

ĐIỀU KHIỂN ĐỒNG BỘ TÍNH MÔ-MEN CHO TAY MÁY ROBOT SONG SONG PHẪNG 3 BẬC TỰ DO

SYNCHRONOUS COMPUTED TORQUE CONTROL OF 3 DOF PLANAR PARALLEL ROBOTIC MANIPULATORS

Lê Tiến Dũng¹, Lê Quang Dân²

¹Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng; ltdung@dut.udn.vn

²Trường Đại học Ulsan, Hàn Quốc; ledantm@gmail.com

Tóm tắt - Trong bài báo này, một thuật toán điều khiển đồng bộ tính mô-men được trình bày cho điều khiển bám quỹ đạo của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do. Trước hết, mô hình động lực học của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do được xây dựng trên cơ sở áp dụng nguyên lý D'lambert. Sau đó, dựa trên mô hình động lực học này, một thuật toán điều khiển bám đồng bộ tính mô-men được đề xuất. Khác với các thuật toán điều khiển truyền thống trước đây chỉ xét đến sai số của riêng từng trục chuyển động, thuật toán điều khiển đồng bộ được phát triển sử dụng các khái niệm hàm đồng bộ và sai số đồng bộ để xét đồng thời sai số của các khớp chủ động của tay máy robot song song. Sự ổn định của thuật toán được chứng minh bằng lý thuyết ổn định Lyapunov. Để kiểm chứng sự hiệu quả của thuật toán điều khiển, các mô phỏng được thực hiện trên Matlab/ Simulink và SimMechanics cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do và so sánh với các thuật toán điều khiển truyền thống.

Từ khóa - tay máy robot song song; điều khiển đồng bộ; hàm đồng bộ; sai số đồng bộ; điều khiển bám quỹ đạo.

1. Đặt vấn đề

Ngày nay, tay máy robot công nghiệp đã trở nên phổ biến và được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp cũng như trong dân dụng. Xét về cấu trúc động học, tay máy robot công nghiệp được chia thành hai loại: Tay máy robot nối tiếp và tay máy robot song song. Mỗi loại tay máy này đều có các ưu nhược điểm riêng và do đó được ứng dụng để thực hiện các chức năng phù hợp với thể mạnh của chúng. So với tay máy robot nối tiếp truyền thống, tay máy robot song song có nhiều ưu điểm như độ chính xác cao, độ cứng vững lớn, khả năng mang tải lớn, tốc độ chuyển động nhanh và mô-men quán tính nhỏ. Tuy nhiên, tay máy robot song song có một số hạn chế do tính chất của cấu trúc động học như không gian làm việc nhỏ, mô hình động lực học phức tạp, nhiều cấu hình kỳ dị và tính toán động học phức tạp. Chính những hạn chế này làm cho việc điều khiển tay máy robot song song phẳng gặp nhiều khó khăn và thách thức hơn so với tay máy robot nối tiếp truyền thống.

Trong lịch sử phát triển của lý thuyết điều khiển cho tay máy robot, đã có nhiều nhà khoa học, nhiều nhà nghiên cứu công bố các công trình liên quan đến việc điều khiển bám quỹ đạo cho tay máy robot song song. Trong [1], một thuật toán điều khiển PD phi tuyến được đề xuất cho tay máy robot song song có xét đến cấu trúc cơ khí của tay máy. Ở một công bố khác [2], thuật toán điều khiển PD có bù thành phần trọng lực được trình bày cho tay máy robot 6 bậc tự do truyền động bằng thủy lực. Ngoài ra, một số biến thể của thuật toán điều khiển PD phi tuyến và PID phi tuyến cũng đã được đề xuất cho tay máy robot song song [3-5]. Đặc điểm chung của các thuật toán điều khiển đã được đề xuất ở các công trình

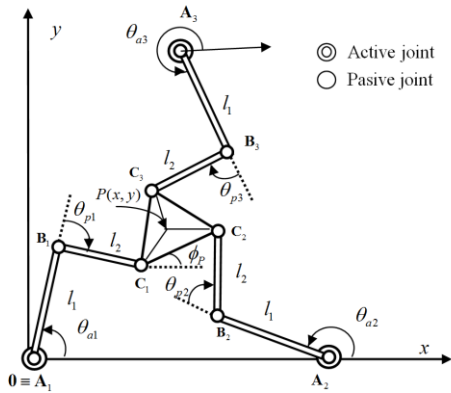
Abstract - In this paper, a synchronous computed torque control algorithm is presented for trajectory tracking control of 3 DOF planar parallel robotic manipulators. Firstly, a dynamic model of the parallel robotic manipulators is developed based on the application of D'lambert principle. After that, based on this dynamic model, a synchronous computed torque tracking controller is proposed. Different from traditional tracking controllers which consider only the error of individual joints, the synchronous tracking controller is developed using the principles of synchronization function and cross-coupling errors in order to consider error of active joints of parallel robotic manipulators in a synchronous manner. The stability of the proposed control algorithm is proved by Lyapunov theory. For demonstration of the effectiveness of the proposed control algorithm, simulations are conducted on Matlab/ Simulink and SimMechanics for a 3 DOF planar parallel robotic manipulator and are compared with some traditional tracking control algorithms.

Key words - parallel robotic manipulators; synchronous tracking control; synchronization function; cross-coupling errors; trajectory tracking control.

nghiên cứu kể trên là đều dựa theo sai số các khớp của tay máy robot song song mà chưa tính đến mô hình động lực học của robot. Thuật toán điều khiển dựa theo sai số tuy đơn giản, dễ thực hiện nhưng có những hạn chế về chất lượng điều khiển do không tính đến động lực học của tay máy robot. Để khắc phục hạn chế này, các thuật toán điều khiển dựa theo mô hình động lực học đã được nghiên cứu và công bố như: điều khiển tính mô-men [6, 7], điều khiển trượt [8], điều khiển thích nghi [9, 10]. Các thuật toán này đã khắc phục được hạn chế của phương pháp điều khiển chỉ dựa theo sai số, tuy nhiên, các mạch vòng điều khiển đều chỉ lấy thông tin sai số từ các khớp chuyển động riêng lẻ của robot. Điều này chưa thật sự phù hợp với đặc điểm động học của tay máy robot song song. Trong các tay máy robot song song, các chuỗi động học đều được nối vào một khâu chấp hành cuối. Chuyển động của mỗi chuỗi động học đều ảnh hưởng đến độ chính xác điều khiển của khâu chấp hành cuối. Vì vậy, trong thuật toán điều khiển nên tính đến sai số của các khớp chủ động ảnh hưởng đến nhau.

Với những phân tích ở trên, bài báo này đề xuất một thuật toán điều khiển đồng bộ cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do. Thuật toán điều khiển được xây dựng dựa trên mô hình động lực học của tay máy robot kết hợp với các định nghĩa về hàm đồng bộ và sai số đồng bộ. Khác với các thuật toán điều khiển truyền thống trước đây chỉ xét đến sai số của riêng từng trục chuyển động, thuật toán điều khiển của bài báo xét đồng thời sai số của các khớp chủ động của tay máy robot song song. Sự ổn định của hệ thống được đảm bảo bằng lý thuyết ổn định Lyapunov.

2. Mô hình động lực học của tay máy robot song song 3 bậc tự do



Hình 1. Robot song song phẳng 3 bậc tự do

Một tay máy robot song song phẳng được thể hiện như trên Hình 1. Nó bao gồm 3 khớp chủ động (A_1 , A_2 và A_3) và 6 khớp thụ động (B_1 , B_2 , B_3 , C_1 , C_2 và C_3). Chiều dài các thanh của robot là $l_1 = A_i B_i$, $l_2 = B_i C_i$ ($i = 1, 2, 3$). Khâu chấp hành cuối của tay máy robot là một tam giác đều $C_1 C_2 C_3$ với khoảng cách từ đỉnh đến tâm P của tam giác là $l_3 = C_i P$ ($i = 1, 2, 3$).

Ký hiệu các vector của tay máy robot như sau:

- $\theta_a = [\theta_{a1}, \theta_{a2}, \theta_{a3}]^T$ là vector góc của các khớp chủ động.
- $\theta_p = [\theta_{p1}, \theta_{p2}, \theta_{p3}]^T$ là vector góc của các khớp thụ động quan trọng.
- $X_p = [x_p, y_p, \phi_p]^T$ là vector vị trí và hướng của khâu chấp hành cuối.

Mô hình động lực học của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do ở trên được thiết lập bằng cách sử dụng nguyên lý D'lambert và phương pháp Lagrange. Trước hết, giả sử tay máy robot được cắt ảo thành cấu trúc hở như trên Hình 2. Sau đó, các phương trình Lagrange được thiết lập cho cơ hệ với cấu trúc hở và các mô-men ở các khớp chủ động được tính toán để tạo ra chuyển động thỏa mãn được các ràng buộc của các chuỗi động học kín.

Mô hình động lực học của tay máy robot với cấu trúc hệ hở được viết như sau:

$$M_o \ddot{\theta} + C_o \dot{\theta} = \tau_o \quad (1)$$

Trong đó:

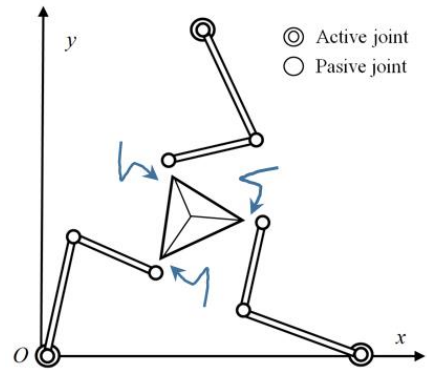
$M_o \in \mathcal{R}^{9 \times 9}$ là ma trận quán tính của hệ hở;

$C_o \in \mathcal{R}^{9 \times 9}$ là ma trận của các lực hướng tâm, lực Coriolis của hệ hở;

$\tau_o = [\tau_a, \tau_p, \tau_x] \in \mathcal{R}^{9 \times 1}$ là vector mô-men của tất cả các khớp của tay máy robot;

$\theta = [\theta_a, \theta_p, X_p] \in \mathcal{R}^{9 \times 1}$ là vector tất cả các biến khớp và biến tọa độ khâu chấp hành cuối của robot.

Trong tay máy robot song song, chỉ có các khớp chủ động được truyền động, do đó mô hình động lực học (1) chưa thể sử dụng để làm cơ sở thiết kế các thuật toán điều khiển cho tay máy robot. Để xây dựng thuật toán điều khiển, cần thiết phải đưa mô hình động lực học về xây dựng trong mối quan hệ với các tín hiệu vào là mô-men của các khớp chủ động và điều khiển ở hệ tọa độ các biến khớp chủ động.



Hình 2. Cấu trúc hệ hở của robot có được bằng cách cắt ảo ở các khớp thụ động

Dựa trên nguyên lý D'lambert, chúng ta có mối quan hệ sau đây giữa vector mô-men của tất cả các khớp và vector mô-men của các khớp chủ động [11]:

$$W^T \tau_o = \tau_a \quad (2)$$

trong đó $\tau_a = [\tau_{a1}, \tau_{a2}, \tau_{a3}]^T$ là vector mô-men của các khớp chủ động; W là ma trận Jacobian được tính từ mối quan hệ động học ràng buộc của cơ hệ kín ban đầu của tay máy robot song song. Phương trình của ma trận Jacobian W được tính như sau:

$$W = [I, \partial \theta_p / \partial \theta_a, \partial X_p / \partial \theta_a]^T \in \mathcal{R}^{9 \times 3} \quad (3)$$

Từ phương trình (3) chúng ta cũng sẽ có mối quan hệ sau đây:

$$\dot{\theta} = [I, \partial \theta_p / \partial \theta_a, \partial X_p / \partial \theta_a]^T \frac{d\theta_a}{dt} \quad (4)$$

tương đương với:

$$\dot{\theta} = W \dot{\theta}_a \quad (5)$$

Để xây dựng mô hình động lực học của tay máy robot song song trong hệ tọa độ khớp chủ động, chúng ta nhân 2 vế của phương trình (1) với W^T . Kết quả có được:

$$W^T (M_o \ddot{\theta} + C_o \dot{\theta}) = W^T \tau_o \quad (6)$$

Thay phương trình (2) và (4) vào phương trình (6) chúng ta có:

$$W^T M_o W \ddot{\theta}_a + (W^T M_o \dot{W} + W^T C_o W) \dot{\theta}_a = \tau_a \quad (7)$$

Đặt:

$M_a = W^T M_o W$ là ma trận quán tính của tay máy robot trong hệ tọa độ khớp chủ động.

$C_a = W^T M_o \dot{W} + W^T C_o W$ là ma trận các lực hướng tâm và Coriolis của tay máy robot trong hệ tọa độ khớp chủ động.

Như vậy, phương trình (7) có thể viết lại như sau:

$$M_a \ddot{\theta}_a + C_a \dot{\theta}_a = \tau_a \quad (8)$$

Phương trình (8) chính là mô hình động lực học của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do trong hệ tọa độ khớp chủ động. Trong các mục tiếp theo, các thuật toán điều khiển sẽ được thiết kế dựa trên mô hình động lực học (8).

3. Thuật toán điều khiển tính mô-men cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do

Gọi $\theta_{da}(t)$ là quỹ đạo góc quay mong muốn của các khớp chủ động của tay máy robot. Các vector sai số quỹ đạo và sai số vận tốc được định nghĩa như sau:

$$e = \theta_{da}(t) - \theta_a(t) \quad (9)$$

$$\dot{e} = \dot{\theta}_{da}(t) - \dot{\theta}_a(t) \quad (10)$$

Điều khiển tính mô-men là một thuật toán nổi tiếng và rất hiệu quả cho việc điều khiển chuyển động bám quỹ đạo của tay máy robot công nghiệp. Bên cạnh đó, thuật toán này còn đảm bảo được tính ổn định toàn cục của hệ thống [12]. Thuật toán điều khiển tính mô-men truyền thống cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do trong bài báo này được viết như sau:

$$\tau_a = M_a(\ddot{\theta}_{da} + K_p \dot{e} + K_v e) + C_a \dot{\theta}_a \quad (11)$$

Trong đó, $K_p \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ và $K_v \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là các ma trận tham số xác định dương.

Bộ điều khiển (11) có thể được chia thành 2 thành phần. Thành phần thứ nhất có tác dụng bù các thành phần động lực học của robot theo quỹ đạo mong muốn:

$$\tau_{a1} = M_a \ddot{\theta}_{da} + C_a \dot{\theta}_a \quad (12)$$

Thành phần thứ 2 có tác dụng làm triệt tiêu sai số, đưa quỹ đạo thực của tay máy robot bám theo quỹ đạo mong muốn:

$$\tau_{a2} = M_a(K_p e + K_v \dot{e}) \quad (13)$$

Trước đây, thuật toán điều khiển tính mô-men truyền thống được áp dụng nhiều cho việc điều khiển bám quỹ đạo của tay máy robot nổi tiếp. Gần đây thuật toán này cũng đã được nhiều nhà nghiên cứu, nhiều công trình áp dụng cho tay máy robot song song, kết quả đã có hiệu quả nhất định trong việc điều khiển tay máy robot bám theo quỹ đạo mong muốn. Tuy nhiên thuật toán điều khiển này mới chỉ xét sai số của từng khớp chủ động riêng lẻ mà chưa xét sự ảnh hưởng qua lại của các khớp chủ động với kết quả chuyển động của khâu chấp hành cuối. Đối với tay máy robot song song, do các chuỗi động học được nối kín với nhau bằng khâu chấp hành cuối nên cần thiết phải điều khiển đồng bộ giữa các khớp chủ động [13]. Trong mục tiếp theo của bài báo, các tác giả đề xuất một thuật toán điều khiển đồng bộ cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do dựa trên sự cải tiến của thuật toán điều khiển tính mô-men truyền thống (11).

4. Điều khiển bám đồng bộ cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do

Trước hết, định nghĩa lại sai số quỹ đạo như sau:

$$e_a = \theta_a(t) - \theta_{da}(t) \quad (14)$$

Trong thuật toán điều khiển đồng bộ, không chỉ riêng sai số của mỗi trục thành phần phải tiến về không ($e_{ai}(t) \rightarrow 0, i = 1, 2, 3$) mà các sai số này phải cùng đồng thời bằng nhau trong quá trình điều khiển bám quỹ đạo:

$$e_{a1}(t) = e_{a2}(t) = e_{a3}(t) \quad (15)$$

Sai số đồng bộ được định nghĩa như sau:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1(t) &= e_{a1}(t) - e_{a2}(t) \\ \varepsilon_2(t) &= e_{a2}(t) - e_{a3}(t) \\ \varepsilon_3(t) &= e_{a3}(t) - e_{a1}(t) \end{aligned} \quad (16)$$

Mục tiêu của thuật toán điều khiển là các sai số đồng bộ trong công thức (16) cùng tiến về 0, điều này có nghĩa là thuật toán điều khiển xem xét sai số của các trục có sự ảnh hưởng qua lại lẫn nhau. Để thực hiện điều này, chúng ta định nghĩa một hàm sai số xen kẽ ngang như sau:

$$e_i^* = e_i + \beta \int_0^t (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}) dw, i = 1, 2, 3 \quad (17)$$

trong đó β là hằng số dương, w là biến số thời gian.

Thuật toán điều khiển đồng bộ tính mô-men cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do mà bài báo đề xuất được viết như sau:

$$\tau_a = M_a \ddot{\theta}_{da} + M_a(K_p e_a^* + K_v \dot{e}_a^*) + C_a \dot{\theta}_a \quad (18)$$

trong đó $K_p \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $K_v \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là các ma trận tham số xác định dương. Các vector sai số xen kẽ ngang: $e_a^* = [e_1^*, e_2^*, e_3^*]^T$, $\dot{e}_a^* = [\dot{e}_1^*, \dot{e}_2^*, \dot{e}_3^*]^T$.

Để chứng minh tính ổn định của thuật toán điều khiển đề xuất, hàm Lyapunov được chọn như sau:

$$V(e_a^*, \dot{e}_a^*) = \frac{1}{2} \dot{e}_a^{*T} \dot{e}_a^* + \int_0^{e_a^*} \sigma^T K_p(\sigma) d\sigma \quad (19)$$

trong đó, vì K_p là ma trận xác định dương nên ta có [14]:

$$\int_0^{e_a^*} \sigma^T K_p(\sigma) d\sigma = \int_0^{e_{a1}^*} \sigma_1 k_{p1}(\sigma_1) d\sigma_1 + \int_0^{e_{a2}^*} \sigma_2 k_{p2}(\sigma_2) d\sigma_2 + \int_0^{e_{a3}^*} \sigma_3 k_{p3}(\sigma_3) d\sigma_3 \quad (20)$$

Đạo hàm của hàm Lyapunov (19) được tính bằng cách sử dụng công thức (20) và công thức Leibnitz cho thành phần tích phân như sau:

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_a^*, \dot{e}_a^*) &= \dot{e}_a^{*T} \ddot{e}_a^* + \frac{d}{dt} \left[\int_0^{e_a^*} \sigma^T K_p(\sigma) d\sigma \right] \\ &= \dot{e}_a^{*T} \ddot{e}_a^* + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial e_{ai}^*} \left[\int_0^{e_{ai}^*} \sigma_i k_{pi}(\sigma_i) d\sigma_i \right] \dot{e}_{ai}^* \\ &= \dot{e}_a^{*T} \ddot{e}_a^* + \sum_{i=1}^3 e_{ai}^* k_{pi}(e_{ai}^*) \dot{e}_{ai}^* \\ &= \dot{e}_a^{*T} \ddot{e}_a^* + e_a^{*T} K_p \dot{e}_a^* \end{aligned} \quad (21)$$

Từ mô hình động lực học (8) và phương trình của thuật toán điều khiển đồng bộ tính mô-men (18) chúng ta có:

$$\ddot{e}_a^* + K_p e_a^* + K_v \dot{e}_a^* = 0 \quad (22)$$

Nhân 2 vế của phương trình (22) với \dot{e}_a^* và thay vào phương trình (21) chúng ta có:

$$\dot{V}(e_a^*, \dot{e}_a^*) = -\dot{e}_a^{*T} K_v \dot{e}_a^* \quad (23)$$

Do K_v là ma trận xác định dương, nên $\dot{V}(e_a^*, \dot{e}_a^*) \leq 0$. Vì vậy chúng ta có thể kết luận là hệ thống điều khiển ổn định dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov.

5. Mô phỏng kiểm chứng

Để kiểm chứng tính hiệu quả của thuật toán điều khiển bám đồng bộ cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do trong bài báo trình bày kết quả so sánh giữa bộ điều khiển mô-men truyền thống và bộ điều khiển đồng bộ. Robot được xây dựng mô phỏng dựa trên sự kết hợp phần mềm Solidworks và Matlab/Simulink.

Bảng 1. Thông số của tay máy robot

Thanh	Thông số		
	Chiều dài (m)	Khối lượng (Kg)	Mô-men quán tính
Chủ động	$l_{ai} = 0.2$	$m_{ai} = 0.5$	$I_{ai} = 0.002$
Bị động	$l_{pi} = 0.2$	$m_{pi} = 0.55$	$I_{pi} = 0.0025$
Khâu chấp hành	$l_e = 0.125$	$m_e = 0.17$	$I_e = 0.0006$

Trong đó: l_{ai}, l_{pi} là chiều dài của thanh truyền lần lượt là của chủ động và bị động thứ i^{th} ; l_e là chiều dài từ tâm khâu chấp hành đến khớp liên kết với thanh bị động. Trọng tâm của các thanh truyền và khâu chấp hành được đặt ở điểm chính giữa của thanh và trung tâm của khâu chấp hành. m_{ai} và m_{pi} là khối lượng của thanh truyền thứ i^{th} lần lượt của thanh chủ động và thanh bị động; m_e là khối lượng của khâu chấp hành; I_i là mô-men quán tính của thanh thứ i^{th} ($i=1, 2, 3$).

Thông số của bộ điều khiển mô-men truyền thống có hệ số $K_v = 250 \times I_{3 \times 3}, K_e = 25 \times I_{3 \times 3}$ là ma trận với $I_{3 \times 3}$ là ma trận đơn vị 3×3 . Trong bộ điều khiển đồng bộ hệ số đồng bộ $\beta = 0.2$ được chọn.

Quy đạo thiết kế của robot

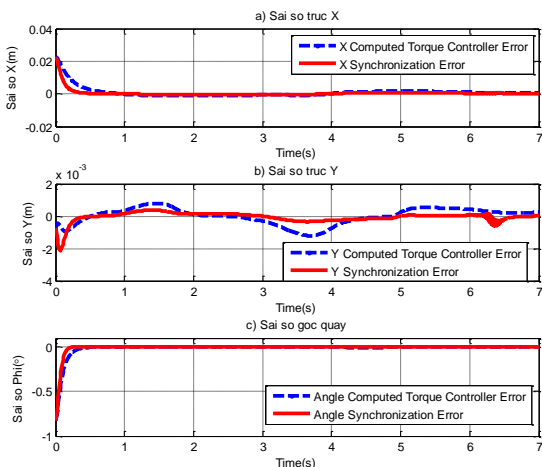
$$\begin{cases} x(t) = 0.25 + 0.03 \cos(t) \\ y(t) = \sqrt{3} / 12 + 0.03 \sin(t) \\ \phi_p(t) = 0 \end{cases}$$

và ma sát tại khớp chủ động

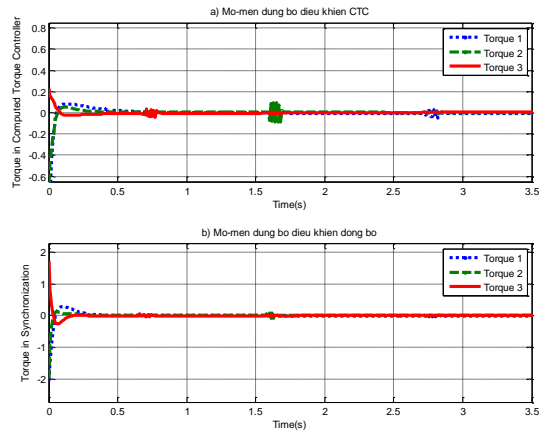
$$f_{fi} = 0.03 \text{sign}(\dot{\theta}_{ai}) + 0.02 \dot{\theta}_{ai} \quad (i = 1, 2, 3)$$

Kết quả sai số của khâu chấp hành cuối theo các trục tọa độ x, y và sai lệch góc quay được thể hiện trên Hình 3. Đường nét đứt là kết quả của phương pháp điều khiển tính mô-men truyền thống. Đường nét liền là kết quả của phương pháp điều khiển đồng bộ tính mô-men mà bài báo đề xuất. Chúng ta có thể thấy rõ rằng phương pháp điều khiển đồng bộ tính mô-men mang lại kết quả sai số nhỏ hơn và nhanh tiến đến xác lập hơn so với phương pháp truyền thống.

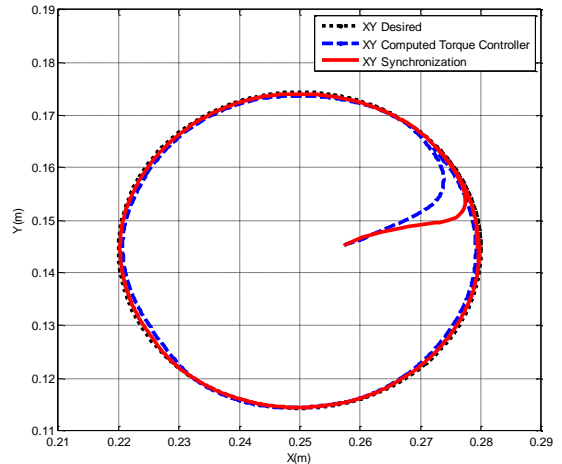
Hình 4 thể hiện so sánh tín hiệu mô-men đầu vào truyền động cho các khớp chủ động của tay máy robot (được tính bởi thuật toán điều khiển). Kết quả cho thấy tín hiệu mô-men ở trường hợp sử dụng phương pháp điều khiển đồng bộ tính mô-men ít đập mạch hơn so với phương pháp truyền thống.



Hình 3. Sai số của khâu chấp hành cuối



Hình 4. Mô-men cung cấp tại khớp chủ động của robot



Hình 5. Kết quả bám theo quỹ đạo của khâu chấp hành

Kết quả điều khiển bám quỹ đạo của khâu chấp hành cuối được thể hiện trên Hình 5. Chúng ta có thể thấy rõ phương pháp điều khiển đồng bộ tính mô-men cho kết quả bám quỹ đạo nhanh hơn và chính xác hơn so với phương pháp điều khiển tính mô-men truyền thống.

6. Kết luận

Bài báo đã trình bày một thuật toán điều khiển đồng bộ bám mô-men cho việc điều khiển bám quỹ đạo của tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do. Trong bài báo, dựa trên mô hình động lực học của tay máy robot, một thuật toán điều khiển bám đồng bộ đã được đề xuất. Khác với các thuật toán điều khiển truyền thống trước đây chỉ xét đến sai số của riêng từng trục chuyển động, thuật toán điều khiển đồng bộ được phát triển sử dụng các khái niệm hàm đồng bộ và sai số đồng bộ để xét đồng thời sai số của các khớp chủ động của tay máy robot song song. Sự ổn định của thuật toán được chứng minh bằng lý thuyết ổn định Lyapunov. Các mô phỏng kiểm chứng đã được thực hiện trên Matlab/Simulink và SimMechanics cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do. Kết quả cho thấy thuật toán điều khiển mà bài báo đề xuất mang lại kết quả tốt hơn so với thuật toán điều khiển tính mô-men truyền thống.

Lời ghi nhận

Bài báo là kết quả nghiên cứu của đề tài cấp Bộ Giáo

dục & Đào tạo mã số KYTH-17 năm 2017, tên đề tài “Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển đồng bộ thích nghi cho tay máy robot song song phẳng”.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Su, Yuxin, et al., "Integration of saturated PI synchronous control and PD feedback for control of parallel manipulators", *IEEE Transactions on Robotics* 22.1 (2006): 202-207.
- [2] Yang, Chifu, et al., "PD control with gravity compensation for hydraulic 6-DOF parallel manipulator", *Mechanism and Machine theory* 45.4 (2010): 666-677.
- [3] Su, Y. X., B. Y. Duan, and C. H. Zheng, "Nonlinear PID control of a six-DOF parallel manipulator", *IEE Proceedings-Control Theory and Applications* 151.1 (2004): 95-102.
- [4] Shang, Wei Wei, et al., "Augmented nonlinear PD controller for a redundantly actuated parallel manipulator", *Advanced Robotics* 23.12-13 (2009): 1725-1742.
- [5] Su, Y. X., et al., "Nonlinear PD synchronized control for parallel manipulators", *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on. IEEE, 2005.*
- [6] Le, Quang Dan, Hee-Jun Kang, and Tien Dung Le, "Adaptive Extended Computed Torque Control of 3 DOF Planar Parallel Manipulators Using Neural Network and Error Compensator", *International Conference on Intelligent Computing*. Springer International Publishing, 2016.
- [7] Le, Tien Dung, et al., "An online self-gain tuning method using neural networks for nonlinear PD computed torque controller of a 2-dof parallel manipulator", *Neurocomputing* 116 (2013): 53-61.
- [8] Le, Tien Dung, Hee-Jun Kang, and Young-Soo Suh, "Chattering-free neuro-sliding mode control of 2-DOF planar parallel manipulators", *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10.1 (2013): 22.
- [9] Casalilla, J., et al., "Adaptive control of a 3-DOF parallel manipulator considering payload handling and relevant parameter models", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 30.5 (2014): 468-477.
- [10] Le, Tien Dung, and Hee-Jun Kang, "An adaptive tracking controller for parallel robotic manipulators based on fully tuned radial basic function networks", *Neurocomputing* 137 (2014): 12-23.
- [11] Nakamura, Yoshihiko, and Katsu Yamane, "Dynamics computation of structure-varying kinematic chains and its application to human figures", *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 16.2 (2000): 124-134.
- [12] Song, Zuoshi, et al., "A computed torque controller for uncertain robotic manipulator systems: Fuzzy approach", *fuzzy Sets and Systems* 154.2 (2005): 208-226.
- [13] Ren, Lu, James K. Mills, and Dong Sun, "Adaptive synchronized control for a planar parallel manipulator: theory and experiments", *Journal of dynamic systems, measurement, and control* 128.4 (2006): 976-979.
- [14] M.A. Llama, et al., Stable computed-torque control of robot manipulators via fuzzy self-tuning, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B Cybern.* 30 (2000) 143–150.

(BBT nhận bài: 05/5/2017, hoàn tất thủ tục phản biện: 26/6/2017)