

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Cao Trần Ngọc Tuấn

**PHÁT TRIỂN PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN QUỸ ĐẠO CỦA
XE LĂN ĐIỆN ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN
TRƯỢT BẬC CAO**

**TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT ĐIỆN, ĐIỆN TỬ
VÀ VIỄN THÔNG**

Ngành: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa
Mã số: 9 52 02 16

TP. Hồ Chí Minh, 2025

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Người hướng dẫn khoa học:

1. Người hướng dẫn khoa học 1: TS. Trương Nguyên Vũ
2. Người hướng dẫn khoa học 2: PGS.TS. Hà Quang Phúc

Phản biện 1: GS.TS Nguyễn Trường Thịnh

Phản biện 2: TS. Nguyễn Như Sơn

Phản biện 3: PGS.TS Lê Hoàng Thái

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện, tại Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi 9 giờ, ngày 04 tháng 10 năm 2025

Có thể tìm hiểu luận án tại:

1. Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
2. Thư viện Quốc gia Việt Nam

**DANH MỤC CÁC BÀI BÁO ĐÃ XUẤT BẢN
LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN**

1. TNT Cao, TB Pham, TN Nguyen, DL Vu, & NV Truong, 2024, Second-Order Terminal Sliding Mode Control for Trajectory Tracking of a Differential Drive Robot. Mathematics, 12(17), 2657
2. TNT Cao & Pham, Binh & Tran, Hieu & Gia, Long & Nguyen, No & Truong, Vu. (2024). Non-singular terminal sliding mode control for trajectory-tracking of a differential drive robot. E3S Web of Conferences. 496. 10.1051/e3sconf/202449602005.
3. Pham, Thanh-Binh & TNT Cao & Nguyen, Tan-No & Truong, Nguyen-Vu. (2025). Adaptive Full Order Sliding Mode Control for Electrical Motor Drive. E3S Web of Conferences. 626. 02001. 10.1051/e3sconf/202562602001.
4. Dang-Phuc Tran, TNT Cao, Duc-Hieu Tran, Tan-No Nguyen and Nguyen-Vu Truong. (2025). Electrical motor drive parameter estimation via higher order sliding mode control. E3S Web of Conferences. 626. 02002. 10.1051/e3sconf/202562602002

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết

Nhu cầu sử dụng xe lăn điện ngày càng tăng cao do rất nhiều nguyên nhân. Cụ thể theo thống kê, hiện nay (năm 2025) có khoảng 12% người trưởng thành tại Hoa Kỳ gặp phải vấn đề hạn chế vận động dẫn đến khó khăn nghiêm trọng trong việc đi bộ hoặc leo cầu thang, và xấp xỉ 5.5 đến 6 triệu người trưởng thành sử dụng xe lăn để di chuyển [1].

Trong tổng số người sử dụng thì có đến 10% phản ánh gặp khó khăn nghiêm trọng hoặc không thể sử dụng xe lăn điện để thực hiện các hoạt động sinh hoạt hàng ngày và 40% người dùng xe lăn điện gặp vấn đề trong việc điều khiển, đặc biệt là khi di chuyển trong không gian hẹp, địa hình phức tạp [2]. Từ việc khó khăn trong điều khiển dẫn đến nhiều tai nạn nghiêm trọng xảy ra, trong đó từ 65-80% số vụ tai nạn liên quan đến lật xe hoặc ngã [3]. Để giải quyết vấn đề này, xe lăn điện tự động hoặc bán tự động đã nổi lên như một giải pháp giúp người sử dụng có thể điều khiển xe lăn điện tốt hơn, nhất là đối với những người bệnh lý nặng, không đảm bảo sức khỏe và sự linh hoạt để có thể tự điều khiển và đảm bảo an toàn.

Để phát triển các hệ thống xe lăn điện tự động, bên cạnh các nghiên cứu về tích hợp hệ thống cảm biến dẫn đường, hoặc phát triển các hệ giao tiếp như: Giao diện người-máy tính (Human-Computer Interface - HCI), hoặc giao diện não – máy tính (Brain-Computer Interface - BCI), thì vấn đề cốt lõi được nghiên cứu rộng rãi trong nhiều năm qua đó là điều khiển quỹ đạo (Trajectory tracking control).

Lý do việc điều khiển quỹ đạo đóng vai trò rất quan trọng bởi vì xe lăn điện phải hoạt động trong điều kiện tương đối phức tạp, tồn tại nhiều bất định, từ các bất định trong chính mô hình động lực học của nó như: khối lượng thay đổi, trọng tâm thay đổi, cho đến các nhiễu loạn bên ngoài như: bề mặt di chuyển (trơn trượt), độ dốc thay đổi, v.v.. Vì vậy cần phải có phương pháp điều khiển quỹ đạo đáng tin cậy để đảm bảo sự ổn định, chính

xác và an toàn khi di chuyển qua các địa hình phức tạp.

Với các vấn đề nan giải ở trên, điều khiển trượt (SMC) được xem là một giải pháp thích hợp để giải quyết thay vì các phương pháp điều khiển truyền thống. Tuy nhiên bên cạnh ưu điểm, điều khiển trượt tồn tại một nhược điểm cố hữu đó là hiện tượng “chattering”, có nghĩa là tín hiệu điều khiển sẽ xuất hiện sự dao động mạnh với tần số lớn quanh giá trị mong muốn, điều này sẽ làm giảm độ chính xác hoặc gây ra hư hỏng cho các thiết bị cơ điện.

Chính vì vậy, cho dù những năm gần đây xuất hiện tương đối nhiều các nghiên cứu ứng dụng SMC trong điều khiển quỹ đạo [4]-[18] có xét đến các yếu tố bất định và nhiễu, tuy nhiên các nghiên cứu này chỉ dừng lại ở mô phỏng hoặc thử nghiệm hạn chế trong môi trường thí nghiệm vì sự xuất hiện của chattering.

Với lý do và hiện trạng như trên, luận án sẽ tập trung phát triển một giải thuật điều khiển quỹ đạo mới cho xe lăn điện dựa trên phương pháp trượt bậc cao nhằm giải quyết vấn đề chattering. Cụ thể luận án sẽ lựa chọn phương pháp trượt Terminal bậc 2 với các ưu điểm như: bền vững trước nhiễu và bất định, độ chính xác cao và có khả năng điều khiển hội tụ trong thời gian hữu hạn. Hơn nữa, ưu điểm nổi trội nhất là có khả năng triệt tiêu hiện tượng chattering, giúp giải thuật có thể được áp dụng trực tiếp lên hệ cơ điện (xe lăn điện).

2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

Phát triển một phương pháp điều khiển quỹ đạo cho xe lăn điện áp dụng trượt bậc cao nhằm giải quyết vấn đề “chattering” trong điều khiển trượt để có thể áp dụng trực tiếp vào thực tế.

3. Nội dung nghiên cứu chính của luận án

- Thiết kế mặt trượt Terminal Sliding Mode bậc 2, bao gồm khả năng tính toán thiết kế các thông số bộ điều khiển cũng như tính toán thời gian

hội tụ các biến trạng thái, có thể ứng dụng vào hệ cơ điện thực tế.

- Thiết kế một bộ điều khiển quỹ đạo cho DDMR dựa trên Terminal Sliding Mode bậc 2

- Áp dụng lên hệ DDMR thực tế để chứng minh tính bền vững và hiệu quả của bộ điều khiển.

Cấu trúc nội dung luận án bao gồm 4 chương

Chương 1: Trình bày tổng quan về những nghiên cứu điều khiển quỹ đạo xe lăn điện, DDMR, và các nghiên cứu chuyên sâu về điều khiển trượt, từ đó định hướng đến nội dung nghiên cứu trong luận án.

Chương 2: Trình bày lý thuyết về điều khiển trượt và mô hình hóa hệ thống DDMR. Chương này làm nền tảng để xây dựng các lý thuyết mới của luận án trong Chương 3 và Chương 4.

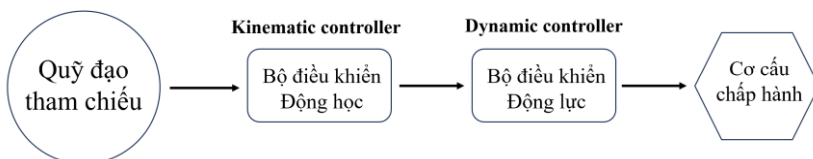
Chương 3: Trình bày lý thuyết trượt mới (2TSM) bao gồm thiết kế hoàn chỉnh mặt trượt và mô phỏng kiểm chứng.

Chương 4: Thiết kế bộ điều khiển quỹ đạo cho DDMR dựa trên mặt trượt 2TSM (được xây dựng trong Chương 3). Hiệu quả của bộ điều khiển sẽ được đánh giá thông qua việc so sánh với các phương pháp điều khiển truyền thống, đồng thời được kiểm chứng bằng các thí nghiệm thực tế.

Kết luận

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

1.1 Giới thiệu



Hình 1.1 Cấu trúc bộ điều khiển quỹ đạo rút gọn

1.2 Các nghiên cứu liên quan

1.2.1 Các nghiên cứu về điều khiển quỹ đạo xe lăn điện truyền thống

Những nghiên cứu đầu tiên về điều khiển quỹ đạo xe lăn điện xuất hiện vào cuối những năm 1990. Năm 1999 Caracciolo [27] và Sun.S [28] vào năm 2005 đã sử dụng phương pháp “linearization feedback control” để điều khiển quỹ đạo cho robot di động. Cụ thể, trong nghiên cứu của mình, Sun.S đã sử dụng phương pháp điều khiển hồi tiếp tuyến tính hóa (Feedback Linearization) chỉ dựa trên mô hình động học. Tương tự, vào năm 2019, K. Maatoug [29] đã đề xuất phương pháp điều khiển quỹ đạo dựa trên bộ điều khiển Fuzzy, năm 2023, tác giả A. Amrane [30] có đề xuất phương pháp điều khiển dựa trên bộ điều khiển PID. Để tăng tính chính xác cho bộ điều khiển, một vài nghiên cứu đã xét đến cả mô hình động lực, như nghiên cứu của tác giả T. Fukao và các cộng sự [31], tác giả Shojaei và các cộng sự [32] đã sử dụng điều khiển thích nghi (Adaptive control) áp dụng vào điều khiển quỹ đạo. Các nghiên cứu trên ít tập trung vào các yếu tố bất định, nhiễu bên ngoài, phần lớn dừng lại ở mô phỏng.

1.2.2 Các nghiên cứu về điều khiển quỹ đạo xe lăn điện dùng SMC

Năm 2009, Solea [7] đề xuất nghiên cứu điều khiển quỹ đạo sử dụng mặt trượt SMC thông thường. Sau đó, tiếp tục nhiều nghiên cứu được đề xuất ứng dụng các biến thể mặt trượt khác nhau của SMC như tác giả B.B.Mevo [8] năm 2018 sử dụng một mặt trượt tích phân, J.Yang (1999) [11], Lingrong (2011) [12], cũng đề xuất các phương pháp sử dụng SMC bậc 1. Các nghiên cứu này tuy có kết quả tốt, tính đến các bất định, tuy nhiên đều gặp phải vấn đề chattering.

1.2.3 Các nghiên cứu về khử chattering trong SMC

Năm 1977 Utkin [37] đã đề xuất phương pháp “boundary layer”, đây

cũng là phương pháp đơn giản và phổ biến thường được sử dụng. Phương pháp nâng bậc cho mặt trượt được đề xuất từ những năm 1998 bởi G. Bartolini [42], Levant [43]-[44]. Năm 2014, Y. Feng [49] đề xuất mặt trượt TSM full order. Năm 2021, Xinghuo Yu và Yong Feng [50] tổng hợp các phương pháp SMC, cụ thể trong Terminal Sliding Mode Control (TSMC) và các mặt trượt nâng bậc để giảm "chattering". TSMC bậc cao vượt trội trong việc triệt tiêu chattering, giữ tính bền vững, nhưng không tính được thông số bộ điều khiển và thời gian hội tụ, hạn chế ứng dụng thực tế. Vì vậy, luận án nghiên cứu mặt trượt Terminal Sliding Mode bậc 2 (2TSM) để giải quyết hai vấn đề này, tối ưu hóa triệt tiêu chattering cho hệ DDMR.

1.3 Kết luận

1.3.1 Tổng kết tình hình nghiên cứu hiện nay

1.3.2 Các vấn đề nghiên cứu trong luận án

- Nghiên cứu thiết kế mặt trượt 2TSM với khả năng tính toán thông số bộ điều khiển và tính toán thời gian hội tụ.
- Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển quỹ đạo cho DDMR dựa trên 2TSM với sự xuất hiện của các yếu tố bất định mô hình.
- Tiến hành thực nghiệm trên hệ DDMR thực tế.

1.3.3 Giới hạn phạm vi nghiên cứu

Luận án sẽ tập trung vào phát triển một giải thuật điều khiển mới, vì vậy khi tiến hành thực nghiệm, tác giả sẽ thực hiện trên mô hình robot di động với các kịch bản xuất hiện yếu tố bất định để thuận tiện trong việc hiệu chỉnh và thay đổi thuật toán thay vì thực nghiệm trên một xe lăn điện hoàn chỉnh

CHƯƠNG 2. LÝ THUYẾT ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT VÀ MÔ HÌNH HÓA HỆ THỐNG

2.1 Lý thuyết điều khiển trượt

2.1.1 Lịch sử hình thành

2.1.2 Các khái niệm về ổn định

2.1.2.1 Ổn định tiệm cận (Asymptotic stability)

$$x(t) \rightarrow 0 \quad \text{khi} \quad t \rightarrow \infty \quad (2.1)$$

➤ **Khi xuất hiện yếu tố bất định:**

Nếu Δf là các yếu tố nhiễu không biết trước, thay vì trở về “0”, trạng thái của hệ sẽ trở về:

$$x(t) \rightarrow \frac{\Delta f}{\gamma} \quad \text{khi} \quad t \rightarrow \infty \quad (2.2)$$

2.1.2.2 Ổn định trong thời gian hữu hạn

$$x(t) \rightarrow 0 \quad \text{tại} \quad t = \frac{x(0)^{1-p/q}}{\gamma(1-p/q)}, \quad (2.3)$$

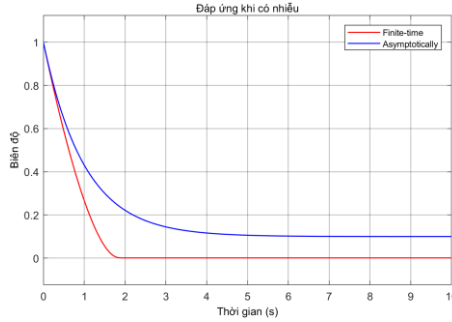
Trong đó p, q là số lẻ và $p/q < 1$

➤ **Khi xuất hiện yếu tố bất định**

Nếu Δf là các yếu tố nhiễu không biết trước, thì:

$$\rightarrow x(t) = \left(\frac{\Delta f}{\gamma} \right)^{\frac{q}{p}} \quad (2.4)$$

Điều này có nghĩa là khi sử dụng tín hiệu điều khiển để đưa hệ thống về trạng thái cân bằng trong thời gian hữu hạn (*Finite-time*) sẽ giúp hệ thống có sai số xác lập nhỏ hơn so với ổn định tiệm cận (*Asymptotic*).



Hình 2.1 Đáp ứng hệ thống với sự xuất hiện của nhiễu
($\gamma = 1, \Delta f = 0.1, p/q = 1/3$)

Kết luận: Như vậy ta có thể thấy một số ưu điểm của điều khiển hệ thống đáp ứng theo “finite-time” so với “asymptotically” như sau:

- Tốc độ hội tụ nhanh hơn.
- Điều khiển độ chính xác cao hơn.

Từ các khái niệm này, luận án sẽ phân tích các ưu, nhược điểm của các mặt trượt tuyến tính và phi tuyến ở phần tiếp theo.

2.1.3 Ý tưởng điều khiển trượt

2.1.3.1 Mặt trượt tuyến tính (Linear Sliding Mode – LSM)

Xét hệ:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + u + \rho(x, t) \end{cases} \quad (2.5)$$

Đầu tiên ta thiết kế một trượt tuyến tính:

$$s = x_2 + \gamma x_1, \gamma > 0 \quad (2.6)$$

Khi $s = 0$, các biến trạng thái x_1, x_2 sẽ tiến về tiệm cận “0” một cách tự nhiên theo phương trình: $\dot{x}_1 = -\gamma x_1$

Luật điều khiển được thiết kế như sau:

$$u = u_{eq} + u_n \quad (2.7)$$

Trong đó:

$$u_{eq} = -f(x) - \gamma x_2 \quad (2.8)$$

$$u_n = -ksign(s)$$

Với tín hiệu điều khiển trên, $s \rightarrow 0$ trong thời gian hữu hạn là:

$$t_r = \frac{\sqrt{2}}{\eta} V^{\frac{1}{2}}(0) \quad (2.9)$$

2.1.3.2 Mặt trượt phi tuyến (Terminal Sliding Mode Control - TSM)

Đầu tiên ta chọn mặt trượt phi tuyến:

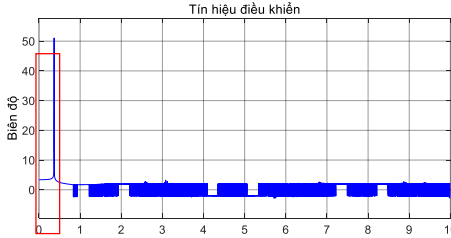
$$s = x_2 + \gamma x_1^{p/q}, \gamma > 0 \quad (2.10)$$

Với $0 < \frac{p}{q} < 1$ và p, q là số lẻ. Khi $s = 0$, các biến trạng thái x_1, x_2 sẽ tiến về “0” theo: $\dot{x}_1 = -\gamma x_1^{p/q}$

Luật điều khiển được thiết kế như sau:

$$\begin{aligned} u &= u_{eq} + u_n \\ u_{eq} &= -f(x) - \gamma p/q x_1^{p/q-1} \dot{x}_1 \\ u_n &= -ksign(s) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Lưu ý : Trong tín hiệu điều khiển $u_{eq} = -f(x) - \gamma \frac{p}{q} x_1^{\frac{p}{q}-1} \dot{x}_1$ có khả năng xảy ra điểm kỳ dị (singularity) trong trường hợp $x_1 = 0, \dot{x}_1 \neq 0$. Xem ví dụ minh hoạ ở Hình 2.2 ($t = 0.37s$).



Hình 2.2 Tín hiệu điều khiển u xuất hiện điểm kỳ dị

2.1.3.3 Mặt trượt phi tuyến (Nonsingular Terminal Sliding Mode - NTSM)

$$s = x_1 + \frac{1}{\gamma} x_2^{q/p} \quad (2.12)$$

Ta có thể thấy khi mặt trượt $s = 0$, đáp ứng của NTSM (2.12) tương đương với (2.10). Luật điều khiển $u = u_{eq} + u_n$ được thiết kế như sau:

$$\begin{cases} u_{eq} = -f(x) - \gamma \frac{p}{q} x_2^{2-q/p} \\ u_n = -ksign(s) \end{cases} \quad (2.13)$$

Áp dụng luật điều khiển (2.13), hệ thống trở thành:

$$\dot{V} = s \frac{1}{\gamma} \frac{q}{p} x_2^{\frac{q}{p}-1} (-k \text{sign}(s) + \rho(t))$$

Kết luận: Tín hiệu điều khiển $u_{eq} = -f(x) - \gamma \frac{p}{q} x_2^{2-q/p}$ đã loại bỏ điểm kỳ dị ở trường hợp $x_2 = 0, x_1 \neq 0$.

Nhược điểm cố hữu của SMC đó là hiện tượng “chattering”. Các nghiên cứu để loại bỏ hiện tượng “chattering” này sẽ được trình bày ở phần tiếp theo.

2.1.4 Vấn đề chattering

2.2 Mô hình hóa hệ thống

2.2.1 Giới thiệu

2.2.2 Mô hình động học (Kinematic)

❖ **Động học thuận (Forward kinematic):**

$$\begin{cases} v = \frac{v_r + v_l}{2} = \frac{R(\dot{\phi}_r + \dot{\phi}_l)}{2} \\ \omega = \frac{v_r - v_l}{2L} = \frac{R(\dot{\phi}_r - \dot{\phi}_l)}{2L} \end{cases} \quad (2.14)$$

❖ **Động học nghịch (Inverse kinematic):**

$$\begin{cases} v_r = v + \omega L \\ v_l = v - \omega L \end{cases} \quad (2.15)$$

2.2.3 Mô hình động lực học (Dynamic)

$$\begin{cases} \left(m + \frac{2}{R^2} I_w \right) \dot{v} - m_c d\omega^2 = \frac{1}{R} (\tau_r + \tau_l) \\ \left(I + \frac{2L^2}{R^2} I_w \right) \dot{\omega} + m_c d\omega v = \frac{L}{R} (\tau_r - \tau_l) \end{cases} \quad (2.16)$$

2.2.4 Các bất định trong mô hình

- Bất định về khối lượng: giới hạn ở mức 50 – 100 (kg)
- Sự thay đổi về trọng tâm: giới hạn ở mức $\Delta d = 15$ (cm)

$$M_0 \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = V_0 + C \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} + \underbrace{\Delta V - \Delta M \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix}}_{\rho(t)} + d(t) \quad (2.17)$$

Trong đó M_0, V_0 là các đại lượng đã biết ban đầu, ΔM và ΔV là các đại lượng thay đổi, $d(t)$ là nhiễu khác, $\rho(t)$ là tổng của các yếu tố bất định.

2.3 Kết luận

CHƯƠNG 3. THIẾT KẾ MẶT TRƯỢT BẬC CAO

3.1 Các phương pháp loại bỏ “chattering” trong điều khiển trượt

3.1.1 Phương pháp sử dụng lớp biên (boundary layer)

3.1.1.1 Sử dụng hàm saturation

3.1.1.2 Sử dụng hàm sigmoid

3.1.2 Phương pháp trượt bậc cao

3.1.2.1 Mặt trượt LSM bậc cao

Mặt trượt được đề xuất:

$$s = \ddot{x} + \alpha\dot{x} + \beta x \quad (3.1)$$

Luật điều khiển $u = u_{eq} + u_n$ được thiết kế như sau:

$$\begin{cases} u_{eq} = -f(x) - \alpha\dot{x}_1 - \beta x_1 \\ \dot{u}_n = -k \text{sign}(s) \end{cases} \quad (3.2)$$

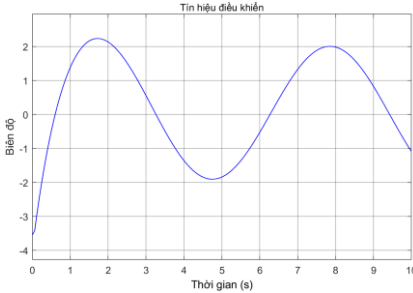
Ví dụ: Ta thiết kế mặt trượt và tín hiệu điều khiển như sau:

$$s = \ddot{x}_1 + 2\dot{x}_1 + x_1$$

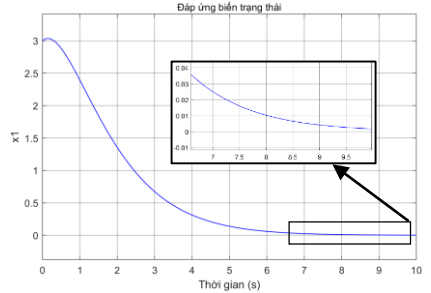
$$u = 0.1x_2 - 2\dot{x}_1 - x_1 - 5 \int_0^t \text{sign}(s) dt$$

Kết quả mô phỏng được thể hiện ở Hình 3.1.

Ta có thể thấy mặt dù tín hiệu điều khiển đã “mượt mà”, triệt tiêu chattering, tuy nhiên vẫn tồn tại nhược điểm của mặt trượt tuyến tính đó là biến trạng thái không thể về 0 mà chỉ về tiệm cận 0.



Hình 3.1 Tín hiệu điều khiển



Hình 3.2 Đáp ứng trạng thái

3.1.2.2 Mặt trượt Terminal Sliding Mode bậc cao (FOTSM)

Theo [46], mặt trượt được chọn là:

$$s = \dot{x}_n + c_n \text{sgn}(x_n) |x_n|^{\alpha_n} + \dots + c_1 \text{sgn}(x_1) |x_1|^{\alpha_1} \quad (3.3)$$

Trong đó các hệ số $c_i, \alpha_i (i = 1, 2, \dots, n)$ là các hằng số. c_i được chọn sao cho đa thức $p^n + c_n p^{n-1} + \dots + c_2 p + c_1$ là Hurwitz, và α_i được chọn dựa trên điều kiện dưới đây:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha, & n = 1 \\ \alpha_{i-1} = \frac{\alpha_i \alpha_{i+1}}{2\alpha_{i+1} - \alpha_i}, & i = 1, 2, \dots, n \quad \forall n \geq 2 \end{cases} \quad (3.4)$$

Trong đó: $\alpha_{n+1} = 1, \alpha_n = \alpha, \alpha \in (1 - \varepsilon, 1), \varepsilon \in (0, 1)$.

Áp dụng cho hệ thống ta có mặt trượt:

$$s = \ddot{x}_1 + c_2 \text{sign}(\dot{x}_1) |\dot{x}_1|^{\alpha_2} + c_1 \text{sign}(x_1) |x_1|^{\alpha_1} \quad (3.5)$$

Luật điều khiển $u = u_{eq} + u_n$ được thiết kế như sau:

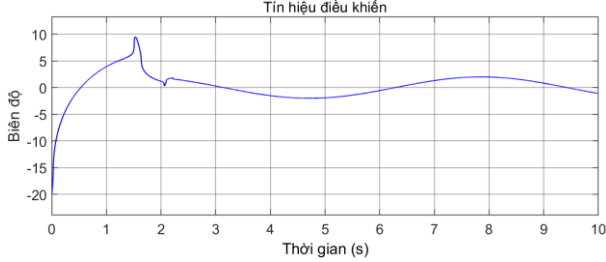
$$u_{eq} = -f(x) - c_2 \text{sign}(\dot{x}_1) |\dot{x}_1|^{\alpha_2} - c_1 \text{sign}(x_1) |x_1|^{\alpha_1} \quad (3.6)$$

$$\dot{u}_n + \lambda u_n = v; \quad v = -(k_d + k_T + \eta) \text{sign}(s)$$

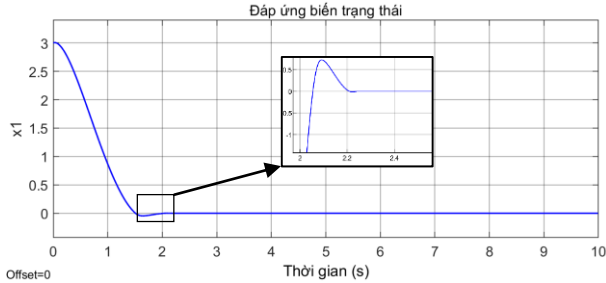
Ví dụ: Xét hệ thống có tương trê, ta thiết kế mặt trượt và tín hiệu điều khiển như sau:

$$\begin{aligned} s &= \ddot{x}_1 + 2 \text{sign}(\dot{x}_1) |\dot{x}_1|^{9/16} + \text{sign}(x_1) |x_1|^{9/23} \\ &\rightarrow u = u_{eq} + e^{-0.1t} \int_0^t e^{-0.1t} v dt \end{aligned}$$

Trong đó e là cơ số logarit tự nhiên ($\ln(e) = 1$).



Hình 3.3 Tín hiệu điều khiển FOTSM



Hình 3.4 Đáp ứng biến trạng thái FOTSM

Ta có thể thấy tín hiệu điều khiển đã loại bỏ được chattering gần như hoàn toàn (Hình 3.3) và biến trạng thái về “0” (Hình 3.4), tuy nhiên phương pháp này hiện tại có hai vấn đề rất lớn để có thể áp dụng được vào thực tế vì: **không thể tính toán, không thể đo lường**

3.1.3 So sánh lựa chọn phương pháp

Phương pháp FOTSM là phương pháp tối ưu để khử chattering trong điều khiển trượt nếu ta có thể khắc phục được các nhược điểm hiện có.

3.2 Mặt trượt TSM bậc 2

3.2.1 Thiết kế mặt trượt

Ta chọn mặt trượt TSM bậc 2 như sau:

$$s = \ddot{x} + \gamma_1 \dot{x}^\alpha + \gamma_2 x^\beta \quad (3.7)$$

Trong đó, các điều kiện sau được thỏa:

$$0 < \alpha = \frac{q}{p} < 1, \beta = \frac{\alpha}{2-\alpha} = \frac{q}{2p-q}, p > q \text{ là số nguyên dương lẻ;} \quad (3.8)$$

$$0 < \gamma_1; \gamma_2 = \gamma_1^{\beta+1} \frac{\alpha^\beta}{(\beta+1)^\beta} \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) > 0;$$

$$x(0) = x_0, \dot{x}(0) = -\gamma_1^{\beta/\alpha} \left(\frac{\alpha}{\beta+1}\right)^{\beta/\alpha} x_0^{1/(2-\alpha)}.$$

Định lý 1: Khi mặt trượt (3.7) tiến đến 0 ($s = 0$) và điều kiện (3.8) được thỏa thì các biến $x(t)$ và đạo hàm của nó $\dot{x}(t)$ hội tụ về 0 trong thời gian hữu hạn là:

$$t_{convergence} = \frac{\alpha}{\alpha - \beta} \left(\frac{\gamma_1 \alpha}{\beta + 1}\right)^{-\beta/\alpha} x_0^{(\alpha-\beta)/\alpha} \quad (3.9)$$

Chứng minh:

Đặt $y = \dot{x} \rightarrow \ddot{x} = y \frac{dy}{dx}$, $s = 0$, (3.7) trở thành:

$$F(y, y) = y \frac{dy}{dx} + \gamma_1 y^\alpha = -\gamma_2 x^\beta \quad (3.10)$$

Đáp ứng tự nhiên (natural response) của (3.10) là:

$$F(y, y) = y \frac{dy}{dx} + \gamma_1 y^\alpha = 0 \quad (3.11)$$

Trong đó $y = 0$ là một nghiệm của (3.11), trong trường hợp $y \neq 0$, ta viết lại (3.11) thành: $y^{1-\alpha} dy = -\gamma_1 dx$.

Lấy tích phân hai vế ta được:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2-\alpha} y^{2-\alpha} &= -\gamma_1 x + C \\ y &= (Mx + N)^{1/(2-\alpha)} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Với sự xuất hiện của tín hiệu $u = -\gamma_2 x^\beta$, nghiệm tổng quát có dạng:

$$y = (Mx + f(x))^{1/(2-\alpha)} \quad (3.13)$$

trong đó $N = f(x)$ làm hàm theo x . Thay vào ta được

$$\left(\gamma_1 + \frac{M + \frac{df}{dx}}{2 - \alpha} \right) (Mx + f(x))^\beta = -\gamma_2 x^\beta \quad (3.14)$$

Trong đó

- $Mx + f(x)$ sẽ có dạng $Mx + f(x) = Kx$; suy ra $f(x) = (K - M)x$

$$- \frac{df}{dx} = (K - M)$$

Đồng nhất 2 vế ta được:

$$\left(\gamma_1 + \frac{K}{2 - \alpha} \right) K^\beta = -\gamma_2 \quad (3.15)$$

Từ (3.15) chỉ ra rằng: nếu $\gamma_2 > 0$, $K < 0$, dễ thấy được:

- Cực tiểu của $g(K) = \left(\gamma_1 + \frac{K}{2 - \alpha} \right) K^\beta + \gamma_2$ tồn tại ở $K^* = -\gamma_1 \frac{\beta(2-\alpha)}{\beta+1} = -\gamma_1 \frac{\alpha}{\beta+1}$
- $g(K^* = -\gamma_1 \frac{\alpha}{\beta+1}) = 0$ và K^* là nghiệm duy nhất của (3.15)

Kết quả là:

$$y = (K^* x)^{1/(2-\alpha)} = - \underbrace{\left[\gamma_1 \frac{\alpha}{\beta+1} \right]}_A^{1/(2-\alpha)} x^{1/(2-\alpha)}$$

Do đó, nghiệm là:

$$y = \dot{x} = Ax^{1/(2-\alpha)} \quad (3.16)$$

Lưu ý : Định lý Picard – Lindelöf khẳng định (3.16) là nghiệm duy nhất của phương trình $F(y, \dot{y}) = y \frac{dy}{dx} + \gamma_1 y^\alpha = -\gamma_2 x^\beta$ theo tập hợp các điều kiện ban đầu đề ra.

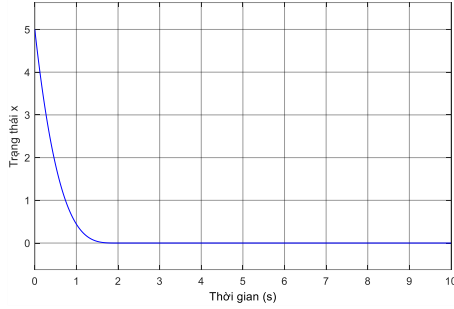
Hoàn tất chứng minh.

3.2.2 Mô phỏng thời gian hội tụ của mặt trượt:

Với $\gamma_1, \gamma_2, \alpha, \beta$ được chọn trong định lý 1, thông số hội tụ mong muốn là $t = 2s$, mặt trượt được thiết kế như sau:

$$s = \ddot{x} + 9.92\dot{x}^{3/5} + 12.8x^{3/7} = 0 \quad (3.17)$$

Với giá trị ban đầu $x_0 = 5$, hệ thống đáp ứng như Hình 3.5



Hình 3.5 Kết quả mô phỏng hội tụ tự nhiên của mặt 2TSM (natural response)

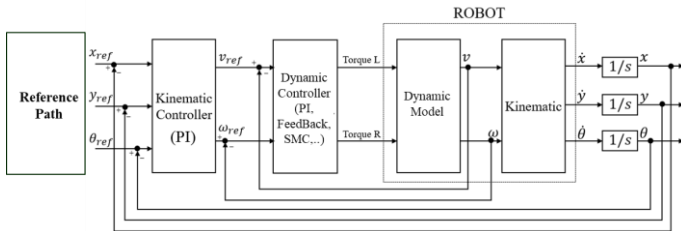
3.3 Kết luận

Như vậy trong phần này, luận án đã trình bày hoàn chỉnh lý thuyết mới về mặt trượt Terminal bậc 2, trong đó đã giải quyết được hai vấn đề quan trọng tồn tại trong nhiều năm qua, đó là khả năng tính toán thông số mặt trượt và khả năng đo lường thời gian hội tụ của các biến trạng thái.

CHƯƠNG 4 THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN QUỸ ĐẠO DỰA TRÊN MẶT TRƯỢT 2TSM

5.1 Phương pháp điều khiển quỹ đạo

Dựa trên quỹ đạo thiết kế sẵn, DDMR tham chiếu sẽ di chuyển trước và DDMR thực sẽ bám theo. Sơ đồ điều khiển mô tả trong Hình 5.1



Hình 5.1 Sơ đồ điều khiển quỹ đạo

❖ Điều khiển động học (Kinematic Controller):

Sai số theo dõi quỹ đạo p_e là sự khác biệt giữa tư thế thực tế của robot, được ký hiệu là $p = [x \ y \ \theta]^T$ và tư thế của robot tham chiếu, được ký hiệu là $p_{ref} = [x_{ref} \ y_{ref} \ \theta_{ref}]^T$, như vậy:

$$p_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = p_{ref} - p = \begin{bmatrix} x_{ref} - x \\ y_{ref} - y \\ \theta_{ref} - \theta \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

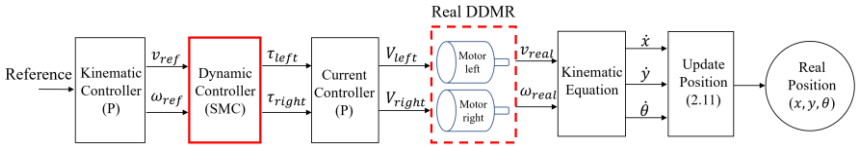
Bộ điều khiển động học ở vòng ngoài cùng sử dụng một bộ điều khiển loại P đơn giản được thiết kế như sau:

$$\omega_{ref} = K_w \cdot \theta_e, v_{ref} = K_v \cdot d_e \quad (5.2)$$

Trong đó, ω_{ref} , v_{ref} là vận tốc tham chiếu; K_w , K_v là hệ số cho bộ điều khiển; $d_e = (x_e^2 + y_e^2)^{1/2}$ và $\theta_e = \tan^{-1}(y_e, x_e)$.

❖ Điều khiển động lực học (Dynamic Controller):

Sau khi tín hiệu ω_{ref} , v_{ref} truyền đến bộ điều khiển động lực học, tại đây bộ điều khiển sẽ tính toán và tạo ra tín hiệu điều khiển là mô men $\tau_{right}, \tau_{left}$ đến từng bánh xe (Hình 5.2)



Hình 5.2 Lưu đồ điều khiển quỹ đạo trong mô phỏng

5.2 Sử dụng mặt trượt tuyến tính (LSM)

5.2.1 Thiết kế bộ điều khiển (mặt trượt LSM)

$$M\ddot{q} = V(\dot{q}) + Cu(t) + \rho(t) \quad (5.3)$$

Sai số được xác định như sau:

$$\dot{e}(t) = \dot{q} - \dot{q}_r = [v_e, \omega_e]^T = [v - v_{ref}, \omega - \omega_{ref}]^T \quad (5.4)$$

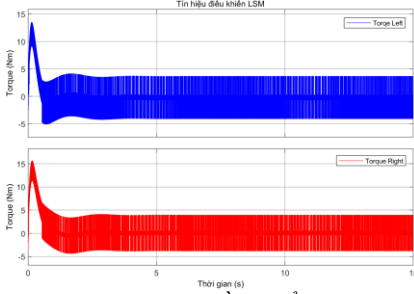
Mặt trượt: $s = \dot{e} + \gamma e$

Tín hiệu điều khiển là: $u = u_{eq} + u_n$

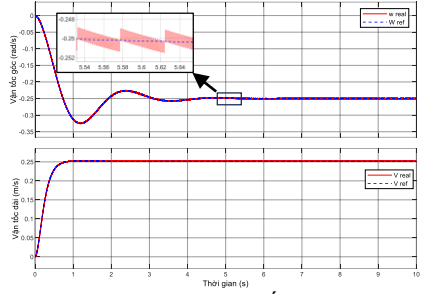
$$\begin{cases} u_{eq} = C^{-1}M(-M^{-1}V(\dot{q}) + \ddot{q}_r - \gamma\dot{e}) \\ u_n = -C^{-1}M\text{sign}(s)(k + \eta) \end{cases} \quad (5.5)$$

5.2.2 Mô phỏng

5.2.2.1 Mô phỏng LSM không sử dụng “lớp biên”

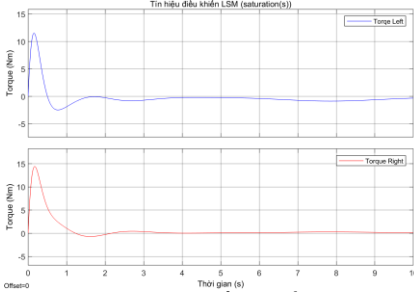


Hình 5.3 Tín hiệu điều khiển quỹ đạo 1 (LSM không boundary layer)

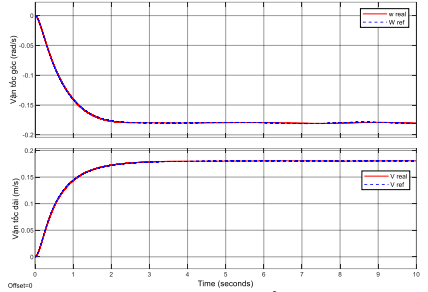


Hình 5.4 Đáp ứng vận tốc quỹ đạo 1 (LSM không boundary layer)

5.2.2.2 Mô phỏng LSM với lớp biên



Hình 5.5 Tín hiệu điều khiển quỹ đạo 1 (LSM có boundary layer)



Hình 5.6 Đáp ứng vận tốc quỹ đạo 1 (LSM có boundary layer)

Ta có thể thấy khá rõ việc sử dụng boundary layer sẽ làm mất đi đáng kể độ chính xác của bộ điều khiển.

5.3 Sử dụng mặt trượt phi tuyến (NTSM)

5.3.1 Thiết kế bộ điều khiển (mặt trượt NTSM)

$$s = e + \frac{1}{\gamma} \dot{e}^{q/p} \quad (5.6)$$

Định lý 2: Tín hiệu điều khiển là: $u = u_{eq} + u_n$

Trong đó:

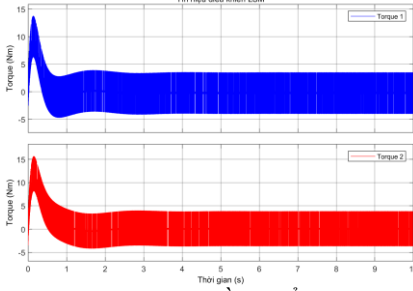
$$u_{eq} = C^{-1}M \left(-M^{-1}V(\dot{q}) + \ddot{q}_r - \gamma \frac{p}{q} \dot{e}^{2-q/p} \right) \quad (5.7)$$

$$u_n = -C^{-1}M \text{sign}(s)(k + \eta) \quad (5.8)$$

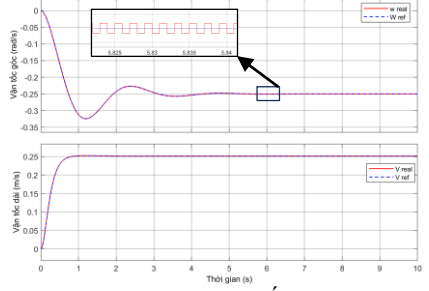
Và thoả điều kiện: $k = \text{Max}\{\|M^{-1}\rho(t)\|\}, \eta > 0$

5.3.2 Mô phỏng

5.3.2.1 Mô phỏng NTSM không sử dụng “lớp biên”

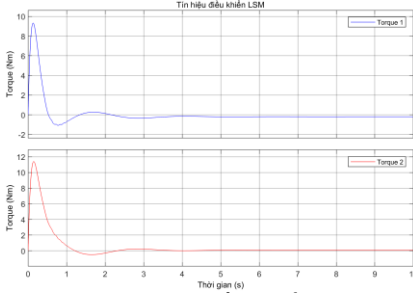


Hình 5.7 Tín hiệu điều khiển quỹ đạo 1 (NTSM không boundary layer)

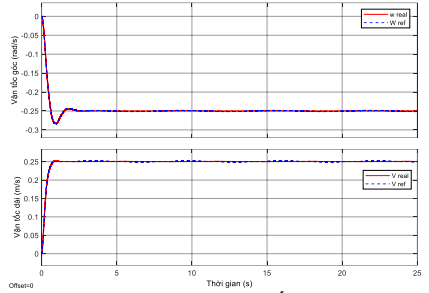


Hình 5.8 Đáp ứng vận tốc quỹ đạo 1 (NTSM không boundary layer)

5.3.2.2 Mô phỏng NTSM với lớp biên



Hình 5.9 Tín hiệu điều khiển quỹ đạo 1 (NTSM có boundary layer)



Hình 5.10 Đáp ứng vận tốc quỹ đạo 1 (NTSM có boundary layer)

Ta thấy NTSM thể hiện sự vượt trội so với LSM trong đảm bảo độ chính xác, tốc độ hội tụ và cả tính bền vững.

5.4 Sử dụng mặt trượt TSM bậc 2

5.4.1 Thiết kế bộ điều khiển (mặt trượt 2TSM)

Định lý 3: Sai số vận tốc của hệ thống sẽ tiến về “0” khi tín hiệu điều khiển được thiết kế như sau: $u = u_{eq} + u_n$

$$u_{eq} = C^{-1}M(-M^{-1}V + \ddot{q}_r - \gamma_1 \dot{e}^\alpha - \gamma_2 e^\beta) \quad (5.9)$$

$$\dot{u}_n = C^{-1}M(\text{sign}(s)(k + \eta))$$

Trong đó $k = \text{Max}\{\|M^{-1}\rho(t)\|\}$ và $\eta > 0$

Chứng minh:

Thay thế sai số trạng thái hệ thống vào mặt trượt 2TSM, ta được:

$$s = M^{-1}(V(\dot{q}) + C\tau(t) + \rho(t)) - \ddot{q}_r + \gamma_1 e^\alpha + \gamma_2 e^\beta$$

Thay tín hiệu điều khiển (5.9) vào biểu thức trên:

$$s = M^{-1}Cu_n + M^{-1}\rho(t)$$

Xét hàm Lyapunov: $V = 0.5s^T s$, suy ra:

$$\dot{V} = s^T \dot{s} = s^T (-\text{sign}(s)k - \text{sign}(s)\mu + M^{-1}\dot{\rho}(t)) \quad (5.10)$$

suy ra:

$$\dot{V} \leq -k\|s\| - \eta\|s\| + M^{-1}\dot{\rho}(t) \leq -\eta\|s\| = -\eta\sqrt{2V}^{1/2} < 0$$

$$s \rightarrow 0 \text{ trong thời gian hữu hạn } t_r \leq \frac{\sqrt{2V^{1/2}(0)}}{\eta}.$$

Hoàn tất chứng minh.

5.4.2 Mô phỏng

Mặt trượt và tín hiệu điều khiển thiết kế kể như sau:

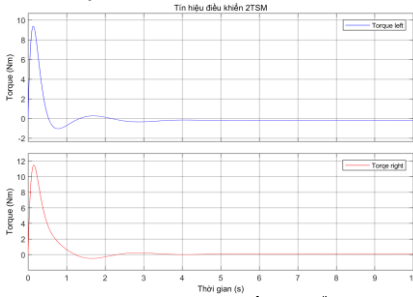
$$s = \ddot{e} + 4\dot{e}^{3/5} + 3.49e^{3/7}$$

$$u_{eq} = C^{-1}M \left(-M^{-1}V + \ddot{q}_r - 4\dot{e}^{3/5} - 3.49e^{3/7} \right)$$

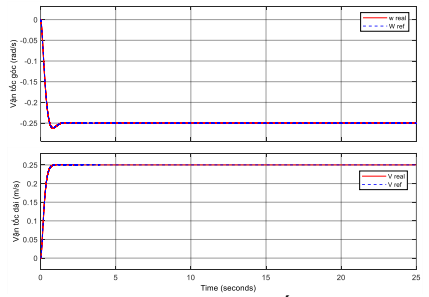
$$\dot{u}_n = C^{-1}M(\text{sign}(s)([2; 1]^T + 0.2))$$

Kết quả mô phỏng từ Hình 5.11 đến Hình 4.14

- Quỹ đạo 1: hình tròn, bán kính 1m**



Hình 5.11 Tín hiệu điều khiển quỹ đạo 1 (2TSM)

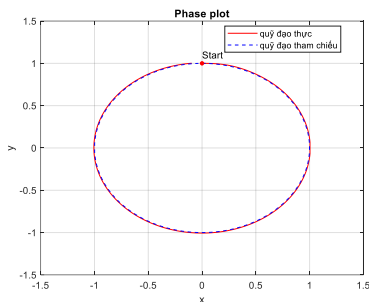


Hình 5.12 Đáp ứng vận tốc theo quỹ đạo 1 (2TSM)

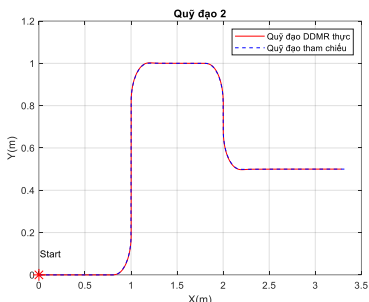
Ta có thể thấy với bộ điều khiển 2TSM đã loại bỏ hiện tượng chattering trong tín hiệu điều khiển (Hình 5.11) mà vẫn đảm bảo độ chính xác cao.

- Quỹ đạo 2: Đoạn đường có thẳng kết hợp rẽ 90°**

Với quỹ đạo 2, bộ điều khiển 2TSM vẫn thể hiện tính bền vững và độ chính xác cao (Hình 5.14).



Hình 5.13 Kết quả của DDMR theo quỹ đạo 1 (2TSM)



Hình 5.14 Kết quả của DDMR theo quỹ đạo 2 (2TSM)

5.4.3 So sánh với các bộ điều khiển trượt truyền thống

Bảng 5.1 Đáp ứng sai số vận tốc dài giữa các phương pháp

STT	Thông số đáp ứng	Đơn vị	NTSM boundary	NTSM	2TSM
1	Sai số xác lập	m/s	2e-3	-1.2e-4	-2.7e-8
2	(IAE)	m/s	5e-2	2.09e-3	1.6e-5

Bảng 5.2 Đáp ứng sai số vận tốc góc giữa các phương pháp

STT	Thông số đáp ứng	Đơn vị	NTSM boundary	NTSM	2TSM
1	Sai số xác lập	m/s	-4e-2	1.07e-3	9.6e-7
2	(IAE)	m/s	3.6e-2	8e-3	1.37e-5

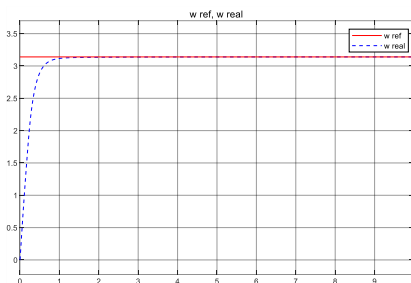
Ta có thể thấy rõ, cả hai chỉ số “sai số xác lập” và “IAE”, bộ điều khiển 2TSM đều thể hiện vượt trội. Điều này đã chứng minh tính ưu việt của bộ điều khiển mới được đề xuất.

5.5 Thực nghiệm

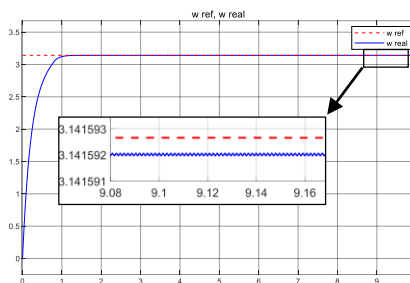
5.5.1 Điều khiển động cơ DC

5.5.1.1 Mô phỏng

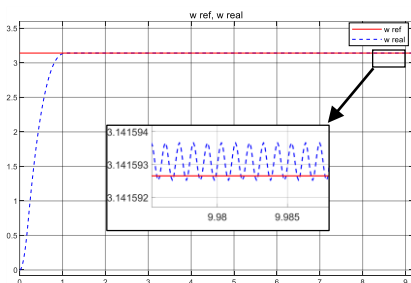
Bảng mô phỏng có thể thấy cả 4 phương pháp điều khiển đều đáp ứng tương đương nhau, cả 4 đều đưa hệ thống về trạng thái hội tụ sau xấp xỉ 1s. Trong đó phương pháp 2TSM (Hình 5.18) thể hiện sự đáp ứng vượt trội, khi vừa đảm bảo độ chính xác, đưa sai số về “0” và không xuất hiện “chattering”.



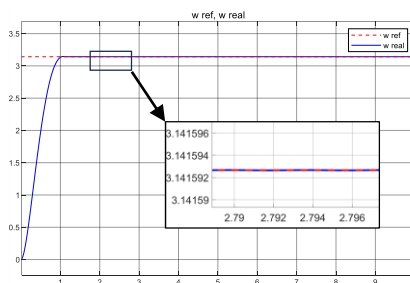
Hình 5.15 Đáp ứng vận tốc của động cơ (PID)



Hình 5.16 Đáp ứng vận tốc của động cơ (LSM)



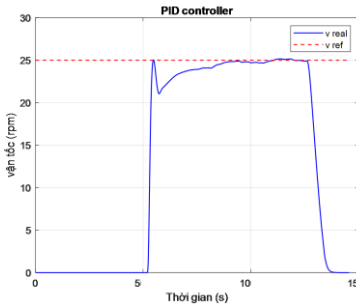
Hình 5.17 Đáp ứng vận tốc của động cơ (NTSM)



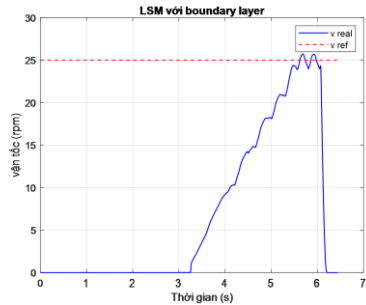
Hình 5.18 Đáp ứng vận tốc của động cơ (2TSM)

5.5.1.2 Thực nghiệm

- **Kịch bản 1:** Thử nghiệm với tốc độ tham chiếu không đổi, không hiệu chỉnh bộ điều khiển

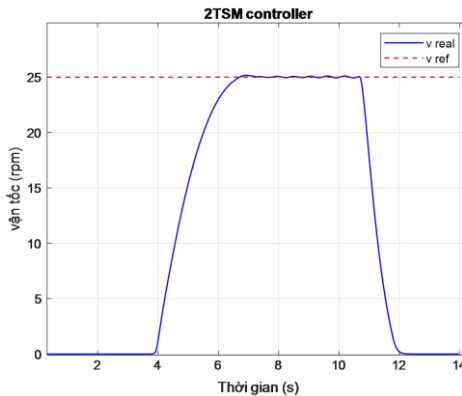


Hình 5.19 Bộ điều khiển PID



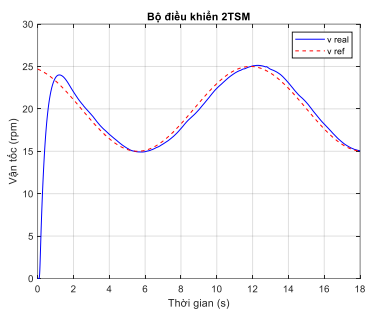
Hình 5.20 Bộ điều khiển LSM với boundary layer ($\varepsilon = 0.01$)

Qua các thí nghiệm và mô phỏng trên, luận án đã chứng minh ưu điểm vượt trội của 2TSM trong việc vẫn giữ lại được tính bền vững đặc trưng của SMC, độ chính xác cao của TSM và khả năng triệt tiêu chattering để áp dụng trực tiếp vào hệ điều khiển thực tế, là cơ sở để áp dụng thực nghiệm điều khiển quỹ đạo.

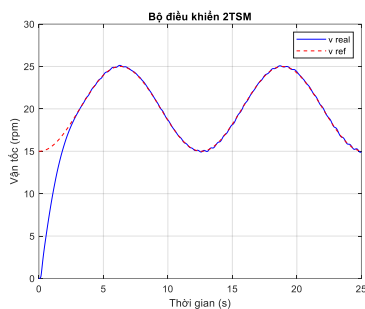


Hình 5.21 Bộ điều khiển 2TSM

- **Kịch bản 2:** Thử nghiệm với tốc độ tham chiếu thay đổi



Hình 5.22 Đáp ứng bộ điều khiển PID với vận tốc tham chiếu thay đổi

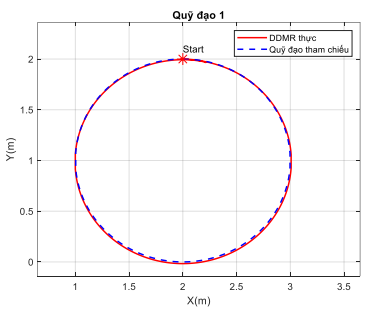


Hình 5.23 Đáp ứng bộ điều khiển 2TSM với vận tốc tham chiếu thay đổi

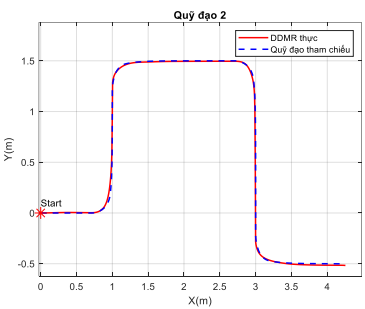
5.5.2 Điều khiển quỹ đạo

Kích thước (DxRxH)	20x20x20 cm
Đường kính bánh xe	6 cm
Khoảng cách trục bánh	23.5 cm
Nguồn (DC)	12VDC 6000mah
Khối lượng	4kg

➤ **Kịch bản 1:** Khối lượng 3.5kg được đặt giữa trọng tâm DDMR.



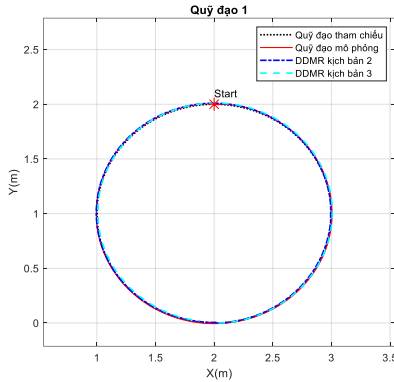
Hình 5.24 DDMR di chuyển theo quỹ đạo 1



Hình 5.25 DDMR di chuyển theo quỹ đạo 2

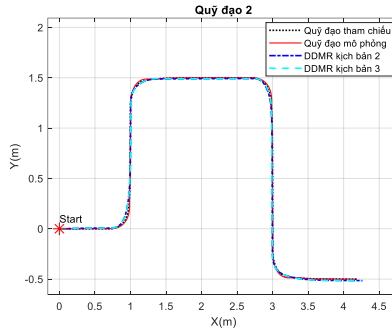
- **Kịch bản 2, 3:** Khối lượng 3.5kg được đặt lệch trái 5cm so với trọng tâm DDMR.

Quỹ đạo 1:



Hình 5.26 Kết quả DDMR theo quỹ đạo 1 (Kịch bản 2&3)

Quỹ đạo 2:



Hình 5.27 Kết quả DDMR theo quỹ đạo 2 (Kịch bản 2&3)

5.6 Kết luận:

Phương pháp điều khiển quỹ đạo dựa trên 2TSM như đã thiết kế ở Chương 4 đã đáp ứng đầy đủ các yêu cầu đặt ra trong luận án, minh chứng trong cả mô phỏng và thực nghiệm.

KẾT LUẬN

Những nội dung nghiên cứu chính của luận án

Luận án đã tập trung nghiên cứu giải pháp khắc phục nhược điểm của điều khiển trượt là hiện tượng chattering mà vẫn giữ được các ưu điểm cơ bản là: bền vững trước các bất định và độ chính xác cao.

Trong Chương 2, luận án đã trình bày cơ sở lý thuyết của điều khiển trượt và mô hình hóa hệ thống DDMR cùng các bất định cần giải quyết. Từ nền tảng lý thuyết đó, chương 3 luận án đã phân tích ưu nhược điểm của các phương pháp khử chattering hiện tại theo hướng nâng bậc cho mặt trượt, qua đó phát triển phương án sử dụng mặt trượt 2TSM. Dựa trên mặt trượt 2TSM này, chương 4 đã trình bày thiết kế bộ điều khiển quỹ đạo và kết quả thực nghiệm để chứng minh hiệu quả bộ điều khiển.

Những đóng góp khoa học mới của luận án

Luận án có 2 đóng góp chính đó là:

- Thiết kế mặt trượt Terminal Sliding Mode bậc 2 hoàn chỉnh với các khả năng:
 - o Loại bỏ chattering trong tín hiệu điều khiển mà vẫn giữ được tính bền vững của SMC,
 - o Trạng thái hội tụ về điểm cân bằng trong thời gian hữu hạn,
 - o Có thể tính toán được thông số bộ điều khiển,
 - o Có thể đo lường được thời gian đáp ứng trạng thái,
 - o Dễ dàng hiệu chỉnh bộ điều khiển.
- Thiết kế bộ điều khiển quỹ đạo cho hệ DDMR, trong đó xét đến các yếu tố bất định mô hình, nhiễu không xác định.

Hướng phát triển của luận án

Phát triển giải pháp hoàn chỉnh cho hệ thống xe lăn điện tự hành có thể di chuyển trong những khu vực trong khuôn viên quy định.

Tiếp tục nghiên cứu, phát triển lý thuyết trượt cho các bộ điều khiển mô men cho các hệ cơ điện khác như: cánh tay robot, drone, v.v..