

# MÔ HÌNH HÓA VÀ MÔ PHỎNG 3D ĐỘNG HỌC NGHỊCH CÁNH TAY ROBOT 6 BẬC TỰ DO BẰNG VIỆC KẾT HỢP PHẦN MỀM CAD VÀ CÔNG CỤ MULTIBODY TRONG MATLAB/SIMULINK 3D MODELING AND INVERSE KINEMATICS SIMULATION OF A 6-DOF ARM ROBOT BY COMBINATION OF CAD SOFTWARE AND MULTIBODY TOOL IN MATLAB/SIMULINK

NGUYỄN ĐỨC SANG

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: sangnd.vck@vmaru.edu.vn

## Tóm tắt

Mô hình hóa và mô phỏng là một công việc không thể thiếu khi bắt tay vào nghiên cứu Robot. Nó cho phép chúng ta dự báo các hiện tượng có thể xảy ra cũng như tối ưu hóa các thông số thiết kế trước khi thực hiện chế tạo. Trong bài báo này, tác giả sử dụng phần mềm NX 12.0 để thiết kế mô hình 3D cánh tay Robot 6 bậc tự do và nhập mô hình này sang MATLAB/Simulink thông qua công cụ Multibody để tiến hành mô phỏng bài toán động học nghịch. Kết quả mô phỏng cho thấy sự ưu việt của phương pháp này so với các phương pháp truyền thống trước đây khi đồng thời tận dụng được sức mạnh thiết kế của các phần mềm CAD cùng với khả năng tính toán mạnh mẽ của MATLAB.

**Từ khóa:** Mô hình hóa, mô phỏng, cánh tay Robot, động học, động lực học, điều khiển.

## Abstract

Modeling and Simulation are essential activities when it comes to studying Robot. This helps us predict the phenomenon may occur and optimize design parameters before the prototyping step. In this paper, we use NX 12.0 to design a 3D six DoF Robot arm and then import this model into MATLAB/Simulink via Multibody tool to conduct inverse kinematics simulation. The results show the superior advantages of this method compared with other conventional ways as it simultaneously utilizes the design power of CAD softwares and computational capacity of MATLAB.

**Keywords:** Modeling, simulation, arm Robot, kinematics, dynamics, CAD, MATLAB, Multibody.

## 1. Giới thiệu chung

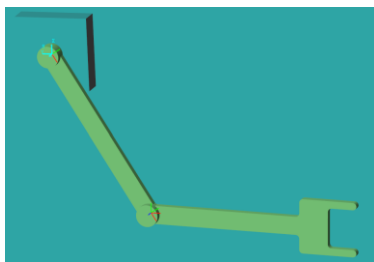
### 1.1. Mô hình hóa và mô phỏng

Các phương pháp truyền thống để mô hình hóa và mô phỏng Robot có thể chia thành hai hướng cơ bản. Hướng thứ nhất là dựa trên các phần mềm thiết kế CAD [6] như SolidWorks, Inventor, Unigraphics NX,... Với lợi thế về đồ họa, cách thức này cho phép chúng ta mô hình hóa rất trực quan và giống với các mẫu Robot thật khi nhắc đến các yếu tố như hình dáng, kích thước hay màu sắc. Hơn thế nữa, việc mô phỏng hoạt hình (animation) các chuyển động của Robot bằng các công cụ CAD cũng rất hiệu quả. Tuy nhiên, do đây là các phần mềm đồ họa nên khả năng lập trình và tính toán của chúng rất hạn chế, không có lợi thế trong việc áp dụng các thuật toán mô phỏng chuyên sâu như động lực học, điều khiển hay tối ưu hóa thiết kế. Hướng thứ hai là sử dụng các phần mềm tính toán [1], [5], [7] như MATLAB, Maple, Visual studio C/C++,... Đối với phương pháp này, việc mô hình hóa và mô phỏng được thực hiện thông qua các phương trình và tham số hệ thống dựa trên các định luật vật lý và cơ học. Người thiết kế phải tự xây dựng cơ sở dữ liệu, thuật toán và cách thức lập trình để đạt được kết quả mô phỏng mong muốn. Do tự xây dựng mô hình nên người lập trình có thể tự thực hiện các mô phỏng chuyên sâu tùy theo năng lực phân tích của mình dựa trên sự hỗ trợ tính toán của phần mềm. Tuy nhiên, điểm yếu của phương pháp này là kém trực quan do thiếu vắng mô hình 3D bởi các phần mềm tính toán không có khả năng thiết kế như các phần mềm CAD.

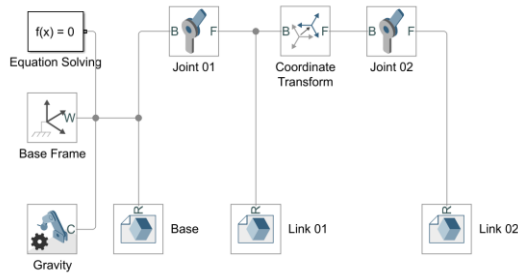
### 1.2. Mô phỏng kết hợp MATLAB và phần mềm NX

Trong bài báo này, tác giả sử dụng phương pháp kết hợp hai cách thức đã giới thiệu ở Mục 1.1 nhằm tận dụng lợi thế riêng của chúng trong một chương trình mô phỏng thống nhất. Phương pháp mô phỏng sử dụng công cụ Multibody được MATLAB giới thiệu một cách khá tổng quát cho các cơ hệ chuyển động [2]. Đóng góp của tác giả là dựa trên các hướng dẫn tổng quát đó đã áp dụng thành công, cụ thể vào mô phỏng

chuyển động của cánh tay Robot 6 bậc tự do. Sau đó, tác giả đã diễn giải lại phương pháp mô phỏng thành các bước chi tiết ở Mục 2. Từ đó, độc giả có thể hiểu rõ hơn về phương pháp này và dễ dàng vận dụng chúng cho cơ hệ đặc thù mà họ quan tâm. Phương pháp mô phỏng này đã được đề cập đến ở [9, 10]. Tuy nhiên đối tượng nghiên cứu là khác nhau. Ở [9] là Robot song song 3 bậc tự do, còn ở [10] là Robot 2 bậc tự do và sử dụng phần mềm thiết kế 3D là SolidWorks. Như vậy, các nghiên cứu đó cùng với bài báo này đã củng cố và mở rộng thêm minh chứng cho việc sử dụng phương pháp mô phỏng đã đề cập là hiệu quả và nên dùng.



a)



b)

**Hình 1.**

a) Mô hình Robot trong NX

b) Mô hình Robot trong Multibody

Để dễ hình dung, ta xem xét mô hình hóa cánh tay Robot 2 bậc tự do như ở Hình 1. Đầu tiên, mô hình Robot được thiết kế trên phần mềm NX 12.0 như ở Hình 1a, sau đó các file thiết kế dưới dạng đuôi .step được nhập sang môi trường MATLAB/Simulink thông qua công cụ Multibody như ở Hình 1b. Về cơ bản, công cụ Multibody cung cấp các khối để chứa đựng thông tin cần thiết từ file ở các phần mềm thiết kế. Trong Hình 1b có thể quan sát thấy các khối Base, Link 01, Link 02, chính là 3 khâu được nhập từ phần mềm NX sang. Các khối này sẽ chứa thông tin về hình dạng, kích thước, khối lượng, mô men quán tính, trọng tâm của mỗi khâu và cơ sở dữ liệu này do phần mềm thiết kế 3D cung cấp. Chú ý rằng, MATLAB cũng cho

phép người dùng tự định nghĩa các dữ liệu này nếu cần. Ngoài ra, ràng buộc giữa các khâu bằng các khớp cũng được mô hình hóa bằng các khớp quay Joint 01, Joint 02. Tất nhiên, công cụ Multibody cung cấp đầy đủ các loại khớp có trong thực tế từ không đến sáu bậc tự do. Để lấy cơ sở tính toán, chúng ta cần gắn vào hệ thống các hệ tọa độ cơ sở như hệ Base Frame là hệ gốc cho đến các phép dịch chuyển hệ tọa độ bởi các khối Coordinate Transform. Các khối nền tảng như Equation Solving hay Gravity do MATLAB cung cấp để tự động giải các phương trình ràng buộc và mang thông tin về gia tốc trọng trường. Như vậy với các khối cơ bản đó, ta đã xây dựng xong mô hình 3D nhập từ phần mềm thiết kế sang MATLAB. Việc thực hiện các bài toán mô phỏng liên quan từ đây hoàn toàn được thực hiện trên môi trường MATLAB.

## 2. Xây dựng mô hình cánh tay Robot 6 bậc tự do kết hợp MATLAB và NX



**Hình 2. Mô hình Robot thực tế**

Dựa trên ý tưởng cơ bản được trình bày ở Mục 1, ta tiến hành xây dựng mô hình cánh tay Robot 6 bậc tự do trong môi trường MATLAB như ở Hình 2 theo các bước sau:

Bước 1: Xây dựng hệ tọa độ cần thiết gắn với các khâu trên Robot (Ở đây sử dụng quy tắc Denavit-Hartenberg, dù có thể theo các quy tắc khác như ma trận Craig hoặc ma trận thuần nhất).

Bước 2: Thiết kế và vẽ 3D các khâu của Robot trên các phần mềm thiết kế dựa theo các hệ tọa độ đã thiết lập ở bước 1.

Bước 3: Nhập mô hình từ phần mềm thiết kế sang MATLAB sử dụng công cụ Multibody để thực hiện bài toán mô phỏng. Việc nhập mô hình được thực hiện bằng cách sử dụng các khối tương ứng của

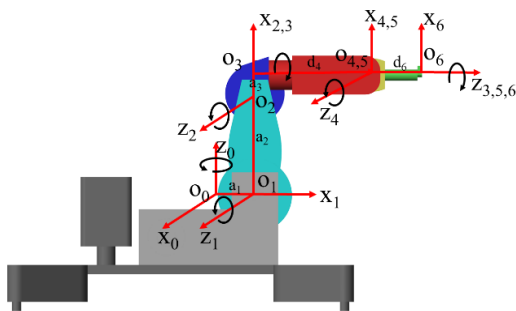
Multibody/Simulink, khai báo các thông số cần thiết và lựa chọn các file thiết kế 3D (đuôi .stl hoặc .step) từ phần mềm NX mà công cụ Multibody cho phép đọc.

### 3. Mô phỏng phương trình động học của Robot

Để thực hiện mô phỏng động học, trước tiên ta cần thiết lập hệ phương trình thể hiện mối quan hệ giữa vị trí và hướng của khâu thao tác đối với vị trí của các khớp quay. Phương trình này có thể được thiết lập dựa trên quy tắc Denavit-Hartenberg [8] bằng cách xây dựng các hệ tọa độ gắn vào Robot như trên Hình 3, sau đó xác định các tham số động học như trong Bảng 1 miêu tả các bước chuyển hệ tọa độ từ khâu cố định (hệ  $O_0$ ) lần lượt đến khâu thao tác (hệ  $O_6$ ). Từ đó, ta xây dựng được các ma trận thuận nhất D-H địa phương, thể hiện phép biến đổi từ hệ tọa độ  $O_{i-1}$  sang hệ tọa độ  $O_i$  như trong biểu thức (1). Khi đó, phép chuyển đổi hệ tọa độ từ hệ  $O_0$  đến hệ  $O_6$  được thể hiện bằng tích của các ma trận D-H địa phương như trong công thức (2).

Bảng 1. Các tham số động học

Khớp	$\alpha$	<b>a</b>	<b>d</b>	<b>q</b>
1	$90^0$	$a_1$	0	$q_1$
2	0	$a_2$	0	$q_2$
3	$90^0$	$a_3$	0	$q_3$
4	$-90^0$	0	$d_4$	$q_4$
5	$90^0$	0	0	$q_5$
6	0	0	$d_6$	$q_6$



Hình 3. Thiết lập các hệ trục tọa độ gắn với Robot

$$\mathbf{H}_0^1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & a_1 c_1 \\ s_1 & 0 & -c_1 & a_1 s_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{H}_1^2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & a_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_2^3 = \begin{bmatrix} c_3 & 0 & s_3 & a_3 c_3 \\ s_3 & 0 & -c_3 & a_3 s_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{H}_3^4 = \begin{bmatrix} c_4 & 0 & -s_4 & 0 \\ s_4 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_4^5 = \begin{bmatrix} c_5 & 0 & s_5 & 0 \\ s_5 & 0 & -c_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{H}_5^6 = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_0^6 = \mathbf{H}_0^1(q_1)\mathbf{H}_1^2(q_2)\dots\mathbf{H}_5^6(q_6) = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x & p_x \\ u_y & v_y & w_y & p_y \\ u_z & v_z & w_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Từ (2), nhân tung ra và thu gọn lại ta được hệ phương trình động học Robot:

$$\begin{cases} p_x = c_1 [a_1 + a_2 c_2 + a_3 c_{23} + d_4 s_{23} + d_6 (c_{23} c_4 s_5 + s_{23} c_5)] + d_6 s_1 s_4 s_5 \\ p_y = s_1 [a_1 + a_2 c_2 + a_3 c_{23} + d_4 s_{23} + d_6 (c_{23} c_4 s_5 + s_{23} c_5)] - d_6 c_1 s_4 s_5 \\ p_z = a_2 s_2 + a_3 s_{23} - d_4 c_{23} + d_6 (s_{23} c_4 s_5 - c_{23} c_5) \\ u_x = c_1 [c_{23} (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - s_{23} s_5 c_6] + s_1 (s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6) \\ v_y = s_1 [-c_{23} (c_4 c_5 c_6 + s_4 s_6) + s_{23} s_5 c_6] - c_1 (-s_4 c_5 c_6 + c_4 s_6) \\ w_z = s_{23} c_4 s_5 - c_{23} c_5 \\ c_{ij} = \cos(q_i + q_j); s_{ij} = \sin(q_i + q_j); \end{cases} \quad (3)$$

Trong bài toán động học nghịch, các thành phần của ma trận ở vế phải biểu thức (2) được cho trước, ta cần tìm các giá trị biến khớp  $q_i$ . Như có thể thấy từ (3), đây là hệ phương trình phi tuyến nhưng có thể giải bằng phương pháp hình học do Robot có cấu trúc đặc biệt. Các hệ trục quay  $Z_{4,5,6}$  đều cắt nhau tại chung một điểm nên ta có thể phân chia riêng biệt thành 2 bài toán độc lập [8] về vị trí (liên quan đến các biến khớp  $q_{1,2,3}$ ) và bài toán về hướng (liên quan đến các biến khớp  $q_{4,5,6}$ ). Bài toán về vị trí cho ta các nghiệm:

$$\begin{cases} q_1 = \arctan\left(\frac{p_y - d_6 w_y}{p_x - d_6 w_x}\right) \\ q_3 = 2 \arctan \frac{k_1 \pm \sqrt{k_1^2 + k_2^2 - k_3^2}}{k_3 + k_2} \\ q_2 = \arctan(s_2, c_2) \end{cases} \quad (4)$$

$$\mathbf{H}_0^6 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0.08 \sin(\pi t) \\ 1 & 0 & 0 & 0.18 + 0.08 \cos(\pi t) \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Với:

$$\begin{cases} k_1 = 2a_2 d_4; \\ k_2 = 2a_2 a_3; \\ k_3 = (p_x - d_6 w_x)^2 + (p_y - d_6 w_y)^2 + \\ (p_z - d_6 w_z)^2 - 2(p_x - d_6 w_x) a_1 c_1 \\ - 2(p_y - d_6 w_y) a_1 s_1 + a_1^2 + a_2^2 - a_3^2 - d_4^2 \end{cases}$$

Bài toán về hướng cho ta nghiệm:

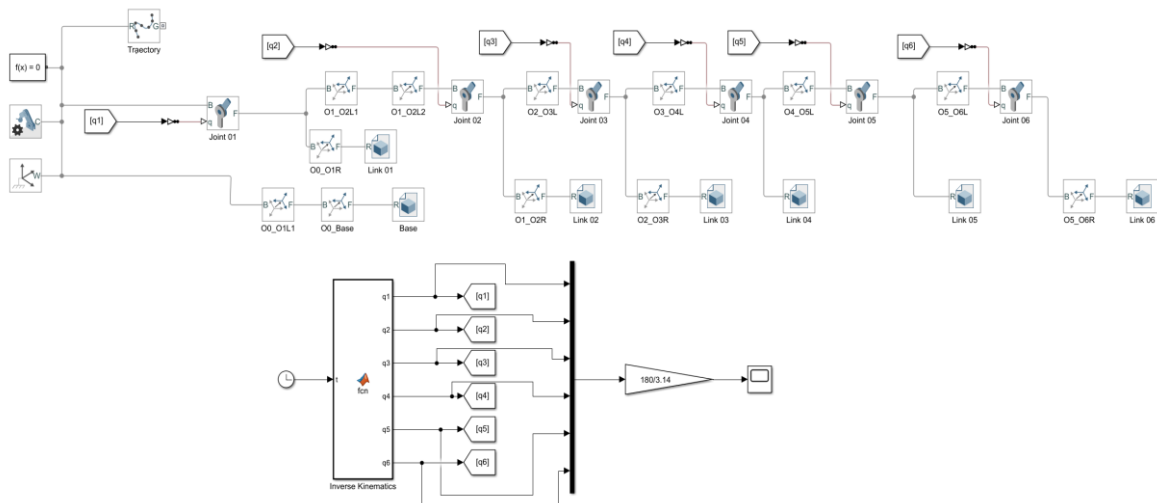
$$\begin{cases} q_5 = a \cos(w_x c_1 s_{23} + w_y s_1 s_{23} - w_z c_{23}) \\ q_4 = \text{asin} \frac{w_x s_1 - w_y s_1}{s_5} \\ q_6 = \text{asin} \frac{v_x c_1 s_{23} + v_y s_1 s_{23} - v_z c_{23}}{s_5} \end{cases} \quad (5)$$

Các nghiệm của phương trình ở (4) và (5) sẽ được dùng để thực hiện bài toán mô phỏng động học nghịch dựa trên mô hình đã thiết lập ở Mục 2. Ở đây, ta giả sử rằng khâu thao tác của Robot chuyển động bám theo một nửa đường tròn có bán kính là  $r=0,08\text{m}$  trong thời gian 1s và hướng của khâu thao tác được giữ luôn không đổi trong quá trình chuyển động. Ma trận thuận nhất biểu diễn hệ tọa độ gắn với khâu thao tác so với hệ cố định được cho bởi:

Các kích thước của Robot có giá trị như sau:

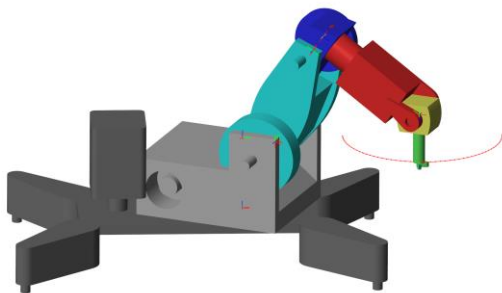
$$a_1 = 0.035; a_2 = 0.11; a_3 = 0.02; d_4 = 0.125; d_6 = 0.05 [m]$$

Để thực hiện mô phỏng, ta cần thêm khối tính toán động học nghịch và khối quỹ đạo của khâu thao tác vào mô hình ở mục 2. Toàn bộ sơ đồ mô phỏng động học nghịch được thể hiện ở Hình 4. Việc giải bài toán động học ngược dựa trên mô hình toán học và hệ phương trình sẽ cho nhiều tập nghiệm do các phương trình lượng giác đối với mỗi biến khớp thường trả 2 nghiệm. Tuy nhiên, đối với cấu trúc vật lý thực tế của Robot, sẽ có nhiều tập nghiệm từ lý thuyết mà Robot không thể đạt tới hoặc không nên chọn (do các ràng buộc va chạm vật lý xảy ra như va chạm giữa các khâu, giới hạn không gian làm việc, dây dẫn,... hoặc do bước nhảy đột ngột của biến khớp từ kết quả nghiệm của phương trình lượng giác). Kết quả mô phỏng chuyển động ở đây đã dựa trên việc lựa chọn 1 tập nghiệm để phù hợp nhất với khả năng chuyển động thực tế của Robot. Đồ thị về vị trí, vận tốc và gia tốc các biến khớp được thể hiện lần lượt ở các Hình 6, 7 và 8. Quan sát video ta có thể thấy khâu thao tác chuyển động bám theo quỹ đạo mà ta đã đặt ra đồng thời hướng của khâu thao tác cũng được giữ không thay đổi như yêu cầu. Đồ thị các biến khớp được thể hiện ở Hình 6, là vị trí góc quay của các khớp (độ)

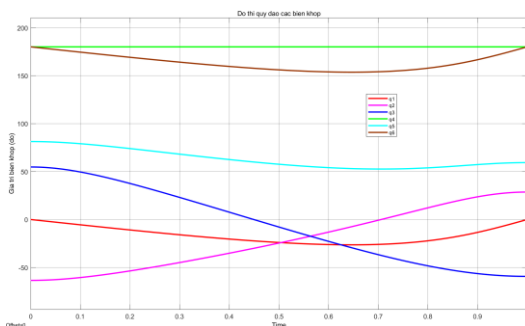


Hình 4. Sơ đồ mô phỏng bài toán động học nghịch

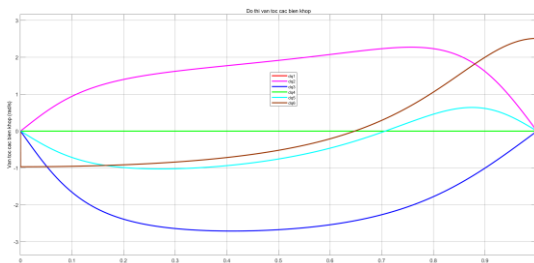
theo thời gian. Ta thấy khớp 4 đứng yên, còn các khớp khác thay đổi trong phạm vi hoạt động cho phép của chúng và chuyển động liên tục không có bước nhảy. Ở Hình 7 và 8 là đồ thị vận tốc và gia tốc của các khớp. Chúng ta cần lựa chọn động cơ để các giá trị này nằm trong giới hạn cho phép của động cơ. Hơn nữa, đây cũng là các giá trị đầu vào cho bài toán động lực học ngược. Như vậy, ta đã kiểm tra được tính đúng đắn lời giải của bài toán động học nghịch thông qua sự kết hợp mô phỏng giữa MATLAB/Simulink và phần mềm NX với công cụ Multibody.



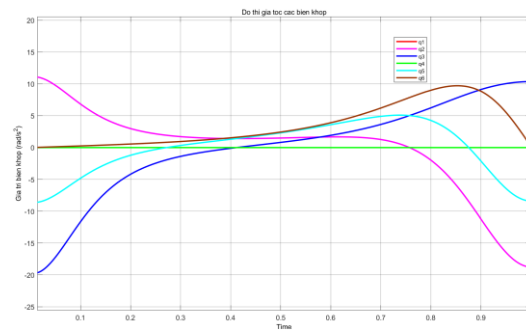
Hình 5. Kết quả mô phỏng trên MATLAB/Simulink



Hình 6. Đồ thị vị trí các khớp (độ)



Hình 7. Đồ thị vận tốc các khớp (rad/s)



Hình 8. Đồ thị gia tốc các khớp (rad/s<sup>2</sup>)

#### 4. Kết luận

Trong bài báo này, tác giả đã trình bày việc mô phỏng 3D động học nghịch cánh tay Robot 6 bậc tự do thông qua công cụ Multibody của MATLAB/Simulink với mô hình thiết kế được nhập từ phần mềm NX 12.0. Kết quả mô phỏng cho thấy việc thiết lập phương trình động học và nghiệm của bài toán động học ngược đã được thực hiện đúng và phù hợp với chuyển động thực tế của Robot. Đồng thời, ta thấy được tính trực quan của phương pháp mô phỏng khi tận dụng được khả năng đồ họa của phần mềm CAD và sức mạnh tính toán từ MATLAB. Tuy nhiên, phương pháp này đòi hỏi người dùng có kỹ năng sử dụng thành thạo cả 2 phần mềm bên cạnh lý thuyết tính toán về chuyển động của các hệ cơ học. Mô hình xây dựng có thể được tiếp tục phát triển cho các bài toán mô phỏng động lực học và điều khiển.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT20-21.35**.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N.D. Sang, Y. Takeda, D. Matsuura and Y. Sugahara, *Kinematic Design of Five-bar Parallel Robot by Kinematically Defined Performance Index for Energy Consumption*, EucoMes Mechanisms and Machine Science, pp.239-247, 2018.
- [2] Mathworks, *Physical Modeling tutorial*, 2019.
- [3] Michael Schlotter, *Multibody System Simulation with Simmechanics*, pp.1-23, 2003.
- [4] Parviz E. Nikravesh, *Planar Multibody Dynamics*, 2<sup>nd</sup>, CRC Press, 2019.
- [5] Nguyễn Văn Khang, *Động lực học hệ nhiều vật*, NXB Khoa học kỹ thuật, 2009.
- [6] <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/nx-for-design.html>

- [7] <https://www.mathworks.com/help/Robotics/modeling-and-simulation.html>
- [8] Lung-Wentsai, *Robot Analysis, The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators*, John Willey & Sons, INC. Publisher, 1999.
- [9] J. Olaya, N. Pintor, O.F. Aviles, J. Chaparro, *Analysis of 3 RPS Robotic Platform Motion in SimScape and MATLAB GUI Environment*, International Journal of Applied Engineering Research, pp.1460-1468, 2017.
- [10] M. Gouasmi, M. Ouali, B. Fernini, M. Meghatria, *Kinematic Modelling and Simulation of a 2-R Robot Using SolidWorks and Verification by MATLAB/Simulink*, International Journal of Advanced Robotic Systems, pp. 1-13, 2012.

Ngày nhận bài:	20/4/2021
Ngày nhận bản sửa:	06/5/2021
Ngày duyệt đăng:	17/5/2021