

Thiết kế thuật toán điều khiển trượt đồng bộ cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do trong hệ tọa độ khớp chủ động

Design of synchronized sliding mode controller for 3 degree-of-freedom planar parallel robotic manipulators in active joint space

Lê Tiến Dũng¹, Đoàn Quang Vinh², Dương Tấn Quốc³

¹ĐH Bách Khoa - ĐH Đà Nẵng, ²ĐH Đà Nẵng, ³ĐH Duy Tân

Email: ltdung@dut.udn.vn, dqvinh@ac.udn.vn, duongtanquoc@dtu.edu.vn

Abstract

Parallel manipulators have the closed-chained kinematic structure and have the cross-effectiveness among the kinematic chains. Therefore, the traditional control algorithms which consider online the tracking error of each active joint will not bring high accuracy. In this paper, a synchronized sliding mode controller for 3 degree-of-freedom planar parallel robotic manipulators in active joint space is presented. The proposed controller is based on the definitions of synchronization error, cross-coupling error and revised sliding mode control algorithm in order to bring better performance. The stability of closed loop system when using the proposed controller is guaranteed by Lyapunov theory. To verify the effectiveness of the proposed controller, compared simulations are conducted by using Matlab/Simulink combine with Solidworks.

Keywords

Planar parallel robotic manipulators, Sliding mode control, Synchronized control, Synchronization error, Dynamics, Cross-coupling error.

Tóm tắt

Các tay máy robot song song có cấu trúc động học khép kín và có sự ảnh hưởng lẫn nhau giữa các chuỗi động học. Vì vậy các thuật toán điều khiển truyền thống chỉ xét riêng sai số của các khớp chủ động sẽ không mang lại độ chính xác cao. Trong bài báo này, một thuật toán điều khiển trượt đồng bộ cho tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do trong hệ tọa độ khớp chủ động được trình bày. Thuật toán điều khiển được đề xuất dựa trên định nghĩa sai số đồng bộ, sai số đồng bộ chéo, mô hình động lực học và đồng thời thay đổi thuật toán điều khiển trượt truyền thống nhằm mang lại hiệu quả tốt hơn. Sự ổn định của hệ thống khi sử dụng thuật toán điều khiển trượt đồng bộ được đảm bảo dựa trên lý thuyết ổn định Lyapunov. Để kiểm chứng sự hiệu quả của thuật toán điều khiển, các mô phỏng và so sánh được thực hiện trên phần mềm Matlab/Simulink kết hợp với SolidWorks.

Từ khóa

Tay máy robot song song phẳng, Điều khiển trượt, Điều khiển đồng bộ, Sai số đồng bộ, Động lực học, Sai số đồng bộ chéo.

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$\Delta \tau$	Nm	Vector chứa các thành phần lực ma sát và nhiễu ngoại lực
τ_a	Nm	Vector mô-men tác dụng vào khớp chủ động
\dot{q}_a	rad/s	Vector vận tốc góc của các khớp chủ động

\ddot{q}_a	rad/s ²	Vector gia tốc góc của các khớp chủ động
--------------	--------------------	--

Chữ viết tắt

CTC	Computed Torque Control
RMSE	Root Mean Square Error
RRR	Revolute – Revolute – Revolute
SMC	Sliding Mode Control

1. Phần mở đầu

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 [1, 2]. Đối với các loại tay máy robot song song thì đối tượng tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do được nghiên cứu nhiều và có nhiều ứng dụng trong thực tiễn như gia công trên mặt phẳng với độ chính xác cao, hàn mạch in kích thước nhỏ, máy CNC,... Trong đó mô hình tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do, loại 3-RRR (Revolute – Revolute – Revolute) đơn giản và dễ điều khiển hơn cả. Vấn đề điều khiển tay máy robot

song song phẳng đã được nghiên cứu trong nhiều tài liệu khác nhau và đã có nhiều thuật toán được đề xuất như điều khiển trượt truyền thống (Sliding Mode Control – SMC) [3], điều khiển tính mô-men (Computed Torque Control – CTC) [4], điều khiển đồng bộ (Synchronization control) [5], hay các bộ điều khiển kết hợp điều khiển mờ và điều khiển trượt [6]. Thuật toán điều khiển trượt truyền thống đã được phát triển và ứng dụng cho điều khiển tay máy robot công nghiệp từ rất lâu và đã trở nên phổ biến nhờ ưu điểm về hiệu năng cao và đem lại chất lượng điều khiển tốt. Tuy nhiên thuật toán này chỉ phù hợp để điều khiển tay máy robot nối tiếp, trong đó sai số được sử dụng trong điều khiển trượt truyền thống là sai số của từng khớp, không có sự đồng bộ và xét ảnh hưởng qua lại lẫn nhau giữa các khớp. Đối với tay máy robot song song, các chuỗi động học nối tiếp cùng phối hợp hoạt động và cùng ảnh hưởng lên khâu chấp hành cuối. Do đó các chuỗi động học của tay máy robot song song cần được điều khiển đồng bộ, trong đó có sự xét ảnh hưởng qua lại của sai số các khớp. Gần đây, đã có những công trình nghiên cứu đề xuất thuật toán điều khiển trượt đồng bộ cho hệ thống các tay máy robot nối tiếp phối hợp hoạt động với nhau [7, 8], hoặc cho tay máy robot song song nhưng trên hệ tọa độ Cartesian của khâu chấp hành cuối [9, 10].

Trên cơ sở phân tích đó, bài báo đề xuất thuật toán điều khiển trượt đồng bộ trên hệ tọa độ khớp chủ động, đó là sự kết hợp giữa điều khiển trượt truyền thống kết hợp với các sai số đồng bộ, sai số đồng bộ chéo thường dùng trong điều khiển đồng bộ. Vì vậy, bộ điều khiển đề xuất sẽ tận dụng được ưu điểm về sự đồng bộ giảm sai lệch của điều khiển đồng bộ cũng như ưu điểm về tính hiệu quả của bộ điều khiển trượt truyền thống. Để kiểm nghiệm kết quả đạt được, bài báo thực hiện mô phỏng trên Matlab/Simulink và SimMechanics trích xuất từ SolidWorks với các thông số gần chính xác thực tế để kiểm tra tính hiệu quả.

Các phần tiếp theo của bài báo được trình bày với cấu trúc như sau. Mục 2 trình bày về mô hình động lực học của tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do. Mục 3 trình bày thuật toán điều khiển trượt truyền thống áp dụng cho tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do. Trong mục 4, thuật toán điều khiển trượt đồng bộ trên hệ tọa độ khớp chủ động được đề xuất. Các chứng minh về tính ổn định của hệ thống được trình bày trong mục 5. Các mô phỏng kiểm chứng được trình bày trong mục 6 và cuối cùng là kết luận của bài báo ở mục 7.

2. Mô hình động lực học

Xét tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do 3-RRR có cấu trúc động học như Hình 1. Tay máy robot này hoạt động trên mặt phẳng nằm ngang và có mô hình động lực học được mô tả trong không gian khớp chủ động như sau [6]:

$$\mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{q}}_a + \mathbf{C}_a \dot{\mathbf{q}}_a + \Delta \tau = \tau_a \quad (1)$$

Trong đó:

- τ_a là vector mô-men tác động vào khớp chủ

động;

- $\dot{\mathbf{q}}_a, \ddot{\mathbf{q}}_a$ là vector vận tốc và gia tốc góc của các khớp chủ động;
- $\mathbf{M}_a = \mathbf{W}^T \mathbf{M}_l \mathbf{W}$ là ma trận quán tính;
- $\mathbf{C}_a = \mathbf{W}^T \mathbf{M}_l \dot{\mathbf{W}} + \mathbf{W}^T \mathbf{C}_l \mathbf{W}$ là ma trận Coriolis và lực hướng tâm;
- $\Delta \tau$ là vector chứa các thành phần lực ma sát và nhiễu ngoại lực, với $\Delta \tau = \mathbf{F}_a + \mathbf{d}(t)$, \mathbf{F}_a là lực ma sát và $\mathbf{d}(t)$ là nhiễu ngoại lực.

Và các ma trận \mathbf{M}_l ; \mathbf{C}_l ; $\mathbf{W} = [\mathbf{I}, \mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2]^T$; $\dot{\mathbf{W}} = [\dot{\mathbf{I}}, \dot{\mathbf{J}}_1, \dot{\mathbf{J}}_2]^T$; \mathbf{I} là ma trận đơn vị có kích thước 3×3 ; $\dot{\mathbf{I}} = 0 \times \mathbf{I}_{3 \times 3}$; $\mathbf{J}_1, \dot{\mathbf{J}}_1$ và $\mathbf{J}_2, \dot{\mathbf{J}}_2$ là các ma trận Jacobian được tính toán từ mô tả hình học của tay máy robot song song 3-RRR và trình bày chi tiết trong tài liệu [6].

3. Thuật toán điều khiển trượt truyền thống áp dụng cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do

Để thiết kế bộ điều khiển trượt truyền thống dựa trên véc tơ sai số của các khớp chủ động, việc đầu tiên là định nghĩa mặt trượt như phương trình:

$$\mathbf{s} = \dot{\mathbf{e}} + \Lambda \mathbf{e} = \dot{\mathbf{q}}_a - (\dot{\mathbf{q}}_{da} - \Lambda \mathbf{e}) = \dot{\mathbf{q}}_a - \dot{\mathbf{q}}_{ar} \quad (2)$$

Trong đó, $\Lambda = \text{diag}(\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3)$ với Λ_i là những hằng số xác định dương để xác định sự duy chuyển của mặt trượt, $i=1,2,3$ và $\dot{\mathbf{q}}_{ar} = \dot{\mathbf{q}}_{da} - \Lambda \mathbf{e}$; $\dot{\mathbf{q}}_{ar} = \dot{\mathbf{q}}_{da} - \Lambda \mathbf{e}$.

Bước tiếp theo là thiết kế luật điều khiển theo phương trình sau:

$$\tau_a = \tau_{eq} + \tau_{sw} \quad (3)$$

Với τ_{eq} là lực tác động để giữ cho quỹ đạo trạng thái hệ thống luôn nằm trên mặt trượt và τ_{sw} sẽ điều khiển quỹ đạo trạng thái hệ thống về lại mặt trượt khi nó bị lệch ra ngoài.

Thành phần τ_{eq} được suy ra từ hệ thống khi không có nhiễu và lực ma sát như phương trình sau:

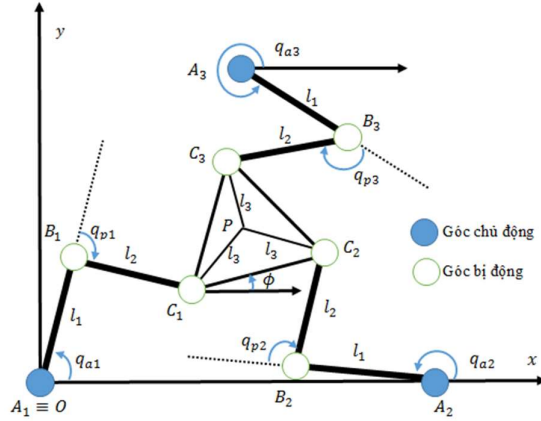
$$\tau_{eq} = \mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{q}}_{ar} + \mathbf{C}_a \dot{\mathbf{q}}_a \quad (4)$$

Và thành phần τ_{sw} được định nghĩa:

$$\tau_{sw} = -\mathbf{A}\mathbf{s} - \mathbf{K}\text{sign}(\mathbf{s}) \quad (5)$$

Trong đó, $\mathbf{K} = \text{diag}(k_1, k_2, k_3)$, $\mathbf{A} = \text{diag}(a_1, a_2, a_3)$ với k_i , a_i là những hằng số dương, $i=1,2,3$; $\text{sign}(\mathbf{s})$ là hàm dấu của mặt trượt. Thay công thức (4), (5) vào (3), sẽ có được bộ điều khiển trượt truyền thống cho tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do 3-RRR như phương trình (6).

$$\tau_a = \mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{q}}_{ar} + \mathbf{C}_a \dot{\mathbf{q}}_a - \mathbf{A}\mathbf{s} - \mathbf{K}\text{sign}(\mathbf{s}) \quad (6)$$



H. 1 Tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do 3-RRR

Bộ điều khiển này đã được chứng minh trong tài liệu [11] bằng cách chọn hàm Lyapunov như sau:

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{M}_a \mathbf{s} \quad (7)$$

Và chọn giá trị của ma trận \mathbf{K} thỏa mãn:

$$k_i \geq |\Delta \tau_i|, i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

với $|\Delta \tau_i|$ là biên của lực để hệ thống ổn định tiệm cận.

Như vậy có thể suy ra:

$$\dot{V} \leq -\mathbf{s}^T \mathbf{A} \mathbf{s} \leq 0 \quad (9)$$

Phương trình (9) như trên đã chứng minh tính ổn định của bộ điều khiển trượt truyền thống. Hàm sign trong thành phần điều khiển gián đoạn của bộ điều khiển trượt truyền thống (6) có tần số chuyển mạch cao và có hiện tượng dao động quanh mặt trượt, đó là hiện tượng "chattering". Để giải quyết vấn đề này, hàm bão hòa chứa hàm sign được sử dụng như công thức:

$$\text{sat}\left(\frac{s}{\Phi}\right) = \begin{cases} \frac{s}{\Phi} & |s| \leq \Phi \\ \text{sign}(s) & |s| > \Phi \end{cases} \quad (10)$$

Với Φ là độ dày biên.

Trong thuật toán điều khiển trượt truyền thống ở trên, thuật toán điều khiển chỉ xét riêng đến sai số của từng khớp riêng lẻ. Các hàm trượt ở phương trình (2) chỉ lấy tín hiệu phản hồi của riêng từng khớp chủ động mà không xét đến các khớp lân cận. Trong khi đó, với cấu trúc khép kín của tay máy robot song song, các chuỗi động học hoạt động song song và cùng tác động lên khâu chấp hành cuối nên sai số cũng như nhiễu loạn tại các khớp chủ động có sự tác động qua lại lẫn nhau. Quỹ đạo chuyển động của khâu chấp hành cuối được xác định và ảnh hưởng bởi tất cả các chuỗi động học trong robot. Vì vậy, các khớp chủ động của robot cần được điều khiển một cách đồng bộ với nhau để mang lại kết quả điều khiển bám quỹ đạo với độ chính xác cao hơn.

4. Thuật toán điều khiển trượt đồng bộ cho tay máy robot song song phẳng 3 bậc tự do

Để xây dựng bộ điều khiển trượt đồng bộ, các nguyên tắc chính được sử dụng đó là sai số đồng bộ, sai số đồng

bộ chéo và thuật toán điều khiển trượt truyền thống. Đối với mô hình tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do 3-RRR, sai số đồng bộ được đưa ra theo tài liệu [5] như sau:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = e_1 - e_2 \\ \varepsilon_2 = e_2 - e_3 \\ \varepsilon_3 = e_3 - e_1 \end{cases} \quad (11)$$

Như định nghĩa sai số đồng bộ ở trên, mô men điều khiển sẽ điều khiển sai số vị trí $e_i = 0$ và đồng thời có thể đồng bộ chuyển động của trục thứ $(i-1)$, thứ i và thứ $(i+1)$ để $e_i = 0$, $\varepsilon_{i-1} = 0$ và $\varepsilon_i = 0$ cùng lúc. Để điều tiết cả sai số vị trí và sai số đồng bộ, sai số đồng bộ chéo có thể được suy ra từ sai số vị trí và sai số đồng bộ như công thức:

$$\mathbf{e}^* = \mathbf{e} + \Gamma \boldsymbol{\varepsilon} \quad (12)$$

Trong đó, $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3]^T$, và:

- \mathbf{e}^* là sai số đồng bộ chéo;
- Γ là ma trận xác định dương có kích thước 3×3 giúp cân bằng trọng số giữa sai số vị trí và sai số đồng bộ.

Trong quá trình tính toán thuật toán điều khiển đồng bộ, bộ điều khiển cần tham số đó là đạo hàm của sai số \mathbf{e}^* như công thức:

$$\dot{\mathbf{e}}^* = \dot{\mathbf{e}} + \Gamma \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (13)$$

Trong đó, $\dot{\mathbf{e}} = [\dot{e}_1, \dot{e}_2, \dot{e}_3]^T$, với:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{e}_1 - \dot{e}_2 \\ \dot{e}_2 = \dot{e}_2 - \dot{e}_3 \\ \dot{e}_3 = \dot{e}_3 - \dot{e}_1 \end{cases} \quad (14)$$

Thuật toán điều khiển trượt đồng bộ dựa trên thuật toán điều khiển trượt truyền thống được đề xuất theo hàm trượt như phương trình:

$$\mathbf{s}^* = \dot{\mathbf{e}}^* + \Lambda \mathbf{e}^* = \dot{\mathbf{q}}_a - \dot{\mathbf{q}}_{ar}^* \quad (15)$$

Trong đó, $\dot{\mathbf{q}}_{ar}^* = \dot{\mathbf{q}}_{da} - \Lambda \mathbf{e}^*$ và có thể suy ra thêm phương trình:

$$\dot{\mathbf{s}}^* = \ddot{\mathbf{q}}_a - \ddot{\mathbf{q}}_{ar}^* \quad (16)$$

Bộ điều khiển trượt đồng bộ cho tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do 3-RRR khi bỏ qua nhiễu ngoại lực và lực ma sát như phương trình:

$$\boldsymbol{\tau}_a = \mathbf{M}_a \ddot{\mathbf{q}}_{ar}^* + \mathbf{C}_a \dot{\mathbf{q}}_{ar}^* - \mathbf{A} \mathbf{s}^* - \mathbf{K} \text{sign}(\mathbf{s}^*) \quad (17)$$

Trong đó, $\ddot{\mathbf{q}}_{ar}^* = \ddot{\mathbf{q}}_{da} - \Lambda \dot{\mathbf{e}}^*$.

Như vậy, phương trình (17) đưa ra ở trên là thuật toán điều khiển trượt đồng bộ khi sử dụng sai số đồng bộ, sai số đồng bộ chéo vào trong bộ điều khiển trượt truyền thống.

5. Chứng minh tính ổn định

Để chứng minh tính ổn định của hệ thống, hàm Lyapunov được chọn như sau:

$$V = \frac{1}{2} s^{*T} M_a s^* \quad (18)$$

Đạo hàm V :

$$\dot{V} = \frac{1}{2} (s^{*T} \dot{M}_a s^* + s^{*T} \dot{M}_a s^* + s^{*T} \dot{M}_a s^*) \quad (19)$$

Theo tính chất của mô hình động lực học chúng ta có:

$$\dot{s}^{*T} M_a s^* = s^{*T} \dot{M}_a s^* \quad (20)$$

$$s^{*T} \dot{M}_a s^* = 2s^{*T} C_a s^* \quad (21)$$

Thay phương trình (20) và (21) vào (19):

$$\dot{V} = s^{*T} (C_a s^* + M_a \dot{s}^*)$$

$$\dot{V} = s^{*T} (C_a \dot{q}_a - C_a \dot{q}_{ar}^* + M_a \ddot{q}_a - M_a \ddot{q}_{ar}^*)$$

$$\dot{V} = s^{*T} [(M_a \ddot{q}_a + C_a \dot{q}_a) - (M_a \ddot{q}_{ar}^* + C_a \dot{q}_{ar}^*)] \quad (22)$$

Bây giờ thay phương trình (1) và (17) vào (22):

$$\dot{V} = s^{*T} [-\Delta\tau - K \text{sign}(s^*)] - s^{*T} A s^*$$

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^n (-k_i |s_i^*| - \Delta\tau_i s_i^*) - s^{*T} A s^* \quad (23)$$

Từ công thức (23) có thể thấy $-s^{*T} A s^* \leq 0$ và nếu chọn giá trị k_i thỏa mãn $k_i \geq |\Delta\tau_i|, i=1,2,3$ với $|\Delta\tau_i|$ là biên của lực để hệ thống ổn định tiệm cận, như vậy có thể thấy rõ hàm $\dot{V} \leq 0$. Từ đó, chúng ta kết luận hệ thống ổn định.

6. Mô phỏng kiểm chứng

Để kiểm nghiệm kết quả bộ điều khiển trượt đồng bộ, bài báo sử dụng các thông số của mô hình tay máy robot được mô phỏng từ mô hình cơ khí vẽ bằng phần mềm SolidWorks kết hợp Matlab/Simulink, nên có thể coi thông số mô hình gần chính xác với thực tế.

Mô hình tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do 3-RRR được lựa chọn có kích thước là $l_1 = 0.2m; l_2 = 0.2m; l_3 = 0.0722m$; khoảng cách giữa hai khớp chủ động là $0.5m$. Khối lượng và mô men quán tính của thanh l_1, l_2 là $m_1 = 0.503kg, m_2 = 0.551kg$ và $I_1 = 0.002kg.m^2, I_2 = 0.0025kg.m^2$; khối lượng và mô men quán tính khâu chấp hành cuối là $m_p = 0.171kg$ và $I_p = 0.000565kg.m^2$.

Mô phỏng thể hiện lực ma sát chứa chất nhớt và lực ma sát Coulomb được định nghĩa theo tài liệu [12, 13] tác động vào hệ thống như công thức:

$$F_a = F_{ci} \text{sign}(\dot{q}_a) + F_{vi} \dot{q}_a \quad (24)$$

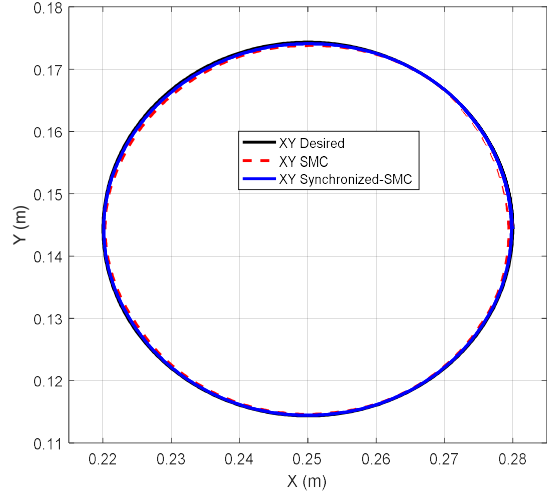
Với: $F_a = [F_{a1}, F_{a2}, F_{a3}]^T; F_{ci} = 0.02; F_{vi} = 0.02$.

Tại thời điểm $t=1s$, để thể hiện quá trình mang tải của tay máy robot khi làm việc, khối lượng và mô men quán tính của khâu chấp hành cuối được cộng thêm một lượng bằng 10 lần khối lượng và mô men quán tính ban đầu. Trong quá trình mô phỏng, tay máy robot bị tác động bởi các nhiễu với lực tác động

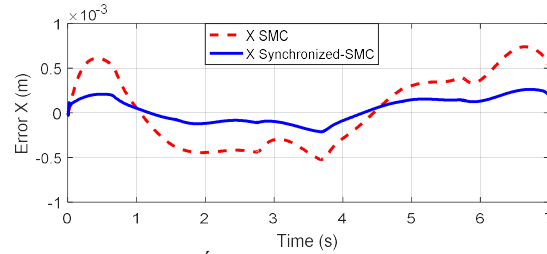
$d(t) = d_1(t) + d_2(t)$. Trong đó, tại thời điểm $t=2s$

$d_1(t) = [0.001, 0.001, 0.001]^T$ và tại thời điểm $t=0$

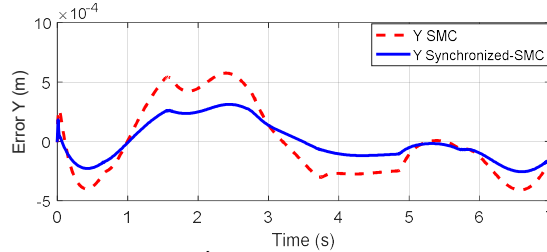
$d_2(t) = [d_c, d_c, d_c]^T$, với $d_c = 0.03 \cos(2t)$.



H.2 Kết quả điều khiển bám theo đường tròn của các bộ điều khiển



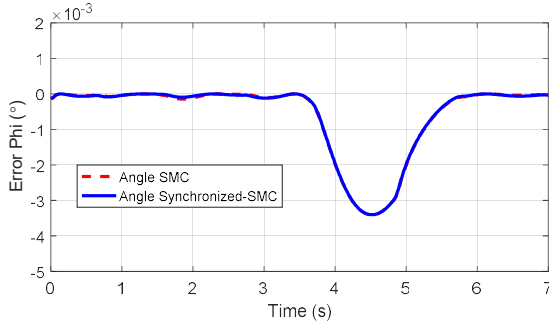
H.3 So sánh sai số quỹ đạo trục x



H.4 So sánh sai số quỹ đạo trục y

Mô phỏng thực hiện điều khiển tay máy robot song song phẳng 3-RRR theo quỹ đạo chuyển động của khâu chấp hành cuối được chọn là hình tròn bán kính $0.03m$ có tâm trong hệ tọa độ Cartesian là $(0.25; 0.1443)$, vị trí tọa độ ban đầu điểm P của khâu chấp hành cuối là $(0.28; 0.1443)$ và góc xoay ban đầu $\phi_p = 0^\circ$. Thời gian mô phỏng là $7s$ để khâu chấp hành cuối chạy được một vòng tròn với quỹ đạo đặt như phương trình:

$$\begin{cases} x_d = 0.25 + 0.03 \cos(t) \\ y_d = \frac{0.5\sqrt{3}}{6} + 0.03 \sin(t) \end{cases} \quad (25)$$

H. 5 Sai số theo góc quay ϕ_p của khâu chấp hành cuối

Bảng 1: So sánh sai số trung bình toàn phương theo trục x và trục y

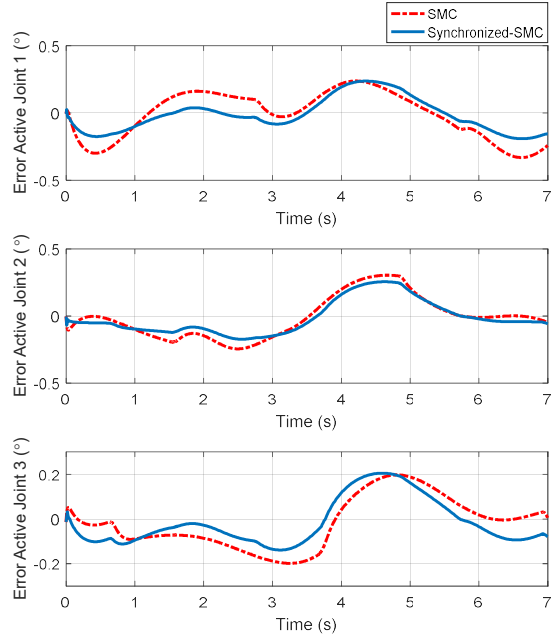
Bộ điều khiển	Sai số E_{RMSE} (m)	Độ giảm sai số của điều khiển trượt đồng bộ
Điều khiển trượt truyền thống	5.160372×10^{-4}	56.9797 %
Điều khiển trượt đồng bộ	2.220005×10^{-4}	x

Bảng 2: So sánh sai số trung bình toàn phương theo góc ϕ_p

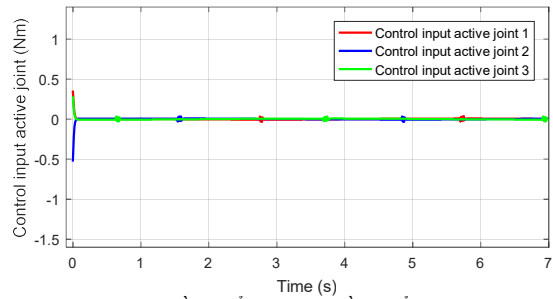
Bộ điều khiển	Sai số $E_{\phi RMSE}$ (°)	Độ giảm sai số của điều khiển trượt đồng bộ
Điều khiển trượt truyền thống	1.2029×10^{-3}	0.4484696 %
Điều khiển trượt đồng bộ	1.1975×10^{-3}	x

Để kiểm nghiệm ưu điểm của bộ điều khiển trượt đồng bộ đề xuất, bộ điều khiển trượt truyền thống được thiết kế và so sánh trên cùng đồ thị, và chịu sự tác động các lực nhiễu, lực ma sát và mang phụ tải như đã trình bày ở trên như nhau. Với: $K = 1.1 \times I_{3 \times 3}$, $\Lambda = 7 \times I_{3 \times 3}$, $\Phi = [0.5, 0.5, 0.5]^T$ chung cho cả hai bộ điều khiển.

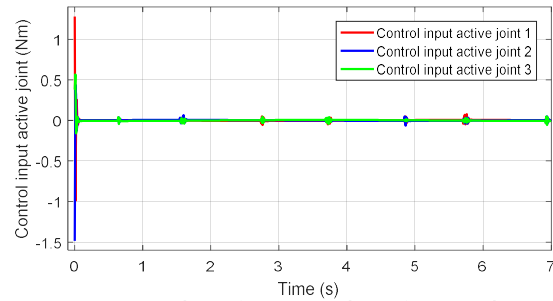
Kết quả mô phỏng bám theo quỹ đạo hình tròn của các bộ điều khiển được vẽ trên H. 2. Từ kết quả mô phỏng trên H. 3 đến H. 5 có thể nhận thấy điều khiển trượt đồng bộ cho kết quả bám tốt hơn theo sai số trục x, trục y cũng như góc quay ϕ_p của khâu chấp hành cuối. Tại các thời điểm sai số tăng hoặc giảm nhiều thì bộ điều khiển trượt đồng bộ nhờ sử dụng sai số đồng bộ, sai số đồng bộ chéo mà hội tụ được sai số chung của hệ thống nhanh hơn bộ điều khiển trượt truyền thống.



H. 6 Sai số tại các khớp chủ động của mô hình thực tế so với mô hình động học



H. 7 Mô men điều khiển của bộ điều khiển trượt



H. 8 Mô men điều khiển của bộ điều khiển trượt đồng bộ

Để làm rõ hơn việc so sánh kết quả bám quỹ đạo đặt, sai số trung bình toàn phương (Root Mean Square Error – RMSE) được đưa ra như tài liệu [14]:

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (e_x^2(j) + e_y^2(j))} \quad (26)$$

$$E_{\phi RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e_{\phi p}^2(j)} \quad (27)$$

Trong đó: E_{RMSE} là sai số trung bình toàn phương theo trục x và trục y; $E_{\phi RMSE}$ là sai số trung bình toàn phương theo góc ϕ_p của khâu chấp hành cuối; N : Số lượng giá trị lấy mẫu; $e_x(j), e_y(j)$: Sai số theo trục x và trục y; $e_{\phi_p}(j)$: Sai số theo góc ϕ_p trong hệ tọa độ Cartesian.

Kết quả so sánh sai số trung bình toàn phương của các bộ điều khiển được trình bày trong Bảng 1 và Bảng 2. Trong Bảng 1, sai số trung bình toàn phương theo trục x và trục y của bộ điều khiển trượt đồng bộ giảm được 56.9797 % còn sai số trung bình toàn phương theo góc ϕ_p của bộ điều khiển trượt đồng bộ giảm được 0.4484696 % so với bộ điều khiển trượt truyền thống. Kết quả sai số tại các khớp chủ động của mô hình thực tế so với mô hình động học được thể hiện trên H.6 cho thấy sự thay đổi về giá trị sai số của bộ điều khiển trượt đồng bộ ít thay đổi hơn bộ điều khiển trượt truyền thống. Trên H.7 và H. 8 thể hiện mô men điều khiển của hai bộ điều khiển đều có giá trị rất nhỏ và gần như nhau.

7. Kết luận

Bài báo đã trình bày về thuật toán điều khiển trượt đồng bộ dựa trên hệ tọa độ khớp chủ động của tay máy robot song song phẳng ba bậc tự do loại 3-RRR. Thuật toán điều khiển trượt đồng bộ đã khắc phục được nhược điểm của bộ điều khiển trượt truyền thống đối với các loại tay máy robot có động học song song. Tính ổn định của hệ thống được chứng minh theo lý thuyết Lyapunov. Các kết quả mô phỏng cho thấy rõ sai số của bộ điều khiển trượt đồng bộ nhỏ hơn so với bộ điều khiển trượt truyền thống. Điều này chứng tỏ các sai số đồng bộ, sai số đồng bộ chéo khi được sử dụng trong thuật toán điều khiển trượt truyền thống phù hợp với mô hình động học khép kín của máy robot song song phẳng ba bậc tự do loại 3-RRR.

Lời ghi nhận

Công việc nghiên cứu của bài báo được hỗ trợ kinh phí từ đề tài cấp Bộ Giáo dục & Đào tạo, mã số KYTH-17 năm 2017.

Tài liệu tham khảo

- [1] Đào Văn Hiệp, *Robot công nghiệp*, NXB Khoa Học và Kỹ Thuật, 2004.
- [2] Merlet J. P., *Parallel Robots*, 2nd ed. Springer, 2006.
- [3] Kok-Meng Lee, Dharman K. Shah, "Dynamic Analysis of a Three-Degrees-of-Freedom In-Parallel Actuated Manipulator", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 4, no. 3, pp. 361-367, Jun. 1988.
- [4] Lê Tiến Dũng, Đoàn Quang Vinh, "Phân tích

động học và các cấu hình kỳ dị của tay máy robot song song phẳng hai bậc tự do", *Chuyên san Kỹ Thuật Điều Khiển & Tự Động Hóa, Tạp chí Tự động hóa ngày nay*, số 8, tr. 26-32, 2013.

- [5] Lei Liu, Quanmin Zhu, Lei Cheng, Yongji Wang, Dongya Zhao, *Applied Methods and Techniques for Mechatronic Systems*. Springer, 2014.
- [6] Quang Dan Le, Hee-Jun Kang, Tien Dung Le, "Adaptive Extended Computed Torque Control of 3 DOF Planar Parallel Manipulators Using Neural Network and Error Compensator". *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9773, pp. 437-448, 2016.
- [7] Sun D, Mills J.K., "Adaptive synchronized control for coordination of multi robot assembly tasks". *IEEE Trans Robot Autom*, 18(4), pp. 498-510, 2002.
- [8] Sun D, Li S, Gao F, Zhu Q. "Robust adaptive terminal sliding mode-based synchronised position control for multiple motion axes systems". *IET Control Theory Appl*, vol. 3, no. 1, pp. 136-150, 2009.
- [9] Sun D, "Position synchronization of multiple motion axes with adaptive coupling control". *Automatica* 39, pp. 997-1005, 2003.
- [10] Yuan Yuan Cao, Guoqin Gao, Xintong Wu, "Chattering-free sliding mode synchronization control for a hybrid mechanism". *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9(7), pp. 1-11, 2017.
- [11] G. Yuzheng, W. Peng-Yung, "An adaptive fuzzy sliding mode controller for robotic manipulators". *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, vol. 33, pp. 149-159, 2003.
- [12] Tien Dung Le, Hee-Jun Kang, "An Adaptive Tracking Controller for Parallel Robotic Manipulators Based on Fully Tuned Radial Basic Function Networks". *Neurocomputing - Elsevier*, vol. 137, pp. 12-23, 2014.
- [13] Tien Dung Le, Hee-Jun Kang, Young-Soo Suh, "Chattering-Free Neuro-Sliding Mode Control of 2-DOF Planar Parallel Manipulators". *International Journal of Advanced Robotic Systems*. No. Robot Arm issue, pp. 1-15, 2013.
- [14] Weiwei Shang, Shuang Cong, Shilong Jiang, "Synchronization control of a parallel manipulator with redundant actuation in the task space", *International Journal of Robotics and Automation*, vol. 26, no. 4, pp. 432-440, 2011.

Lê Tiến Dũng sinh năm 1981. Ông nhận bằng Thạc sĩ chuyên ngành *Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa* năm 2009 tại Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng.



đoán lỗi trong các hệ thống điều khiển tự động, Điều khiển các cơ cấu động học song song.

Năm 2013, ông nhận bằng Tiến sĩ *Kỹ thuật điện - Tự động hóa* tại Đại học Ulsan, Hàn Quốc. Hiện ông đang là Phó Trưởng Khoa Điện, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng. Hướng nghiên cứu chính của ông là Tự động hóa, Điều khiển động cơ điện, Robot công nghiệp, Chẩn

đoán lỗi trong các hệ thống điều khiển tự động, Điều khiển các cơ cấu động học song song.



Đoàn Quang Vinh tốt nghiệp Kỹ sư năm 1986 tại Viện nghiên cứu Cơ khí và Kỹ thuật điện ở Pilsner, Czechoslovakia. Tốt nghiệp Tiến sĩ năm 1996 tại Đại học West Bohemia, Cộng hòa Séc. Được phong học hàm Phó Giáo sư năm 2004. Hiện

nay ông đang là giảng viên trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, giữ chức vụ Phó Giám đốc Đại học Đà Nẵng.



Dương Tấn Quốc sinh năm 1986. Ông tốt nghiệp Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng năm 2009 chuyên ngành *Điện kỹ thuật* và nhận bằng Thạc sĩ chuyên ngành *Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa* tại Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng năm 2017. Hiện nay ông là Giảng viên tại

Khoa Điện – Điện Tử, Đại học Duy Tân. Hướng nghiên cứu chính là mô hình hóa, điện tử công suất và tay máy robot công nghiệp.