

**ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT DỪNG NHANH VỚI ĐẠO HÀM CẤP PHÂN SỐ  
CỦA TAY MÁY ĐÔI**  
FRACTIONAL-ORDER TERMINAL SLIDING MODE CONTROL  
OF DUAL ARM MANIPULATORS

**LÊ ANH TUẤN**

*Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam*

*Email liên hệ: tuanla.ck@vimaru.edu.vn*

**Tóm tắt**

*Dựa trên mô hình động lực tay máy đôi tổng quát cho hệ 2n bậc tự do kể đến đàn nhớt phi tuyến ở các khớp, chúng tôi đề xuất một phiên bản nâng cao của điều khiển trượt sử dụng đạo hàm cấp phân số và ổn định dừng Lyapunov. Chất lượng và tính bền vững của bộ điều khiển được kiểm chứng bằng lý thuyết ổn định Mittag-Leffler và mô phỏng số.*

**Từ khóa:** Điều khiển trượt dừng nhanh, rô bốt tay đôi, ổn định Mittag-Leffler.

**Abstract**

*On the basis of dynamic model of 2n DOFs dual arm robots considering nonlinear viscoelasticity at joints, we propose an advanced version of sliding mode control for dual arm robots using fractional derivative and terminal Lyapunov stability. The effectiveness and robustness of controller are investigated by utilizing Mittag-Leffler theory and numerical simulation.*

**Keywords:** Fast terminal sliding mode control, dual-arm robots, Mittag-Leffler stability.

**1. Mở đầu**

Tay máy đôi được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp chế tạo và lắp ráp, trong các dây chuyền sản xuất tự động. Nó có thể làm việc trong môi trường độc hại như nhà máy điện hạt nhân, các phòng thí nghiệm độc học để thay thế vai trò của con người. Là rô bốt phục vụ (servire robots), nó có thể ứng xử giống người, phục vụ con người trong đời sống thường nhật (daily anthropomorphic life). Đặc biệt, nó được sử dụng trong phẫu thuật y học, vi phẫu, và chăm sóc sức khỏe.

Có nhiều công trình đã công bố về điều khiển tay máy đôi sử dụng các kỹ thuật khác nhau: từ cơ bản như hồi tiếp tuyến tính hóa [1], tựa thụ động [2], điều khiển trượt [3 & 4], cho đến các kỹ thuật hiện đại như logic mờ [4], mạng nơ ron [5]. Công trình này phát triển một phiên bản khác của điều khiển trượt. Chúng tôi kết hợp điều khiển trượt với giải tích phân số. Ở đó, cấu trúc điều khiển chứa đạo hàm cấp phân số của mặt trượt và tín hiệu phản hồi. Thuật toán điều khiển được thiết kế dựa trên mô hình toán tay máy đôi có kể đến đàn nhớt phi tuyến ở các khớp đặc trưng bởi số mũ cấp phân số và đạo hàm cấp phân số của chuyển vị quay. Khác với kỹ thuật trượt truyền thống, chúng tôi sử dụng một phiên bản nâng cao cho phép các đáp ứng hội tụ tiệm cận với thời gian hội tụ hữu hạn. Các kết quả mới nhất của giải tích phân số được sử dụng để phân tích ổn định hệ thống điều khiển như lý thuyết Mittag-Leffler, ổn định Lyapunov dừng.

Bài báo này được cấu trúc thành năm mục. Mục 2 mô tả mô hình toán tay máy đôi dạng tổng quát 2n bậc tự do có kể đến đàn nhớt phi tuyến ở các khớp. Mục 3 xây dựng luật điều khiển để dẫn động và ổn định chuyển động tay máy dựa trên nền tảng trượt và đạo hàm cấp phân số. Phân tích và chứng minh ổn định của thuật toán điều khiển cũng được trình bày trong mục này. Để kiểm chứng chất lượng của hệ thống điều khiển, Mục 4 mô phỏng số các đáp ứng, áp dụng cho tay máy đôi 4 bậc tự do, được lập trình và chạy trên môi trường MATLAB/Simulink. Phân tích chất lượng tín hiệu ra được thảo luận trong mục này. Cuối cùng, các kết luận và kiến nghị được trình bày trong Mục 5.

**2. Mô hình toán**

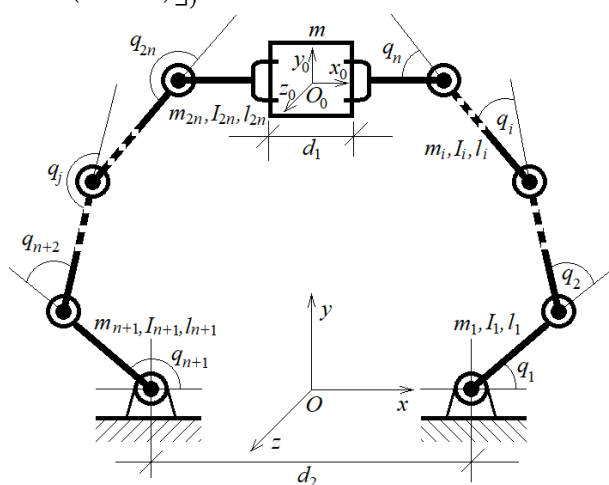
Sơ đồ tính tay máy đôi cho trên Hình 1, mỗi tay có n bậc tự do. Mỗi tay gồm r khâu và n khớp cầu. Mỗi khâu đặc trưng bởi khối lượng  $m_i$ , mô men quán tính  $I_i$ , chiều dài  $l_i$ , và  $k_i$  là khoảng cách từ trọng tâm của khâu đến khớp xoay tương ứng. Rô bốt mang vật khối lượng m di chuyển đến đích theo quỹ đạo yêu cầu. Như vậy, 2r khâu có 2n bậc tự do tương ứng với 2n tọa độ suy rộng

$\mathbf{q} = [q_i]^T \in \mathbb{R}^{2n}$ . Để quay khớp, 2n động cơ servo được trang bị ứng với tín hiệu vào là mô men

quay ở mỗi khớp  $\mathbf{T} = [T_i]^T \in \mathbb{R}^{2n}$ . Phương trình vi phân mô tả chuyển động của rô bốt viết dưới dạng ma trận như sau:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\boldsymbol{\mu}, D_t^\alpha \mathbf{q})D_t^\alpha \mathbf{q} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) + \mathbf{T} + \mathbf{D}, \quad (1)$$

với  $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$  là ma trận khối lượng,  $\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \mathbf{M}^T(\mathbf{q})$  là ma trận xác định dương thỏa mãn  $\mathbf{q}^T \mathbf{M}(\mathbf{q}) \mathbf{q} > 0 \forall \mathbf{q} \in \mathbb{R}^{2n}$ .  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$  là ma trận Coriolis hướng kính.  $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{2n}$  là véc tơ trọng trường.  $\mathbf{J}(\mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$  là ma trận Jacobi.  $\mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^{2n}$  là véc tơ các lực tương tác giữa vật thể và hai tay gắp.  $\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{2n}$  là véc tơ mô men điều khiển ở các khớp.  $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{2n}$  là véc tơ nhiễu ngoài.  $\mathbf{B}(\boldsymbol{\mu}, D_t^\eta \mathbf{q}) \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$  là ma trận cản đàn nhớt chứa số mũ cấp phân số và đạo hàm cấp phân số, cụ thể:  $\boldsymbol{\mu} = [\mu_i]^T \in \mathbb{R}^{2n}$ ,  $0 < \mu_i < 1$  là cấp số mũ,  $0 < \eta < 1$  là cấp đạo hàm, và  $i = 1 - 2n$ . Mỗi thành phần cản có dạng  $B_i = b_i |D_t^{\eta_i} q_i|^{2\mu_i} D_t^{\eta_i} q_i$  với  $D_t^{\eta_i} q_i = \frac{d^{\eta_i} q_i}{dt^{\eta_i}}$  là đạo hàm cấp phân số  $\eta_i$  của  $q_i$  theo thời gian. Thành phần  $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{B}(\boldsymbol{\mu}, D_t^\eta \mathbf{q})$  là ma trận phản đối xứng thỏa mãn  $\mathbf{q}^T \left\{ \dot{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) - 2 \left[ \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{B}(\boldsymbol{\mu}, D_t^\eta \mathbf{q}) \right] \right\} \mathbf{q} = 0 \forall \mathbf{q} \in \mathbb{R}^{2n}$ .



Hình 1. Sơ đồ tính tay máy đôi 2n bậc tự do

### 3. Thuật toán điều khiển

Dựa trên bài toán động học ngược, ta xác định được góc quay yêu cầu  $\mathbf{q}_d(t)$  tại các khớp từ quỹ đạo chuyển động của tải  $m$ . Mục này đề xuất thuật toán điều khiển trượt dừng nhanh với đạo hàm cấp phân số (fractional-order fast terminal sliding mode control) để dẫn góc quay  $\mathbf{q}(t)$  của các khâu tới góc quay mong muốn  $\mathbf{q}_d(t)$ . Tín hiệu ra  $\mathbf{q}(t)$  được ổn định theo hai pha: Đầu tiên, nó hội tụ nhanh đến mặt trượt với thời gian hữu hạn bởi kỹ thuật trượt hội tụ nhanh (fast terminal SMC) [6]. Sau đó, tín hiệu ra bị đẩy đến vị trí yêu cầu trên mặt trượt theo nghĩa ổn định Mittag-Leffler [7]. Luật điều khiển được phát biểu thông qua định lý sau:

**Định lý 1:** Cấu trúc điều khiển FO-FT-SMC:

$$\mathbf{T} = \mathbf{M}(\mathbf{q}) \left\{ \ddot{\mathbf{q}}_d - D_t^{1-\alpha} \left[ \boldsymbol{\beta}(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d) + \boldsymbol{\beta} \mathbf{s} + \boldsymbol{\lambda} \mathbf{s}^{q/p} + \mathbf{K} \operatorname{sgn}(\mathbf{s}) \right] \right\} - \mathbf{J}^T(\mathbf{q}) \mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) - \mathbf{D} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\boldsymbol{\mu}, D_t^\eta \mathbf{q}) D_t^\eta \mathbf{q} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (2)$$

Ổn định tiệm cận tín hiệu ra của mô hình động lực tay máy đôi (1) với thời gian hội tụ hữu hạn với mọi ma trận hệ số điều khiển xác định dương  $\boldsymbol{\beta} = \operatorname{diag}(\beta_1, \dots, \beta_{2n})$ ,  $\boldsymbol{\lambda} = \operatorname{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_{2n})$ ,  $\mathbf{K} = \operatorname{diag}(K_1, \dots, K_{2n})$  đồng thời  $q$  và  $p$  là những số lẻ dương thỏa mãn  $q > p$ . Mặt trượt chứa đạo hàm cấp phân số, xác định bởi:

$$\mathbf{s} = D_t^\alpha (\mathbf{q} - \mathbf{q}_d) + \boldsymbol{\beta} (\mathbf{q} - \mathbf{q}_d), \quad (3)$$

với  $\mathbf{s} = \mathbf{s}(t) \in \mathbb{R}^{2n}$ ,  $D_t^\alpha$  là đạo hàm cấp phân số  $\alpha \in (0,1)$  theo thời gian.

**Chứng minh:** Ta chứng minh hệ mạch kín tạo bởi mô hình rô bốt (1) dẫn động bởi luật điều khiển (2) ổn định tiệm cận dừng theo nghĩa Mittag-Leffler. Chúng tôi sẽ sử dụng các bổ đề và hệ quả về giải tích phân số và ổn định Lyapunov nâng cao để chứng minh định lý trên:

**Bổ đề 1 [8]:** Nếu tồn tại hàm liên tục, khả vi, xác định dương  $V(\mathbf{x})$  với  $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$  là véc tơ trạng thái sao cho:

$$\dot{V}(\mathbf{x}) \leq -\chi V(\mathbf{x}) - \delta V^\varrho(\mathbf{x}) \quad \forall t > t_0 \quad (4)$$

với mọi hằng  $0 < \varrho < 1$ ,  $\chi > 0$ , và  $\delta > 0$ , thì  $V(\mathbf{x})$  hội tụ tiệm cận với thời gian hội tụ hữu hạn:

$$t_s \leq \frac{1}{\chi(1-\varrho)} \ln \frac{\chi V^{1-\varrho}(\mathbf{x}(t_0)) + \delta}{\delta} \quad (5)$$

Ở đây,  $t_0$  là thời điểm đầu.

**Bổ đề 2 [9]:** Gọi  $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$  là véc tơ của các hàm thực, liên tục, khả vi. Với mọi  $t \geq t_0$ , bất đẳng thức sau:

$$D_t^\beta \left( \frac{1}{2} \mathbf{x}^T(t) \mathbf{x}(t) \right) \leq \mathbf{x}^T(t) D_t^\beta \mathbf{x}(t) \quad (6)$$

thỏa mãn với mọi cấp phân số  $\beta \in (0,1)$ .

Áp dụng bổ đề 2 cho hệ vi phân cấp phân số có dạng:

$$D_t^\alpha \mathbf{x}(t) = f(\mathbf{x}(t)) \quad (7)$$

với hàm Lyapunov:

$$V(\mathbf{x}(t)) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T(t) \mathbf{x}(t), \quad (8)$$

ta được hệ quả sau:

**Hệ quả 1 [10]:** Xét hệ vi phân phân số (7) với  $\alpha \in (0,1)$  và  $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$  là véc tơ trạng thái.

Nếu điều kiện sau thỏa mãn:

$$\mathbf{x}^T(t) f(\mathbf{x}(t)) \leq 0 \quad (9)$$

thì gốc  $\mathbf{x} = \mathbf{0}$  của hệ (7) ổn định. Và nếu:

$$\mathbf{x}^T(t) f(\mathbf{x}(t)) < 0 \quad (10)$$

thì hệ (7) ổn định tiệm cận quanh điểm cân bằng  $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ .

Bây giờ, ta phân tích ổn định của mặt trượt (3) bằng khảo sát hàm Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{s} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{2n} s_i^2 \quad (11)$$

có đạo hàm:

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T \dot{\mathbf{s}} = \sum_{i=1}^{2n} s_i \dot{s}_i. \quad (12)$$

Sử dụng tính chất sau của đạo hàm cấp phân số [11]:

$$D_t^\alpha (q(t)) = D_t^{\alpha-2} \left( \frac{dq^2(t)}{dt^2} \right), \quad (13)$$

ta được đạo hàm của mặt trượt (3) theo thời gian:

$$\dot{\mathbf{s}} = D_t^{\alpha-1} (\ddot{\mathbf{q}} - \ddot{\mathbf{q}}_d) + \beta (\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d) \quad (14)$$

Thay (14) vào (12) với lưu ý (1), ta được:

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T \left\{ D_t^\alpha \left( \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{q}) \begin{bmatrix} \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) + \mathbf{T} + \mathbf{D} \\ -\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{B}(\boldsymbol{\mu}, D_t^\eta \mathbf{q}) D_t^\eta \mathbf{q} - \mathbf{G}(\mathbf{q}) \end{bmatrix} - \ddot{\mathbf{q}}_d \right) + \boldsymbol{\beta}(\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d) \right\} \quad (15)$$

Thay luật điều khiển (2) vào đạo hàm Lyapunov (15) dẫn tới:

$$\dot{V} = -\mathbf{s}^T \boldsymbol{\beta} \mathbf{s} - \mathbf{s}^T \boldsymbol{\lambda} \mathbf{s}^{q/p} - \mathbf{s}^T \mathbf{K} \operatorname{sgn}(\mathbf{s}) \quad (16)$$

suy ra:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\sum_{i=1}^{2n} \beta_i s_i^2 - \sum_{i=1}^{2n} \lambda_i s_i^{(q/p)+1} - \sum_{i=1}^{2n} K_i |s_i| \\ &\leq -\beta_{\min} \sum_{i=1}^{2n} s_i^2 - \lambda_{\min} \sum_{i=1}^{2n} s_i^{(q/p)+1} - \sum_{i=1}^{2n} K_i |s_i| \\ &= -2\beta_{\min} V(\mathbf{x}) - 2\lambda_{\min} V(\mathbf{x})^{\frac{(q/p)+1}{2}} - \sum_{i=1}^{2n} K_i |s_i| \\ &\leq -2\beta_{\min} V(\mathbf{x}) - 2\lambda_{\min} V(\mathbf{x})^{\frac{(q/p)+1}{2}} \end{aligned} \quad (17)$$

với  $\beta_{\min} = \min(\beta_1, \dots, \beta_{2n})$ . Áp dụng Bổ đề 1 cho  $\chi = 2\beta_{\min}$ ,  $\delta = 2\lambda_{\min}$ , và  $2\vartheta = (q/p) + 1$ , ta kết luận rằng mặt trượt ổn định tiệm cận tới không với thời gian hội tụ nhanh, hữu hạn:

$$t_s = \frac{1}{\beta_{\min} (1 - q/p)} \ln \frac{2\beta_{\min} V^{2/p}(\mathbf{x}(t_o)) + 2\lambda_{\min}}{2\lambda_{\min}} \quad (18)$$

Khi mặt trượt (3) đã hội tụ số mũ dừng (terminal exponential stability), tín hiệu ra cũng hội tụ tiệm cận. Thật vậy, phương trình (3) khi mặt trượt ổn định tiệm cận dẫn đến:

$$D_t^\alpha (\mathbf{q} - \mathbf{q}_d) + \boldsymbol{\beta}(\mathbf{q} - \mathbf{q}_d) = \mathbf{0} \quad (19)$$

Hay:

$$D_t^\alpha \mathbf{e}(t) = f(\mathbf{e}(t)) = -\boldsymbol{\beta} \mathbf{e}(t) \quad (20)$$

Áp dụng Hệ quả 1 cho  $\mathbf{x}(t) = \mathbf{e}(t)$  và nhận thấy rằng:

$$\mathbf{e}(t)^T f(\mathbf{e}(t)) = -\mathbf{e}(t)^T \boldsymbol{\beta} \mathbf{e}(t) \leq 0 \quad (21)$$

với mọi  $\mathbf{e}(t) = (\mathbf{q}(t) - \mathbf{q}_d(t)) \in \mathbb{R}^{2n}$ , ma trận xác định dương  $\boldsymbol{\beta} = \operatorname{diag}(\beta_i) \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ , và  $\beta_i > 0$ . Hệ quả 1 chỉ ra rằng sai số  $\mathbf{e}(t)$  ổn định theo nghĩa Mittag-Leffler có dạng hội tụ:

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{e}(0) E_\alpha(\boldsymbol{\beta} t^\alpha), \quad (22)$$

Ở đây,  $E_\alpha(z)$  là hàm Mittag-Leffler định nghĩa bởi:

$$E_\alpha(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(k\alpha + 1)} \quad (23)$$

với  $0 < \alpha < 1$ ,  $z \in \mathbb{C}$ , và  $\Gamma(\cdot)$  là hàm gamma. Ổn định Mittag-Leffler đồng nghĩa với ổn định tiệm cận. Vậy,  $\mathbf{q}(t)$  tiệm cận đến  $\mathbf{q}_d(t)$  khi  $t$  tiến đến vô cùng.

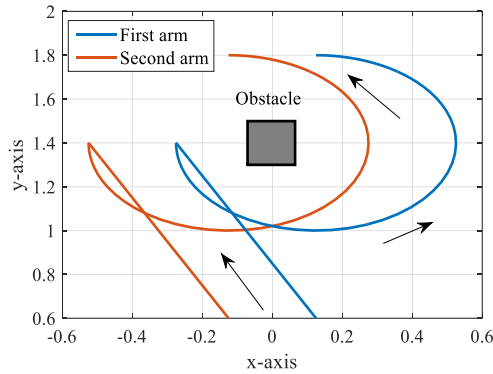
#### 4. Mô phỏng và kết quả

Để kiểm chứng chất lượng của bộ điều khiển đề xuất, chúng tôi mô phỏng hệ động lực (1) cho trường hợp 4 bậc tự do [4] dẫn động bởi luật điều khiển (2). Chi tiết mô hình động lực rút gọn cho hệ 4 bậc tự do, các tham số hệ thống, và điều kiện đầu, độc giả xem thêm ở tài liệu [4]. Các

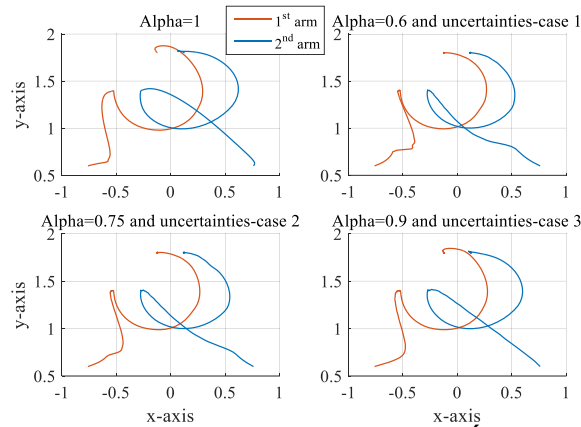
thông số về cân đản nhớt phi tuyến ở các khớp gồm  $b_i = 110$ ;  $\mu_i = 0, 4$ ;  $\eta_i = 0, 65$  ( $i = 1 - 4$ ). Các tham số của bộ điều khiển gồm:

$$\beta_1 = 5; \beta_2 = 4; \beta_3 = 4; \beta_4 = 3; \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 0, 05;$$

$$K_1 = 1; K_2 = K_3 = K_4 = 3; p = 2; q = 4; \varepsilon = 0, 05.$$



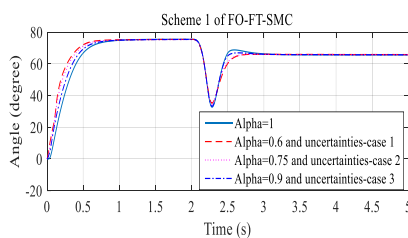
Hình 2. Quỹ đạo yêu cầu của tay gấp



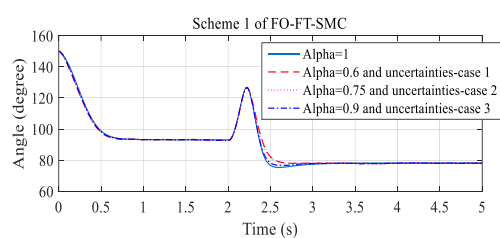
Hình 3. Quỹ đạo thực của tay gấp

Chúng tôi mô phỏng cho bốn trường hợp thay đổi cấp đạo hàm gồm  $\alpha = \{1; 0, 6; 0, 75; 0, 9\}$ . Ngoài ra, tính bền vững của hệ thống cũng được kiểm chứng xét đến tính bất ổn của các tham số (parametric uncertainties) gồm  $m + \Delta m$  với  $\Delta m = [0, 5 \ 1 \ 1, 5]$  và  $\mathbf{b} + \Delta \mathbf{b} = [b_i + \Delta b_j]^T$  ( $i = 1 - 4, j = 1 - 3$ ) với  $\Delta \mathbf{b} = [10 \ 25 \ 15]^T$ . Kết quả mô phỏng thể hiện trên các hình 2-7. Quỹ đạo yêu cầu cho trên Hình 2, hai tay gấp sẽ mang vật từ vị trí ban đầu  $(-0, 76; 0, 6)$  và  $(0, 76; 0, 6)$  đến đích  $(-0, 525; 1, 4)$  và  $(-0, 275; 1, 4)$  theo quỹ đạo là nửa vòng tròn tâm  $(0; 1, 4)$  bán kính 0,4 m.

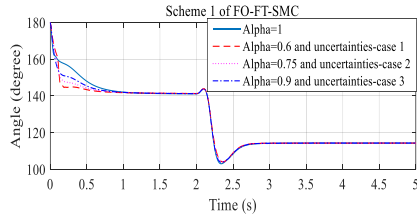
Quỹ đạo thực của hai tay gấp như Hình 3, nhìn chung nó bám quỹ đạo yêu cầu và tiến đến đích chính xác. Chuyển động quay của 4 khâu thể hiện trên các hình từ 4 đến 7 cho thấy nó bám góc quay yêu cầu và đảm bảo tính bền vững mặc cho có các yếu tố bất ổn về tham số hệ động lực.



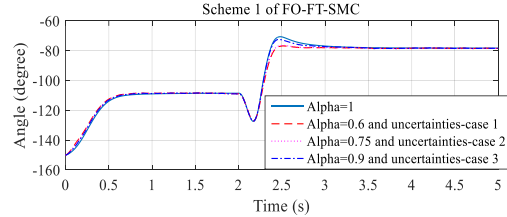
Hình 4. Góc quay khâu 1



Hình 5. Góc quay khâu 2



Hình 6. Góc quay khâu 3



Hình 7. Góc quay khâu 4

## 5. Kết luận

Công trình này đã thiết kế thành công một bộ điều khiển bền vững áp dụng cho rô bốt tay đôi dạng tổng quát  $2n$  bậc tự do. Bộ điều khiển dựa trên nền tảng kỹ thuật trượt SMC kết hợp với ổn định dừng Lyapunov, ổn định Mittag-Leffler, và đạo hàm cấp phân số. Bộ điều khiển được kiểm chứng thông qua mô phỏng với tay máy đôi 4 bậc tự do. Kết quả cho thấy bộ điều khiển làm việc tốt, ổn định tiệm cận tất cả các đáp ứng, bền vững với sự biến đổi rộng các tham số hệ động lực.

### Ghi nhận tài trợ:

Công trình này là sản phẩm của đề tài nghiên cứu khoa học cấp Trường hỗ trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, năm học 2018-2019.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] X. Yun, V. Kumar, An approach to simultaneous control of trajectory and interaction forces in dual-arm configurations, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 7 (5), pp. 618-625, 1991.
- [2] J. G. Lau, M. Arteaga, L. Munoz, V. Parra-Vega, On the control of cooperative robots without velocity measurements, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 12 (4), pp. 600-608, 2004.
- [3] N. Yagiz, Y. Hacioglu, Y. Z. Arslan, Load transportation by dual arm robot using sliding mode control, *Journal of Mechanical Science and Technology* 24 (5), pp. 1177-1184, 2010.
- [4] Y. Hacioglu, Y. Z. Arslan, N. Yagiz, MIMO fuzzy sliding mode controlled dual arm robot in load transportation, *Journal of the Franklin Institute* 348 (8), pp. 1886-1902, 2011.
- [5] W. Gueaieb, F. Karray, S. Al-Sharhan, A robust hybrid intelligent position/force control scheme for cooperative manipulators, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 12 (2), pp. 109-125, 2007.
- [6] X. Yu, Z. Man, Fast terminal sliding mode control design for nonlinear dynamical systems, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications* 49 (2), pp.261-264, 2002.
- [7] Y. Li, Y. Q. Chen, I. Podlubny, Mittag-Leffler stability of fractional order nonlinear dynamic systems, *Automatica* 45 (8), pp. 1965-1969, 2009.
- [8] S. Yu, X. Yu, B. Shirinzadeh, Z. Man, Continuous finite time control for robotic manipulators with terminal sliding mode, *Automatica* 41 (11), pp. 1957-1964, 2005.
- [9] Y. Hong, Y. Xu, J. Huang, Finite-time control for robot manipulators, *Systems & Control Letters* 46 (4), pp. 243-253, 2002.
- [10] N. A.-Camacho, M. A. D.-Mermoud, J. A. Gallegos, Lyapunov functions for fractional order systems, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 19 (9), pp. 2951-2957, 2014.
- [11] M. Chen, S. Shao, P. Shi, Robust adaptive control for fractional-order systems with disturbance and saturation, *ASME Press and John Wiley & Sons*, 2017.

Ngày nhận bài: 23/03/2019  
 Ngày nhận bản sửa: 02/04/2019  
 Ngày duyệt đăng: 03/04/2019