

# TÌM HIỂU LUẬT ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI LI-SLOTINE TRONG ĐIỀU KHIỂN ROBOT

## RESEARCH ADAPTIVE CONTROL LI-SLOTINE IN ROBOT CONTROL

**Vũ Duy Thuận**

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 12/1/2022, Ngày chấp nhận đăng: 26/5/2023, Phản biện: TS. Phạm Văn Hùng

### **Tóm tắt:**

Cùng với sự phát triển của khoa học công nghệ, robot công nghiệp là một phần không thể thiếu trong sản xuất tự động hóa. Trong kỹ thuật điều khiển robot, người ta thường chia theo mục đích sử dụng và môi trường làm việc, từ đó có các phương pháp điều khiển khác nhau như điều khiển theo chương trình, thích nghi, mờ, neuron... Với môi trường công nghiệp, robot thường là một hệ thống có tính phi tuyến cao với các thông số bất định, giữa các khâu khớp có sự tác động qua lại nên là một trong những nguyên nhân gây sai lệch quỹ đạo hay vị trí khớp. Nội dung của bài báo này là nghiên cứu luật điều khiển Li-Slotine trong việc điều khiển vị trí tay robot, và đánh giá về sự ổn định của luật điều khiển này đối với robot SCARA công nghiệp.

### **Từ khóa:**

Điều khiển robot, điều khiển thích nghi, Li-Slotine, SCARA.

### **Abstract:**

Along with the development of science and technology, industrial robots are an indispensable part of automated production. In robot control engineering, people are often divided according to the purpose of use and working environment, from which there are different control methods such as program control, adaptive, fuzzy, neuron... In the industrial field, the robot is usually a highly nonlinear system with uncertain parameters, between the joints there is a reciprocal interaction, so it is one of the causes of the deviation of the trajectory or the joint position. In this paper, the research direction is Li-Slotine control law in controlling robot arm position, namely industrial SCARA robot.

### **Keywords:**

Robot control, adaptive control, Li-Slotine, SCARA.

## **1. MỞ ĐẦU**

Điều khiển robot được xây dựng dựa trên 3 phần: thiết bị điều khiển, đối tượng điều khiển (tay robot, các động cơ truyền động) và thiết bị đo lường (đo vị trí, lực, dòng áp cấp cho động cơ).

Theo nhiệm vụ, điều khiển robot thường

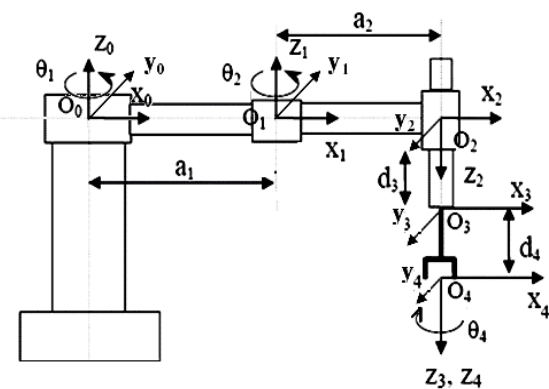
được phân loại thành 2 dạng bài toán là điều khiển theo quỹ đạo (điều khiển thô) và bài toán điều khiển kết hợp giữa quỹ đạo và lực tác động (điều khiển tinh). Mặc dù chia ra thành nhiều dạng, nhưng quan trọng nhất vẫn là chất lượng điều khiển mà cụ thể ở đây là sự ổn định và là

một trong những tiêu chuẩn đầu tiên khi xem xét tới việc điều khiển. Để nói một cách đơn giản thì robot được điều khiển tự động theo chương trình, nhưng khi nghiên cứu về vấn đề điều khiển thì nó bao gồm nhiều tham số như: quỹ đạo làm việc với thông số động học tay robot, các luật điều khiển, cơ cấu cơ khí và hệ truyền động, lập trình điều khiển...

Trong các phương pháp điều khiển robot, trong kỹ thuật điều khiển hiện đại, điều khiển thích nghi là phương pháp được áp dụng khá nhiều bởi đây là một phương pháp điều khiển mềm dẻo, có khả năng tự thay đổi cấu trúc hoặc tham số để phù hợp với việc thay đổi của đối tượng sao cho hệ thống vẫn ổn định. Luật điều khiển thích nghi Li-Slotine là một trong những phương pháp điều khiển như vậy. Trước khi đi vào luật điều khiển này, ta xem xét các vấn đề liên quan tới việc điều khiển robot Scara như phương trình động học, động lực học và động lực học ngược.

## 2. PHƯƠNG TRÌNH ĐỘNG LỰC HỌC ROBOT SCARA

### 2.1. Cấu tạo của robot SCARA



Hình 1. Cấu hình Robot SCARA và hệ tọa độ D-H

Cấu hình robot SCARA bao gồm đế, khớp (quay và tịnh tiến), các liên kết giữa các khớp và bàn kẹp. Ngoài ra còn có hệ thống truyền động, cảm biến, hệ điều khiển để robot hoạt động trong không gian làm việc...

Theo cấu hình, robot SCARA có các thông số như ở bảng 1.

Bảng 1. Ký hiệu các thông số của robot SCARA

Tham số	Khớp 1	Khớp 2	Khớp 3	Khớp 4
Biến khớp	$\theta^*_1$	$\theta^*_2$	$l^*_3$	$\theta^*_4$
Chiều dài (m)	$l_1$	$l_2$	$l_3$	0
Khối lượng (kg)	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$
Vận tốc (m/s)	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$
Chiều dài tâm khối (m)	$l_{g1}$	$l_{g2}$	$l_{g3}$	0

Với giả thiết:  $l_{g1} = l_1/2$        $l_{g2} = l_2/2$   
 $l_{g3} = l_3/2$

$J_i$ : mômen quán tính của khớp  $i$ .

Hệ qui chiếu gắn với hệ trục tọa độ  $(O_0, x_0, y_0, z_0)$  trên khớp thứ nhất. Khi đó mặt phẳng  $(O_0, x_0, y_0)$  là mặt phẳng đẳng thế.

### 2.2. Phương trình động lực học của robot SCARA

Tính toán động năng và thế năng cho từng khớp.

Để tính vận tốc góc của các khâu robot, ta sử dụng công thức:

$$v_i = \sqrt{\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2 + \dot{z}_i^2}, \text{ trong đó } x_i, y_i, z_i \text{ là}$$

hình chiếu của tâm thanh nối thứ  $i$  lên các trục  $x, y, z$ . Sau khi tính toán, ta có được:

**Động năng và thế năng khớp 1:** (1)

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2} J_1 \cdot \omega_1^2 = \frac{1}{2} m_1 \cdot l_{g1}^2 \cdot \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_1 \cdot \dot{\theta}_2^2$$

$$P_1 = 0.$$

**Động năng và thế năng khớp 2:** (2)

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 \cdot v_2^2 + \frac{1}{2} J_2 \cdot \omega_2^2 = \frac{1}{2} m_2 \cdot [ l_1^2 \cdot \dot{\theta}_1^2 + l_{g2}^2 \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + 2 \cdot l_1 \cdot l_{g2} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \cos\theta_2) ] + \frac{1}{2} J_2 \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2$$

$$P_2 = 0$$

**Động năng và thế năng khớp 3:** (3)

$$K_3 = \frac{1}{2} m_3 \cdot v_3^2 = \frac{1}{2} m_3 \cdot [ l_1^2 \cdot \dot{\theta}_1^2 + l_{g2}^2 \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + 2 \cdot l_1 \cdot l_{g2} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \cos\theta_2 + \dot{l}_3^2) ]$$

$$P_3 = m_3 \cdot g \cdot h_3 = - m_3 \cdot g \cdot l_3$$

**Động năng và thế năng khớp 4:** (4)

$$K_4 = \frac{1}{2} m_4 \cdot v_4^2 + \frac{1}{2} J_4 \cdot \omega_4^2 = \frac{1}{2} m_4 [ l_1^2 \cdot \dot{\theta}_1^2 + l_{g2}^2 \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + 2 \cdot l_1 \cdot l_{g2} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \cos\theta_2 + \dot{l}_3^2) ] + \frac{1}{2} J_4 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4)^2$$

$$P_4 = m_4 \cdot g \cdot h_4 = - m_4 \cdot g \cdot l_3$$

**Tổng động năng của hệ thống:** (5)

$$K = K_1 + K_2 + K_3 + K_4$$

Ta có:

$$K = \frac{1}{2} m_1 l_{g1}^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_{234} l_{g1}^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} l_{g2}^2 m_{234} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) + l_1 l_{g2} m_{234} (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \cdot \dot{\theta}_2) \cdot \cos\theta_2 + \frac{1}{2} m_{34} \dot{l}_3^2 + \frac{1}{2} J_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + \frac{1}{2} J_4 \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_4)^2$$

$$\text{Với: } m_{1234} = m_1 + m_2 + m_3 + m_4;$$

$$m_{234} = m_2 + m_3 + m_4;$$

$$m_{34} = m_3 + m_4;$$

**Tổng thế năng của hệ thống:** (6)

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = - m_{34} \cdot g \cdot l_3$$

**Phương trình động lực học:** Áp dụng phương trình Lagrange của hệ thống [4]:

$$L = K - P$$

Các phần tử của phương trình động lực học:

$$F_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i}$$

Như vậy sau khi tính toán, phương trình động lực học của hệ thống được biểu diễn bằng các phương trình động lực học rút gọn dưới dạng ma trận sau:

$$\begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & 0 & H_{14} \\ H_{21} & H_{22} & 0 & H_{24} \\ 0 & 0 & H_{33} & 0 \\ H_{41} & H_{42} & 0 & H_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{d}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g_3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Viết gọn lại:

$$M = H(q, \dot{q}) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) \quad (8)$$

### 3. LUẬT ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI LI-SLOTINE CHO SCARA

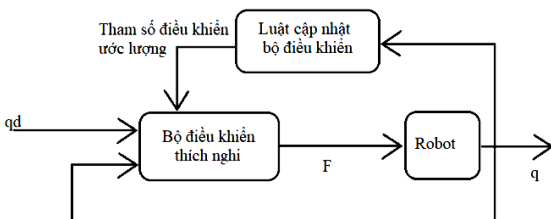
#### 3.1. Luật điều khiển thích nghi Li-Slotine

Bài toán động học ngược vị trí là bài toán phức tạp, khối lượng tính toán lớn, ngoài ra trong quá trình tính ma trận nghịch đảo có thể sẽ gặp phải điểm cực làm hệ thống không ổn định. Để đảm bảo vấn đề đặt ra, một hệ điều khiển MIMO được gọi là điều khiển thích nghi sẽ áp dụng cho các đối tượng nhiều bậc tự do, ảnh hưởng tác động qua lại lẫn nhau [2], [3].

Phương pháp điều khiển thích nghi nói chung là ước lượng tham số chưa xác định, sau đó tính toán và cập nhật các thông số của bộ điều khiển dựa trên các tín hiệu vào ra của hệ thống trong khi làm việc để đạt kết quả đề ra.

Có thể mô tả bộ điều khiển thích nghi hoạt động dựa theo hình 2.

Có thể thấy bộ điều khiển thích nghi có cấu trúc dựa trên cấu trúc của bộ điều khiển kinh điển, còn tham số bộ điều khiển thì không cố định, được hiệu chỉnh sau mỗi chu kỳ lấy mẫu thông qua luật cập nhật các thông số điều khiển dựa trên trạng thái robot tại từng thời điểm.



Hình 2. Sơ đồ khối luật điều khiển thích nghi

Xét phương trình động lực học của robot và theo [5], [6], [7], [8], với giả thiết không

xuất hiện các tham số hằng bất định:

$$\tau = H(q) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + G(q) \quad (9)$$

Trong đó: H là ma trận quán tính đối xứng, C là ma trận lực Coriolis, G là ma trận vecto gia tốc trọng trường.

Sử dụng bộ điều khiển giả định mô tả như sau:

$$\tau = H(q) \cdot \dot{v} + C(q, \dot{q})v + G(q) + K_d(v - \dot{q}) \quad (10)$$

trong đó:

$$v = \dot{q}_d + \nabla(q_d - q) = \dot{q}_d + \nabla e;$$

$$r = \dot{e} + \nabla e = \dot{q}_d - \dot{q} + \nabla(q_d - q) = v - \dot{q}; \quad (11)$$

$K_d$ : ma trận đối xứng, xác định dương tùy ý.

$\nabla = \text{diag}(\lambda_i)$ : ma trận đường chéo xác định dương ( $\lambda_i > 0$ ).

Ta áp dụng phương pháp hàm Lyapunov xét tính ổn định của hệ trên.

Cấu trúc của Robot có các tham số bất định như tải trọng, khối lượng tải, mômen quán tính tải, các thành phần ma sát trong các khớp... Luật điều khiển Li-Slotine có thể khử các tham số bất định bằng cách chỉnh (cập nhật) các thông số, đồng thời nhận dạng tham số động học của hệ thống, so sánh và cập nhật với các giá trị thực, đưa vào bộ điều khiển để sai lệch về vị trí của các khớp robot sẽ về không; hệ thống ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov.

Để áp dụng được luật điều khiển thích nghi Li-Slotine cho robot điều khiển bám quỹ đạo thì ta có các giả thiết sau:

Mô hình động lực học có đầy đủ các thành phần.

Đối với mô hình động lực học thì tính bất định là ở tham số hằng có giá trị chưa biết hoặc không chính xác (ước lượng).

Các tham số hằng bất định được tách riêng ra.

Trong mô hình động lực học: Ma trận quán tính  $H$  là ma trận đối xứng xác định và  $S=C(q,\dot{q})-\frac{1}{2}\dot{H}(q)$  là ma trận đối xứng lệch  $S=-S^T$ .

Từ (10) luật điều khiển thích nghi Li-Slotine được đưa ra như sau:

$$\tau = \hat{H}(q)\dot{v} + \hat{C}(q,\dot{q})v + \hat{G}(q) - K_d r = Y(q,\dot{q},v,\dot{v})\hat{p} - K_d r \quad (12)$$

trong đó:  $\hat{H}(q), \hat{C}(q,\dot{q}), \hat{G}(q)$  - các thành phần ước lượng của  $H(q), C(q,\dot{q}), G(q)$ ;

$\hat{p}$  - thành phần chỉnh định của tay robot;

$Y(q,\dot{q},v,\dot{v})$  - ma trận xác định  $n \times n$ .

Kết hợp phương trình (9) và (12) được phương trình động lực học kín của tay máy:

$$H(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) = \hat{H}(q)\dot{v} + \hat{C}(q,\dot{q})v + \hat{G}(q) - K_d r \quad (13)$$

**Áp dụng luật điều khiển Li-Slotine vào robot SCARA và xét tính ổn định của hệ:**

*Luật điều khiển Li-Slotine cho robot SCARA:*

Từ phương trình

$$u = H(q)\ddot{q} + \left[ \frac{1}{2}\dot{H}(q) + S(q,\dot{q}) \right] \dot{q} + G(q)$$

ta có thể viết lại thành:

$$u = H(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (14)$$

Xây dựng luật điều khiển cho robot SCARA theo Li-Slotine từ (13), (14):

$$u = \hat{H}(q)\dot{v} + \hat{C}(q,\dot{q})v + \hat{G}(q) - K_d r \quad (15)$$

Trong đó  $\hat{H}, \hat{C}, \hat{G}$  là các ma trận ước lượng thông số của hệ thống

$$\Delta H = \hat{H} - H; \Delta C = \hat{C} - C; \Delta G = \hat{G} - G;$$

$$\Delta H \dot{v} + \Delta C v + \Delta G = H r + C r + K_d r = 0$$

$$\Delta H \dot{v} + \Delta C v + \Delta G = H(\dot{q} - v) + C(\dot{q} - v) + K_d r$$

$$= Y(q,\dot{q},v,\dot{v})\Delta p$$

Với  $\Delta p$  là các thông số vật lý của hệ thống như khối lượng, momen quán tính...  $\Delta p = (I_1, m_1, \dots, I_n, m_n)^T$

$Y(q,\dot{q},v,\dot{v})$  là ma trận hồi quy tham số hệ thống.

Nhân cả 2 vế của (16) với  $r^T$ , ta sẽ được:

$$r^T [H r + C r + K_d r] = r^T Y(q,\dot{q},v,\dot{v}) \Delta p \quad (17)$$

*Xét tính ổn định của hệ theo phương pháp hàm Lyapunov:*

Chọn hàm Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} r^T H r + \frac{1}{2} \Delta p^T \Gamma \Delta p \quad (18)$$

Trong đó:  $\Delta p = \hat{p} - p$ ;  $\Delta \dot{p} = \dot{\hat{p}}$

$$\Rightarrow \dot{V} = r^T H \dot{r} + \Delta p^T \Gamma \Delta \dot{p} + \frac{1}{2} r^T \dot{H} r \quad (19)$$

Từ (17), thay vào (19), ta được:

$$\dot{V} = \Delta p^T \Gamma \Delta \dot{p} + \Delta p^T Y^T r - r^T K_d r - r^T C r + \frac{1}{2} r^T \dot{H} r \quad (20)$$

Theo tính chất của động lực học, ta có  $\dot{H} - 2C = 0$ . Như vậy:

$$\dot{V} = \Delta p^T (\Gamma \Delta \dot{p} + Y^T r) - r^T K_D r \quad (21)$$

$$-r^T K_D r \leq 0 \quad (r \rightarrow 0 \text{ khi } t \rightarrow \infty)$$

và cho  $\Delta p^T (\Gamma \Delta \dot{p} + Y^T r) = 0$  để hệ ổn định.

Từ

$$\Delta p^T (\Gamma \Delta \dot{p} + Y^T r) = 0 \rightarrow \Gamma \dot{\hat{p}} = -Y^T r \rightarrow \dot{\hat{p}} = -\Gamma^{-1} Y^T r \quad (22)$$

Khi tính được  $\dot{\hat{p}}$  ở (22), tích phân để tính  $\hat{p}$ , suy ngược lại từ các phương trình (15), (16), (17), ta sẽ được các ma trận  $\hat{M}, \hat{C}, \hat{G}$ .

Tính được các giá trị của các ước lượng thông số hệ thống, thay vào (13) ta sẽ có được luật điều khiển theo Li-Slotine.

*Ưu điểm:* Hệ thống ổn định tốt. Tuy không biết chính xác các thông số vật lý của hệ thống nhưng dựa vào ước lượng để tính toán.

*Nhược điểm:* Khối lượng tính toán phức tạp.

Để xem xét kết quả tính toán trên, ta mô phỏng trên phần mềm Matlab Simulink.

### 3. ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

#### 3.1. Sơ đồ khối điều khiển và thông số ban đầu của robot

Dựa trên các thông số của robot Adept One [1], ta có:

Khối lượng các tay máy:  $m_1 = 2,5 \text{ kg}$ ;  
 $m_2 = 1,5 \text{ kg}$ ;  $m_3 = 2,0 \text{ kg}$ ;  $m_4 = 0,6 \text{ kg}$ .

Môment quán tính các tay máy:

$$J_1 = 1,50 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2;$$

$$J_2 = 0,32 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2;$$

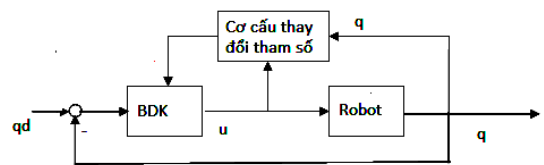
$$J_4 = 0,32 \cdot 10^{-4} \text{ kg.m}^2;$$

Độ dài các tay máy:

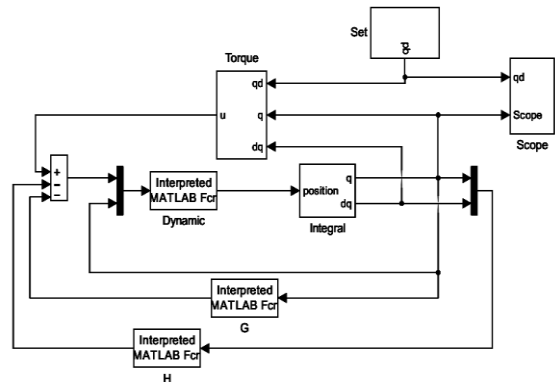
$$l_1 = 0,25 \text{ m}; \quad l_2 = 0,15 \text{ m};$$

**Bảng 2. Các thông số của tay Robot SCARA**

Vị trí ban đầu của các tay robot so với vị trí cân bằng thẳng hàng của tay robot			
$\theta_1 \text{ (rad)}$	$\theta_2 \text{ (rad)}$	$d_3 \text{ (dm)}$	$\theta_4 \text{ (rad)}$
0,6	1,6	0,7	1,2
Vị trí đặt cần đạt tới:			
$\theta_{d1} \text{ (rad)}$	$\theta_2 \text{ (rad)}$	$d_{d3} \text{ (dm)}$	$\theta_{d4} \text{ (rad)}$
1,6	1,9	1,7	1,8



**Hình 3a. Sơ đồ khối luật điều khiển Li-Slotine**

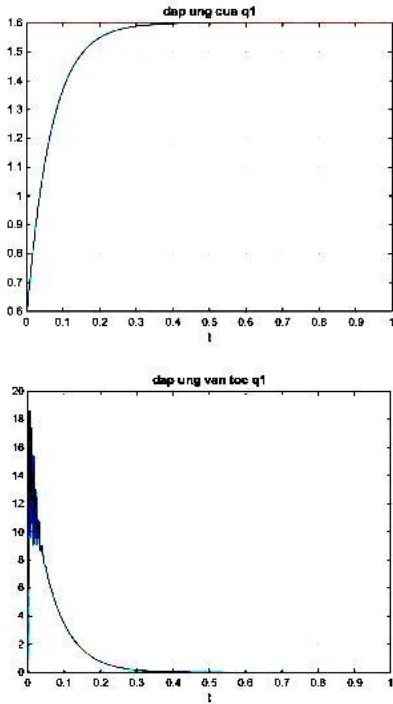


**Hình 3b. Sơ đồ khối của luật điều khiển Li-Slotine cho robot trên Matlab Simulink**

#### 3.2. Kết quả mô phỏng

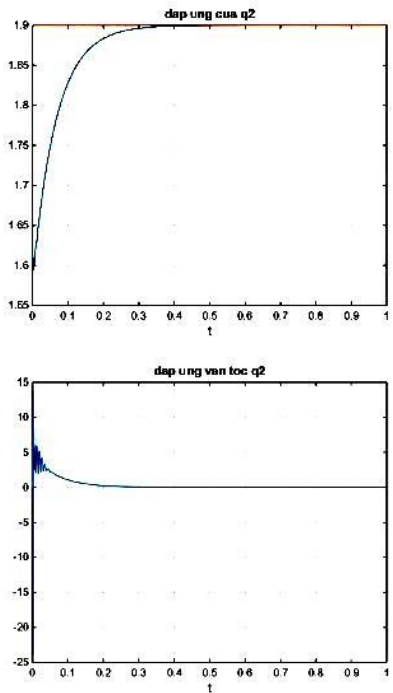
Với các thông số ban đầu, vị trí đặt của tay Robot, kết quả mô phỏng luật thích nghi Li-Slotine được thực hiện trên phần mềm Matlab Simulink như sau:

*Kết quả mô phỏng khớp 1*



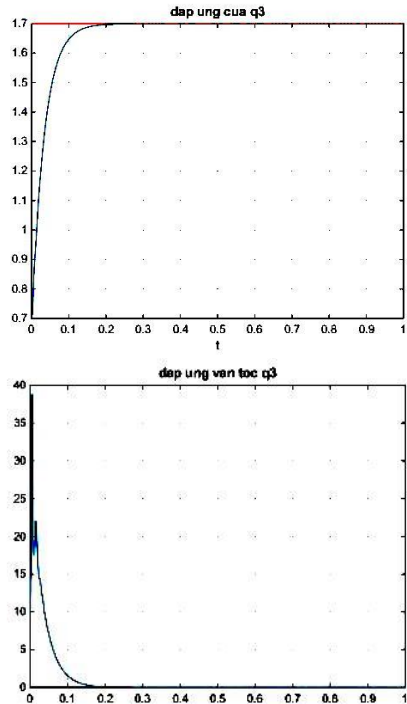
Hình 4. Đáp ứng về vị trí, vận tốc khớp 1

*Kết quả mô phỏng khớp 2*



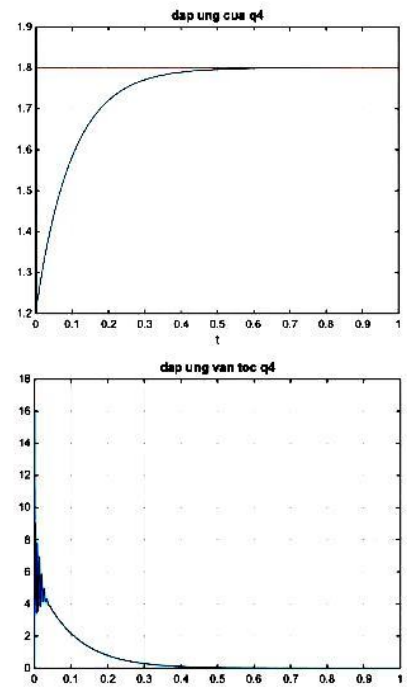
Hình 5. Đáp ứng về vị trí, vận tốc khớp 2

*Kết quả mô phỏng khớp 3*



Hình 6. Đáp ứng về vị trí, vận tốc khớp 3

*Kết quả mô phỏng khớp 4*



Hình 7. Đáp ứng về vị trí, vận tốc khớp 4

Từ các kết quả mô phỏng 4 khâu của robot SCARA, ta có thể thấy đáp ứng của hệ thống ổn định và bền vững, luật điều khiển Li-Slotine sẽ làm cho robot dễ thích nghi hơn với các tải trọng khác nhau trong quá trình làm việc mà vẫn đạt yêu cầu về vị trí.

#### 4. KẾT LUẬN

Ta thấy thuật toán điều khiển thích nghi Li-Slotine khử được dao động của tay máy, thể hiện qua vị trí của từng tay robot và thời gian đáp ứng của hệ thống, việc sử dụng ước lượng các thông số, kết quả đạt yêu cầu. Tuy nhiên khối lượng tính toán của thuật toán rất nhiều, việc xử lý các vấn đề về công nghệ như điều khiển chính

xác vận tốc tay máy, mô men tối đa của động cơ... vẫn cần phải xem xét và nghiên cứu kỹ hơn. Ngoài ra, tốc độ ổn định của hệ thống cũng phụ thuộc vào các thông số được chọn.

Các mô phỏng trên phần mềm cho thấy bộ điều khiển đã đáp ứng được yêu cầu. Bộ điều khiển thích nghi Li-Slotine đã bám tốt tín hiệu đặt, hệ thống hoạt động ổn định, nên việc sử dụng bộ điều khiển này để hạn chế dao động của robot là có thể thực hiện được. Tuy nhiên, để điều khiển chính xác hơn nữa về vận tốc, gia tốc của từng khớp robot thì cần bổ sung thêm các thuật toán điều khiển phù hợp.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Lê Văn Chung, *Nâng cao chất lượng điều khiển robot SCARA 4 bậc tự do*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ, 2014, 118(04):113-118.
- [2] Nguyễn Doãn Phước, Phan Xuân Minh, Hán Thành Trung, *Lý thuyết điều khiển phi tuyến*. NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2006.
- [3] Nguyễn Doãn Phước, *Lý thuyết điều khiển nâng cao*. NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2005.
- [4] Nguyễn Thiện Phúc, *Robot công nghiệp*. NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2002.
- [5] Nguyễn Minh Đông, *Nghiên cứu và ứng dụng các thuật toán điều khiển thích nghi Li-Slotine cho hệ chuyển động robot Almega 16*. 2012.
- [6] Craig, J.J, *Adaptive control of Mechanical Manipulator*, Adison-Wesley, Reading, MA, 1986.
- [7] Suguru Arimoto, *Control theory of Non-Linear Mechanical Systemr: A passitivity-based and circurt theoretic approach* - Oxford University Press - 1996.
- [8] Hsia, AF, *Adaptive control of Mechanical Manipulator*, IEEE int, San Francisco, CA, Mar, 1986.
- [9] Hazem I. Ali, Mohammed F. Hadi, *Robust Diagonal and Nondiagonal Controllers Design for MIMO Systems*, The Mediterranean Journal of Measurement and Control, Vol. 11, No. 1, 2015.

#### Giới thiệu tác giả:



Tác giả Vũ Duy Thuận tốt nghiệp đại học ngành đo lường và tin học công nghiệp năm 2004, nhận bằng Thạc sĩ ngành tự động hóa năm 2008 tại Đại học Bách khoa Hà Nội; nhận bằng Tiến sĩ ngành điều khiển và tự động hóa tại Viện Công nghệ thông tin - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam năm 2018. Hiện nay tác giả là giảng viên Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: điều khiển và tự động hóa, lập trình điều khiển và ứng dụng.