

**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

TPHCM, 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:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

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 giờ, ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại:

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

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 hạn chế vận động và xấp xỉ 5,5 đến 6 triệu người trưởng thành sử dụng xe lăn để di chuyển [1].

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, 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 các 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. Vì vậy cần phải có phương pháp điều khiển quỹ đạo đáng tin cậy.

Trong những năm qua đã có nhiều nghiên cứu về các giải pháp điều khiển quỹ đạo cho xe lăn điện [4]-[12], tuy nhiên các nghiên cứu này phần lớn đều không phản ánh đầy đủ các yếu tố bất định hoặc thiếu xét đến mô hình động lực của xe lăn nên không đảm bảo sự bền vững trước các thay đổi môi trường và nhiễu loạn, vì vậy kết quả hầu hết chỉ dừng lại ở mô phỏng hoặc thực nghiệm trong môi trường thí nghiệm. Mặc dù bên cạnh đó cũng có một số nghiên cứu sử dụng phương pháp Sliding Mode Control [13]-[17] có đánh giá đến các yếu tố bất định trên, tuy nhiên các nghiên cứu này chỉ dừng lại ở mô phỏng vì sự xuất hiện của chattering, nguyên nhân chi tiết hơn sẽ được trình bày ở phần sau của luận án.

Chính vì vậy, việc nghiên cứu một phương pháp mới để điều khiển quỹ đạo xe lăn điện, đảm bảo được độ chính xác, sự bền vững trước các yếu tố bất định, và hơn nữa là có thể áp dụng vào thực tế là hết sức cần thiết.

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, các phương pháp triệt tiêu chattering hiện có, từ đó đưa ra sự lựa chọn phương pháp chính nghiên cứu trong luận án
- Chương 3: Giới thiệu, mô tả cụ thể mô hình hoá của DDMR, các yếu tố bất định có thể xảy ra và phương pháp điều khiển quỹ đạo, điều khiển động học, động lực học cho mô hình DDMR
- Chương 4: Thiết kế bộ điều khiển quỹ đạo DDMR dựa trên Terminal Sliding Mode bậc 2 bao gồm mô phỏng và thực nghiệm.
- Kết luận

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN

1.1 Tổng quan các nghiên cứu liên quan

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

Năm 1999 Caracciolo [5] và Sun.S [6] vào năm 2005 đã sử dụng phương pháp “linearization feedback control” để điều khiển quỹ đạo cho mobile robot. Tương tự, vào năm 2019, K. Maatoug [7] đã đề xuất phương pháp điều khiển quỹ đạo dựa trên bộ điều khiển Fuzzy, năm 2023, tác giả A. Amrane [8] có đề xuất phương pháp điều khiển dựa trên bộ điều khiển PID. Điểm chung của các nghiên cứu này khi chỉ xét mô hình động học mà không xét động lực học. Bên cạnh đó T. Fukao và các cộng sự [9], tác giả Shojaei và các cộng sự [10], đã sử dụng điều khiển thích nghi (Adaptive control), có tính đến mô hình động lực và cả sự xuất hiện của tham số chưa biết (uncertainties). Li.Z năm 2016 [11] sử dụng cách tiếp cận kết hợp “Neural-Dynamic Optimized Model Predictive”, năm 2023 Trujillo [12] đề xuất nghiên cứu “*Trajectory Tracking Control of a Mobile Robot using*

Neural Networks”. Tuy nhiên các nghiên cứu này chỉ xét đến động học và dừng ở mô phỏng.

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

Năm 2009, Solea [13] 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 [14] năm 2018 sử dụng một mặt trượt tích phân, J.Yang (1999) [15], Lingrong (2011) [16], Nikranjbar (2018) [17] 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.

1.1.3 Các nghiên cứu về khử chattering trong SMC

Năm 1992 Utkin [20] 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 [22], Levant [23]-[24]. Năm 2006, Ferrara [40] giới thiệu mặt trượt SMC bậc 2 cho cánh tay robot. Năm 2016, Y. Feng [16] đề xuất mặt trượt TSM full order. Năm 2021, Xinghuo Yu và Yong Feng [41] 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.

1.2 Kết luận

1.2.1 Tổng kết tình hình nghiên cứu hiện nay

1.2.2 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.

1.2.3 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 PHƯƠNG PHÁP LOẠI BỎ CHATTERING

2.1 Ổn định tiệm cận và ổn định trong thời gian hữu hạn

2.1.1 Ổn định tiệm cận

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

❖ **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:

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

2.1.2 Ổn định trong thời gian hữu hạn

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

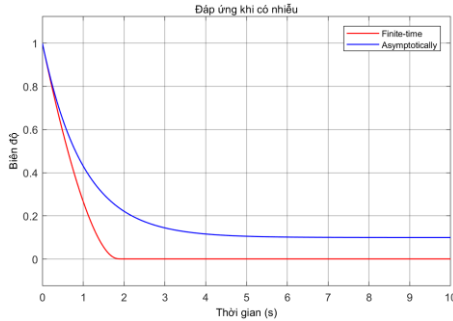
Trong đó p, q là số lẻ và $p/q < 1$

❖ **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.

2.2 Lý thuyết điều khiển trượt

2.2.1 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:

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

$$u_n = -k \text{sign}(s)$$

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

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

2.2.2 Mặt trượt phi tuyến (Nonlinear Sliding Mode)

2.2.2.1 Terminal Sliding Mode Control (TSM)

Đầu tiên ta chọn mặt trượt phi tuyến:

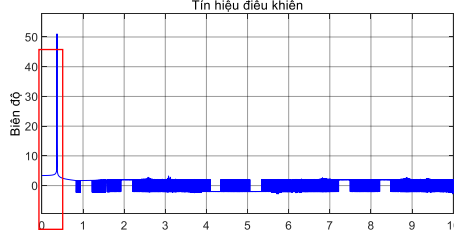
$$s = x_2 + \gamma x_1^{p/q}, \gamma > 0 \quad (2.10)$$

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:

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

Lưu ý : Trong tín hiệu điều khiển $ueq = -f(x) - \gamma \frac{p}{q} x_1^{\frac{p-1}{q}}$ $\dot{x}_1$ 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

2.2.2.2 Nonsingular Terminal Sliding Mode Control (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 (2.21) tương đương với (2.10). Luật điều khiển $u = u_{eq} + u_n$ được thiết kế như sau:

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

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.

2.3 Loại bỏ “chattering” trong điều khiển trượt.

2.3.1 Phương pháp thay thế bằng hàm saturation

2.3.2 Phương pháp thay thế bằng hàm sigmoid

2.3.3 Phương pháp trượt bậc cao

2.3.3.1 Mặt trượt LSM bậc cao

Mặt trượt được đề xuất:

$$s = \ddot{x} + \alpha \dot{x} + \beta x \quad (2.14)$$

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

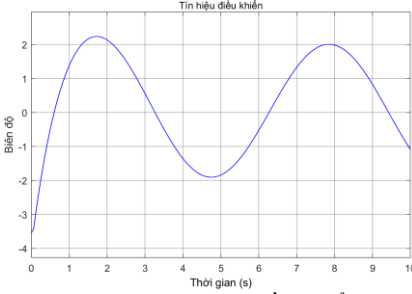
$$\begin{cases} u_{eq} = -f(x) - \alpha \dot{x}_1 - \beta x_1 \\ \dot{u}_n = -k \text{sign}(s) \end{cases} \quad (2.15)$$

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

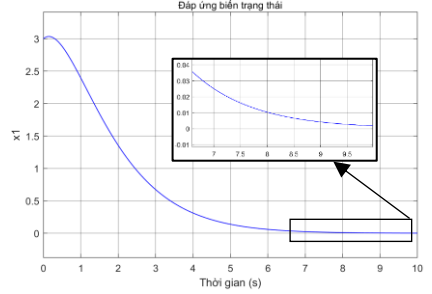
$$s = \ddot{x}_1 + 2\dot{x}_1 + x_1$$

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

Kết quả mô phỏng được thể hiện ở Hình 2.3.



Hình 2.3 Tín hiệu điều khiển



Hình 2.4 Đáp ứng trạng thái

2.3.3.2 Mặt trượt Terminal Sliding Mode bậc cao (FOTSM)

Theo [23], mặt trượt được chọn là:

$$s = \dot{x}_n + c_n \text{sgn}(x_n) |x_n|^{\alpha_n} + \dots + c_1 \text{sgn}(x_1) |x_1|^{\alpha_1} \quad (2.16)$$

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:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \alpha, & n = 1 \\ \alpha_{i-1} = \frac{\alpha_i \alpha_{i+1}}{2\alpha_{i+1} - \alpha_i}, & i = 1, 2, \dots, n \quad \forall n \geq 2 \end{cases} \quad (2.17)$$

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

Áp dụng cho hệ thống (2.5) ta có mặt trượt:

$$s = \ddot{x}_1 + c_2 \text{sign}(\dot{x}_1) |\dot{x}_1|^{\alpha_2} + c_1 \text{sign}(x_1) |x_1|^{\alpha_1} \quad (2.18)$$

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

$$u_{eq} = -f(x) - c_2 \text{sign}(\dot{x}_1) |\dot{x}_1|^{\alpha_2} - c_1 \text{sign}(x_1) |x_1|^{\alpha_1} \quad (2.19)$$

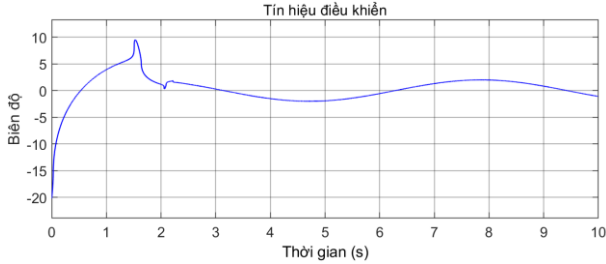
$$\dot{u}_n + \lambda u_n = v; v = -(k_d + k_T + \eta) \text{sign}(s)$$

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

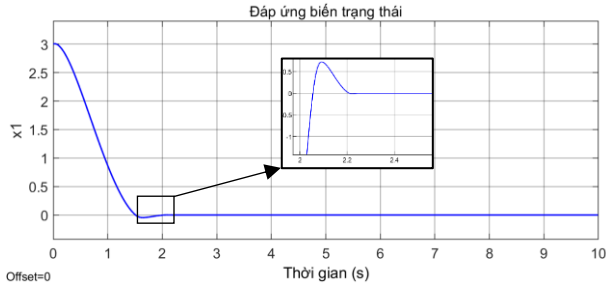
$$s = \ddot{x}_1 + 2\text{sign}(\dot{x}_1)|\dot{x}_1|^{9/16} + \text{sign}(x_1)|x_1|^{9/23}$$

$$\rightarrow u = u_{eq} + e^{-0.1t} \int_0^t e^{-0.1t} v dt$$

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



Hình 2.5 Tín hiệu điều khiển FOTSM



Hình 2.6 Đáp ứng biến trạng thái FOTSM

Ta có thể thấy tín hiệu điều khiển đã loại bỏ được chattering gần như hoàn toàn (Hình 2.5) và biến trạng thái về “0” (Hình 2.6), tuy nhiên phương pháp này hiện tại có hai vấn đề rất lớn để có thể áp dụng được vào thực tế [24][40]: **không thể tính toán, không thể đo lường**

2.4 Kết luận

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.

CHƯƠNG 3. ROBOT DI ĐỘNG VÀ PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN QUỸ ĐẠO

3.1 Giới thiệu mô hình

3.1.1 Mô hình động học (Kinematic)

❖ Động học thuận (Forward kinematic):

$$\begin{cases} v = \frac{v_r + v_l}{2} = \frac{R(\dot{\varphi}_r + \dot{\varphi}_l)}{2} \\ \omega = \frac{v_r - v_l}{2L} = \frac{R(\dot{\varphi}_r - \dot{\varphi}_l)}{2L} \end{cases} \quad (3.1)$$

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

$$\begin{cases} v_r = v + \omega L \\ v_l = v - \omega L \end{cases} \quad (3.2)$$

3.1.2 Mô hình động lực học (Dynamic)

$$\begin{cases} \left(m + \frac{2}{R^2} I_w\right) \dot{v} - m_c d \omega^2 = \frac{1}{R} (\tau_r + \tau_l) \\ \left(I + \frac{2L^2}{R^2} I_w\right) \dot{\omega} + m_c d \omega v = \frac{L}{R} (\tau_r - \tau_l) \end{cases} \quad (3.3)$$

3.1.3 Các bất định trong mô hình

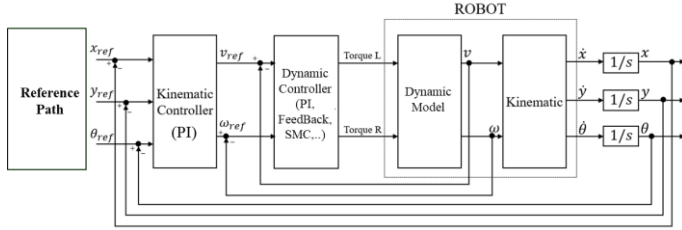
- Bất định về khối lượng: giới hạn ở mức 50 – 100 (kg)
- Sự thay đổi về trọng tâm: giới hạn ở mức $\Delta d = 15$ (cm)

$$M_0 \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = V_0 + C \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} + \underbrace{\Delta V - \Delta M \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix}}_{\rho(t)} + d(t) \quad (3.4)$$

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.

3.2 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 3.1



Hình 3.1 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:

$$p_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = p_{ref} - p = \begin{bmatrix} x_{ref} - x \\ y_{ref} - y \\ \theta_{ref} - \theta \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

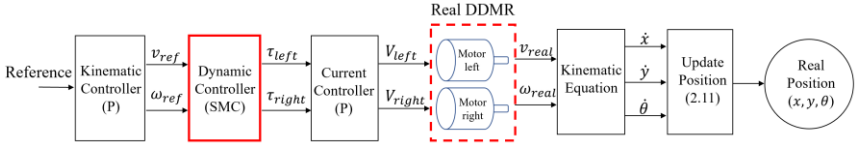
Bộ điều khiển động học ở vòng ngoài cùng sử dụng một bộ điều khiển loại P đơn giản được thiết kế như sau:

$$\omega_{ref} = K_w \cdot \theta_e, v_{ref} = K_v \cdot d_e \quad (3.6)$$

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 3.2)



Hình 3.2 Lưu đồ điều khiển quỹ đạo trong mô phỏng

3.3 Bộ điều khiển quỹ đạo dựa trên mặt trượt tuyến tính (LSM)

3.3.1 Thiết kế bộ điều khiển quỹ đạo sử dụng mặt trượt LSM

$$M\ddot{q} = V(\dot{q}) + Cu(t) + \rho(t) \quad (3.7)$$

Sai số được xác định như sau:

$$\dot{e}(t) = \dot{q} - \dot{q}_r = [v_e, \omega_e]^T = [v - v_{ref}, \omega - \omega_{ref}]^T \quad (3.8)$$

Mặt trượt: $s = \dot{e} + \gamma e$

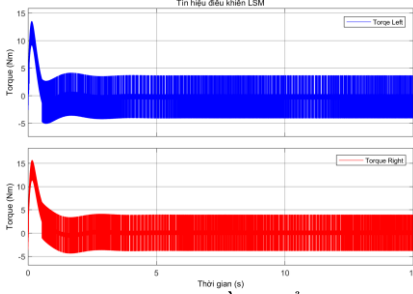
Định lý 1: Tín hiệu điều khiển là: $u = u_{eq} + u_n$

$$u_{eq} = C^{-1}M(-M^{-1}V(\dot{q}) + \ddot{q}_r - \gamma \dot{e}) \quad (3.9)$$

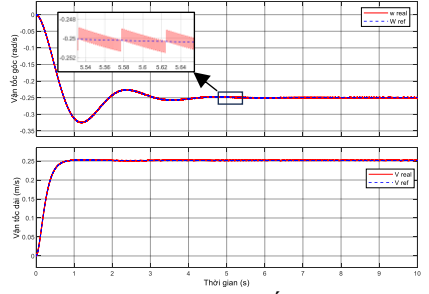
$$u_n = -C^{-1}M \text{sign}(s)(k + \eta) \quad (3.10)$$

3.3.2 Mô phỏng

3.3.2.1 Mô phỏng LSM không sử dụng “boundary layer”

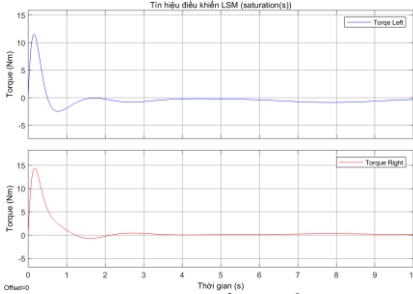


Hình 3.3 Tín hiệu điều khiển quỹ đạo 1 (LSM không boundary layer)

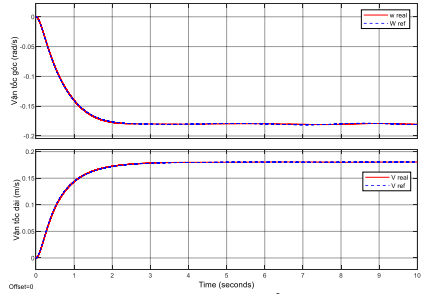


Hình 3.4 Đáp ứng vận tốc quỹ đạo 1 (LSM không boundary layer)

3.3.2.2 Mô phỏng LSM với boundary layer



Hình 3.5 Tín hiệu điều khiển quỹ đạo 1 (LSM có boundary layer)



Hình 3.6 Đáp ứng vận tốc quỹ đạo 1 (LSM có boundary layer)

3.3.2.3 Nhận xét

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

3.4 Bộ điều khiển quỹ đạo sử dụng mặt trượt NTSM

3.4.1 Thiết kế bộ điều khiển quỹ đạo sử dụng mặt trượt NTSM

$$s = e + \frac{1}{\gamma} \dot{e}^{q/p} \quad (3.11)$$

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

Trong đó:

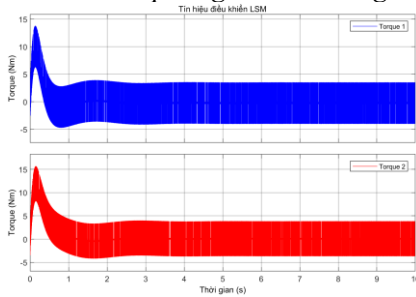
$$u_{eq} = C^{-1}M \left(-M^{-1}V(\dot{q}) + \ddot{q}_r - \gamma \frac{p}{q} \dot{e}^{2-q/p} \right) \quad (3.12)$$

$$u_n = -C^{-1}M \text{sign}(s)(k + \eta) \quad (3.13)$$

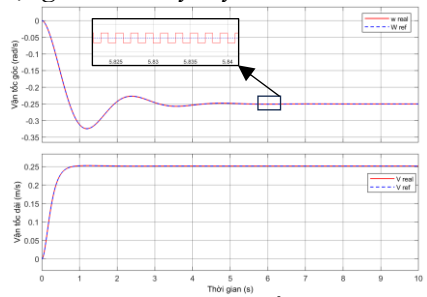
Và thỏa điều kiện: $k = \text{Max}\{\|M^{-1}\rho(t)\|\}, \eta > 0$

3.4.2 Mô phỏng

3.4.2.1 Mô phỏng NTSM không sử dụng “boundary layer”

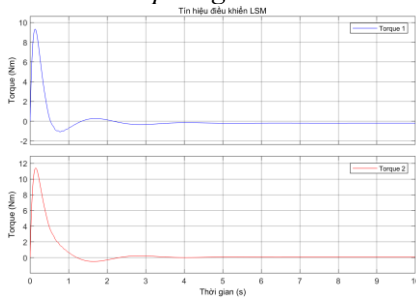


Hình 3.7 Tín hiệu điều khiển quỹ đạo 1 (NTSM không boundary layer)

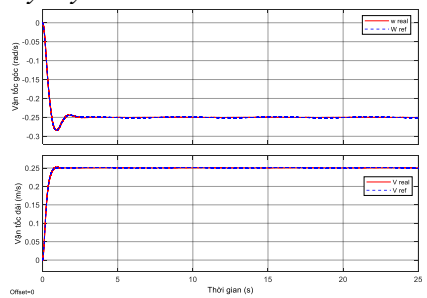


Hình 3.8 Đáp ứng vận tốc quỹ đạo 1 (NTSM không boundary layer)

3.4.2.2 Mô phỏng NTSM với boundary layer



Hình 3.9 Tín hiệu điều khiển quỹ đạo 1 (NTSM có boundary layer)



Hình 3.10 Đáp ứng vận tốc quỹ đạo 1 (NTSM có boundary layer)

3.4.2.3 Nhận xét

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.

3.5 Kết luận

Hiện tượng chattering xuất hiện ở cả hai phương pháp LSM và NTSM, và “boundary layer” đã thể hiện sự thiếu bền vững và làm giảm độ chính xác bộ điều khiển. Vậy trong chương 4, luận án sẽ giải quyết vấn đề này bằng phương pháp trượt bậc cao

CHƯƠNG 4 THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN QUỶ ĐẠO BẰNG PHƯƠNG PHÁP TERMINAL SLIDING MODE BẬC 2

4.1 Mặt trượt TSM bậc 2

4.1.1 Đặc tính thời gian hội tụ của mặt trượt

Ta chọn mặt trượt TSM bậc 2 như sau:

$$s = \ddot{x} + \gamma_1 \dot{x}^\alpha + \gamma_2 x^\beta \quad (4.1)$$

Trong đó, các điều kiện sau được thỏa:

$$0 < \alpha = \frac{q}{p} < 1, \beta = \frac{\alpha}{2-\alpha} = \frac{q}{2p-q}, p > q \text{ là số nguyên dương}; \quad (4.2)$$

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

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

Định lý 3: Khi mặt trượt (4.1) tiến đến 0 ($s = 0$) và điều kiện (4.2) 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:

$$t_{convergence} = \frac{\alpha}{\alpha - \beta} \left(\frac{\gamma_1 \alpha}{\beta + 1}\right)^{-\beta/\alpha} x_0^{(\alpha-\beta)/\alpha} \quad (4.3)$$

Chứng minh:

Đặt $y = \dot{x} \rightarrow \ddot{x} = y \frac{dy}{dx}$, $s = 0$, (4.1) trở thành:

$$F(y, \dot{y}) = y \frac{dy}{dx} + \gamma_1 y^\alpha = -\gamma_2 x^\beta \quad (4.4)$$

Đáp ứng tự nhiên (natural response) của (4.4) là:

$$F(y, \dot{y}) = y \frac{dy}{dx} + \gamma_1 y^\alpha = 0 \quad (4.5)$$

Trong đó $y = 0$ là một nghiệm của (4.5), trong trường hợp $y \neq 0$, ta viết lại (4.5) thành: $y^{1-\alpha} dy = -\gamma_1 dx$.

Lấy tích phân hai vế ta được:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2-\alpha} y^{2-\alpha} &= -\gamma_1 x + C \\ y &= (Mx + N)^{1/(2-\alpha)} \end{aligned} \quad (4.6)$$

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

$$y = (Mx + f(x))^{1/(2-\alpha)} \quad (4.7)$$

trong đó $N = f(x)$ làm hàm theo x . Thay (4.7) vào (4.4) ta được

$$\left(\gamma_1 + \frac{M + \frac{df}{dx}}{2 - \alpha} \right) (Mx + f(x))^\beta = -\gamma_2 x^\beta \quad (4.8)$$

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:

$$\left(\gamma_1 + \frac{K}{2 - \alpha} \right) K^\beta = -\gamma_2 \quad (4.9)$$

Từ (4.9) 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 (4.9)

Kết quả là:

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

Do đó, nghiệm là:

$$y = \dot{x} = Ax^{1/(2 - \alpha)} \quad (4.10)$$

Lưu ý : Định lý Picard – Lindelöf khẳng định (4.10) 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.

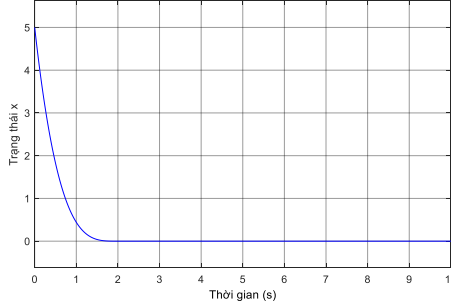
Hoàn tất chứng minh.

4.1.2 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:

$$s = \ddot{x} + 9.92\dot{x}^{3/5} + 12.8x^{3/7} = 0 \quad (4.11)$$

Với giá trị ban đầu $x_0 = 5$, hệ thống đáp ứng như Hình 4.1:



Hình 4.2 Kết quả mô phỏng hội tụ tự nhiên của mặt 2TSM (natural response)

4.2 Điều khiển quỹ đạo dựa trên mặt trượt TSM bậc 2

4.2.1 Thiết kế bộ điều khiển

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

$$u_{eq} = C^{-1}M(-M^{-1}V + \ddot{q}_r - \gamma_1 \dot{e}^\alpha - \gamma_2 e^\beta) \quad (4.12)$$

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

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

Chứng minh:

Thay thế sai số trạng thái hệ thống vào mặt trượt 2TSM (4.12), ta được:

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

Thay tín hiệu điều khiển (4.12) vào biểu thức trên:

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

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

$$\dot{V} = s^T \dot{s} = s^T (-\text{sign}(s)k - \text{sign}(s)\mu + M^{-1}\dot{\rho}(t)) \quad (4.13)$$

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.

4.2.2 Mô phỏng

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

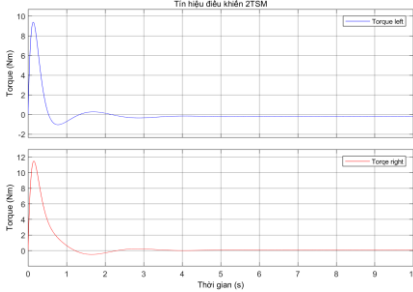
$$s = \ddot{e} + 4\dot{e}^{3/5} + 3.49e^{3/7}$$

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

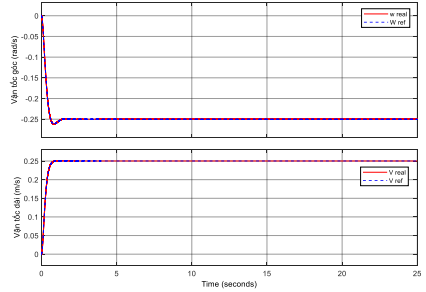
$$\dot{u}_n = C^{-1}M(\text{sign}(s)([2; 1]^T + 0.2))$$

Kết quả mô phỏng từ Hình 4.3 đến Hình 4.6

- **Quỹ đạo 1: hình tròn, bán kính 1m**



Hình 4.3 Tín hiệu điều khiển quỹ đạo 1 (2TSM)

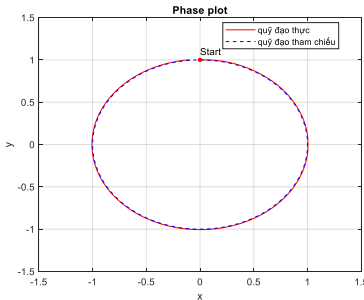


Hình 4.4 Đáp ứng vận tốc theo quỹ đạo 1 (2TSM)

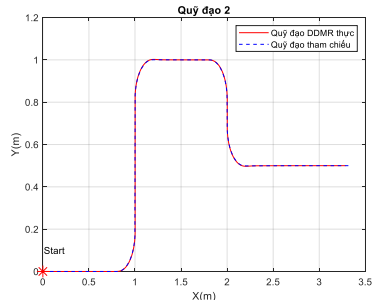
Ta có thể thấy với bộ điều khiển 2TSM đã loại bỏ hiện tượng chattering trong tín hiệu điều khiển (Hình 4.3) mà vẫn đảm bảo độ chính xác cao.

- **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 4.6).



Hình 4.5 Kết quả của DDMMR theo quỹ đạo 1 (2TSM)



Hình 4.6 Kết quả của DDMMR theo quỹ đạo 2 (2TSM)

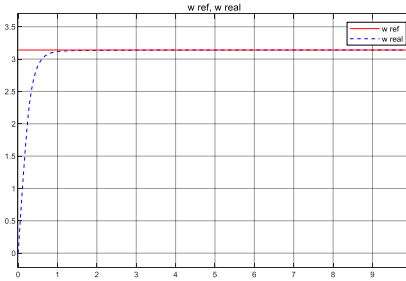
4.3 Thực nghiệm

4.3.1 Điều khiển động cơ DC

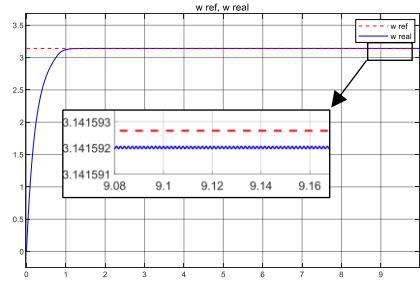
4.3.1.1 Mô phỏng

Bằng 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 4.10) thể hiện sự đáp ứng vượt

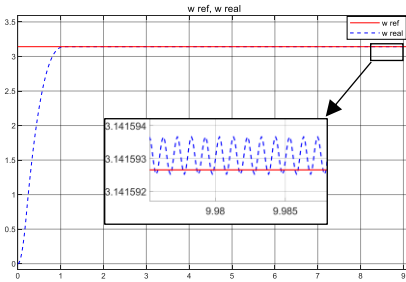
trội, khi vừa đảm bảo độ chính xác, đưa sai số về “0” và không xuất hiện “chattering”.



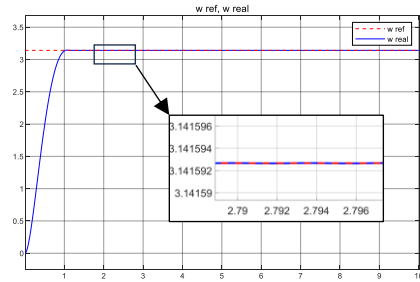
Hình 4.7 Đáp ứng vận tốc của động cơ (PID)



Hình 4.8 Đáp ứng vận tốc của động cơ (LSM)

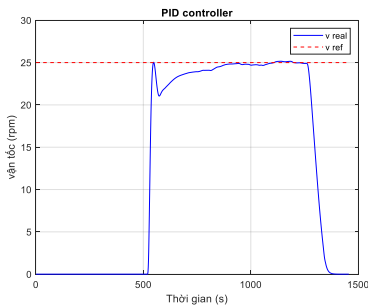


Hình 4.9 Đáp ứng vận tốc của động cơ (NTSM)

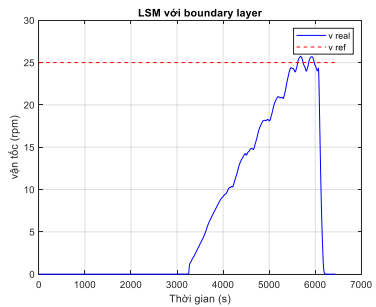


Hình 4.10 Đáp ứng vận tốc của động cơ (2TSM)

4.3.1.2 Thực nghiệm

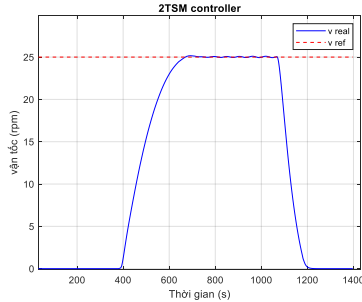


Hình 4.11 Bộ điều khiển PID



Hình 4.12 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.

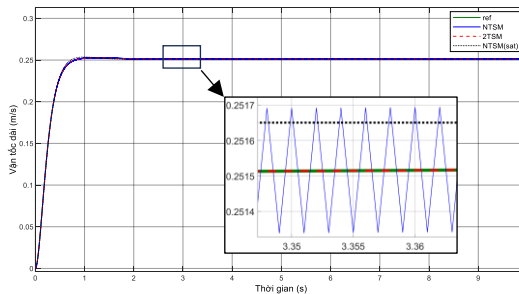


Hình 4.13 Bộ điều khiển 2TSM

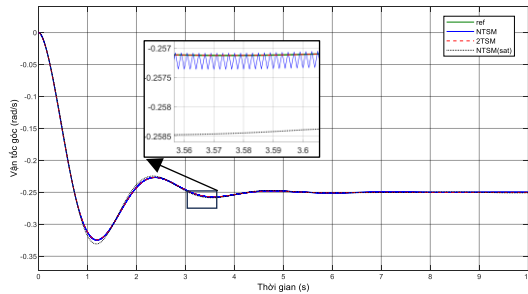
4.3.2 Điều khiển quỹ đạo

4.3.2.1 Mô phỏng

Trước khi tiến hành thực nghiệm điều khiển quỹ đạo, luận án sẽ trình bày ngắn gọn kết quả mô phỏng của 2TSM so với NTSM và NTSM sử dụng boundary layer trên cùng một hệ quy chiếu (cùng giá trị bất định, cùng thông số vật lý của DDMR) để đánh giá rõ hơn bằng thông số cụ thể sự vượt trội của phương pháp 2TSM.



Hình 4.14 Kết quả đáp ứng vận tốc dài giữa 3 phương pháp

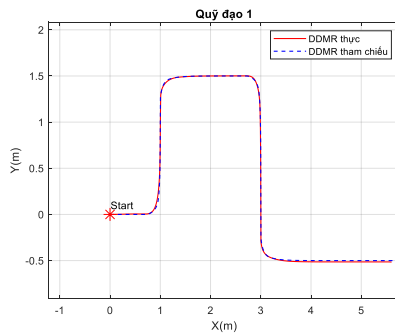


Hình 4.15 Đáp ứng vận tốc góc (Rad/s)

4.3.2.2 Thực nghiệm

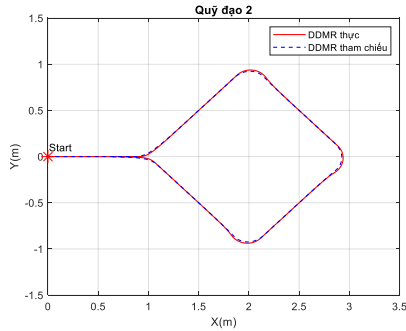
Kích thước (DxRxC)	20x20x20 cm
Đường kính bánh xe	6 cm
Khoảng cách trục bánh	23.5 cm
Nguồn (DC)	12VDC 6000mah

- **Quỹ đạo 1:** Quỹ đạo 1 bao gồm các tuyến đường thẳng, kết quả thực nghiệm thể hiện trên Hình 4.16



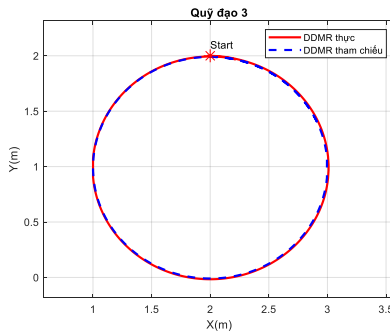
Hình 4.16 DDMR di chuyển theo quỹ đạo 1

- **Quỹ đạo 2:** Quỹ đạo 2 bao gồm các tuyến đường xiên, sau đó quay về vị trí ban đầu, kết quả thực nghiệm trên như Hình 4.17.



Hình 4.17 DDMR di chuyển theo quỹ đạo 2

- **Quỹ đạo 3:** Quỹ đạo 3 là một hình tròn, bán kính 1m. Kết quả thực nghiệm thể hiện trong hình 4.18.



Hình 4.18 DDMR di chuyển theo quỹ đạo 3

4.4 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 tập trung nghiên cứu giải pháp nâng bậc cho mặt trượt phi tuyến để khắc phục hiện tượng chattering mà vẫn đảm bảo các ưu điểm 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, tập trung phân tích ưu, nhược điểm các phương pháp điều khiển trượt truyền thống và các giải pháp loại bỏ chattering, từ đó quyết định chọn hướng giải quyết bằng cách nâng bậc cho mặt trượt TSM nhằm tận dụng những ưu điểm của mặt trượt này nhưng vẫn có thể tạo tín hiệu điều khiển mượt mà có thể ứng dụng trong thực tế trong các hệ cơ điện.

Chương 4 đã trình bày cụ thể cơ sở lý thuyết, phương án thiết kế bộ điều khiển dựa trên 2TSM. Chương 5 đã trình bày kết quả thực nghiệm điều khiển quỹ đạo DDMR dựa trên bộ điều khiển 2TSM.

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:
 - Loại bỏ chattering trong tín hiệu điều khiển
 - Vẫn giữ được tính bền vững của SMC
 - Trạng thái hội tụ về điểm cân bằng trong thời gian hữu hạn
 - Có thể tính toán được thông số bộ điều khiển
 - Có thể đo lường được thời gian đáp ứng trạng thái
- Thiết kế bộ điều khiển quỹ đạo (động lực học) cho hệ DDMR, trong đó xét đến các yếu tố bất định mô hình, nhiễu không xác định.

Trong các kết quả của luận án, có 02 điểm rất quan trọng mà chưa có nghiên cứu khác giải quyết được đó là: tính toán được thông số bộ điều khiển và đo lường được thời gian đáp ứng trạng thái của phương pháp 2TSM.

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.

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, TB Pham, DH Tran, XL Gia, TN Nguyen and NV Truong, 2024, Non-singular terminal sliding mode control for trajectory-tracking of a differential drive robot. *E3S Web of Conferences* 496, 02005
3. Thanh Binh Pham, TNT Cao, Tan No Nguyen and Nguyen Vu Truong, 2025, Adaptive Full Order Sliding Mode Control for Electrical Motor Drive, *International Conference on Energy, Infrastructure and Environmental Research (EIER 2025)*.
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, *International Conference on Energy, Infrastructure and Environmental Research (EIER 2025)*.