

ĐIỀU KHIỂN QUỹ ĐẠO ROBOT BỐN BẬC TỰ DO

CONTROLLING THE PATH OF 4 DOF ROBOT

Phạm Trường Tùng

Trường Đại học Phạm Văn Đồng; pttung@pdu.edu.vn

Tóm tắt - Robot 4 bậc tự do dạng RRR.R là dạng robot có nhiều ưu điểm hơn so với các robot 4 bậc tự do khác nhờ khả năng định hướng và vị trí một cách linh hoạt. Bài báo giới thiệu cách thức điều khiển điểm tác động cuối của robot bám theo một quỹ đạo trong không gian Descarte cho trước bằng cách tính toán ma trận biến đổi thuần nhất bằng phương pháp biến đổi tọa độ. Trên cơ sở ma trận thuần nhất, tính toán động học ngược của robot và thiết kế quỹ đạo biến khớp của robot để cơ cấu chấp hành cuối bám theo quỹ đạo đã cho. Với mô hình động lực học robot, bài báo giới thiệu một bộ điều khiển theo phương pháp điều khiển trượt (slide mode control) để điều khiển các khớp theo quỹ đạo biến khớp vừa xác định. Các kết quả được kiểm tra mô phỏng bằng phần mềm Matlab.

Từ khóa - robot; 4DOF; quỹ đạo biến khớp; quỹ đạo cung tròn; điều khiển trượt.

Abstract - The 4DOF (degree of freedom) robot RRR.R has more advantages than other 4DOF robots through flexible orientation and position. This paper presents a method to control the end effector of 4DOF robot to follow the path that is desired on Descarter-coordinates by calculating the homogeneous matrix. On the basis of homogeneous matrix, the robot's inverse kinematic dynamics is calculated and the robot's joint space trajectory is designed. On the basis of dynamics, this paper proposes a controller that is designed by slide mode control theory to control joints according to the determination of joint trajectories. The results are simulated by using Matlab.

Key words - robot; 4DOF; joint trajector; arc path; slide mode control.

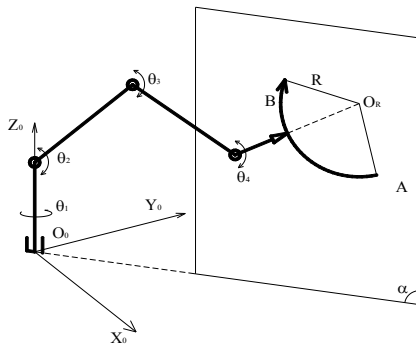
1. Đặt vấn đề

Robot 4DOF có kết cấu 4 khớp quay RRR.R bị hạn chế bởi khả năng định hướng trong không gian (so với các robot có số bậc tự do cao hơn), do đó khó thực hiện được các nguyên công đòi hỏi khắt khe về vị trí và hướng của cơ cấu chấp hành cuối (như nguyên công sơn, hàn...). Trong khi đó, quỹ đạo cung tròn trong không gian là dạng quỹ đạo thường được sử dụng trong thực tế (như trong nguyên công hàn ống). Bài viết giải quyết bài toán định vị trí và hướng của robot bám theo một cung tròn trong không gian nằm trong trường công tác của robot và thiết kế bộ điều khiển để điều khiển robot theo quỹ đạo đã thiết kế.

2. Kết quả nghiên cứu

2.1. Bài toán đặt ra

Cho robot 4DOF có bốn khớp quay, cho một cung tròn được định hướng nằm trong mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng $O_0X_0Z_0$ gắn trên đế của robot và nằm trong trường công tác của robot. Điều khiển cơ cấu chấp hành cuối của robot bám theo cung tròn và có phương của vector hướng đi qua tâm cung tròn.

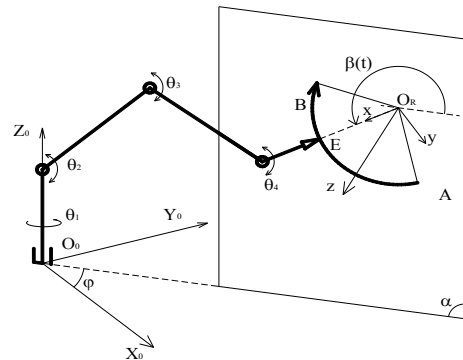


Hình 1. Mô hình bài toán

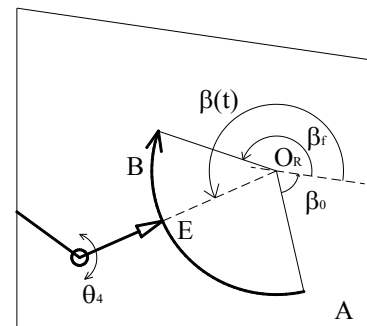
2.2. Giải bài toán

Gọi góc giữa hai mặt phẳng α và mặt phẳng $O_0X_0Z_0$ là φ , góc hợp giữa tia O_RA với giao tuyến mặt phẳng α và mặt

phẳng $O_0X_0Y_0$ là β_0 , góc hợp giữa tia O_RB với giao tuyến mặt phẳng α và mặt phẳng $O_0X_0Y_0$ là β_f , góc hợp giữa hướng của cơ cấu chấp hành cuối với giao tuyến mặt phẳng α và mặt phẳng $O_0X_0Y_0$ là $\beta(t)$. Điểm E thể hiện vị trí hiện tại của cơ cấu chấp hành cuối của robot. Cơ cấu chấp hành cuối di chuyển theo hướng của cung tròn từ A đến B (Hình 2).



Hình 2. Xác định các giá trị bài toán



Hình 3. Mô hình điểm tác động cuối của robot trên quỹ đạo

Gắn vào điểm O_R một hệ trục tọa độ O_Rxyz , sao cho mặt phẳng O_Rxy trùng với mặt phẳng α , trục O_Rx trùng với đường O_RE , chiều của O_Rx là chiều của vector O_RE .

Như vậy ma trận biến đổi thuần nhất mô tả vị trí và hướng của hệ tọa độ O_Rxyz so với hệ tọa độ $O_0X_0Y_0Z_0$ là:

$$H = \text{Trans}(P) \cdot \text{Rot}(z, \varphi) \cdot \text{Rot}(x, 90) \cdot \text{Rot}(z, \beta(t)).$$

Trong đó $\vec{P} = X_{O_R} \vec{i} + Y_{O_R} \vec{j} + Z_{O_R} \vec{k}$

Vậy các ma trận biến đổi là:

$$Trans(\vec{P}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{O_R} \\ 0 & 1 & 0 & Y_{O_R} \\ 0 & 0 & 1 & Z_{O_R} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Rot(z, \varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 & 0 \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Rot(x, 90^\circ) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Rot(z, \beta(t)) = \begin{bmatrix} \cos(\beta(t)) & -\sin(\beta(t)) & 0 & 0 \\ \sin(\beta(t)) & \cos(\beta(t)) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Vậy ma trận biến đổi thuần nhất là:

$$H(t) = \begin{bmatrix} C_{\beta(t)} C_{\varphi} & -C_{\varphi} S_{\beta(t)} & S_{\varphi} & X_{O_R} \\ C_{\beta(t)} S_{\varphi} & -S_{\beta(t)} S_{\varphi} & -C_{\varphi} & Y_{O_R} \\ S_{\beta(t)} & C_{\beta(t)} & 0 & Z_{O_R} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Trong đó:

$C_{\beta(t)} = \cos(\beta(t)); S_{\beta(t)} = \sin(\beta(t)); C_{\varphi} = \cos(\varphi); S_{\varphi} = \sin(\varphi);$

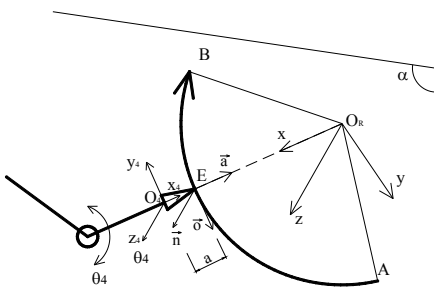
Vị trí đến của tay máy được mô tả bằng phương trình sau [2,5,6]:

$$T_4 {}^4T_{Tool} = H(t) {}^{base}P_{obj} \quad (6)$$

Trong đó:

- T_4 là ma trận biến đổi thuần nhất mô tả hướng và vị trí của hệ tọa độ gắn trên khâu chấp hành cuối so với hệ tọa độ gốc.
- ${}^4T_{Tool}$ là ma trận biến đổi thuần nhất mô tả hướng và vị trí của điểm tác động cuối của công cụ đối với hệ tọa độ gắn trên khâu chấp hành cuối.
- $H(t)$ là ma trận biến đổi thuần nhất, là một hàm theo thời gian, mô tả hệ tọa độ làm việc OR của đối tượng đối với hệ tọa độ gốc của robot.
- ${}^{base}P_{obj}$ là ma trận biến đổi thuần nhất mô tả hướng và vị trí của cơ cấu chấp hành cuối so với hệ tọa độ làm việc OR.

Điểm tác động cuối của robot được mô tả như Hình 4.



Hình 4. Mô tả điểm tác động cuối của robot

Trong đó:

- Hệ tọa độ O_4 mô tả hướng và vị trí của điểm cuối của khâu thứ 4.
- Hệ tọa độ E với các vector hướng $\vec{n}, \vec{o}, \vec{a}$ mô tả hướng và vị trí điểm tác động cuối gắn trên robot (ví dụ như đầu mũi hàn...)

Như vậy ta có:

$${}^4T_{Tool} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & a \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^{base}P_{obj} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & R \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

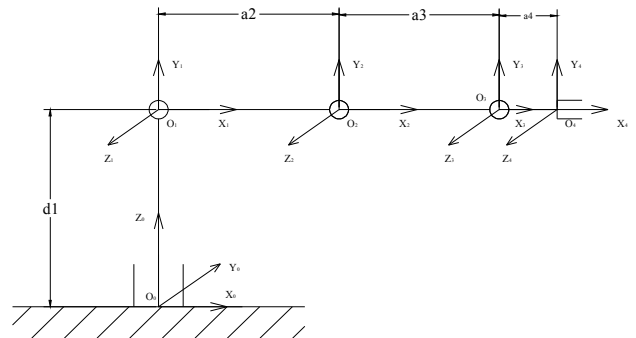
Để tìm vị trí góc quay của các khớp, ta giải phương trình (6) với các biến khớp, do đó ta có:

$$T_4 = H(t) {}^{base}P_{obj} {}^4T_{Tool}^{-1} \quad (7)$$

Như vậy theo (7):

$$T_4 = \begin{bmatrix} -C_{\beta(t)} C_{\varphi} & S_{\beta(t)} C_{\varphi} & S_{\varphi} & X_{O_R} + (R+a) C_{\beta(t)} C_{\varphi} \\ -C_{\beta(t)} S_{\varphi} & S_{\beta(t)} S_{\varphi} & -C_{\varphi} & Y_{O_R} + (R+a) C_{\beta(t)} S_{\varphi} \\ -S_{\beta(t)} & -C_{\beta(t)} & 0 & Z_{O_R} + (R+a) S_{\beta(t)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} R_o$$

bot 4 bậc tự do kết cấu kiểu RRR.R có mô hình động học như sau [1]:



Hình 5. Mô hình động học robot

Với mô hình động học như vậy, phương trình động học của robot như sau:

$$T_4 = \begin{bmatrix} C_1 C_{234} & -C_1 S_{234} & S_1 & a_4 C_1 C_{234} + a_3 C_1 C_{23} + a_2 C_1 C_2 \\ S_1 C_{234} & -S_1 S_{234} & -C_1 & a_4 S_1 C_{234} + a_3 S_1 C_{23} + a_2 S_1 C_2 \\ S_{234} & C_{234} & 0 & a_4 S_{234} + a_3 S_{23} + a_2 S_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Giả sử vị trí khâu chấp hành cuối nằm ở vị trí thỏa mãn điều kiện tồn tại nghiệm, theo [1] ta có nghiệm toán học của robot là:

$$\begin{cases} \theta_1 = -\arctan 2(a_x, a_y) \\ \theta_2 = \arctan 2(A, B) \\ \theta_3 = \arctan 2\left(\pm \sqrt{1 - C_3^2}, \frac{P_x^2 + P_y^2 - a_3^2 - a_2^2}{a_3^2 + a_2^2}\right) \\ \theta_4 = \theta_{234} - \theta_2 - \theta_3 \end{cases} \quad (8)$$

Với:

$C_1 = \cos \theta_1; S_1 = \sin \theta_1; C_2 = \cos \theta_2; S_2 = \sin \theta_2;$
 $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2); S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2) \dots$

$$A = \frac{(a_3 C_3 + a_2)(a_3 S_{23} + a_2 S_2) - a_3 S_3(a_3 C_{23} + a_2 C_2)}{(a_3 C_3 + a_2)^2 + (a_3 S_3)^2};$$

$$B = \frac{(a_3 C_3 + a_2)(a_3 C_{23} + a_2 C_2) + a_3 S_3(a_3 S_{23} + a_2 S_2)}{(a_3 C_3 + a_2)^2 + (a_3 S_3)^2}$$

$$n_x = -C_{\beta(t)} C_\varphi; n_y = -C_{\beta(t)} S_\varphi - C_{\beta(t)} S_\varphi S_\psi; n_z = -S_{\beta(t)};$$

$$o_x = S_{\beta(t)} C_\varphi; o_y = S_{\beta(t)} S_\varphi; o_z = -C_{\beta(t)}; a_x = S_\varphi;$$

$$a_y = -C_{\beta(t)}; a_z = 0; p_x = X_{O_R} + (R+a) C_{\beta(t)} C_\varphi;$$

$$p_y = Y_{O_R} + (R+a) C_{\beta(t)} S_\varphi; p_z = Z_{O_R} + (R+a) S_{\beta(t)}$$

$$P_x = C_1 p_x + S_1 p_y - a_4 C_{234}; P_y = p_z - d_1 - a_4 S_{234}$$

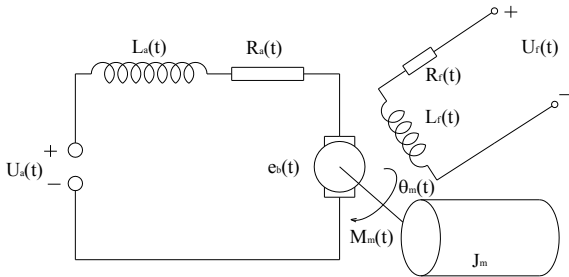
Để chuyển động các khớp được liên tục và mượt, ta chọn quy luật vận tốc góc của điểm tác động cuối so với tâm quay là O_R là một hàm bậc 2 (tức $\dot{\beta}(t)$, là một hàm bậc 2 hay $\beta(t)$ là hàm bậc 3) [2,5]. Do đó, ta có hàm $\beta(t)$ theo thời gian như sau:

$$\beta(t) = \beta_0 + \dot{\beta}_0 t + \frac{3(\beta_f - \beta_0) - (2\dot{\beta}_0 + \dot{\beta}_f)t_f}{t_f^2} t^2 + \frac{(\dot{\beta}_0 + \dot{\beta}_f)t_f - 2(\beta_f - \beta_0)}{t_f^3} t^3 \quad (9)$$

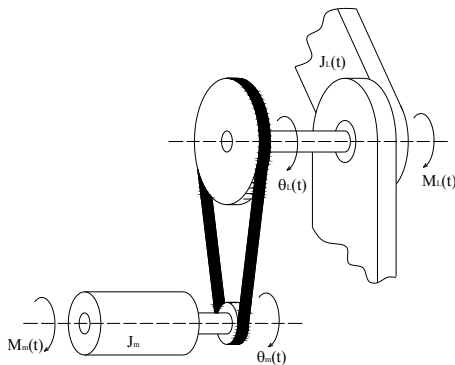
Với $\dot{\beta}_0$ và $\dot{\beta}_f$ lần lượt là vận tốc góc tại thời gian $t=0$ và $t=t_f$, t_f là khoảng thời gian để robot di chuyển từ vị trí được định vị bởi góc β_0 đến góc β_f .

2.3. Thiết kế bộ điều khiển robot

Xét mô hình động lực điều khiển robot sử dụng động cơ điện một chiều kích từ độc lập như sau:



Hình 6. Mô hình động cơ một chiều kích từ độc lập



Hình 7. Truyền động cho khớp robot

Ta có phương trình vi phân mô tả mối quan hệ giữa đầu vào hệ thống (điện áp) và đầu ra hệ thống (vận tốc góc của trục động cơ):

$$u_a(t) = \frac{1}{\Theta(t)} \ddot{\theta}_m + \frac{\Psi(t)}{\Theta(t)} \dot{\theta}_m + K_b \dot{\theta}_m \quad (10)$$

Từ đó ta có phương trình trạng thái của hệ thống như sau:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = \Theta(t)u_a(t) - \Psi(t)x_2 - \Theta(t)K_b x_1 \\ y = x_1 = \dot{\theta}_m \end{cases} \quad (11)$$

Với:

$$\Psi(t) = \frac{K_a}{L_a J(t)} \left[\frac{R_a J(t)}{K_a} + \frac{L_a}{K_a} \frac{dJ(t)}{dt} \right]; \Theta(t) = \frac{K_a}{L_a J(t)}$$

Ta thấy trong mô hình của đối tượng điều khiển (11) có các tham số biến đổi tùy theo vị trí của các khớp robot theo thời gian, do đó ta sẽ sử dụng phương pháp điều khiển bền vững để điều khiển. Cụ thể trong trường hợp này, ta lựa chọn phương pháp điều khiển trượt (Sliding Mode Control) để thiết kế bộ điều khiển [3,4].

Gọi:

- $y_d(t)$ là tín hiệu đặt (là một hàm biến thiên theo thời gian).
- $e(t) = y_d(t) - y(t)$ là sai lệch giữa tín hiệu đặt và tín hiệu điều khiển.

Do mô hình là bậc 2, nên ta sử dụng hàm trượt có dạng:

$$s = k_1 e + \frac{de}{dt} \quad (12)$$

Với $k_1 > 0$ để phương trình $s(e)$ có đa thức đặc tính $A(p) = k_1 + p$ là một đa thức Hurwitz.

Từ hàm trượt s ta có:

$$s = k_1 e + \frac{de}{dt} = k_1 (y_d - y) + \frac{d(y_d - y)}{dt} \quad (13)$$

$$\Rightarrow s = \left(k_1 y_d + \frac{dy_d}{dt} \right) - \left(k_1 y + \frac{dy}{dt} \right) \quad (14)$$

$$\text{Vậy mặt trượt } s = \left(k_1 y_d + \frac{dy_d}{dt} \right) - \left(k_1 x_1 + x_2 \right) \quad (15)$$

Với hàm trượt s , nhiệm vụ của bộ điều khiển là phải tạo ra được $s \rightarrow 0$ để có $e \rightarrow 0$ và điều này tương đương với:

$$\frac{ds}{dt} \text{sgn}(s) < 0 \quad (16)$$

Chọn $K > 0$, từ điều kiện trượt ta được:

$$\frac{ds}{dt} \text{sgn}(s) = -K \quad K > 0 \quad (17)$$

Từ (15), (17) ta được:

$$\begin{aligned} & \frac{d \left[\left(k_1 y_d + \frac{dy_d}{dt} \right) - \left(k_1 x_1 + x_2 \right) \right]}{dt} \text{sgn}(s) = -K \\ & \Rightarrow \left[k_1 \frac{dy_d}{dt} + \frac{d^2 y_d}{dt^2} - \left(k_1 \frac{dx_1}{dt} + \frac{dx_2}{dt} \right) \right] \text{sgn}(s) = -K \\ & \Rightarrow \left[k_1 \frac{dy_d}{dt} + \frac{d^2 y_d}{dt^2} - \left(k_1 \frac{dy}{dt} + \Theta(t)u_a(t) - \Theta(t)K_b x_1 - \Psi(t)x_2 \right) \right] \text{sgn}(s) = -K \end{aligned}$$

$$\Rightarrow [k_1 \dot{e} + \ddot{y}_d - \Theta(t)u_a(t) + \Theta(t)K_b x_1 + \Psi(t)x_2] \text{sgn}(s) = -K \quad (18)$$

$$\Rightarrow [k_1 \dot{e} + \ddot{y}_d - \Theta(t)u_a(t) + \Theta(t)K_b x_1 + \Psi(t)x_2] = -K \text{sgn}(s) \quad (19)$$

Từ (19), ta được

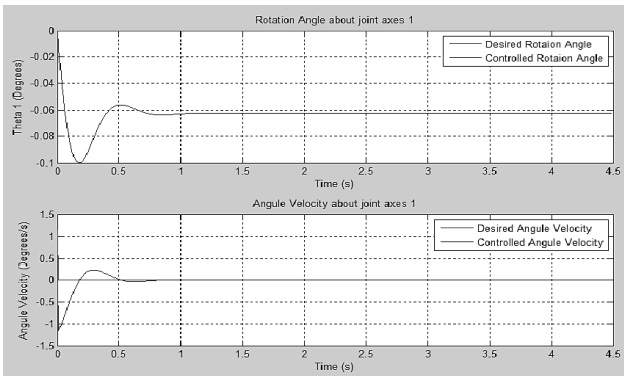
$$\Theta(t)u_a(t) = K \text{sgn}(s) + k_1 \dot{e} + \ddot{y}_d + \Psi(t)x_2 + \Theta(t)K_b x_1 \quad (20)$$

Ta được:

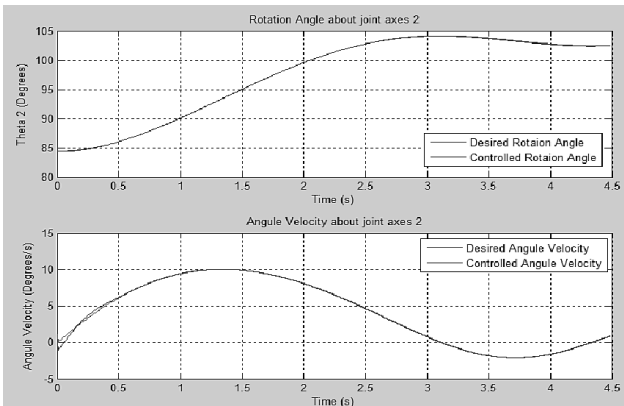
$$u_a(t) = \frac{1}{\Theta(t)} [K \text{sgn}(s) + k_1 \dot{e} + \ddot{y}_d + \Psi(t)x_2 + \Theta(t)K_b x_1] \quad (21)$$

2.4. Kết quả

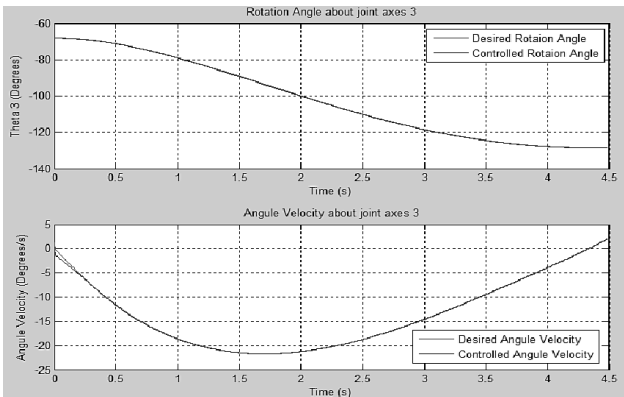
Các kết quả mô phỏng bằng phần mềm Matlab cho thấy bộ điều khiển được thiết kế hoạt động tốt, thời gian đáp ứng nhanh, sai lệch tính nhỏ trong phạm vi cho phép. Tuy nhiên, hiện có hiện tượng Chattering khi sử dụng hàm sign(s). Hiện tượng Chattering giảm hẳn khi ta sử dụng hàm bão hòa sat(s) thay cho sign(s) [4].



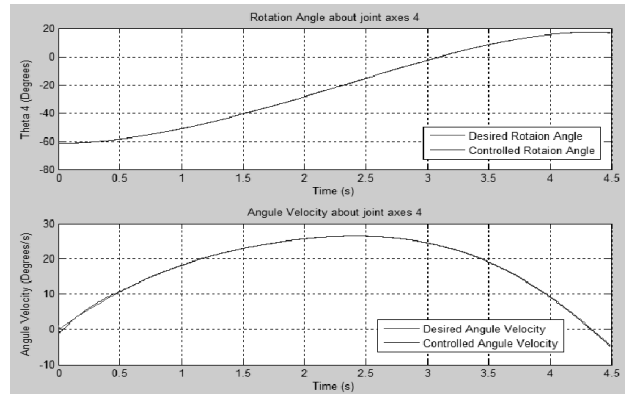
Hình 8. Vị trí góc và vận tốc góc trên trục khớp 1



Hình 9. Vị trí góc và vận tốc góc trên trục khớp 2



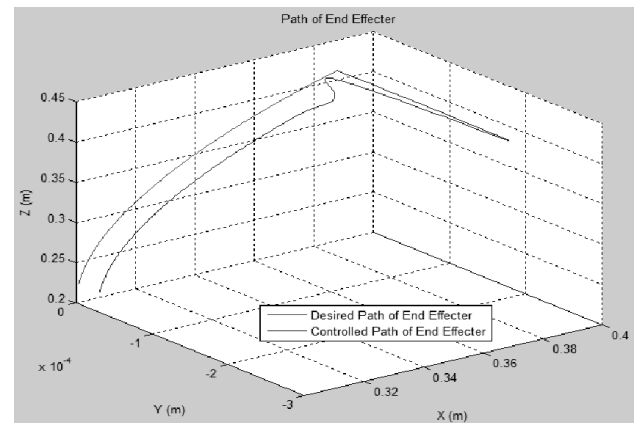
Hình 10. Vị trí góc và vận tốc góc trên trục khớp 3



Hình 11. Vị trí góc và vận tốc góc trên trục khớp 4

Mô phỏng với cung tròn có tọa độ tâm O_R là (0.6m; 0m; 0.2m); bán kính $R = 0.25$ m; cung tròn giới hạn bởi $\beta_0 = 135^\circ$ và $\beta_f = 180^\circ$. Các thông số của robot lần lượt là $d_1 = 0.1$ m; $a_2 = 0.3$ m; $a_3 = 0.3$ m; $a_4 = 0.1$ m; $a = 0.05$ m. Thông số động cơ: $K_a = 0.01$; $K_b = 0.01$; $R_a = 3 \Omega$; $L_a = 0.05$ H; $J_m = 1$ N.m. Vận tốc ban đầu $\dot{\beta}_0 = 0.02$ rad/s; vận tốc cuối $\dot{\beta}_f = 0$. Các hệ số $K = 1$ và $k_1 = 1$. Kết quả như sau:

Kết quả mô phỏng ta thấy sai số của cơ cấu chấp hành cuối $e = 6,6 \cdot 10^{-5}$ m.



Hình 12. Quỹ đạo điểm tác động cuối của robot



Hình 13. Sai số trên điểm tác động cuối của robot

3. Kết luận

Kết quả nghiên cứu đã hoàn thành việc thiết kế quỹ đạo của robot 4DOF định hướng và vị trí theo một cung tròn cho trước nằm trong trường công tác của robot. Trên

cơ sở quỹ đạo các biến khớp tìm được, tác giả đã thiết kế bộ điều khiển kiểu slide mode để điều khiển các động cơ trên các khớp của robot. Kết quả tính toán được mô phỏng bằng phần mềm Matlab với các cung tròn khác nhau và cho chất lượng điều khiển khả quan.

Tuy nhiên, bộ điều khiển kiểu slide mode có nhược điểm là sự dao động của tín hiệu điều khiển lớn, dễ gây hư hỏng cho các thiết bị điện và cơ khí. Chính vì vậy, tác giả sẽ có những đề xuất giải pháp điều khiển khác để khắc phục nhược điểm này.

Nhìn chung với kết quả đạt được, việc thiết kế và điều khiển quỹ đạo theo bài toán trên đối với các robot 4DOF kết cấu RRR.R như đã mô tả là hợp lý. Giải thuật của bài toán này có thể áp dụng vào thực tế đối với các robot thực hiện các nguyên công yêu cầu về điều khiển quỹ đạo theo cung tròn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Phạm Trường Tùng, *Điều khiển đồng bộ robot 4 bậc tự do*, Luận văn thạc sĩ kỹ thuật, Đại học Đà Nẵng, 2011.
- [2] Phạm Đăng Phước, *Robot công nghiệp*, NXB. Xây dựng, Hà Nội 2007.
- [3] Nguyễn Doãn Phước – Phan Xuân Minh – Hán Thành Trung, *Lý thuyết điều khiển phi tuyến*, NXB. Khoa học và kỹ thuật, Hà Nội 2008.
- [4] Jean –Jacques E.Slotine – Weiping Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, New Jersey 1991.
- [5] Reza-N.Jazar, *Theory of applied Robotics*, Springer New York Dordrecht Heidelberg London, New York 2006.
- [6] Henry W.Stone, *Kinematic Modeling Identification, and control of robotic Manipulators*, Kluwer Academic Publishers, United State of America 1987.

(BBT nhận bài: 25/08/2015, phản biện xong: 10/09/2015)