

## APPLICATION OF DIGITAL TWIN TECHNOLOGY IN REAL-VIRTUAL SIMULATION OF A COAXIAL SPHERICAL PARALLEL MECHANISM

Nguyen Tan No, Nguyen Huy Thao Anh, Dao Nguyen Anh Tuan, Mai Nhat Thien\*

Vinh Long University of Technology Education

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p><b>Received:</b> 15/02/2025</p> <p><b>Revised:</b> 27/02/2025</p> <p><b>Published:</b> 27/02/2025</p>	<p>This paper presents a real-time simulation method that applies Digital twin technology to the simulation of a coaxial spherical parallel mechanism. The paper details the steps involved in constructing the kinematic model, computer-aided design, and establishing a real-virtual control interface using MATLAB/Simscape Multibody software presented in detail in the paper. The research results simulated the Roll-Pitch-Yaw angle of the robot of working plane corresponding to the rotation angles of the input joint corresponds to 16 movements with the resulting angle varying from <math>0^0</math> to <math>30^0</math>. In addition, the experimental results are synchronized with each other at the initial time of the three dimensional experimental model and the simulation model at the 12th second with a delay between the Pitch angle. However, the implementation results have the largest deviation (<math>MSE_{roll} = 3.5^0</math>; <math>MSE_{pitch} = 6.5^0</math>; <math>MSE_{yaw} = 6.03^0</math>) in the range of 16th to 32nd seconds. The research team built a virtual reality simulation model for a spherical parallel robot with high synchronization at the most suitable cost. Furthermore, the results of this research are aimed at the fields of automotive technology, missile technology and submarines.</p>
<p><b>KEYWORDS</b></p> <p>Spherical coaxial manipulator</p> <p>Digital twin</p> <p>Robot modeling</p> <p>Simscape multibody</p> <p>Real-time simulation</p>	

## ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ DIGITAL TWIN MÔ PHỎNG THỰC ẢO CƠ CẤU SONG SONG ĐỒNG TRỰC DẠNG HÌNH CẦU

Nguyễn Tấn Nó, Nguyễn Huy Thảo Anh, Đào Nguyễn Anh Tuấn, Mai Nhật Thiên\*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh Long

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p><b>Ngày nhận bài:</b> 15/02/2025</p> <p><b>Ngày hoàn thiện:</b> 27/02/2025</p> <p><b>Ngày đăng:</b> 27/02/2025</p>	<p>Bài báo trình bày một phương pháp mô phỏng thời gian thực ứng dụng công nghệ Digital twin trong mô phỏng cơ cấu song song đồng trục dạng hình cầu. Trong đó, mô hình động học, mô hình toán động lực học thuần và động lực nghịch của cơ cấu song song hình cầu. Bên cạnh đó, mô hình ảo được thiết kế với sự trợ giúp máy tính thông qua phần mềm SOLIDWORKS kết nối giao tiếp điều khiển ảo với phần mềm MATLAB/Simscape Multibody được trình bày chi tiết trong bài báo. Kết quả nghiên cứu đã mô phỏng các góc Roll-Pitch-Yaw của mặt phẳng công tác robot tương ứng với các góc xoay các khớp đầu vào tương ứng với 16 động tác có kết quả các góc thay đổi từ <math>0^0</math> đến <math>30^0</math>. Ngoài ra, kết quả thực nghiệm đồng bộ với nhau ở những thời điểm đầu của mô hình thực nghiệm in 3 chiều và mô hình mô phỏng tại giây thứ 12 có độ trễ giữa góc Pitch. Tuy nhiên, kết quả thực nghiệm có độ lệch lớn nhất (<math>MSE_{roll} = 3,5^0</math>; <math>MSE_{pitch} = 6,5^0</math>; <math>MSE_{yaw} = 6,03^0</math>) trong khoảng giây thứ 16 đến 32 giây. Nhóm nghiên cứu xây dựng mô hình mô phỏng thực ảo cho robot song song dạng cầu đạt độ đồng bộ cao với chi phí phù hợp nhất. Hơn thế nữa, kết quả nghiên cứu này hướng đến lĩnh vực công nghệ ô tô, công nghệ tên lửa và tàu ngầm.</p>
<p><b>TỪ KHÓA</b></p> <p>Cơ cấu đồng trục hình cầu</p> <p>Digital Twin</p> <p>Mô hình hóa robot</p> <p>Simscape Multibody</p> <p>Mô phỏng thời gian thực</p>	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12058>

\* Corresponding author. Email: thienmn@vlute.edu.vn

## 1. Giới thiệu

Phương pháp hình học phân tích vị trí của cơ cấu robot Delta, giải pháp động học thuận của robot Delta bởi Cheng Liu và cộng sự [1]. Dựa trên giải pháp động học thuận, không gian làm việc của robot Delta được phân tích và không gian làm việc của robot Delta được vẽ bằng cách sử dụng chức năng tính toán và vẽ của MATLAB, cung cấp tham chiếu để đo hiệu suất của robot Delta. Bên cạnh đó, nhóm tác giả Florin Covaciu và Laura Nicoleta Covaciu [2] nghiên cứu hệ thống điều khiển và truyền động của một robot song song có ba bậc tự do. Để điều khiển hệ thống robot song song này, một giao diện người dùng đã được phát triển, thông qua đó người dùng có thể tương tác với robot với thao tác từng thanh trượt riêng lẻ. Tuy nhiên, chúng còn tồn tại một số khuyết điểm như: không gian làm việc nhỏ, độ phức tạp của chuyển động, dẫn đến việc kiểm soát điều khiển hoạt động, mô phỏng cơ cấu khó khăn, đặc biệt là xác định vùng không gian làm việc.

Công nghiệp 4.0 và số hóa cung cấp vô số lĩnh vực nghiên cứu đang phát triển không ngừng. Ngoài việc tích hợp hệ thống giữa các công ty, việc ảo hóa các sản phẩm, thành phần thông qua mô hình mô phỏng là một yếu tố đặc biệt thúc đẩy xu hướng tích hợp chặt chẽ. Về nguyên tắc, mọi thành phần và quy trình đều có thể được ảo hóa thông qua mô hình digital twin [3].

Trong đó, mô phỏng thực ảo (digital twin) [4], [5] đề cập đến bản sao ảo hoặc mô hình của bất kỳ thực thể vật lý nào, đều được kết nối thông qua trao đổi dữ liệu thời gian thực [6]. Ứng dụng của mô phỏng thực ảo bao gồm: giám sát thời gian thực, thiết kế, lập kế hoạch, tối ưu hóa, bảo trì, truy cập từ xa [7], [8]. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu tập trung vào các hoạt động dây chuyền sản xuất, chưa xem xét cụ thể về ảnh hưởng của tác động mô hình lý thuyết động học, động lực học của hệ thống đến hoạt động của đối tượng mô phỏng.

Trong bài báo này, phương pháp mô hình hóa và mô phỏng thực ảo cho cơ cấu robot song song dạng hình cầu đồng trục sẽ được trình bày. Đây là một trường hợp đặc biệt của một robot song song hình cầu có 3 bậc tự do, có khả năng xoay vô hạn quanh bất kỳ trục nào trong không gian làm việc của nó. Do có khả năng nhanh chóng tạo ra các mô hình của các hệ thống vật lý trong môi trường Simulink, nên công cụ Simscape Multibody được chọn. Kết quả của nghiên cứu này là nền tảng cho việc phát triển thuật toán điều khiển chuyển động cho robot song song. Hơn nữa, phương pháp này có thể được áp dụng vào việc mô hình hóa các cơ cấu robot song song chuyển động phức tạp khác.

## 2. Phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Mô hình động học cơ cấu song song đồng trục

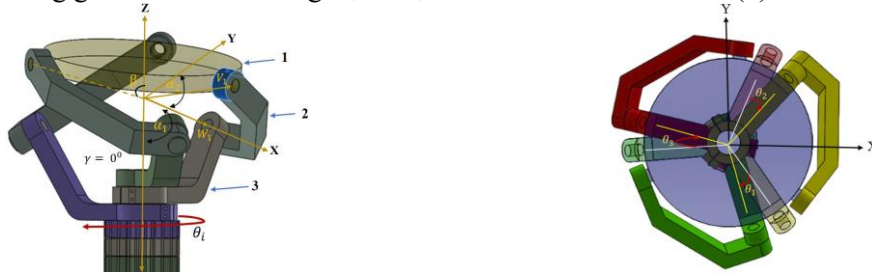
Cơ cấu nghiên cứu bao gồm một mặt di động và một đế cố định, kết nối với nhau bởi ba chân phân bố đều (mỗi chân bao gồm 2 khâu), được đánh số từ 1 đến 3 theo hướng ngược chiều kim đồng hồ. Mặt phẳng di động được xác định bởi góc  $\beta$ , và mặt phẳng cố định được xác định bởi góc  $\gamma$ . Mỗi khớp nối của mặt di động bao gồm hai liên kết: liên kết gần và liên kết xa, với tất cả các khớp thuộc loại khớp quay. Các khớp được xác định bởi các vectơ đơn vị  $u_i$ ,  $v_i$  và  $w_i$  (với  $i = 1, 2, 3$ ) tương ứng với các khớp đầu vào, khớp trung gian và khớp trên mặt phẳng di động (Hình 1a). Trong hệ quy chiếu cố định, trục z thẳng hàng với trục khớp và có phương hướng lên trên, trục x nằm trong mặt phẳng tạo bởi trục z và vectơ đơn vị  $w_i$ , và trục y được xác định theo quy tắc bàn tay phải. Các trục của khớp đầu vào được xác định trong hệ quy chiếu bởi vectơ đơn vị  $u_i$ :  $u_i = [0 \ 0 \ -1]^T$  với ( $i = 1, 2, 3$ ).

Chuyển động của mặt di động được biểu diễn thông qua các biến khớp đầu vào và các vị trí được biểu diễn dưới dạng vectơ:

$$\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T \quad (1)$$

Các vị trí khớp đầu vào được coi là các góc giữa các mặt phẳng trung tâm của các liên kết gần tại cấu hình gốc và tại bất kỳ cấu hình nào khác của cơ cấu song song đồng trục. Ở cấu hình gốc

( $\theta = [0, 0, 0]^T$ ), hướng quay theo chiều kim đồng hồ được chọn là hướng dương (Hình 1b), các trục khớp trung gian của cơ cấu đồng trục được biểu diễn như biểu thức (2):



a. Hệ tọa độ trong robot

b. Chiều dương của các khớp điều khiển

**Hình 1.** Mô hình cơ cấu song song đồng trục dạng cầu trong phần mềm SOLIDWORKS

$$w_i = \begin{bmatrix} \cos(\eta_i - \theta_i) \sin \alpha_1 \\ \sin(\eta_i - \theta_i) \sin \alpha_1 \\ -\cos \alpha_1 \end{bmatrix}, (i=1, 2, 3) \quad (2)$$

Trong đó góc  $\eta_i = 2(i - 1)/3$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) là khoảng cách bù góc giữa mỗi cạnh và giữ nguyên như một giá trị không đổi cho mỗi cạnh thứ  $i$ .

**2.2. Động học thuận**

Để xác định bài toán động học thuận, một hệ gồm chín phương trình độc lập với chín ẩn số có thể được suy ra từ các ràng buộc hình học của SPM đồng trục:

$$\begin{cases} w_1 \cdot v_1 = w_2 \cdot v_2 = w_3 \cdot v_3 = \cos 85^0 \\ v_1 \cdot v_2 = v_2 \cdot v_3 = v_3 \cdot v_1 = \cos 120^0 \\ \|v_1\| = \|v_2\| = \|v_3\| = 1 \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó,  $\alpha_3 = 2 \sin^{-1} \left( \sin \beta \cos \frac{\pi}{6} \right)$  là góc giữa trục của khớp nối mặt di động thứ  $i$  và thứ  $j$ .

Với  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  là góc quay của 3 khớp của 3 biến đầu vào. Từ biểu thức (2), ta tính được:

$$w_1 = \begin{bmatrix} \cos(-\theta_1) \sin \alpha_1 \\ \sin(-\theta_1) \sin \alpha_1 \\ -\cos \alpha_1 \end{bmatrix}; w_2 = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \theta_2\right) \sin \alpha_1 \\ \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \theta_2\right) \sin \alpha_1 \\ -\cos \alpha_1 \end{bmatrix}; w_3 = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{4\pi}{3} - \theta_3\right) \sin \alpha_1 \\ \sin\left(\frac{4\pi}{3} - \theta_3\right) \sin \alpha_1 \\ -\cos \alpha_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Các vectơ trên mặt phẳng công tác:  $v_1 = v_{1x}, v_{1y}, v_{1z}$ ;  $v_2 = v_{2x}, v_{2y}, v_{2z}$ ;  $v_3 = v_{3x}, v_{3y}, v_{3z}$  được xác định theo phương trình (5):

$$\begin{cases} w_{1x} \cdot v_{1x} + w_{1y} \cdot v_{1y} + w_{1z} \cdot v_{1z} = \cos 90^0 \\ w_{2x} \cdot v_{2x} + w_{2y} \cdot v_{2y} + w_{2z} \cdot v_{2z} = \cos 90^0 \\ w_{3x} \cdot v_{3x} + w_{3y} \cdot v_{3y} + w_{3z} \cdot v_{3z} = \cos 90^0 \\ v_{1x} \cdot v_{2x} + v_{1y} \cdot v_{2y} + v_{1z} \cdot v_{2z} = \cos 120^0 \\ v_{2x} \cdot v_{3x} + v_{2y} \cdot v_{3y} + v_{2z} \cdot v_{3z} = \cos 120^0 \\ v_{1x} \cdot v_{3x} + v_{1y} \cdot v_{3y} + v_{1z} \cdot v_{3z} = \cos 120^0 \end{cases} \text{ và } \begin{cases} v_{1x}^2 + v_{1y}^2 + v_{1z}^2 = 1 \\ v_{2x}^2 + v_{2y}^2 + v_{2z}^2 = 1 \\ v_{3x}^2 + v_{3y}^2 + v_{3z}^2 = 1 \end{cases} \quad (5)$$

**2.3. Động học nghịch**

Để giải bài toán động học nghịch đảo của cơ cấu song song đồng trục dạng hình cầu, ta cần tìm các biến khớp đầu vào  $\theta_i$  (với  $i = 1, 2, 3$ ) để đảm bảo rằng mặt đế di động có thể đạt được các vị trí và hướng mong muốn. Phương trình tách rời cho mỗi biến khớp đầu vào  $\theta_i$  được tính từ phương trình (6):

$$A_i T_i^2 + 2B_i T_i + C_i = 0, (i=1, 2, 3) \quad (6)$$

Trong đó:

+  $T_i = \tan\left(\frac{\theta_i}{2}\right)$  là hàm chuyển đổi từ góc  $\theta$  sang một biến mới  $T_i$ ;  
 + Các hệ số  $A_i, B_i$  và  $C_i$ , được tính từ các thành phần của vectơ đơn vị  $v_i$ ;  
 Với

$$\begin{cases} A_i = -\cos\eta_i \sin\alpha_1 v_{ix} - \sin\eta_i \sin\alpha_1 v_{iy} - \cos\alpha_1 v_{iz} - \cos\alpha_2 \\ B_i = \sin\eta_i \sin\alpha_1 v_{ix} - \cos\eta_i \sin\alpha_1 v_{iy}; \\ C_i = \cos\eta_i \sin\alpha_1 v_{ix} + \sin\eta_i \sin\alpha_1 v_{iy} - \cos\alpha_1 v_{iz} - \cos\alpha_2 \end{cases} \quad (7)$$

Thay  $\eta_1 = 0; \eta_2 = 2\pi/3; \eta_3 = 4\pi/3; \alpha_1 = 60^0; \alpha_2 = 90^0$  vào (7), ta được:

$$\begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \end{bmatrix} = \Pi_i \cdot \begin{bmatrix} v_{ix} \\ v_{iy} \\ v_{iz} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (8)$$

Trong đó:

$$\Pi_1 = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & -\frac{1}{2} \end{bmatrix}; \Pi_2 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{4} & -\frac{3}{4} & -\frac{1}{2} \\ \frac{3}{4} & \frac{3}{4} & 0 \\ -\frac{3}{4} & \frac{3}{4} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix}; \Pi_3 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{4} & \frac{3}{4} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{3}{4} & \frac{\sqrt{3}}{4} & 0 \\ -\frac{\sqrt{3}}{4} & -\frac{3}{4} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

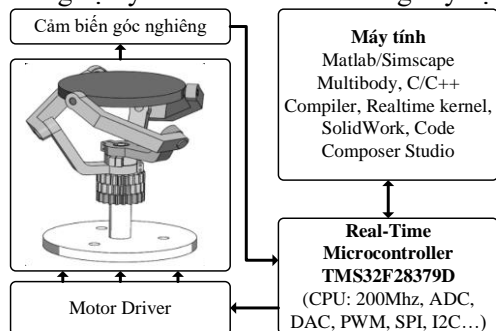
Các góc xoay cần điều khiển được xác định thông qua phương trình (9):

$$\begin{cases} \theta_1 = 2 \tan^{-1} T_1 \\ \theta_2 = 2 \tan^{-1} T_2 \\ \theta_3 = 2 \tan^{-1} T_3 \end{cases} \quad (9)$$

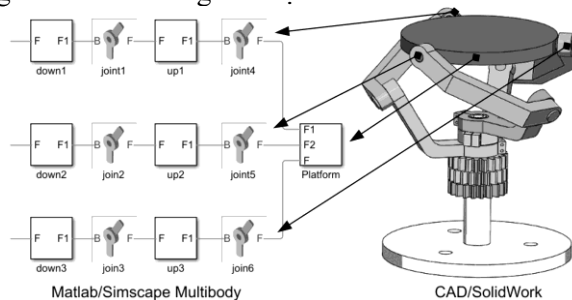
### 2.4. Xây dựng môi trường mô phỏng

Mô phỏng thực ảo được xây dựng để kiểm tra hiệu suất của hệ thống điều khiển, cho phép phát triển các ứng dụng phức tạp kết hợp giữa phần thực với thành phần ảo trong quá trình điều khiển. Trong nghiên cứu này, mô phỏng thực ảo được xây dựng như Hình 2, bao gồm ba thành phần chính: máy tính, bộ điều khiển, và phần cứng thực tế.

**Máy tính:** là máy tính đã được cài đặt phần mềm thiết kế cơ khí SOLIDWORKS, MATLAB/Simscap Multibody, Real-time workshop, C/C++ compiler, CCS. Simscap Multibody cho phép tham số hóa các mô hình thực tế bằng các biến và biểu thức trong MATLAB, giúp thiết kế thay đổi hệ thống dễ dàng. Từ đó, hệ thống có thể tích hợp hệ thống thủy lực, điện, khí nén và cả hệ thống vật lý khác vào mô hình đang xây dựng bằng các khối có trong thư viện.



Hình 2. Các thành phần của mô phỏng

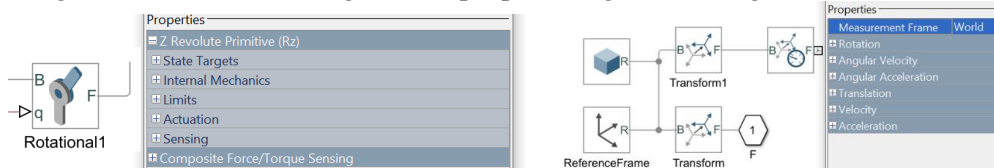


Hình 3. Mô hình CAD và Simulink

**Bộ điều khiển:** là board vi điều khiển TMS320F28379D thu thập tín hiệu từ cảm biến gia tốc MPU9250, điều khiển hoạt động của cơ cấu thông qua mô đun điều khiển động cơ bước A4988 kết hợp stepper motor NEMA23 và truyền thông với máy tính chủ qua chuẩn truyền Ethernet.

**Phần cứng thực tế:** là cơ cấu robot song song đồng trục dạng hình cầu có ba bậc tự do, tích hợp cảm biến gia tốc MPU9250, cho phép đo được các thông số thay đổi (Roll – Pitch – Yaw) của mặt phẳng công tác trong không gian.

Mô hình CAD được thiết kế bằng phần mềm SOLIDWORKS với kích thước, vật liệu và cấu trúc được thực hiện giống với mô hình thực tế. Simscape Multibody hỗ trợ biên dịch các chi tiết sau khi thiết kế, lắp ráp thành file có định dạng (.xml) tương ứng và được mở bằng MATLAB/Simulink. Trong môi trường Simulink, thư viện Simscape hỗ trợ nhiều khối khác nhau, trong đó có các khối cơ bản như: Rotational mô tả khớp xoay của robot, khối Body mô tả các khâu, khối Frame tương ứng với hệ tọa độ của robot như Hình 3. Từ các khối Simulink này, cho phép ta thay đổi các thông số vật lý của chi tiết giống thực tế như: kích thước, khối lượng, momen quán tính. Trong khối Rotational, ta có thể cài đặt các giá trị cho khớp như: góc, vận tốc góc, gia tốc góc, momen. Ngoài ra, thuộc tính sensing còn cho phép ta đo ngược lại các giá trị đó.

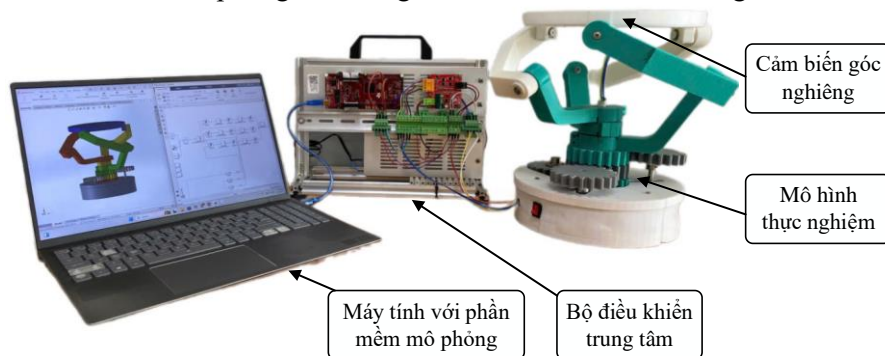


**Hình 4.** Thuộc tính của các khối trong Simscape

Khối Transform thường được liên kết với khối body như Hình 4, và được hiểu như một hệ tọa độ gắn lên một khâu của robot, nếu truy cập vào thuộc tính của khối này, ta có thể đo được các thông số vật lý của khâu như: độ dịch chuyển tịnh tiến, các góc quay Roll – Pitch – Yaw.

### 3. Kết quả nghiên cứu

Mô hình thực nghiệm được xây dựng như minh họa trong Hình 5. Phần mềm mô phỏng được thiết lập để chạy trong 32(s), thực hiện 16 động tác (ĐT) khác nhau. Mỗi động tác tương ứng với một tập hợp giá trị góc  $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ , thay đổi theo một dãy từ nhỏ đến lớn. Trong quá trình mô phỏng trên máy tính, phần mềm MATLAB liên tục gửi tín hiệu xuống vi điều khiển TMS320F28379D với thời gian lấy mẫu 0,1ms để điều chỉnh góc quay của các khớp trên robot thực tế. Đồng thời, hệ thống thu thập dữ liệu góc nghiêng từ cảm biến và truyền về MATLAB. Phần mềm mô phỏng Simulink/MATLAB tiếp nhận tín hiệu từ bộ điều khiển và so sánh với dữ liệu thu được từ mô hình mô phỏng để đánh giá độ chính xác của hệ thống.



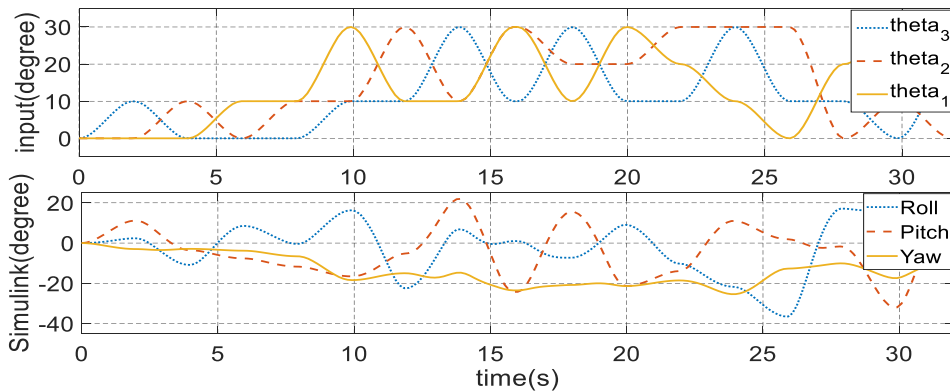
**Hình 5.** Mô hình thực nghiệm thực tế

Kết quả ở Bảng 1 chứng minh được robot hoạt động linh hoạt có những động tác khác nhau tương ứng với các góc xoay khác nhau, đồng thời mô hình thực tế cũng hoạt động phù hợp với kết quả trên phần mềm mô phỏng. Kết quả mô phỏng được thể hiện ở đồ thị Hình 6.

Đồ thị trong Hình 6 mô tả kết quả mô phỏng các góc Roll-Pitch-Yaw của mặt phẳng công tác robot tương ứng với các góc xoay các khớp đầu vào tương ứng với 16 động tác. Ta thấy khi các góc thay đổi từ  $0^0$  đến  $30^0$ , thì các giá trị góc Roll-Pitch-Yaw của mặt phẳng công tác robot thay đổi tương ứng theo phương trình động học thuận, với giá trị lớn nhất và nhỏ nhất lần lượt khoảng  $22^0$  và  $-38^0$ .

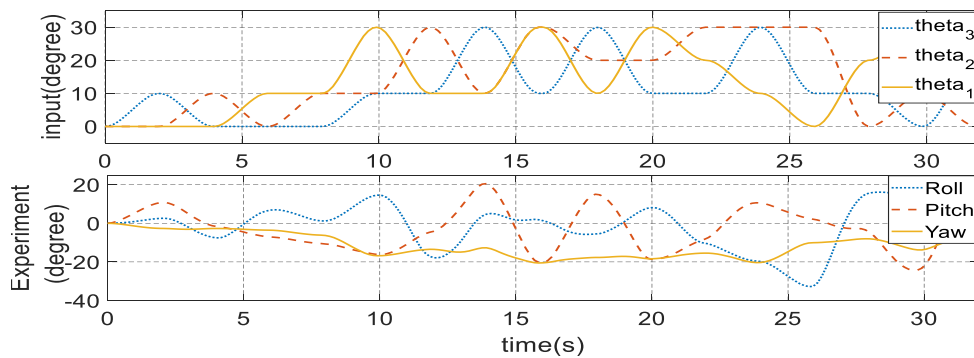
**Bảng 1.** Kết quả đáp ứng góc nghiêng giữa phần mềm mô phỏng và mô hình thực tế ở các góc xoay khác nhau

Chuyển động từ 1-8				Chuyển động từ 9-16			
Mô phỏng	Thực nghiệm	Mô phỏng	Thực nghiệm	Mô phỏng	Thực nghiệm	Mô phỏng	Thực nghiệm
ĐT1 = $[0^0; 0^0; 10^0]$		ĐT5 = $[30^0; 10^0; 10^0]$		ĐT9 = $[10^0; 20^0; 30^0]$		ĐT13 = $[0^0; 30^0; 10^0]$	
ĐT2 = $[0^0; 10^0; 0^0]$		ĐT6 = $[10^0; 30^0; 10^0]$		ĐT10 = $[30^0; 20^0; 10^0]$		ĐT14 = $[20^0; 0^0; 10^0]$	
ĐT3 = $[10^0; 0^0; 0^0]$		ĐT7 = $[10^0; 10^0; 30^0]$		ĐT11 = $[20^0; 30^0; 10^0]$		ĐT15 = $[30^0; 10^0; 0^0]$	
ĐT4 = $[10^0; 10^0; 0^0]$		ĐT8 = $[30^0; 30^0; 10^0]$		ĐT12 = $[10^0; 30^0; 30^0]$		ĐT16 = $[10^0; 0^0; 20^0]$	



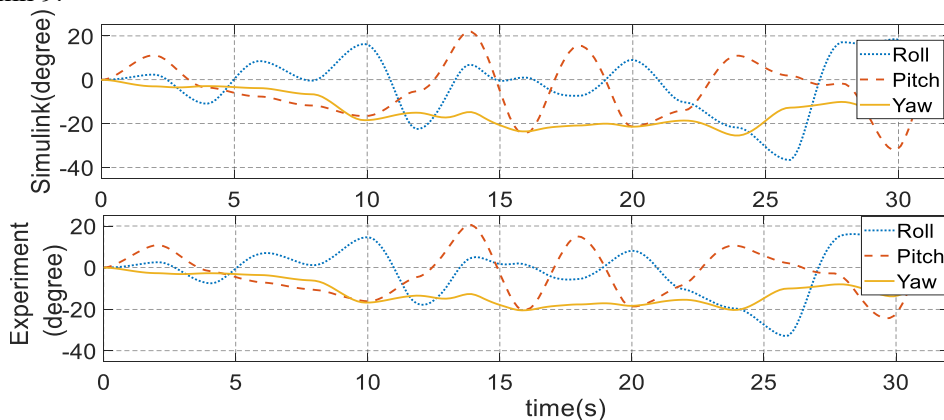
**Hình 6.** Kết quả mô phỏng

Kết quả thực nghiệm trong Hình 7 đã chứng minh đáp ứng mô hình thực tế hoạt động đồng bộ với mô hình mô phỏng, khi giá trị các góc mặt phẳng công tác cũng thay đổi phụ thuộc vào các góc quay của các động cơ điều khiển ở các khớp.



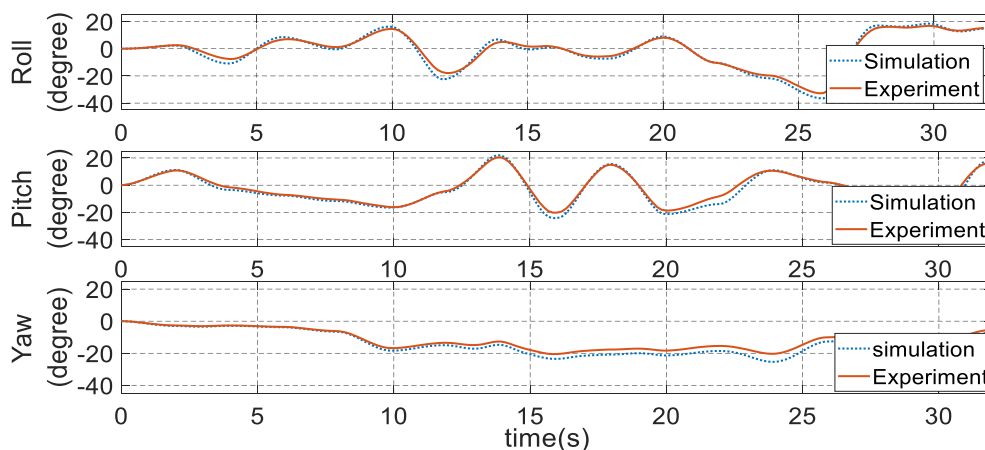
**Hình 7.** Kết quả thực nghiệm

Kết quả so sánh về mức độ đồng bộ giữa mô phỏng và thực nghiệm được trình bày trên Hình 8 và Hình 9.



**Hình 8.** So sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm

Từ đồ thị trong Hình 8, kết quả mô phỏng và thực nghiệm đồng bộ với nhau tương ứng với các góc Roll-Pitch-Yaw, từ dữ liệu thu được trung bình bình phương sai số tương ứng ( $MSE_{roll} = 3,5^0$ ;  $MSE_{pitch} = 6,5^0$ ;  $MSE_{yaw} = 6,03^0$ ).



**Hình 9.** So sánh các góc giữa kết quả mô phỏng và thực nghiệm

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu này đã xây dựng thành công mô hình mô phỏng thực ảo cho robot song song dạng cầu. Hoạt động của robot được kiểm chứng bằng cách thay đổi góc quay của ba khớp và so sánh góc nghiêng đo được từ công cụ mô phỏng với dữ liệu thực tế thu từ cảm biến gia tốc gắn trên mặt phẳng làm việc của robot như trình bày trong Hình 9. Kết quả cho thấy mô hình thực nghiệm và mô phỏng đạt độ đồng bộ cao. Trong tương lai, nhóm nghiên cứu sẽ tiếp tục phát triển và thử nghiệm các ứng dụng điều khiển hướng dựa trên mô hình động học và động lực học đã thiết lập, đồng thời đánh giá độ cứng vững của cơ cấu trong quá trình chuyển động có yêu cầu cao về độ chính xác và độ tin cậy như trong lĩnh vực ô tô, tên lửa và tàu ngầm.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] C. Liu, G. H. Cao, and Y. Y. Qu, "Workspace Analysis of Delta Robot Based on Forward Kinematics Solution," *3rd IEEE International Conference on Robotics and Automation Sciences*, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICRAS.2019.8808987.

- 
- [2] F. Covaciu and L.-N. Covaciu, "Control and Actuation of A Parallel Robot With Three Degrees Of Freedom," *Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering, Technical University Of Cluj-Napoca*, vol. 65, no. 1, pp. 37-42, 2022.
- [3] D. Adamenko, S. Kunnen, R. Pluhnau, A. Loibl, and A. Nagarajah, "Review and comparison of the methods of designing the Digital Twin," *Procedia CIRP*, vol. 91, pp. 27-32, 2020.
- [4] F. Tao, B. Xiao, Q. Qi, J. Cheng, and P. Ji, "Digitak twin modeling," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 64, pp. 371-389, 2022.
- [5] M. Singh, E. Fuenmayor, E. P. Hinchy, Y. Qiao, N. Murray, and D. Devine, "Digital Twin: Origin to Future," *Appl. Syst. Innov.*, vol. 4, no. 36, pp. 1-19, 2021.
- [6] I. Errandonea, S. Beltrán, and S. Arrizabalaga, "Digital Twin for maintenance: A literature review," *Computers in Industry*, vol. 123, 2020, doi: 10.1016/j.compind.2020.103316.
- [7] W. Jia, W. Wang, and Z. Zhang, "From simple digital twin to complex digital twin," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 53, 2022, doi: 10.1016/j.aei.2022.101706.
- [8] M. I. Saputra, S. R. Sulistiyanti, S. Purwiyanti, and U. Murdika, "Design of Prototype Measuring Motor Vehicles Velocity Using Hall Effect Sensor Series A-1302 based On Arduino Mega2560," *2nd International Conference on Industrial Electrical and Electronics (ICIEE)*, Lombok, Indonesia, 2020, pp. 66-69.