

PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN BỀN VỮNG MỚI CHO TAY MÁY ROBOT CÔNG NGHIỆP SỬ DỤNG KẾT HỢP BỘ QUAN SÁT TRƯỢT BẬC CAO THỜI GIAN CỐ ĐỊNH VỚI THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT

A NEW ROBUST CONTROL METHOD FOR ROBOTIC MANIPULATORS USING A COMBINATION OF A FIXED-TIME HIGH-ORDER SLIDING MODE OBSERVER AND FINITE-TIME SLIDING MODE CONTROL

Lê Tiến Dũng^{1*}, Võ Anh Tuấn², Nguyễn Ngọc Hoài Ân²

¹Trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng

²Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật – Đại học Đà Nẵng

*Tác giả liên hệ: ltdung@dut.udn.vn

(Nhận bài: 02/3/2021; Chấp nhận đăng: 28/4/2021)

Tóm tắt - Bài báo đề xuất một thuật toán điều khiển bền vững mới sử dụng kết hợp bộ quan sát trượt bậc cao thời gian cố định với thuật toán điều khiển trượt cho tay máy robot công nghiệp. Đầu tiên, một bộ quan sát trượt bậc cao được đề xuất để tính gần đúng những thành phần bất định. Sau đó, một thuật toán điều khiển trượt thời gian hữu hạn được thiết kế sử dụng mặt trượt đầu cuối nhanh toàn cục và luật điều khiển tiếp cận nhanh để đạt được sự hội tụ trong một thời gian hữu hạn toàn cục của hệ thống. Hệ thống điều khiển có được các ưu điểm như độ chính xác bám quỹ đạo cao, ít xảy ra hiện tượng rung động, hội tụ trong thời gian hữu hạn và bền vững trước các thành phần bất định. Tính ổn định và sự hội tụ của hệ thống điều khiển được chứng minh bằng lý thuyết Lyapunov. Các mô phỏng với một tay máy 3 bậc tự do được thực hiện để kiểm nghiệm tính hiệu quả và các ưu điểm của thuật toán điều khiển đề xuất.

Từ khóa - Điều khiển thời gian hữu hạn; Điều khiển thời gian cố định; Bộ quan sát trượt bậc cao; Điều khiển trượt đầu cuối nhanh; Phương pháp điều khiển dựa trên bộ quan sát.

1. Phần giới thiệu

Tay máy robot đã và đang được ứng dụng phổ biến trong hầu hết các lĩnh vực quân sự, khoa học, y tế, công nghiệp ô tô, thám hiểm đại dương, phẫu thuật, nông nghiệp, phát hiện bom v.v. Tuy nhiên, việc điều khiển tay máy robot hoạt động với độ chính xác cao và bền vững với các thành phần bất định vẫn luôn là một thách thức cho các nhà nghiên cứu. Bởi vì mô hình động học, động lực học của các tay máy robot phức tạp với các thành phần xen kẽ, độ phi tuyến cao, chịu ảnh hưởng của nhiễu loạn bên ngoài, sự thay đổi trọng tải, ma sát, nhiễu của cảm biến, v.v. Do đó, dường như không thể mô hình hóa một cách chính xác tất cả các thành phần của tay máy robot bằng các phương trình toán học.

Điều khiển trượt (Sliding Mode Control - SMC) là một trong những phương pháp điều khiển phi tuyến hiệu quả được sử dụng để điều khiển các hệ thống phi tuyến có sự tồn tại của các thành phần bất định, đặc biệt là tay máy robot [1]. Tuy nhiên, nhược điểm của nó là chỉ đảm bảo sự ổn định tiệm cận trong khi có nhiễu dao động tần số cao trong tín hiệu điều khiển đầu vào. Để đảm bảo sự hội tụ trong thời gian hữu hạn của các quỹ đạo trạng thái hệ thống, rất nhiều công trình nghiên cứu đã được thực hiện và đề

Abstract - This article proposes a new robust control strategy using a combination between a fixed-time high-order sliding mode observer (FxTHOSMO) and finite-time terminal sliding mode control (FnTSMC) for robotic manipulators. First, a FxTHOSMO is proposed to approximate the lumped uncertainties. Then, a FnTSMC algorithm is designed based on a finite-time global fast terminal sliding mode surface and fast reaching control law to establish a global finite-time convergence of the system. The hybrid control system provides superior characteristics such as high tracking accuracy, less chattering occurrence, finite-time convergence, and robustness against the lumped uncertainties. The stability and convergence of the control system are validated by using the Lyapunov theory. Computer simulations applied to a 3-DOF robotic manipulator are conducted to verify the effectiveness and outstanding properties of the proposed control algorithm.

Key words - Finite-Time Control; Fixed-Time Control; High-Order Sliding Mode Observer; Fast Terminal Sliding Mode Control; Observer-based Control Method.

xuất các giải pháp, trong đó có những công trình nghiên cứu về điều khiển trượt bậc cao (HSMC). Trong những nghiên cứu [2]-[4], phương pháp điều khiển trượt đầu cuối (Terminal SMC) đã được giới thiệu để đảm bảo độ chính xác bám quỹ đạo của các trạng thái hệ thống với sự ổn định trong thời gian hữu hạn. Với phương pháp TSMC, hiệu suất hội tụ được cải thiện đáng kể. Tuy nhiên, vấn đề kỹ dị có thể xuất hiện với một số thuật toán TSMC kinh điển. Có một số thuật toán TSMC được đề xuất dành cho các tay máy robot trong đó vấn đề kỹ dị đã được giải quyết hoàn toàn như thuật toán TSMC không kỹ dị (NTSMC) [5]. Bên cạnh đó, các thuật toán điều khiển trượt đầu cuối thời gian hữu hạn (FnTSMC) đã được đề xuất [6], [7] để có thể điều khiển các quỹ đạo trạng thái của hệ thống hội tụ đến điểm cân bằng trong một khoảng thời gian hữu hạn. Để tăng tốc độ ổn định và hiệu suất động học của TSMC và FnTSMC, các thuật toán điều khiển TSMC tác động nhanh (FTSMC) [8]-[10] và thuật toán điều khiển TSMC tác động nhanh toàn cục (GFTSMC) [11], [12] đã được phát triển. Ý tưởng chủ đạo của GFTSMC là thêm một thành phần tuyến tính để nhanh chóng buộc các quỹ đạo trạng thái hệ thống hội tụ đến mặt trượt trong thời gian ngắn. Thuật toán GFTSMC

¹ The University of Danang - University of Science and Technology (Tien Dung Le)

² The University of Danang - University of Technology and Education (Vo Anh Tuan, Nguyen Ngoc Hoai An)

đã được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng thực tế như điều khiển các tay máy robot [13], những tay máy robot được truyền động bằng dây đai kéo [14], hệ thống kính hiển vi [15], các hệ thống phi tuyến [11], v.v. Tuy nhiên, FTSMC hoặc GFTSMC là các thuật toán điều khiển dựa trên một mô hình động lực học của hệ thống, và không dễ dàng để có được một mô hình toán học chính xác do sự hiện diện của nhiều thành phần bất định của hệ thống. Hơn nữa, không thể loại bỏ hoàn toàn hiện tượng dao động trong tín hiệu điều khiển của thuật toán FTSMC hoặc GFTSMC.

Có một phương pháp hiệu quả có thể giải quyết cùng lúc hai tồn tại nêu trên đó là sử dụng một bộ quan sát tích hợp vào thuật toán điều khiển để tính gần đúng tổng các thành phần bất định ảnh hưởng đến hệ thống. Bằng cách cách này, những dao động tần số cao không chỉ được giảm đáng kể mà còn tăng tính bền vững của hệ thống điều khiển. Có nhiều bộ quan sát khác nhau đã được đề xuất để tính gần đúng các thành phần bất định như bộ quan sát trượt (SMO) [16], bộ quan sát dùng logic mờ (FLO) [17], bộ quan sát trượt bậc cao (HOSMO) [18], [19], bộ quan sát dùng mạng nơ-ron (NNO) [20], bộ quan sát khuếch đại (HGO) [21], bộ quan sát mở rộng (ETO) [22], v.v. Xét về tính bền vững, thiết kế đơn giản và khả năng ứng dụng thực tế, phương pháp sử dụng các bộ quan sát trượt bậc cao (HOSMO) không chỉ cung cấp khả năng chống lại các yếu tố bất định và nhiễu động bên ngoài mà còn giảm thiểu dao động tần số cao. Tuy nhiên, các bộ HOSMO thông thường không đảm bảo sự ổn định và hội tụ của hệ thống trong thời gian xác định.

Dựa trên những phân tích nêu trên, trong bài báo này trước hết đề xuất một bộ quan sát trượt bậc cao thời gian cố định (FxTHOSMO) mới để ước tính toàn bộ các thành phần bất định mà không cần biết trước các thông tin về chúng. Một thuật toán điều khiển trượt đầu cuối thời gian hữu hạn (FnTSMC) sau đó được thiết kế dựa trên phương trình mặt trượt đầu cuối nhanh toàn cục thời gian hữu hạn và luật điều khiển tiếp cận nhanh để thiết lập sự hội tụ trong thời gian hữu hạn toàn cục của hệ thống. Hệ thống điều khiển tích hợp có các đặc tính ưu việt như độ chính xác bám quỹ đạo cao, hội tụ trong thời gian hữu hạn và bền vững với những ảnh hưởng của các thành phần bất định. Tính ổn định trong thời gian hữu hạn và sự hội tụ của hệ thống điều khiển được chứng minh bằng cách sử dụng lý thuyết Lyapunov.

2. Các bổ đề cần thiết và mô hình toán học của tay máy robot

2.1. Các bổ đề cần thiết

Xem xét hệ thống sau đây:

$$\dot{x}(t) = f(t, x), x(0) = x_0 \quad (1)$$

Trong đó, $x \in R^n$, $f(x): \Delta$ là một hàm phi tuyến trên vùng lân cận mở $\Delta \subseteq R^n$ của điểm gốc, và $f(0) = 0$. Điểm gốc được giả định là điểm cân bằng của hệ (1).

Định nghĩa 1: Điểm gốc của hệ thống (1) được gọi là điểm ổn định thời gian hữu hạn toàn cục nếu nó ổn định tiệm cận toàn cục với hàm thời gian giới hạn $T(x_0)$, tức là có tồn tại $T_{\max} > 0$ sao cho $T(x_0)$ thỏa mãn điều kiện $T(x_0) < T_{\max}$.

Bổ đề 1 [11]: Xem xét phương trình vi phân sau đây:

$$\dot{q} = -\frac{2\alpha_0}{1+e^{-\eta_0(|q|-\varepsilon_0)}} q - \frac{2\beta_0}{1+e^{\mu_0(|q|-\varepsilon_0)}} \text{sig}(q)^{\alpha_0} \quad (2)$$

Trong đó, $\alpha_0, \beta_0, \eta_0, \mu_0$ là những hằng số thiết kế có giá trị dương, $0 < \alpha_0 < 1$, $\varepsilon_0 = (\beta_0/\alpha_0)^{1/(1-\alpha_0)}$, và $\text{sig}(q)^{\alpha_0} = |q|^{\alpha_0} \text{sgn}(q)$. Do đó, hệ thống (2) được thừa nhận là ổn định thời gian hữu hạn liên quan đến giá trị ban đầu $q(0)$ và thời gian hội tụ T_0 được mang lại như sau:

$$T_0 < \frac{\ln(|q(0)|) - \ln(\varepsilon_0)}{\alpha_0} + \frac{1}{\beta_0(1-\delta_0)} |\varepsilon_0|^{1-\alpha_0} \quad (3)$$

Bổ đề 2 [23]: Xem xét phương trình vi phân sau đây:

$$\dot{q} = -\alpha_0 \text{sig}(q)^{\eta_0} - \beta_0 \text{sig}(q)^{\lambda_0} \quad (4)$$

Trong đó, α_0, β_0 là các hằng số dương được chọn, $\text{sig}(q)^{\eta_0} = |q|^{\eta_0} \text{sgn}(q)$, $\eta_0 > 1$, $0 < \lambda_0 < 1$. $\eta_0 = 0.5(\varphi_0 + 1) + 0.5(\varphi_0 - 1)\text{sgn}(|q| - 1)$, và $\mu_0 = 0.5(\varphi_0 + \lambda_0) + 0.5(\varphi_0 - \lambda_0)\text{sgn}(|q| - 1)$. Khi đó, hệ thống (4) được thừa nhận là ổn định thời gian hữu hạn liên quan đến giá trị ban đầu $q(0)$ và thời gian hội tụ T_0 được mang lại như sau:

$$T_0 < \frac{1}{(\alpha_0 + \beta_0)(\varphi_0 - 1)} + \frac{1}{\beta_0(1-\lambda_0)} \ln\left(1 + \frac{\alpha_0}{\beta_0}\right) \quad (5)$$

2.2. Mô hình động lực học của tay máy robot

Xem xét mô hình động lực học của tay máy robot được thể hiện trong không gian khớp (Joint space) như sau:

$$M(p)\ddot{p} + C(p, \dot{p})\dot{p} + G(p) + F_r(\dot{p}) = \tau - \tau_d(t) \quad (6)$$

Trong đó, $p \in R^{3 \times 1}$, $\dot{p} \in R^{3 \times 1}$, và $\ddot{p} \in R^{3 \times 1}$ tương ứng với các vector vị trí, vận tốc và gia tốc trong không gian khớp nói. $M(p) \in R^{n \times n}$, $C(p, \dot{p}) \in R^{n \times n}$, và $G(p) \in R^{n \times 1}$ tương ứng với ma trận khối lượng, Coriolis và lực ly tâm, và lực hấp dẫn. $\tau \in R^{n \times 1}$, $F_r(\dot{p}) \in R^{n \times 1}$, và $\tau_d(t) \in R^{n \times 1}$ tương ứng với các vector của mô-men điều khiển, lực ma sát và nhiễu loạn.

Trên thực tế, để đạt được một mô hình động lực học chính xác của tay máy robot không phải là điều dễ dàng. Do đó, trong bài báo này giả định rằng:

$$\begin{cases} M(p) = \hat{M}(p) + dM(p) \\ C(p, \dot{p}) = \hat{C}(p, \dot{p}) + dC(p, \dot{p}) \\ G(p) = \hat{G}(p) + dG(p) \end{cases} \quad (7)$$

Trong đó, $\hat{M}(p) \in R^{n \times n}$, $\hat{C}(p, \dot{p}) \in R^{n \times n}$, và $\hat{G}(p) \in R^{n \times 1}$ tương ứng với các giá trị ước tính của các giá trị thực của $M(p)$, $C(p, \dot{p})$, và $G(p)$. $dM(p) \in R^{n \times 3}$,

$dC(p, \dot{p}) \in R^{n \times n}$, và $dG(p) \in R^{n \times 1}$ là những thành phần động lực học bất định.

Chúng ta đặt $x = [x_1^T, x_2^T]^T = [p^T, \dot{p}^T]^T$ và $u = \tau$; khi đó, mô hình động lực học của tay máy robot được mô tả dưới dạng mô hình không gian trạng thái như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a(x)u + b(x) + \Delta(x, d, t) \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó, $b(x) = -\hat{M}^{-1}(p)(\hat{C}(p, \dot{p})\dot{p} + \hat{G}(p))$ đại diện cho phần động lực học tính toán được; $a(x) = \hat{M}^{-1}(p)$ đại diện cho ma trận nghịch đảo của ma trận khối lượng; và $\Delta(x, d, t) = -\hat{M}^{-1}(p) \begin{pmatrix} F_r(\dot{p}) + dM(p)\ddot{p} \\ +dC(p, \dot{p})\dot{p} + dG(p) + \tau_d(t) \end{pmatrix}$ đại diện cho toàn bộ những thành phần bất định.

Giả định 1: Toàn bộ những thành phần bất định là hữu hạn và bị chặn trên bởi:

$$|\Delta(x, \Sigma, t)| < \bar{\Delta}, \quad (9)$$

Trong đó, $\bar{\Delta}$ là một hằng số dương.

Giả định 2: Đạo hàm bậc nhất của toàn bộ những thành phần bất định cũng là hữu hạn và bị chặn trên bởi:

$$|\dot{\Delta}(x, \Sigma, t)| \leq \Delta^*, \quad (10)$$

Trong đó, Δ^* là một hằng số dương.

3. Thiết kế bộ quan sát trượt bậc cao thời gian cố định

Bộ quan sát được thiết kế để xấp xỉ những thành phần bất định được mô tả như sau:

$$\begin{cases} \tilde{v} = v - x_2 \\ \dot{v} = a(x)u_d + b_n(x) + \hat{\Delta} \\ -\frac{2\alpha_3}{1+e^{-\eta_3(|\tilde{v}|-\varepsilon_3)}}\tilde{v} - \frac{2\beta_3}{1+e^{\mu_3(|\tilde{v}|-\varepsilon_3)}}\text{sig}(\tilde{v})^{\omega_3} \\ -\frac{2\alpha_4}{1+e^{-\eta_4(|\varpi|-\varepsilon_4)}}\varpi - \frac{2\beta_4}{1+e^{\mu_4(|\varpi|-\varepsilon_4)}}\text{sig}(\varpi)^{\omega_4} \\ -\Delta^*(t)\text{sgn}(\varpi) \end{cases} \quad (11)$$

Trong đó, v là giá trị xấp xỉ của x_2 ; $\alpha_3, \beta_3, \eta_3, \mu_3$ là những hằng số dương; $0 < \omega_3 < 1$, và $\varepsilon_3 = (\beta_3/\alpha_3)^{1/(1-\omega_3)}$;

$\hat{\Delta}$ là giá trị xấp xỉ của những thành phần bất định. Luật cập nhật của $\hat{\Delta}$ được thiết kế như sau:

$$\begin{cases} \dot{\varpi} = \dot{v} + \frac{2\alpha_3}{1+e^{-\eta_3(|\tilde{v}|-\varepsilon_3)}}\tilde{v} + \frac{2\beta_3}{1+e^{\mu_3(|\tilde{v}|-\varepsilon_3)}}\text{sig}(\tilde{v})^{\omega_3} \\ \dot{\Delta} = -\frac{2\alpha_4}{1+e^{-\eta_4(|\varpi|-\varepsilon_4)}}\varpi - \frac{2\beta_4}{1+e^{\mu_4(|\varpi|-\varepsilon_4)}}\text{sig}(\varpi)^{\omega_4} \\ -\Delta^*(t)\text{sgn}(\varpi) \end{cases} \quad (12)$$

Trong đó, $\alpha_4, \beta_4, \eta_4, \mu_4$ là những hằng số dương; $0 < \omega_4 < 1$, $\varepsilon_4 = (\beta_4/\alpha_4)^{1/(1-\omega_4)}$; Và $\Delta^*(t)$ là một giá trị thích nghi.

Chứng minh tính ổn định:

Tính đạo hàm bậc 1 của \tilde{v} dựa vào những phương trình (11) – (12), ta có:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{v}} &= \dot{v} - \dot{x}_2 \\ &= \hat{\Delta} - \Delta - \frac{2\alpha_3}{1+e^{-\eta_3(|\tilde{v}|-\varepsilon_3)}}\tilde{v} - \frac{2\beta_3}{1+e^{\mu_3(|\tilde{v}|-\varepsilon_3)}}\text{sig}(\tilde{v})^{\omega_3} \end{aligned} \quad (13)$$

Thay phương trình (13) vào trong phương trình (12), sau đó tính đạo hàm theo thời gian của kết quả đạt được, ta có:

$$\begin{cases} \dot{\varpi} = \hat{\Delta} - \Delta \\ \dot{\varpi} = -\dot{\Delta} - \Delta^*(t)\text{sgn}(\varpi) \\ -\frac{2\alpha_4}{1+e^{-\eta_4(|\varpi|-\varepsilon_4)}}\varpi - \frac{2\beta_4}{1+e^{\mu_4(|\varpi|-\varepsilon_4)}}\text{sig}(\varpi)^{\omega_4} \end{cases} \quad (14)$$

Lựa chọn hàm Lyapunov $V_1 = 0.5\varpi^2$ và tính toán đạo hàm theo thời gian của nó dựa vào kết quả trong phương trình (14), ta đạt được:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \varpi\dot{\varpi} \\ &= \varpi \left(-\dot{\Delta} - \frac{2\alpha_4}{1+e^{-\eta_4(|\varpi|-\varepsilon_4)}}\varpi - \frac{2\beta_4}{1+e^{\mu_4(|\varpi|-\varepsilon_4)}}|\varpi|^{\omega_4}\text{sgn}(\varpi) \right) \\ &= -\dot{\Delta}\varpi - \Delta^*(t)|\varpi| - \frac{2\alpha_4}{1+e^{-\eta_4(|\varpi|-\varepsilon_4)}}\varpi^2 - \frac{2\beta_4}{1+e^{\mu_4(|\varpi|-\varepsilon_4)}}|\varpi|^{\omega_4+1} \\ &\leq -(\Delta^*(t) - |\dot{\Delta}|)|\varpi| - \frac{2\alpha_4}{1+e^{-\eta_4(|\varpi|-\varepsilon_4)}}\varpi^2 - \frac{2\beta_4}{1+e^{\mu_4(|\varpi|-\varepsilon_4)}}|\varpi|^{\omega_4+1} \\ &\leq -\frac{2\alpha_4}{1+e^{-\eta_4(|\varpi|-\varepsilon_4)}}\varpi^2 - \frac{2\beta_4}{1+e^{\mu_4(|\varpi|-\varepsilon_4)}}|\varpi|^{\omega_4+1} \\ &\leq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Như vậy, ta thấy điều kiện $V_1 > 0$ và $\dot{V}_1 \leq 0$ được đảm bảo. Kết quả theo lý thuyết ổn định Lyapunov, mặt trượt ϖ đã chọn cho bộ quan sát sẽ hội tụ về 0 trong khoảng thời gian hữu hạn, nghĩa là $\varpi = 0$.

Xác định $\tilde{\Delta} = \hat{\Delta} - \Delta$ như là sai số xấp xỉ của bộ quan sát. Từ phương trình (14), ta có:

$$\tilde{\Delta} = \hat{\Delta} - \Delta = \varpi \quad (16)$$

do $\varpi = 0$ nên $\tilde{\Delta} = \varpi = 0$. Như vậy, đã chứng minh được bộ quan sát mà bài báo đề xuất có thể xấp xỉ những thành phần bất định trong khoảng thời gian hữu hạn.

Giá trị $\Delta^*(t)$ trong bài báo này có thể xác định được bằng cách áp dụng kỹ thuật thích nghi hai lớp trong các công bố [24], [25].

4. Thiết kế thuật toán điều khiển trượt thời gian hữu hạn

4.1. Thiết kế mặt trượt với sự hội tụ thời gian hữu hạn

Đặt $x_r = [x_{1r}, \dots, x_{nr}]^T \in R^n$ là vector quỹ đạo mong muốn. Khi đó, $x_e = x_1 - x_r$ là sai số điều khiển vận

tốc và $\dot{x}_e = \dot{x}_1 - \dot{x}_r$ là sai số điều khiển vị trí.

Thiết kế một mặt trượt với sự hội tụ trong thời gian hữu hạn dựa vào bổ đề 1 như sau:

$$s = \dot{x}_e + \frac{2\alpha_1}{1+e^{-\eta_1(|x_e|-\varepsilon_1)}} x_e + \frac{2\beta_1}{1+e^{\mu_1(|x_e|-\varepsilon_1)}} \text{sig}(x_e)^{\omega_1} \quad (17)$$

Trong đó, $s \in R^{n \times 1}$ là hàm trượt; $\alpha_1, \beta_1, \eta_1, \mu_1$ là những hằng số dương; $0 < \omega_1 < 1$, $\varepsilon_1 = (\beta_1/\alpha_1)^{1/(1-\omega_1)}$, và $\text{sig}(x_e)^{\omega_1} = |x_e|^{\omega_1} \text{sgn}(x_e)$.

Một khi các của trạng thái hệ thống được vận hành trong chế độ trượt, chúng phải thỏa mãn điều kiện $s = 0$ [26]. Do đó, xem xét phương trình (17) trong trường hợp $s = 0$ như sau:

$$\dot{x}_e = -\frac{2\alpha_1}{1+e^{-\eta_1(|x_e|-\varepsilon_1)}} x_e - \frac{2\beta_1}{1+e^{\mu_1(|x_e|-\varepsilon_1)}} \text{sig}(x_e)^{\omega_1} \quad (18)$$

Thời gian giới hạn để thực hiện chuyển động trên mặt trượt được xác định như sau:

$$T_s < \int_{\varepsilon_1}^{x_e(0)} \frac{1}{\alpha_1 |x_e|} d(|x_e|) + \int_0^{\varepsilon_1} \frac{1}{\beta_1 |x_e|^{\omega_1}} d(|x_e|) \quad (19)$$

$$< \frac{\ln(|x_e(0)|) - \ln(\varepsilon_1)}{\alpha_1} + \frac{1}{\beta_1 (1-\delta_1)} |\varepsilon_1|^{1-\omega_1}$$

4.2. Tổng hợp phương pháp điều khiển đề xuất

Để xác định được phương trình của tín hiệu điều khiển đầu vào, đầu tiên ta đạo hàm phương trình (17) theo thời gian như sau:

$$\dot{s} = \ddot{x}_e + \frac{2\alpha_1}{1+e^{-\eta_1(|x_e|-\varepsilon_1)}} \dot{x}_e + \frac{2\alpha_1 \eta_1 \dot{x}_e \text{sgn}(x_e) e^{-\eta_1(|x_e|-\varepsilon_1)}}{\left(1+e^{-\eta_1(|x_e|-\varepsilon_1)}\right)^2} x_e \quad (20)$$

$$+ \frac{2\beta_1 \omega_1}{1+e^{\mu_1(|x_e|-\varepsilon_1)}} |x_e|^{\omega_1-1} \dot{x}_e - \frac{2\beta_1 \mu_1 \dot{x}_e e^{\mu_1(|x_e|-\varepsilon_1)}}{\left(1+e^{\mu_1(|x_e|-\varepsilon_1)}\right)^2} |x_e|^{\omega_1}$$

Trong đó, $\ddot{x}_e = \ddot{x}_2 - \ddot{x}_r$. Sau đó thay mô hình (8) vào phương trình (20) ta được:

$$\dot{s} = a(x)u_d + b_n(x) + \Delta(x, \Sigma, t) - \ddot{x}_r + \Pi \quad (21)$$

Trong đó:

$$\Pi = \frac{2\alpha_1}{1+e^{-\eta_1(|x_e|-\varepsilon_1)}} \dot{x}_e + \frac{2\alpha_1 \eta_1 \dot{x}_e \text{sgn}(x_e) e^{-\eta_1(|x_e|-\varepsilon_1)}}{\left(1+e^{-\eta_1(|x_e|-\varepsilon_1)}\right)^2} x_e$$

$$+ \frac{2\beta_1 \omega_1}{1+e^{\mu_1(|x_e|-\varepsilon_1)}} |x_e|^{\omega_1-1} \dot{x}_e - \frac{2\beta_1 \mu_1 \dot{x}_e e^{\mu_1(|x_e|-\varepsilon_1)}}{\left(1+e^{\mu_1(|x_e|-\varepsilon_1)}\right)^2} |x_e|^{\omega_1}$$

Phương trình thuật toán điều khiển trượt được thiết kế như sau:

$$u_d = -a^{-1}(x)(u_{eq} + u_r) \quad (22)$$

Trong đó, u_{eq} được xây dựng dựa trên bộ quan sát (13) và

phương trình (21):

$$u_{eq} = b_n(x) + \hat{\Delta} - \ddot{x}_r + \Pi \quad (23)$$

và u_r là luật tiếp cận nhanh được đề xuất bởi phương trình:

$$u_r = \alpha_2 \text{sig}(s)^{\eta_2} + \beta_2 \text{sig}(s)^{\mu_2} \quad (24)$$

với α_2, β_2 là những hằng số dương; và:

$$\text{sig}(s)^{\eta_2} = |s|^{\eta_2} \text{sgn}(s), \quad \varphi_2 > 1, \quad 0 < \lambda_2 < 1;$$

$$\eta_2 = 0.5(\varphi_2 + 1) + 0.5(\varphi_2 - 1) \text{sgn}(|s| - 1);$$

$$\text{và } \mu_2 = 0.5(\varphi_2 + \lambda_2) + 0.5(\varphi_2 - \lambda_2) \text{sgn}(|s| - 1).$$

Chứng minh sự ổn định của phương pháp điều khiển đề xuất:

Thay các phương trình của thuật toán điều khiển (22), (23) và (24) vào phương trình (21) và sau một số biến đổi rút gọn ta có được:

$$\dot{s} = -u_r - \tilde{\Delta} \quad (25)$$

Hàm Lyapunov $V_2 = s^2$ được chọn để phân tích sự ổn định của phương pháp điều khiển đề xuất. Đạo hàm theo thời gian của V_2 được tính toán như sau:

$$\dot{V}_2 = 2s\dot{s}$$

$$= 2s(-u_r - \tilde{\Delta})$$

$$= 2s(-\alpha_2 |s|^{\eta_2} \text{sgn}(s) - \beta_2 |s|^{\mu_2} \text{sgn}(s) - \tilde{\Delta}) \quad (26)$$

$$= -2\alpha_2 |s|^{\eta_2+1} - 2\beta_2 |s|^{\mu_2+1} - 2\tilde{\Delta}s$$

Như đã phân tích trong phương trình (16), ta có $\tilde{\Delta} = 0$. Do đó:

$$\dot{V}_2 = -2\alpha_2 |s|^{\eta_2+1} - 2\beta_2 |s|^{\mu_2+1} \quad (27)$$

$$= -2\alpha_2 V_2^{\frac{\eta_2+1}{2}} - 2\beta_2 V_2^{\frac{\mu_2+1}{2}}$$

Dựa vào bổ đề 2, mặt trượt đề xuất sẽ hội tụ đến điểm 0 trong khoảng thời gian hữu hạn T_r ; Và thời gian hội tụ T_r bị chặn bởi:

$$T_r < \frac{1}{(\alpha_2 + \beta_2)(\varphi_2 - 1)} + \frac{1}{\beta_2 (1 - \lambda_2)} \ln \left(1 + \frac{\alpha_2}{\beta_2} \right) \quad (28)$$

Do đó, tổng thời gian hội tụ của những quỹ đạo trạng thái trong hệ thống là hữu hạn và được tính toán như sau:

$$T = T_r + T_s$$

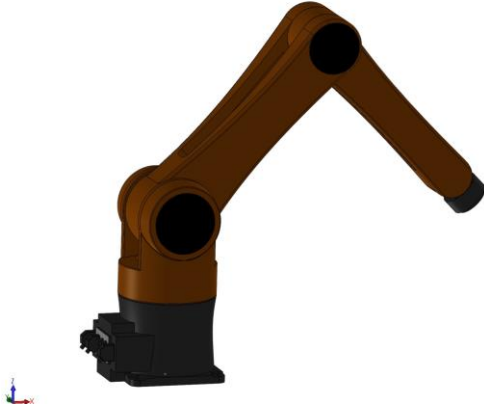
$$< \frac{1}{(\alpha_2 + \beta_2)(\varphi_2 - 1)} + \frac{1}{\beta_2 (1 - \lambda_2)} \ln \left(1 + \frac{\alpha_2}{\beta_2} \right) \quad (29)$$

$$+ \frac{\ln(|x_e(0)|) - \ln(\varepsilon_1)}{\alpha_1} + \frac{1}{\beta_1 (1 - \delta_1)} |\varepsilon_1|^{1-\omega_1}$$

5. Mô phỏng kiểm chứng

Để kiểm chứng sự hiệu quả của phương pháp điều khiển đề xuất, các mô phỏng được thực hiện áp dụng lên một robot 3 bậc tự do có cấu tạo như Hình 1. Thiết kế chi tiết

phần cơ khí của tay máy robot được thực hiện trên phần mềm SOLIDWORKS, sau đó mô hình cơ khí được tích hợp vào môi trường Simscape của Matlab và các thuật toán điều khiển được mô phỏng bằng Simulink. Mô tả hình học và tính toán động lực học của tay máy robot đã được trình bày chi tiết trong tài liệu [27].



Hình 1. Mô phỏng của tay máy robot 3 bậc tự do trên phần mềm SOLIDWORKS

Thông số của robot được mô phỏng như sau:

Khối lượng tương ứng của mỗi thanh: $m_1 = 33.429(kg)$, $m_2 = 34.129(kg)$, và $m_3 = 15.612(kg)$; chiều dài mỗi thanh là $l_1 = 0.25(m)$, $l_2 = 0.7(m)$, và $l_3 = 0.6(m)$; Tọa độ trọng tâm tương ứng của mỗi thanh

$$\begin{bmatrix} l_{c1x}, l_{c1y}, l_{c1z} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0, 0, -74.610 \times 10^{-3} \end{bmatrix}^T (m),$$

$$\begin{bmatrix} l_{c2x}, l_{c2y}, l_{c2z} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0.3477, 0, 0 \end{bmatrix}^T (m),$$

$$\text{và } \begin{bmatrix} l_{c3x}, l_{c3y}, l_{c3z} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0.3142, 0, 0 \end{bmatrix}^T (m);$$

mô men quán tính

$$\begin{bmatrix} I_{1xx}, I_{1yy}, I_{1zz} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0.7486, 0.5518, 0.5570 \end{bmatrix}^T (kg.m^2),$$

$$\begin{bmatrix} I_{2xx}, I_{2yy}, I_{2zz} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0.3080, 2.4655, 2.3938 \end{bmatrix}^T (kg.m^2),$$

$$\text{Và } \begin{bmatrix} I_{3xx}, I_{3yy}, I_{3zz} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0.0446, 0.7092, 0.7207 \end{bmatrix}^T (kg.m^2).$$

Khâu chấp hành cuối của robot được điều khiển theo quỹ đạo tham chiếu như sau:

$$\begin{cases} x = 0.85 - 0.01t \\ y = 0.2 + 0.2 \sin(0.5t) \\ z = 0.7 + 0.2 \cos(0.5t) \end{cases} (m) \quad (30)$$

Ma sát và nhiễu bên ngoài được giả định như sau:

$$F_r(\dot{p}) + \tau_d(t) = \begin{bmatrix} 0.1 \operatorname{sgn}(\dot{p}_1) + 2\dot{p}_1 \\ 0.1 \operatorname{sgn}(\dot{p}_2) + 2\dot{p}_2 \\ 0.1 \operatorname{sgn}(\dot{p}_3) + 2\dot{p}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 4 \sin(t) \\ 5 \sin(t) \\ 6 \sin(t) \end{bmatrix} \quad (31)$$

Để so sánh và kiểm chứng hiệu quả, mô phỏng thực hiện thuật toán điều khiển mà bài báo đề xuất so sánh với các thuật toán điều khiển NFTSMC [8] và NFTSMC [11] có các phương trình cụ thể như sau:

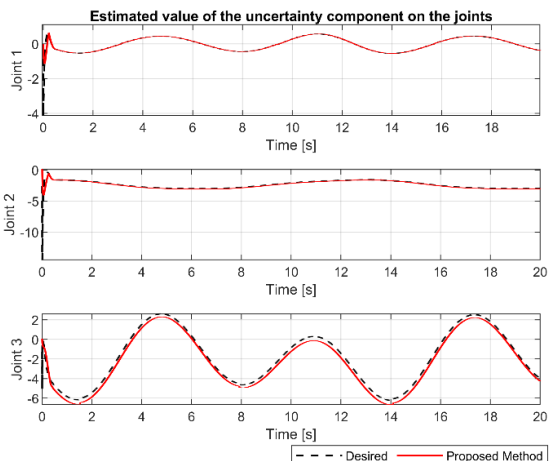
$$\begin{cases} s = \dot{x}_e + \alpha_5 x_e + \beta_5 \operatorname{sig}(x_e)^{\omega_5} \\ u_d = -\frac{1}{a(x)} \left(b_n(x) + \left(\alpha_5 + \beta_5 \omega_5 |x_e|^{\omega_5-1} \right) \dot{x}_e \right. \\ \left. + \Delta_5 s + (\Delta_5^* + v_5) \operatorname{sgn}(s) - \ddot{x}_r \right) \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} s = \dot{x}_e + \frac{2\alpha_6}{1 + e^{-\eta_6(|x_e| - \varepsilon_6)}} x_e + \frac{2\beta_6}{1 + e^{\mu_6(|x_e| - \varepsilon_6)}} \operatorname{sig}(x_e)^{\omega_6} \\ \left(b_n(x) + \frac{2\alpha_6}{1 + e^{-\eta_6(|x_e| - \varepsilon_6)}} \dot{x}_e \right. \\ \left. + \frac{2\alpha_6 \eta_6 \dot{x}_e \operatorname{sgn}(x_e) e^{-\eta_6(|x_e| - \varepsilon_6)}}{\left(1 + e^{-\eta_6(|x_e| - \varepsilon_6)} \right)^2} x_e \right) \\ u_d = -\frac{1}{a(x)} \left(+ \frac{2\beta_6 \omega_6}{1 + e^{\mu_6(|x_e| - \varepsilon_6)}} |x_e|^{\omega_6-1} \dot{x}_e \right. \\ \left. - \frac{2\beta_6 \mu_6 \dot{x}_e e^{\mu_6(|x_e| - \varepsilon_6)}}{\left(1 + e^{\mu_6(|x_e| - \varepsilon_6)} \right)^2} |x_e|^{\omega_6} \right. \\ \left. + \Delta_6 s + (\Delta_6^* + v_6) \operatorname{sgn}(s) - \ddot{x}_r \right) \end{cases} \quad (33)$$

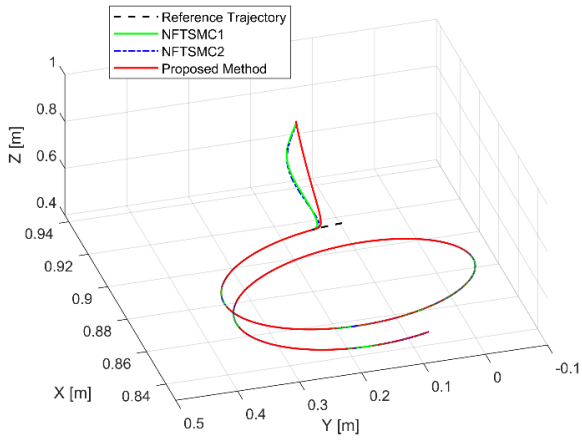
Trong đó, $x_e = x - x_r$, $\alpha_5, \alpha_6, \beta_5, \beta_6, \eta_6, \mu_6$ là những hằng số, $0 < \omega_5, \omega_6 < 1$, $\varepsilon_6 = (\beta_6 / \alpha_6)^{1/(1-\omega_6)}$; $(\Delta_5^* + v_5)$ và $(\Delta_6^* + v_6)$ là những hằng số dương.

Bảng 1. Tham số của các thuật toán điều khiển

Phương pháp	Tham số điều khiển
NFTSMC1	$\alpha_5 = 5, \beta_5 = 5, \omega_5 = 0.8, \Delta_5 = 5, \Delta_5^* = 13, v_5 = 0.1$
NFTSMC2	$\alpha_6 = 5, \beta_6 = 5, \eta_6 = 0.9, \mu_6 = 1.2, \omega_6 = 0.8, \Delta_6 = 5, \Delta_6^* = 13, v_6 = 0.1$
Thuật toán điều khiển của bài báo đề xuất	$\alpha_1 = 5, \beta_1 = 5, \eta_1 = 0.9, \mu_1 = 1.2, \omega_1 = 0.8$
	$\alpha_2 = 5, \beta_2 = 5, \varphi_2 = 1.7, \lambda_2 = 0.6,$
	$\alpha_3 = 6, \beta_3 = 6, \eta_3 = 0.9, \mu_3 = 1.2, \omega_3 = 0.7$ $\alpha_4 = 6, \beta_4 = 6, \eta_4 = 0.9, \mu_4 = 1.2, \omega_4 = 0.7$



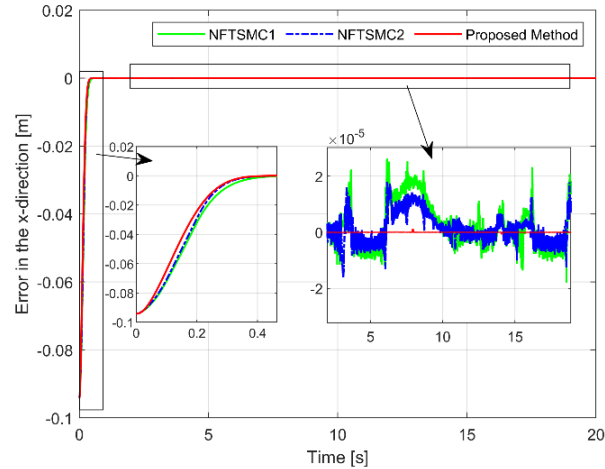
Hình 2. Giá trị giả định của những thành phần bất định và kết quả xấp xỉ bởi bộ quan sát tại mỗi khớp



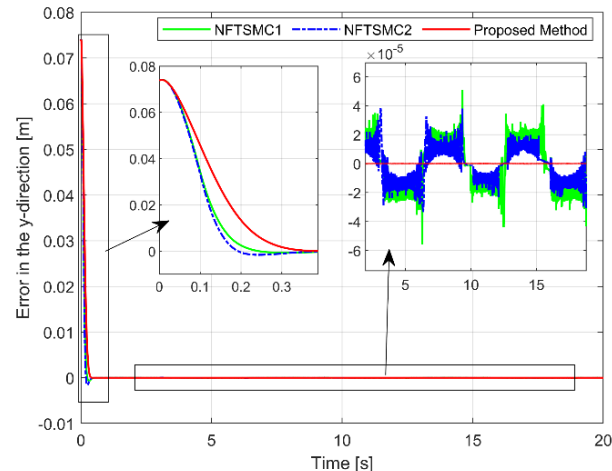
Hình 3. So sánh kết quả bám quỹ đạo của khâu chấp hành cuối khi trong không gian 3 chiều (XYZ)

Đầu tiên, ta phân tích sự hiệu quả của bộ quan sát được đề xuất. Với kết quả đồ thị mô phỏng được thể hiện trong Hình 2, ta có thể thấy bộ quan sát đề xuất đã xấp xỉ chính xác các thành phần bất định.

Hình 3 biểu diễn kết quả mô phỏng của thuật toán điều khiển trượt đề xuất trong việc điều khiển bám quỹ đạo của robot trên hệ trục tọa độ Đề-các XYZ. Kết quả đồ thị cho thấy quỹ đạo thực bám theo quỹ đạo mong muốn.

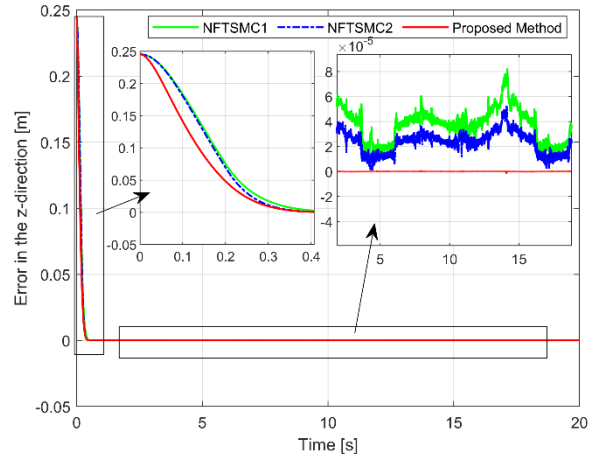


Hình 4. Sai số điều khiển vị trí của khâu chấp hành cuối theo trục X



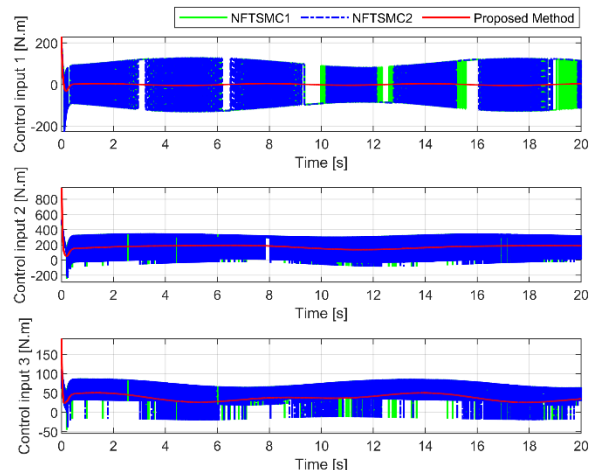
Hình 5. Sai số điều khiển vị trí của khâu chấp hành cuối theo trục Y

Để đánh giá rõ hơn về độ chính xác, so sánh sai số bám quỹ đạo theo các trục X, Y, và Z được thể hiện trong các kết quả đồ thị Hình 4, Hình 5 và Hình 6. Có thể thấy rằng, cả 3 trường hợp sử dụng các thuật toán điều khiển NFTSMC1 (32), NFTSMC2 (33) và thuật toán đề xuất đều cung cấp độ chính xác bám quỹ đạo cao với tốc độ hội tụ nhanh trong thời gian hữu hạn. Tuy nhiên, thuật toán NFTSMC2 có tốc độ hội tụ nhanh hơn và độ chính xác cao hơn một chút so với NFTSMC1. Đặc biệt, thuật toán điều khiển mà bài báo đề xuất có độ chính xác bám quỹ đạo cao nhất và tốc độ hội tụ nhanh nhất trong 3 thuật toán điều khiển.



Hình 6. Sai số điều khiển vị trí của khâu chấp hành cuối theo trục Z

Các kết quả mô phỏng so sánh hiện tượng dao động trong tín hiệu điều khiển (chattering) giữa 3 thuật toán điều khiển được thể hiện trong Hình 7. Kết quả cho thấy, hiện tượng chattering xuất hiện trong cả 2 thuật toán điều khiển NFTSMC1 và NFTSMC2 là khá lớn do trong mô phỏng giả định nhiều thành phần bất định. Tuy nhiên, đối với trường hợp sử dụng thuật toán điều khiển của bài báo đề xuất thì hiện tượng chattering xuất hiện không đáng kể. Kết quả trường hợp sử dụng thuật toán điều khiển do bài báo đề xuất cho các tín hiệu điều khiển mượt mà, ít sự dao động.



Hình 7. Những tín hiệu điều khiển tại mỗi khớp

Qua các kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán điều khiển mà nghiên cứu đề xuất mang lại hiệu quả tốt và chất lượng điều khiển cao hơn so với các trường hợp sử dụng các thuật toán điều khiển của các công trình nghiên cứu đi trước (NFTSMC [8] và NFTSMC [11]).

6. Kết luận

Bài báo đã đề xuất một phương pháp điều khiển bền vững mới sử dụng sự kết hợp giữa một bộ quan sát trượt bậc cao thời gian cố định (FxTHOSMO) để ước tính toàn bộ các thành phần bất định mà không cần biết trước các thông tin về chúng, và một thuật toán điều khiển trượt đầu cuối thời gian hữu hạn (FnTTSMC). Thuật toán FnTTSMC được thiết kế dựa trên phương trình mặt trượt đầu cuối nhanh toàn cục thời gian hữu hạn và luật điều khiển tiếp cận nhanh để thiết lập sự hội tụ trong thời gian hữu hạn toàn cục của hệ thống. Hệ thống điều khiển tích hợp có các đặc tính ưu việt như độ chính xác bám quỹ đạo cao, hội tụ trong thời gian hữu hạn và bền vững với những ảnh hưởng của các thành phần bất định. Các phân tích với lý thuyết Lyapunov đã chứng minh tính ổn định trong thời gian hữu hạn và sự hội tụ của hệ thống điều khiển. Qua các kết quả mô phỏng ứng dụng cho trường hợp cụ thể với tay máy robot 3 bậc tự do đã cho thấy, thuật toán điều khiển mà bài đề xuất mang lại hiệu quả tốt và chất lượng điều khiển cao hơn so với các trường hợp sử dụng các thuật toán điều khiển của các công trình nghiên cứu đi trước (NFTSMC [8] và NFTSMC [11]) ở cả ba khía cạnh bao gồm độ chính xác bám quỹ đạo, hội tụ nhanh trong thời gian hữu hạn và giảm hiện tượng chattering.

LỜI CẢM ƠN: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng trong đề tài có mã số B2019-DN02-52.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. Derbel, J. Ghommam, and Q. Zhu, *Applications of sliding mode control*, vol. 79. Springer, 2017.
- [2] S. Kamal, J. A. Moreno, A. Chalanga, B. Bandyopadhyay, and L. M. Fridman, "Continuous terminal sliding-mode controller", *Automatica*, 2016.
- [3] L. Hui and J. Li, "Terminal sliding mode control for spacecraft formation flying", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 45, no. 3, pp. 835–846, 2009.
- [4] M. Chen, Q.-X. Wu, and R.-X. Cui, "Terminal sliding mode tracking control for a class of SISO uncertain nonlinear systems", *ISA Trans.*, vol. 52, no. 2, pp. 198–206, 2013.
- [5] Y. Feng, X. Yu, and Z. Man, "Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators", *Automatica*, vol. 38, no. 12, pp. 2159–2167, 2002.
- [6] V. A. Tuan and H.-J. Kang, "A New Finite-time Control Solution to The Robotic Manipulators Based on The Nonsingular Fast Terminal Sliding Variables and Adaptive Super-Twisting Scheme", *J. Comput. Nonlinear Dyn.*, 2018.
- [7] S. Yu, X. Yu, B. Shirinzadeh, and Z. Man, "Continuous finite-time control for robotic manipulators with terminal sliding mode", *Automatica*, vol. 41, no. 11, pp. 1957–1964, 2005.
- [8] X. Yu and M. Zhihong, "Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems", *Circuits Syst. I Fundam. Theory ...*, vol. 49, no. 2, pp. 261–264, 2002.
- [9] C. U. Solis, J. B. Clempner, and A. S. Poznyak, "Fast terminal sliding-mode control with an integral filter applied to a Van Der Pol oscillator", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 7, pp. 5622–5628, 2017.
- [10] S. Amirkhani, S. Mobayen, N. Ilaee, O. Boubaker, and S. H. Hosseinnia, "Fast terminal sliding mode tracking control of nonlinear uncertain mass-spring system with experimental verifications", *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 16, no. 1, p. 1729881419828176, 2019.
- [11] H. Pan, G. Zhang, H. Ouyang, and L. Mei, "A Novel Global Fast Terminal Sliding Mode Control Scheme For Second-Order Systems", *IEEE Access*, 2020.
- [12] S. Yu, G. Guo, Z. Ma, and J. Du, "Global fast terminal sliding mode control for robotic manipulators", *Int. J. Model. Identif. Control*, vol. 1, no. 1, pp. 72–79, 2006.
- [13] S. Mobayen, F. Tchier, and L. Ragoub, "Design of an adaptive tracker for n-link rigid robotic manipulators based on super-twisting global nonlinear sliding mode control", *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 48, no. 9, pp. 1990–2002, 2017.
- [14] Y. Wang, K. Zhu, F. Yan, and B. Chen, "Adaptive super-twisting nonsingular fast terminal sliding mode control for cable-driven manipulators using time-delay estimation", *Adv. Eng. Softw.*, vol. 128, pp. 113–124, 2019.
- [15] J. Fei and W. Yan, "Adaptive control of MEMS gyroscope using global fast terminal sliding mode control and fuzzy-neural-network", *Nonlinear Dyn.*, vol. 78, no. 1, pp. 103–116, 2014.
- [16] X.-G. Yan and C. Edwards, "Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding mode observer", *Automatica*, vol. 43, no. 9, pp. 1605–1614, 2007.
- [17] Q. Shen, B. Jiang, and V. Cocquemot, "Adaptive fuzzy observer-based active fault-tolerant dynamic surface control for a class of nonlinear systems with actuator faults", *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 338–349, 2014.
- [18] J.-H. Park, S.-H. Kim, and T.-S. Park, "Approximation-free output-feedback control of uncertain nonlinear systems using higher-order sliding mode observer", *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 140, no. 12, 2018.
- [19] J.-H. Park, S.-H. Kim, and T.-S. Park, "Output-feedback adaptive neural controller for uncertain pure-feedback nonlinear systems using a high-order sliding mode observer", *IEEE Trans. neural networks Learn. Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 1596–1601, 2018.
- [20] Y. Yin *et al.*, "Observer-based adaptive sliding mode control of NPC converters: An RBF neural network approach", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 4, pp. 3831–3841, 2018.
- [21] H. K. Khalil, "Cascade high-gain observers in output feedback control", *Automatica*, vol. 80, pp. 110–118, 2017.
- [22] S. Hwang and H. S. Kim, "Extended disturbance observer-based integral sliding mode control for nonlinear system via T-S fuzzy model", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 116090–116105, 2020.
- [23] Z. Zuo, "Non-singular fixed-time terminal sliding mode control of non-linear systems", *IET Control theory Appl.*, vol. 9, no. 4, pp. 545–552, 2014.
- [24] C. Edwards and Y. Shtessel, "Adaptive dual-layer super-twisting control and observation", *Int. J. Control*, vol. 89, no. 9, pp. 1759–1766, 2016.
- [25] H. Pan, G. Zhang, H. Ouyang, and L. Mei, "Novel Fixed-Time Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode Control for Second-Order Uncertain Systems Based on Adaptive Disturbance Observer", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 126615–126627, 2020.
- [26] V. Utkin and J. Y. Gulder, "Shi j.", *Sliding Mode Control Electromechanical Syst. Teylor Fr.*, 1999.
- [27] S. B. Niku, *Introduction to robotics: analysis, control, applications*. John Wiley & Sons, 2020.