

## Nghiên cứu mô hình động học của robot hỗ trợ tập luyện phục hồi chức năng tay người

### A research on kinematic model of an exoskeleton robot for arm rehabilitation

Nguyễn Anh Tú<sup>1,\*</sup>, Không Minh<sup>1</sup>, Lưu Vũ Hải<sup>1</sup>, Vũ Xuân Quyết<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

<sup>2</sup>Trường trung học phổ thông Bắc Sơn

\*Email: tuna@hau.edu.vn

Mobile: 0904378033

---

#### Tóm tắt

##### Từ khóa:

Động học; Giật; Phục hồi chức năng; Robot dạng khung xương; Thiết kế quỹ đạo.

Tập luyện vận động là một nội dung quan trọng trong điều trị phục hồi chức năng cho người bị tai biến. Ứng dụng robot vào hoạt động hỗ trợ vận động, tập luyện phục hồi giúp kiểm soát chính xác các động tác, giảm thiểu các sai sót do yếu tố chủ quan của con người đồng thời nâng cao chất lượng điều trị phục hồi. Bài báo trình bày nghiên cứu thiết kế cấu trúc động học cho robot tay máy phục vụ luyện tập phục hồi chức năng tay người dựa trên nghiên cứu giải phẫu cơ sinh học tay người, trong đó cấu trúc robot cho phép người dùng có thể di chuyển cánh tay trong không gian tự nhiên của tay người, đồng thời đảm bảo tay người có thể chạm đến các vị trí đặc biệt theo yêu cầu của các bài tập phục hồi chức năng. Bên cạnh đó, giải pháp giảm hiện tượng giật giúp việc thiết kế quỹ đạo chuyển động cho robot có độ mượt cao hơn, tương thích với chuyển động và cấu trúc của tay người cũng được trình bày. Dữ liệu thu được cùng với những phân tích động học là cơ sở cho việc thực hiện điều khiển chuyển động của robot.

#### Abstract

##### Keywords:

Kinematics; Jerk; Rehabilitation; Exoskeleton Robot; Trajectory Design.

The training activities play an important role in rehabilitation therapy for stroke patients. The application of robot in therapy helps manage the accuracy of arm motion, eliminate the mistake beyond the people and improve the therapy quality. This paper presents a research on the designing kinematic architecture of rehabilitation robot based on the human arm biomechanics. The robot architecture allows the patient arm moving in the human space as well as following the therapy exercises. Furthermore, the solution for the minimum jerk is proposed to produce smoother trajectory that is compatible with human arm motions and biomechanics. The research results also can serve as fundamentals for the robot motion control.

---

Ngày nhận bài: 31/7/2018

Ngày nhận bài sửa: 12/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

---

## 1. TỔNG QUAN VỀ ROBOT HỖ TRỢ TẬP LUYỆN PHỤC HỒI CHỨC NĂNG TAY

Hoạt động tập luyện vận động là một nội dung quan trọng trong điều trị phục hồi chức năng, các khảo sát cho thấy nhu cầu phục hồi chức năng do các bệnh về tổn thương thần kinh trung ương; chấn thương xương khớp do tai nạn giao thông, tai nạn lao động hoặc các hoạt động thể thao; thoái hóa khớp và tai biến mạch máu não (đột quy não) ngày càng tăng cao [1].

Các hoạt động tập luyện trước đây chủ yếu dựa vào kỹ thuật viên, những nhân viên phục hồi chức năng đã được đào tạo và công tác tại Khoa vật lý trị liệu và phục hồi chức năng trong các bệnh viện. Do đó kết quả và chất lượng phục hồi không ổn định và đồng đều, đồng thời cũng phụ thuộc nhiều vào kiến thức, kỹ năng, kinh nghiệm và cả tình trạng sức khỏe của người kỹ thuật viên cũng như sự hợp tác của người bệnh [2]. Việc sử dụng robot vào hoạt động hỗ trợ vận động, tập luyện phục hồi giúp kiểm soát chính xác các động tác, giảm thiểu các sai sót do yếu tố chủ quan của con người đồng thời nâng cao chất lượng điều trị phục hồi.

Đến nay, đã có nhiều công trình khoa học nghiên cứu về robot hỗ trợ tập luyện phục hồi chức năng được công bố, các nghiên cứu tập trung nghiên cứu giải pháp kết cấu cơ khí nhằm tạo ra chuyển động linh hoạt, tương tự như thao tác của tay người [3]. Bên cạnh đó, nhiều nghiên cứu tập trung vào các giải pháp đo lường và điều khiển nhằm nâng cao chất lượng cho các bài tập, đảm bảo độ chính xác, an toàn [4]. Trong những nghiên cứu gần đây, các tác giả ứng dụng công nghệ thực tại ảo nhằm tạo sự đa dạng, hấp dẫn cho các bài tập dưới dạng các trò chơi, giảm sự nhàm chán khi tập luyện và nâng cao hiệu quả luyện tập cho người bệnh [5].

Một trong những yếu tố quan trọng nhất của bài toán điều khiển robot tay máy là đạt được độ chính xác vị trí, tuy nhiên với robot hỗ trợ tập luyện phục hồi chức năng, dạng đường đặc tính vận tốc đóng vai trò quan trọng, giúp robot chuyển động không bị hiện tượng giật, đặc biệt là tại các thời điểm khởi động, dừng hoặc đảo chiều chuyển động.

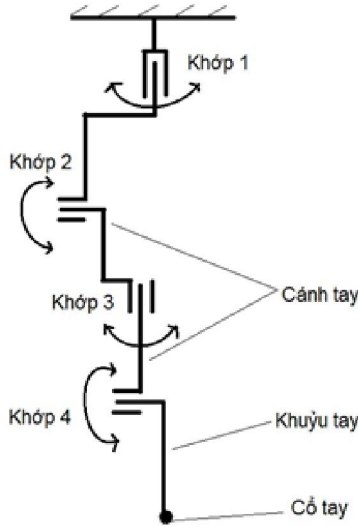
Bài báo trình bày nghiên cứu xây dựng mô hình động học thuận cho robot 4 bậc tự do nhằm đáp ứng đặc điểm chuyển động của tay người theo phương pháp Denavit-Hartenberg. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng cho thấy quỹ đạo chuyển động được thiết kế với đa thức bậc năm cho độ mịn cao hơn của đa thức bậc ba.

## 2. MÔ HÌNH ĐỘNG HỌC VÀ BÀI TOÁN THIẾT KẾ QUỸ ĐẠO

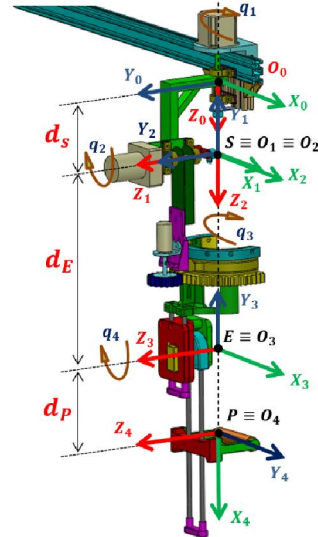
### 2.1. Cấu trúc robot exoskeleton 4DOF

Robot hỗ trợ tập luyện phục hồi chức năng tay người là một cấu trúc cơ học có các khớp tương ứng với cánh tay con người. Robot được sử dụng bằng cách đeo cánh tay ngoài, lực cơ học có thể truyền đến cánh tay con người thông qua tiếp xúc vật lý. Giải phẫu sinh học tay người được cấu tạo bởi hệ xương, các cơ, các dây thần kinh, da và một số thành phần khác. Trong đó có thể coi cấu tạo chủ yếu bởi khớp vai, khớp khuỷu tay và khớp cổ tay (ngoài ra còn có các khớp bàn tay). Khớp vai người được coi là khớp phức tạp nhất trong hệ xương người, có thể mô tả như một cơ cấu ba khớp: ở khớp cánh tay, khớp ức đòn và khớp đỉnh xương đòn. Ba khớp này cho phép tay người chuyển động với sự linh hoạt cao trên phạm vi rộng. Khuỷu tay gồm khớp khuỷu và các khớp trụ, tuy nhiên cấu trúc của khuỷu tay thường được xem như gồm hai chuyển động chính là chuyển động gấp duỗi của cánh tay và chuyển động xoay của cánh tay quanh trục của nó. Cổ tay được cấu tạo gồm tám xương và gồm nhiều khớp, tuy nhiên cổ tay thường được xác định gồm hai bậc tự do. Các chuyển động của cổ tay được thực hiện quanh một tâm quay tức thời, tuy nhiên quỹ đạo của tâm quay tức thời này nhỏ nên thực tế các chuyển động của cổ tay được coi như quay quanh các trục cố định [6].

Trong nghiên cứu bài toán động học và động lực học, các thông số động học, động lực học của cổ tay có thể xác định trực tiếp từ khớp khuỷu tay. Do đó để giảm thời gian tính toán, trong nghiên cứu này tác giả chỉ tập trung nghiên cứu mô hình robot gồm bốn bậc tự do, trong đó khớp vai được cấu tạo bởi ba khớp quay và khớp khuỷu tay gồm một khớp quay. Lược đồ động học của robot được mô tả như trên hình 1.



**Hình 1.** Lược đồ khâu của robot 4DOF



**Hình 2.** Mô hình robot và hệ trục tọa độ theo D-H

## 2.2. Mô hình động học của robot

Từ lược đồ khâu được xác định trong phân trình bày trước, thiết kế kết cấu cơ khí cho robot được đề xuất như Hình 2, trong đó hệ trục tọa độ cố định  $\{O_0 x_0 y_0 z_0\}$  được gắn trên giá đỡ robot, hệ trục tọa độ cuối cùng  $\{O_4 x_4 y_4 z_4\}$  gắn trên khâu tác động cuối là vị trí tay nắm. Các thông số động học của robot được xác định như trong bảng 1.

**Bảng 1.** Thông số động học D-H

Khâu	$d_i$	$\theta_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$d_s$	$q_1$	0	$-\pi/2$
2	0	$q_2$	0	$\pi/2$
3	$d_E$	$q_3$	0	$\pi/2$
4	0	$q_4$	$d_P$	0

Dạng ma trận biến đổi thuần nhất giữa hai khâu liên tiếp ( $i$ ) và ( $i-1$ ) theo phương pháp Denavit-Hartenberg có dạng [7]:

$$H_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sau khi xác định các ma trận biến đổi thuần nhất giữa hai khâu liên tiếp từ khâu 0 đến khâu 4, ta có phương trình động học mô tả mối quan hệ giữa vị trí và hướng của khâu tác động cuối theo các biến khớp được xác định:

$$D_4^0 = H_1^0 H_2^1 H_3^2 H_4^3 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} n_x &= \cos q_1 \sin q_2 \sin q_4 - \cos q_4 (\sin q_1 \sin q_3 - \cos q_1 \cos q_2 \cos q_3); \\ n_y &= \cos q_4 \cos q_1 \sin q_3 + \cos q_2 \cos q_3 \sin q_1 + \sin q_1 \sin q_2 \sin q_4; \\ n_z &= \cos q_2 \sin q_4 - \cos q_3 \cos q_4 \sin q_2; \\ o_x &= \sin q_4 (\sin q_1 \sin q_3 - \cos q_1 \cos q_2 \cos q_3) + \cos q_1 \cos q_4 \sin q_2 \\ o_y &= \cos q_4 \sin q_1 \sin q_2 - \sin q_4 (\cos q_1 \sin q_3 + \cos q_2 \cos q_3 \sin q_1) \\ o_z &= \cos q_2 \cos q_4 + \cos q_3 \sin q_2 \sin q_4 \\ a_x &= \cos q_3 \sin q_1 + \cos q_1 \cos q_2 \sin q_3 \\ a_y &= \cos q_2 \sin q_1 \sin q_3 - \cos q_1 \cos q_3 \\ a_z &= -\sin q_2 \sin q_3 \\ p_x &= d_E \cos q_1 \sin q_2 - d_P \cos q_4 (\sin q_1 \sin q_3 - \cos q_1 \cos q_2 \cos q_3) + d_P \cos q_1 \sin q_2 \sin q_4 \\ p_y &= d_E \sin q_1 \sin q_2 + d_P \cos q_4 (\cos q_1 \sin q_3 + \cos q_2 \cos q_3 \sin q_1) + d_P \sin q_1 \sin q_2 \sin q_4 \\ p_z &= d_S + d_E \cos q_2 + d_P \cos q_2 \sin q_4 - d_P \cos q_3 \cos q_4 \sin q_2 \end{aligned}$$

### 2.3. Tối ưu quỹ đạo chuyển động

Nội dung của chuyên đề thiết kế quỹ đạo cho robot là từ các yêu cầu công nghệ của bài toán, cần xác định vị trí và hướng của khâu tác động cuối tại một số thời điểm khác nhau trong không gian thao tác. Từ đó nhằm xác định các quy luật chuyển động của khâu tác động cuối. Mục tiêu của bài toán thiết kế quỹ đạo là tạo ra bộ tham số đầu vào cho hệ thống điều khiển chuyển động để đảm bảo robot thực hiện theo quỹ đạo mong muốn. Bên cạnh đó, việc xác định được quỹ đạo chuyển động cho robot thỏa mãn các tiêu chuẩn như tối ưu khoảng cách, tối ưu về thời gian, tối ưu năng lượng chuyển động, tránh vật cản cũng được nhiều nhà khoa học quan tâm [8]. Các kỹ thuật tối ưu có thể được thực hiện trong không gian thao tác hoặc không gian khớp bằng cách áp dụng các phương pháp tối ưu hóa kinh điển hoặc kết hợp với các thuật toán di truyền.

Bài toán điều khiển vị trí của robot tay máy thường tập trung vào việc đạt được độ chính xác điểm đích hoặc vận tốc chuyển động không đổi. Tuy nhiên trong bài toán điều khiển vị trí của robot hỗ trợ tập luyện phục hồi chức năng tay người, dạng đường đặc tính của vận tốc chuyển động đóng vai trò quan trọng, đảm bảo robot chuyển động theo một quỹ đạo trơn (không xảy ra hiện tượng giật) và đến vị trí mong muốn trong khoảng thời gian xác định. Độ giật ( $J$ ) được xác định bằng vi phân bậc ba của quãng đường  $x(t)$  theo thời gian [9] (vi phân nhất của gia tốc):

$$J = \ddot{x}(t) = \frac{d^3x(t)}{dt^3} \quad (3)$$

Để đạt được quỹ đạo trơn, cần xác định cực tiểu hóa hàm chi phí của  $J$ . Do đó quỹ đạo với hiện tượng giật ít nhất khi khâu tác động cuối chuyển động từ điểm đầu đến điểm cuối được xác định bởi cực tiểu hóa tích phân của hàm  $I(x)$  theo thời gian:

$$I(x) = \frac{1}{2} \int_0^T (\ddot{x}_t)^2 dt \quad (4)$$

Để xác định cực tiểu hóa của  $I(x)$ , ta định nghĩa một hàm  $h(\varepsilon, t)$  của quỹ đạo  $x(t)$ , trong đó  $\delta$  là một hàm bất kì:

$$h(\varepsilon, t) = x(t) + \varepsilon \delta(t) \quad (5)$$

Trong đó điều kiện ban đầu được xác định:  $\delta_0 = \delta_T = 0$ ;  $\dot{\delta}_0 = \dot{\delta}_T = 0$ ;  $\ddot{\delta}_0 = \ddot{\delta}_T = 0$   
Xét hàm:

$$F(\varepsilon) = \frac{1}{2} \int_a^b (\ddot{h})^2 dt \quad (6)$$

Điều kiện của quỹ đạo  $x(t)$  để  $I(x)$  đạt cực tiểu là:  $\left. \frac{dF(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} = 0$  (7)

$$\text{Do đó: } \frac{dF(\varepsilon)}{d\varepsilon} = \int_0^T (\ddot{x}_t + \varepsilon \ddot{\delta}_t) \ddot{\delta}_t dt \text{ hay } \left. \frac{dF(\varepsilon)}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} = \int_0^T \ddot{x}_t \ddot{\delta}_t dt \quad (8)$$

Thực hiện lần lượt các phép biến đổi tích phân từng phần ta có:

$$\begin{aligned} \int_0^T \ddot{x}_t \ddot{\delta}_t dt &= \ddot{x}_t \ddot{\delta}_t \Big|_0^T - \int_0^T \ddot{x}_t^{[4]} \ddot{\delta}_t dt \\ \int_0^T \ddot{x}_t \ddot{\delta}_t dt &= - \int_0^T \ddot{x}_t^{[4]} \ddot{\delta}_t dt \\ - \int_0^T \ddot{x}_t^{[4]} \ddot{\delta}_t dt &= - \ddot{x}_t^{[4]} \dot{\delta}_t \Big|_0^T + \int_0^T \ddot{x}_t^{[5]} \dot{\delta}_t dt \\ - \int_0^T \ddot{x}_t^{[4]} \ddot{\delta}_t dt &= \int_0^T \ddot{x}_t^{[5]} \dot{\delta}_t dt \\ \int_0^T \ddot{x}_t^{[5]} \dot{\delta}_t dt &= - \int_0^T \ddot{x}_t^{[6]} \delta_t dt \end{aligned} \quad (9)$$

Do đó, để thỏa mãn điều kiện (7) thì:

$$\int_0^T \ddot{x}_t^{[6]} \delta_t dt = 0 \quad (10)$$

$$\text{Để điều kiện này thỏa mãn với mọi hàm khi } t \in [0, t] \text{ ta có } \ddot{x}_t^{[6]} = 0 \quad (11)$$

Từ biểu thức (11) ta thấy để hiện tượng giật trên toàn quỹ đạo chuyển động là nhỏ nhất thì vi phân bậc sáu của hàm quỹ đạo theo thời gian phải bằng không. Do đó, quỹ đạo chuyển động cần có dạng đa thức bậc 5 theo thời gian:

$$\begin{cases} x(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \\ \dot{x}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 + 4a_4t^3 + 5a_5t^4 \\ \ddot{x}(t) = 2a_2 + 6a_3t + 12a_4t^2 + 20a_5t^3 \end{cases} \quad (12)$$

Giả sử tại thời điểm ban đầu và kết thúc chuyển động, các thông số động học vị trí, vận tốc và gia tốc đã biết. Nếu robot ở trạng thái đứng yên ta có:  $a_0 = x_0$ ;  $a_1 = \dot{x}_0$  và  $a_2 = \frac{1}{2}\ddot{x}_0$

Khi robot chuyển động đến vị trí cuối, ứng với thời điểm  $t = T$  ta có:

$$\begin{aligned} x_T &= a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 + a_5T^5 \\ \dot{x}_T &= a_1 + 2a_2T + 3a_3T^2 + 4a_4T^3 + 5a_5T^4 \\ \ddot{x}_T &= 2a_2 + 6a_3T + 12a_4T^2 + 20a_5T^3 \end{aligned} \quad (13)$$

Biểu diễn hệ phương trình (13) dưới dạng ma trận ta có:

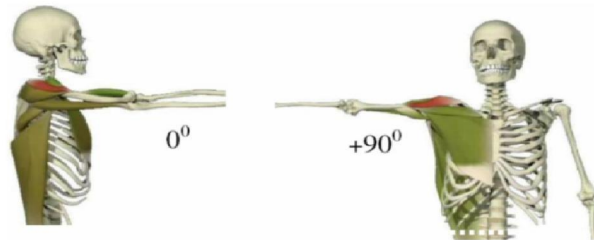
$$\begin{bmatrix} x_T - a_0 - a_1T - a_2T^2 \\ \dot{x}_T - a_1 - 2a_2T \\ \ddot{x}_T - 2a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^3 & T^4 & T^5 \\ 3T^2 & 4T^4 & 5T^5 \\ 6T & 12T^2 & 20T^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T^3 & T^4 & T^5 \\ 3T^2 & 4T^4 & 5T^5 \\ 6T & 12T^2 & 20T^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_T - a_0 - a_1T - a_2T^2 \\ \dot{x}_T - a_1 - 2a_2T \\ \ddot{x}_T - 2a_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Thay các giá trị  $a_i$  vào phương trình (13) ta có thể xác định quỹ đạo chuyển động của robot thỏa mãn điều kiện hiện tượng giật nhỏ nhất.

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

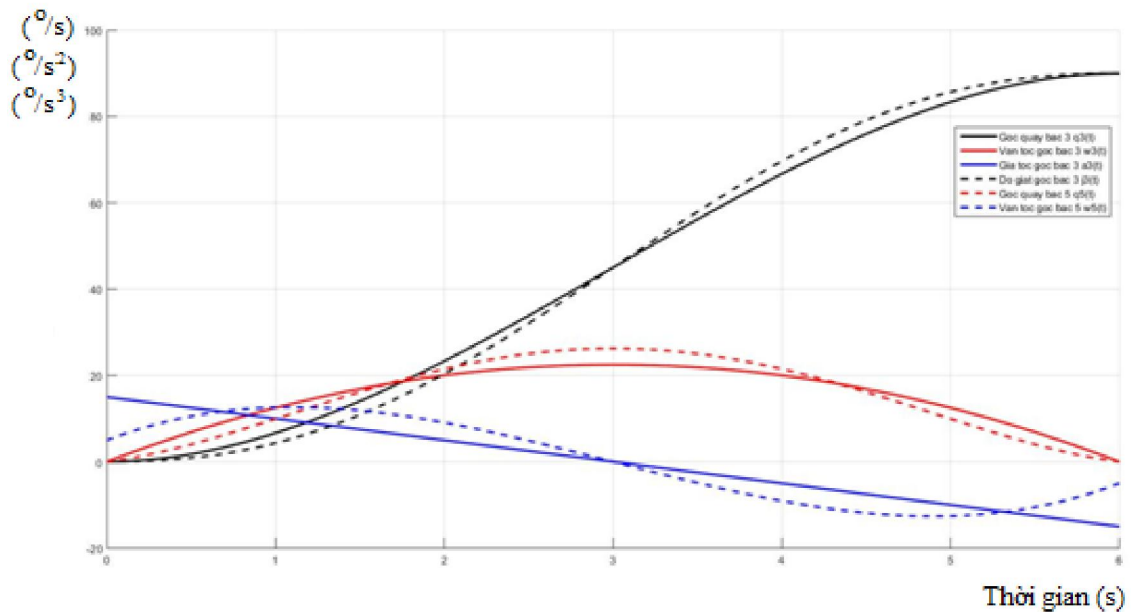
#### 3.1. Quỹ đạo chuyển động dạng điểm - điểm



Hình 3. Động tác mở tay của khớp vai  $90^\circ$  [6].

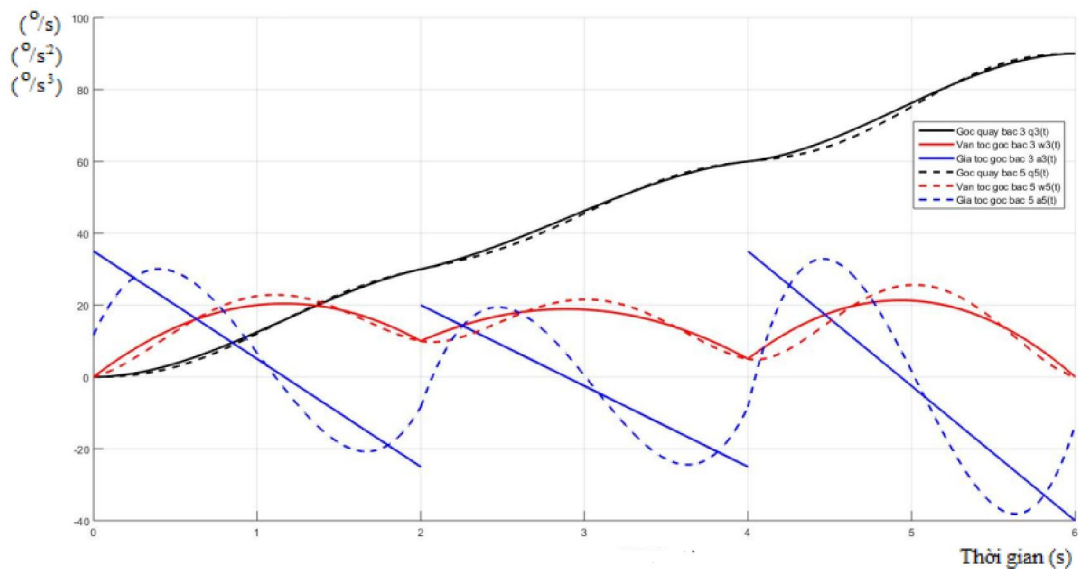
Để đánh giá cấu trúc động học và kiểm chứng thuật toán giảm hiện tượng giật khi chuyển động của robot, bài báo phân tích chuyển động của khớp  $q_1(t)$  khi thực hiện động tác mở tay một góc từ  $0^\circ$  đến  $90^\circ$  trong thời gian 6s, tương thích với vận tốc chuyển động của tay người (Hình 3). Nghiên cứu được thực hiện với quỹ đạo chuyển động là đa thức bậc 3 và đa thức bậc 5, trong đó gia tốc góc tại vị trí xuất phát và vị trí kết thúc bằng của quỹ đạo đa thức bậc 5 bằng 1/3 độ lớn của gia tốc của đa thức bậc 3.

Kết quả tính toán góc quay, vận tốc góc và gia tốc góc được biểu diễn trên hình 4. Có thể thấy vận tốc góc lớn nhất của quỹ đạo dạng đa thức bậc 5 là  $26,25^{\circ}/s$  lớn hơn giá trị lớn nhất theo đa thức bậc 3 bằng  $22,5^{\circ}/s$  tại thời điểm 3s. Bên cạnh đó, kết quả tính toán cho thấy quỹ đạo chuyển động dạng đa thức bậc 5 cho phép điều khiển giảm gia tốc tại các điểm dừng (điểm bắt đầu và điểm kết thúc), do đó giảm hiện tượng giật khi chuyển động của tay máy.



Hình 4. Quỹ đạo chuyển động của góc  $q_1(t)$  theo đa thức bậc 3 và bậc 5

### 3.2. Quỹ đạo chuyển động dạng điểm - điểm đi qua các điểm chốt



Hình 5. Quỹ đạo chuyển động của góc  $q_1(t)$  theo đa thức bậc 3 và bậc 5 qua các điểm chốt

Trong bài toán điều khiển robot tay máy nói chung cũng như điều khiển robot hỗ trợ tập luyện phục hồi chức năng cho tay người, ngoài việc điều khiển robot chuyển động từ điểm đầu đến điểm cuối thì robot cần chuyển động qua các điểm chốt (điểm chuyển tiếp) với vận tốc khác không để thực hiện các nhiệm vụ công nghệ cũng như thực hiện các chuyển động phức tạp.

Nghiên cứu tiếp tục được thực hiện với thao tác chuyển động như phần 3.1 tuy nhiên tay máy cần phải chuyển động qua hai điểm chốt tại góc quay  $30^0$  và  $60^0$ . Từ kết quả tính toán trên hình 5 ta thấy, khi sử dụng quỹ đạo dạng đa thức bậc 3, đường đặc tính vận tốc bị gãy tại các điểm chốt và gia tốc tại điểm chốt xuất hiện bước nhảy, trong khi đặc khi vận tốc và gia tốc của đường quỹ đạo bậc 5 đều là các đường liên tục. Bên cạnh đó, gia tốc của quỹ đạo dạng đa thức bậc 3 tại các điểm đầu, cuối và điểm chốt luôn lớn hơn giá trị gia tốc khi quỹ đạo có dạng đa thức bậc 5, do đó quỹ đạo chuyển động của robot sẽ trơn hơn.

#### 4. KẾT LUẬN

Sử dụng robot hỗ trợ vận động, tập luyện phục hồi chức năng tay người giúp kiểm soát chính xác các động tác đồng thời nâng cao chất lượng điều trị phục hồi. Trong thiết kế robot hỗ trợ tập luyện tay người, bài toán thiết kế robot có cấu trúc phù hợp để thực hiện được các chuyển động tương tự của tay người là vấn đề được nhiều nhà khoa học quan tâm. Bên cạnh đó, bài toán thiết kế quỹ đạo robot ngoài yêu cầu việc điều khiển robot thực hiện các thao tác cơ bản của tay người đồng thời giảm hiện tượng giật để tạo sự thoải mái cho người bệnh. Bài báo trình bày phương pháp thiết lập mô hình động học cho robot 4 bậc tự do theo quy tắc Denavit-Hartenberg và những cơ sở lý thuyết trong việc lựa chọn dạng quỹ đạo chuyển động để hiện tượng giật nhỏ nhất. Kết quả nghiên cứu cho thấy, quỹ đạo dạng đa thức bậc 5 mặc dù có vận tốc chuyển động lớn hơn nhưng đường có đặc tính vận tốc là các đường cong trơn, ngay các khi chuyển động qua các điểm chốt không dừng. Bên cạnh đó, gia tốc tại các điểm chốt không xảy ra hiện tượng nhảy như trong quỹ đạo bậc 3 và quỹ đạo dạng bậc 5 cho phép điều khiển gia tốc tại các điểm dừng, đây là cơ sở để giảm hiện tượng giật, nâng cao chất lượng bài toán điều khiển chuyển động cho robot, đồng thời cải thiện chất lượng tập luyện phục hồi cho người bệnh.

#### LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả cảm ơn sự hỗ trợ của Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội trong nghiên cứu.

#### DANH MỤC KÝ HIỆU

$q_i$ : Các biến khớp (độ);

$a_i$ : Hằng số của phương trình chuyển động.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Sidey, S., Rosamond, W. D., Howard, V. J., and Luepker, R. V., 2013. *The heart disease and stroke statistics and the need for a national cardiovascular surveillance system*. Circulation, 127 (1), 21-23.

[2]. Brainin, N., 2007. *Acute neurological stroke care in Europe: results of the European Stroke Care Intervention*. Eur. J. Neurol, 7.

[3]. Liu, L., Shi, Y. Y., Xie, L., 2016. *A novel multi-DOF exoskeleton robot for upper limb rehabilitation*. Journal of Mechanics in Medicine and Biology 16(8), 1-11.



- [4]. Kairul, A., Adel, A. A., 2012. *Active exoskeleton control system: State of art*. International symposium on robotics and intelligent sensors 41, 988-994.
- [5]. Craig, C., Jonathan, T., Stephen, R., 2009. *Development of an exoskeleton haptic interface for virtual task training*. International conference on intelligent robots and systems, St. Louis, USA. 3697-3702.
- [6]. Gopura, A. R.C., Kiguchi, K., Horikawa, E., 2009. *A study on Human Upper-Limb Muscles Activities during Daily Upper-Limb Motion*. International journal of bioelectromagnetism.
- [7]. Đào, V. H., 2006. *Kỹ thuật robot*. NXB Khoa học và kỹ thuật, 2006.
- [8]. Mark, W., Spong, Seth, H., Vidyasagar, M., 2005. *Robot Modeling and Control*, JOHN WILEY & SON, INC.
- [9]. Hogan, N., 1984. *An organizing principle for a class of voluntary movements*. Journal of Neuroscience, 4, 2745-2754.