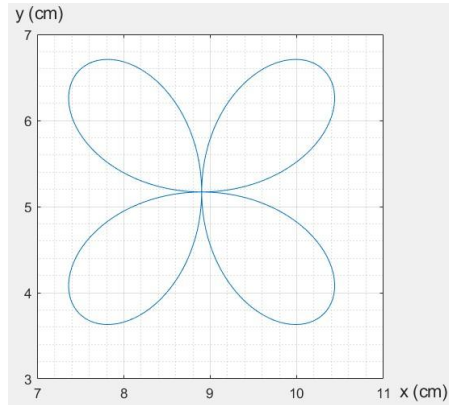
Từ việc phân tích, nghiên cứu động học và động lực học của mô hình rô bốt song song 3RRR kết hợp với mô hình thiết kế trên phần mềm SolidWorks, để tránh các điểm kỳ dị trong quá trình làm việc của rô bốt [14-16], nhóm tác giả đã xác định được tín hiệu góc quay chủ động cần thiết để điều khiển cơ cấu rô bốt theo quỹ đạo hình tròn (Hình 11a), hình số 8 (Hình 11b) và hình cánh hoa (Hình 11c) như sau:



Hình 11. Góc khớp chủ động các chân mô hình rô bốt song song 3RRR.

Quỹ đạo chuyển động của tấm di động P thu được theo kết quả hình tròn (Hình 12a), hình số 8 (Hình 12b) và hình cánh hoa (Hình 12c):

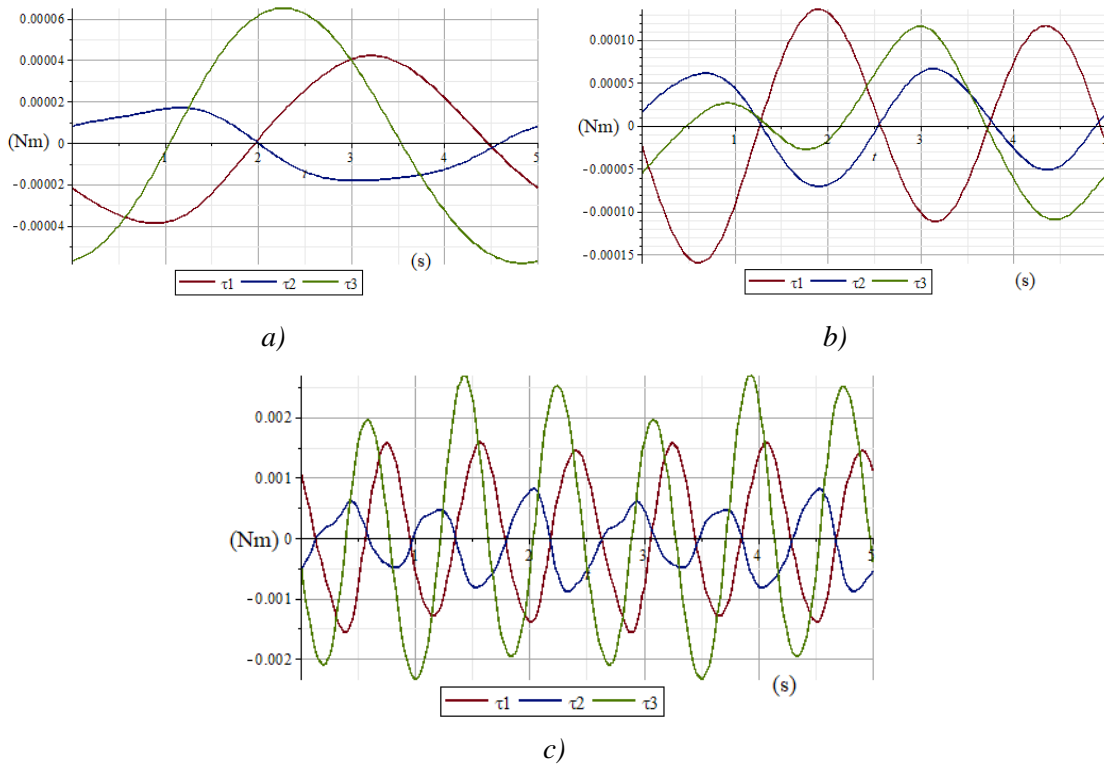




c)

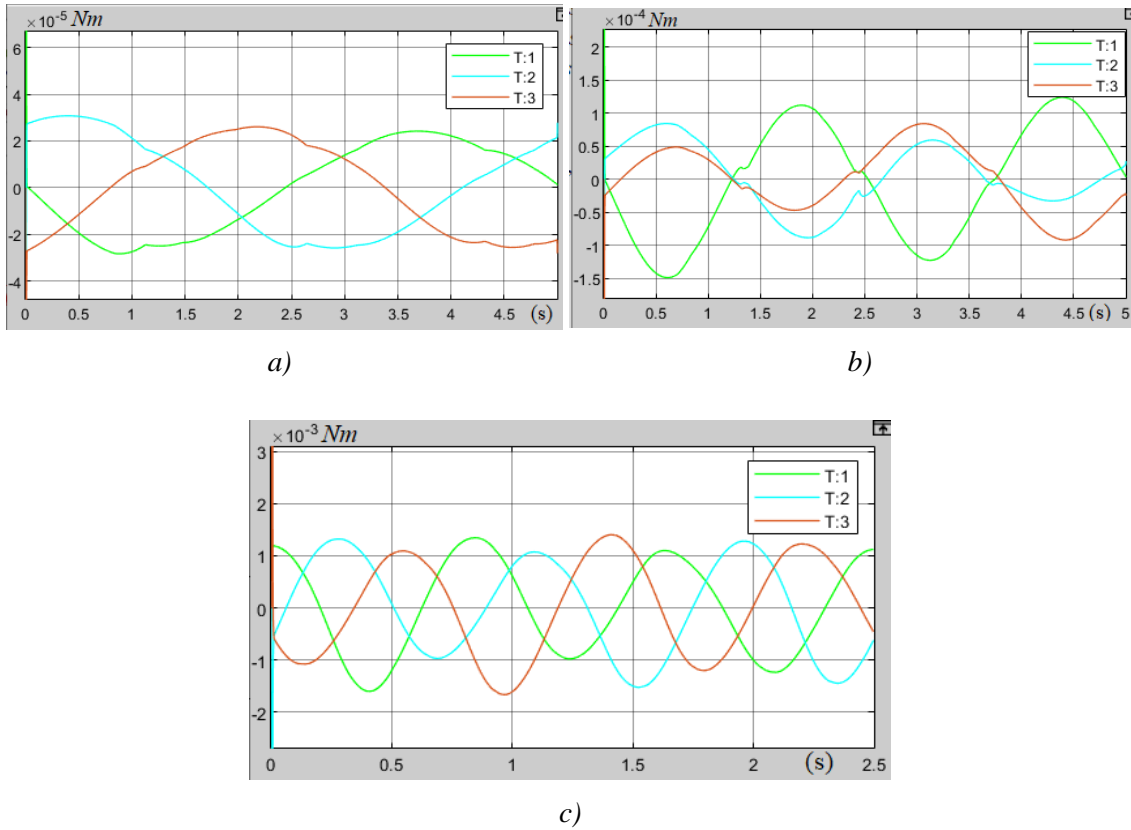
Hình 12. Quỹ đạo chuyển động của tâm di động P.

Quỹ đạo chuyển động mô phỏng hoàn toàn chính xác so với tính toán. Điều đó cho thấy quá trình phân tích, tính toán động học trước đó là hoàn toàn chính xác. Từ mô hình thiết kế trên SolidWorks với đầy đủ các dữ liệu về kích thước, hình dáng, khối lượng, mô men quán tính của từng khâu, nhóm đã tiến hành tính toán trên phần mềm Maple [17, 18] để tính ra mô men dẫn động cần thiết đặt vào các động cơ như sau:



Hình 13. Tín hiệu mô men cấp vào các động cơ.

Bên cạnh đó, sau khi đã mô phỏng được quỹ đạo chuyển động, hệ thống thu được tín hiệu mô men cần thiết cấp vào động cơ tại khớp chủ động để điều khiển tâm di động P như hình 14 (tín hiệu này được lấy ra từ quá trình chuyển động của cơ cấu được tích hợp sẵn trong Matlab-Simulink).

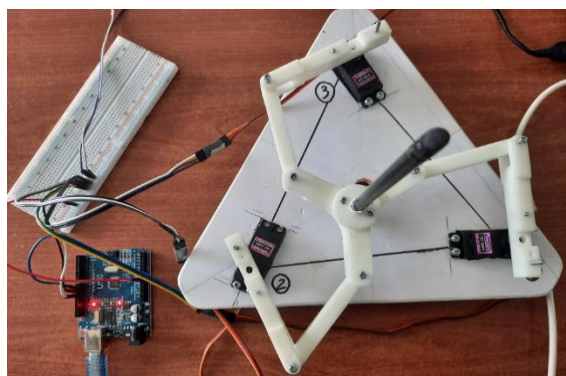


Hình 14. Tín hiệu mô men cấp vào các động cơ.

So sánh hai biểu đồ tín hiệu mô men giữa hình 13 và 14, ta có thể thấy dạng tín hiệu và độ lớn tín hiệu giữa hai phương pháp để có được tín hiệu mô men giống nhau về hình dạng đồ thị và độ lớn của tín hiệu. Điều đó cho thấy quá trình phân tích, tính toán để tìm ra tín hiệu mô men theo hai phương pháp trên là hoàn toàn chính xác. Tuy nhiên, vẫn còn sự sai lệch nhất định đến từ quá trình lấy các tham số đầu vào trong Mass properties của phần mềm SolidWorks để tính toán ở Maple chưa hoàn toàn chính xác về điều kiện lý tưởng của các khâu, các khớp mà ta đã quy ước trong quá trình tính toán động học, động lực học cũng như thuật toán tích hợp sẵn trong phần mềm Matlab-Simulink được giải theo phương pháp số chỉ cho kết quả gần đúng.

4. Kết quả thực nghiệm và bàn luận

Mô hình rô bốt được chế tạo từ các chi tiết nhựa in 3D và lắp ráp trên một tấm gỗ, như thể hiện trong hình 15. Các khoảng trống và biên dạng được cắt tùy ý để giảm sức nặng của các chi tiết chuyển động. Các chốt tiêu chuẩn và tất cả các chi tiết đều được chế tạo bằng cách tạo mẫu nhanh và in 3D. Ba động cơ servo được gắn tại ba khớp nối và điều khiển bằng Arduino Uno. Các động cơ được lắp ráp với dung sai cho phép để giảm va chạm giữa các chi tiết có thể dẫn đến điểm kỳ dị trong cấu hình rô bốt.

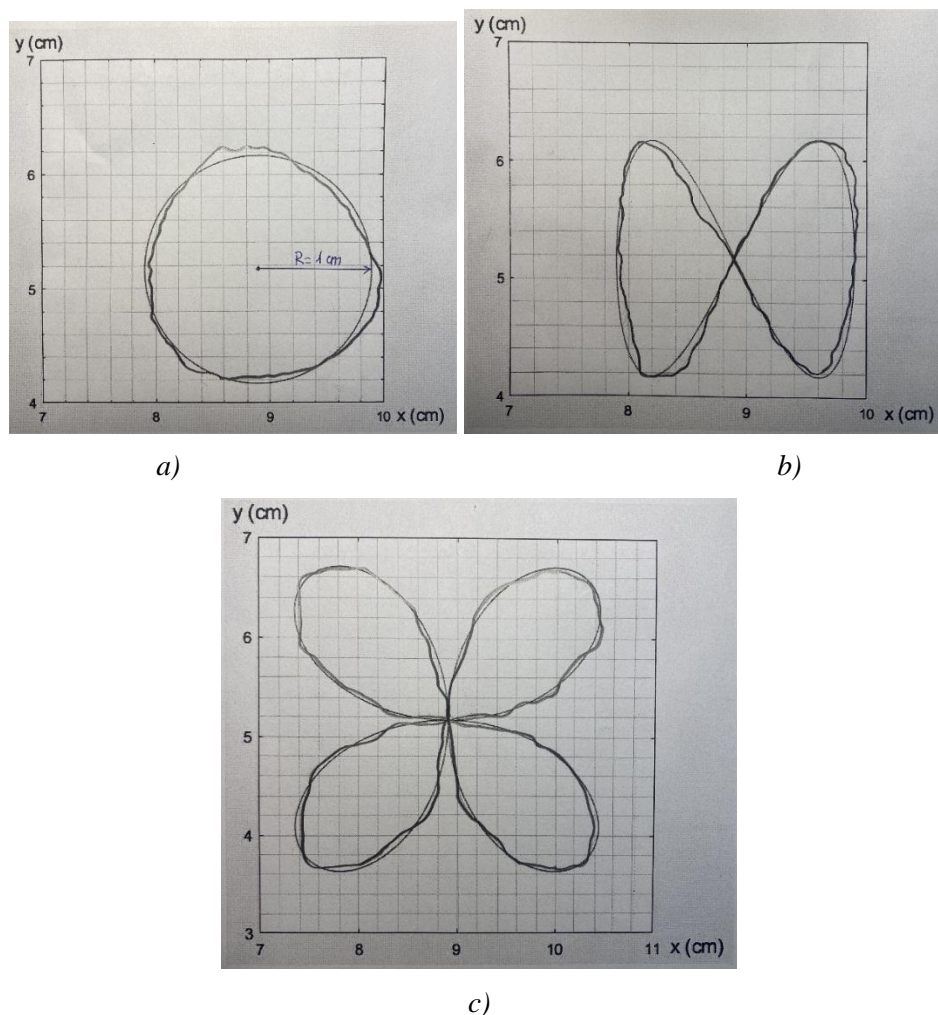


Hình 15. Mô hình thực tế rô bốt song song 3RRR cùng với bộ điều khiển Arduino.

Trong bài toán động lực học ngược điều khiển rô bốt song song 3RRR, vị trí tâm di động của rô bốt (hướng x và y của tấm di động) được lấy làm giá trị đầu vào của chương trình. Bài toán động lực học ngược đã được giải để xác định vị trí các góc khớp. Vị trí và hướng của tấm di động có thể được thay đổi trong khi chỉnh sửa mã chương trình điều khiển. Không gian làm việc được tính toán và tấm di động được chuyển sang tư thế mới (vị trí và hướng). Nhóm tác giả đã thu được quỹ đạo chuyển động mong muốn của tấm di động theo quỹ đạo hình tròn, hình số 8 và hình cánh hoa như hình 16.

Như vậy, kết quả thu được cho thấy quá trình phân tích động lực học ngược là hoàn toàn chính xác, quỹ đạo thực tế tương đối gần đúng với quỹ đạo mong muốn, sai lệch theo tọa độ ở đây nhỏ hơn 2 mm (10 %) so với quỹ đạo mong muốn. Các nét vẽ trong quỹ đạo thực tế còn xuất hiện các đường răng cưa, chưa đều và liên tục. Sự sai lệch ở đây đến từ sai số kích thước cơ khí của động cơ, của các khâu, vật liệu chế tạo các khâu, khớp liên kết được làm bằng nhựa, ma sát giữa các khớp cũng như việc sử dụng bộ điều khiển hồ chưa thể khắc phục được sai lệch so với quỹ đạo mong muốn cũng như đánh giá định lượng chính xác sai số quỹ đạo. Việc xây dựng mô hình với các trang thiết bị, linh kiện có độ chính xác chưa cao do kinh phí thấp nên kết quả của bộ điều khiển ở trên cũng có độ chính xác hạn chế do sai số từ nhiều nguyên nhân. Chính vì vậy, trong hướng nghiên

cứu tiếp theo, nhóm sẽ đầu tư trang thiết bị hiện đại, chất lượng tốt hơn để hạn chế các sai số. Ngoài ra, nhóm tác giả sẽ tiếp tục nghiên cứu, xây dựng các giải thuật điều khiển vòng kín với sự hỗ trợ của các tín hiệu phản hồi từ sensor và encoder để nâng cao độ chính xác trong quá trình điều khiển theo quỹ đạo chuyển động đặt ra và đánh giá chính xác được sai số.



Hình 16. Kết quả quỹ đạo mong muốn (nét trơn) và thực tế (nét răng cưa) của tâm di động.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày chi tiết để làm sáng tỏ được cách thức, phương pháp phân tích, tính toán động học, động lực học rô bốt song song 3RRR từ lý thuyết đến thực nghiệm mô phỏng trên Matlab-Simulink và kiểm nghiệm ở mô hình thực tế. Đối với bài toán động học ngược, nhóm tác giả đã tiến hành thiết kế mô hình 3D trên phần mềm SolidWorks và tiến hành mô phỏng quỹ đạo chuyển động trong Simscape Multibody, Matlab thu được

kết quả hoàn toàn trùng khớp với quỹ đạo mong muốn. Đối với bài toán động lực học rô bốt, tín hiệu mô men dẫn động cần thiết đã được xác định, đây là tín hiệu đầu vào của ba động cơ gắn trên bộ cố định để điều khiển các khớp chủ động q . Tín hiệu mô men này tương đối chính xác khi so sánh với tín hiệu mô men được xuất ra đã được tích hợp sẵn trên phần mềm Matlab-Simulink. Căn cứ vào việc phân tích thông số mô hình động lực học của rô bốt song song 3RRR để lựa chọn linh kiện phù hợp với mô hình kiểm nghiệm thực tế đã được thiết kế và cho kết quả tương đối chính xác về hình dáng và các vị trí theo ba quỹ đạo điển hình là hình tròn, hình số 8 và hình cánh hoa. Hướng nghiên cứu tiếp theo trong tương lai của nhóm sẽ đầu tư trang thiết bị với chất lượng tốt hơn và ứng dụng bộ điều khiển vòng kín để tối ưu độ chính xác quỹ đạo của tám di động và đánh giá định lượng chính xác được sai số.

Tài liệu tham khảo

- [1] Serdar Küçük, “Serial and Parallel Robot Manipulators - Kinematics, Dynamics, Control and Optimization”, *IntechOpen*, 2012, DOI: 10.5772/2301
- [2] S. Saheb, G. Babu, “Mathematical modeling and kinematic analysis of 3-RRR planar parallel manipulator”, *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 2021, DOI: 10.4108/eai.27-1-2021.168502
- [3] AS Sayed, NA Mohamed, AA Salem, HH Ammar, “Modeling of Nonlinear 3-RRR Planar Parallel Manipulator: Kinematics and Dynamics Experimental Analysis”, *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 2020.
- [4] A Peidro, C Tendero, JM Marín, A Gil, L Payá, Óscar Reinoso, “m-PaRoLa: A Mobile Virtual Laboratory for Studying the Kinematics of Five-bar and 3RRR Planar Parallel Robots”, *IFAC - PapersOnLine*, 2018, DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.06.062
- [5] Kun Wang, Zhijiang Xie, Zhongyi Li, and Shaoping Bai, “Optimum configuration design and sensitivity analysis of the 3RRR PPMS with a general kinematic model”, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, pp. 1-23, 05-2020, DOI: 10.1080/15397734.2020.1766490
- [6] Ahmad Taher Azar, Quanmin Zhu, Alaa Khamis, and Dongya Zhao, “Control design approaches for parallel robot manipulators: A review”, *International Journal of Modelling, Identification and Control*, 28(3), 199-211, 2017, DOI: 10.1504/ijmic.2017.086563
- [7] H. Cha, J. Woo, B. Yi, and C. Park, “Workspace analysis of the DELTA robot according to robot parameters and ball joints,” *10th International Conference on Ubiquitous Robot and Ambient Intelligence (URAI)*, pp. 587-588, DOI: 10.31692/2596-0857.icointerpdvgt.2018.00003

- [8] Hwang, W. M., and Hwang, Y. W., “Computer-aided structural synthesis of planar kinematic chains with simple joints,” *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 27(2), pp. 189-199, DOI: 10.1016/0094-114x(92)90008-6
- [9] Merlet Jean-Pierr, Gosselin, Clément and Mouly, Nicolas, “Workspaces of Planar Parallel Manipulators”, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 126, p. 600, DOI: 10.1016/s0094-114x(97)00025-6
- [10] Nicolas Binaud, S Caro, Bai, S., Wenger, P., “Comparison of 3-PPR parallel planar manipulators based on their sensitivity to joint clearances”, *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, DOI: 10.1109/iros.2010.5649455
- [11] Soheil Sadeqi, Shaun P Bourgeois, Edward J Park, Siamak Arzanpour, “Design and performance analysis of a 3-RRR spherical parallel manipulator for hip exoskeleton applications”, *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering*, May 16, 2017, DOI: 10.1177/2055668317697596
- [12] G. Singh, Dr. V. K. Banga and J. Kaur, “Robotic arm kinematics and soft computing”, *Proceedings of International Conference on Advances in Electrical and Electronics Engineering (ICAEE'2011)*, pp. 189-193.
- [13] Al-Mayyahi A., Aldair A.A., Chatwin C., “Control of a 3-RRR Planar Parallel Robot Using Fractional Order PID Controller”, *Int. J. Autom. Comput.*, 17, pp. 822-836, 2020, DOI: 10.1007/s11633-020-1249-9
- [14] Jaime Gallardo, Alvarado, “A Parallel Manipulator with Planar Configurable Platform and Three End-Effectors”, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2019, pp. 1-12, DOI: 10.1155/2019/7972837
- [15] Stefan Schulz, “Performance evaluation of a sensor concept for solving the direct kinematics problem of general planar 3-RPR parallel mechanisms by using solely the linear actuator’s orientations”, *Robotics*, 8:72, 08-2019, DOI: 10.3390/robotics8030072
- [16] Amr A Bo Salem, Tarek Y Khed, Gamal Ahmed, and MI Mahmoud. “Kinematic modeling, dexterity and performance analysis of planar parallel manipulators”, *Menoufia Journal of Electronic Engineering Research*, 27(2), pp. 105-140, 2018, DOI: 10.21608/MJEER.2018.63183
- [17] Phạm Minh Hoàng, *Maple và các bài toán ứng dụng*, Nxb Khoa học và Kỹ thuật, 2008.
- [18] Nguyễn Đình Dũng, “Động lực học ngược và điều khiển chuyển động của rô bốt song song Delta không gian”, Luận án tiến sĩ kỹ thuật cơ khí và cơ kỹ thuật, Học viện Khoa học và Công nghệ, 2018.

DYNAMIC MODELING PARALLEL ROBOT 3RRR

Abstract: *This article studies the dynamic modeling of parallel robot 3RRR. Based on analysis and synthesis of results from domestic and foreign studies, the article presents the problem of analyzing the mechanical model, the mathematical model describing the motion of the parallel robot 3RRR as the basis for kinematic and dynamic analysis. The process of calculation and analysis is performed on Maple for intuitive, explicit results and describes the quantities by vivid simulation graphs. From that result, research and develop the model design on SolidWorks software using the Simscape Multibody tool in MATLAB to simulate the robot's movement according to defined trajectories. Therefore, the study obtained the graph of torque signal at the active joints by the same two methods, proving that the analysis and calculation results are correct. The research also develops the design of a real robot model, and performs model control according to the given trajectories. These research results will serve as a useful reference for the application for the calculation and design of parallel robot 3RRR models in other practical situations.*

Keywords: Simscape multibody; dynamics; parallel robot 3RRR.

Nhận bài: 19/10/2022; Hoàn thiện sau phân biện: 20/02/2023; Chấp nhận đăng: 22/03/2023

