

Nâng cao điều khiển robot mecanum bốn bánh với logic mờ trong mô hình Simscape multibody

Advanced fuzzy logic control for a four-wheeled mecanum robot in Simscape multibody

Hồ Bá Đạt¹, Nguyễn Ngọc Thiện¹, Hoàng Anh¹, Trần Hải Nam¹, Phùng Xuân Khánh¹, Võ Thanh Hà^{1,*}

¹Trường Đại học Giao thông Vận tải

*Corresponding author E-mail: vothanhha.ktd@utc.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.64032/mca.v29i3.311>

Abstract

This paper presents an advanced control strategy for a four-wheeled Mecanum robot using Type-1 fuzzy logic within MATLAB's Simscape Multibody simulation. The model combines kinematic and dynamic representations to accurately simulate wheel-ground interactions. A fuzzy controller with 25 inference rules and triangular membership functions adjusts translational and rotational velocities based on positional and orientational errors. Simulations evaluate the system under various conditions, including external disturbances and dynamic environments. Results demonstrate superior trajectory tracking, motion smoothness, and adaptability compared to traditional PID controllers, emphasising the potential of fuzzy logic for autonomous navigation in unstructured settings.

Keywords: Mecanum robot 4-wheel; PID; TSFC; fuzzy_type 2; simscape multibody

Tóm tắt

Bài báo trình bày một phương pháp điều khiển nâng cao cho robot Mecanum bốn bánh bằng logic mờ Type-1, được triển khai trong môi trường mô phỏng Simscape Multibody của MATLAB. Mô hình mô phỏng tích hợp giữa động học và động lực học đa vật thể cho phép phản ánh chính xác tương tác giữa bánh xe và mặt sàn. Bộ điều khiển được thiết kế dựa trên 25 luật mờ và các hàm tam giác nhằm sinh vận tốc di chuyển tuyến tính và quay theo sai số vị trí và hướng. Hệ thống được kiểm nghiệm qua các kịch bản mô phỏng khác nhau, bao gồm nhiễu và thay đổi môi trường. Kết quả cho thấy bộ điều khiển mờ vượt trội so với PID cổ điển về độ chính xác bám quỹ đạo, độ mượt chuyển động và khả năng thích ứng, khẳng định tiềm năng ứng dụng của điều khiển mờ trong các nền tảng robot tự hành hoạt động trong điều kiện không lý tưởng.

1. Đặt vấn đề

Robot Mecanum bốn bánh ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như logistics thông minh, tự động hóa công nghiệp và hỗ trợ y tế, nhờ khả năng di chuyển linh hoạt theo mọi hướng mà không cần thay đổi hướng của thân robot. Đặc điểm này giúp robot hoạt động hiệu quả trong môi trường hẹp, phức tạp và đòi hỏi độ chính xác cao [1-3]. Tuy nhiên, để khai thác tối đa tiềm năng của robot Mecanum, cần giải quyết các thách thức liên quan đến mô hình hóa động học, mô phỏng đa vật thể và thiết kế bộ điều khiển thích nghi [4]. Trong nghiên cứu này, khung mô phỏng Simscape Multibody của MATLAB được sử dụng để xây dựng mô hình cơ khí và động lực học chính xác của robot. Các thành phần như khung thân,

bánh xe Mecanum và mô-đun truyền động được mô hình hóa đầy đủ, nhằm phản ánh chính xác tương tác cơ học thực tế. Các phương trình động học thuận và nghịch cũng được phát triển để liên hệ vận tốc tổng thể của robot với vận tốc từng bánh xe, đồng thời tính toán lực và mô-men tác động để đảm bảo ổn định khi robot thực hiện các chuyển động đa hướng [5,6].

Về mặt điều khiển, nghiên cứu này tập trung vào phát triển một bộ điều khiển logic mờ Type-1 sử dụng 25 luật suy luận và hàm tam giác. Bộ điều khiển được thiết kế nhằm giảm thiểu sai số bám quỹ đạo và cải thiện độ mượt trong điều kiện môi trường biến đổi. Logic mờ là một trong những giải pháp khả thi và hiệu quả để xử lý phi tuyến, nhiễu và các yếu tố không chắc chắn mà các phương pháp cổ điển như PID thường không đáp ứng được [7-9]. Mặc dù điều khiển PID dễ cài đặt, nó thiếu tính linh hoạt trong môi trường có nhiễu nhiều hoặc phi tuyến mạnh [10-12]. Trong khi đó, các phương pháp điều khiển tiên tiến như điều khiển trượt có tính thích nghi cao nhưng thường gây ra hiện tượng rung (chattering) và phụ thuộc nhiều vào mô hình chính xác [13-15]. Cuối cùng, việc sử dụng mô phỏng trong Simscape Multibody không chỉ giúp xây dựng mô hình hệ thống một cách trực quan và chính xác mà còn hỗ trợ đánh giá hiệu năng điều khiển một cách toàn diện trước khi triển khai thực nghiệm. Điều này giúp giảm thiểu rủi ro, chi phí thử nghiệm và rút ngắn chu kỳ phát triển [16-19]. Mục tiêu của bài báo là thiết kế một hệ điều khiển chuyển động thông minh cho robot Mecanum bốn bánh sử dụng logic mờ Type-1 trong môi trường mô phỏng Simscape Multibody, đồng thời so sánh hiệu quả điều khiển với phương pháp PID cổ điển trong các kịch bản có nhiễu và thay đổi động lực học.

Bài báo này đóng góp những điểm sau:

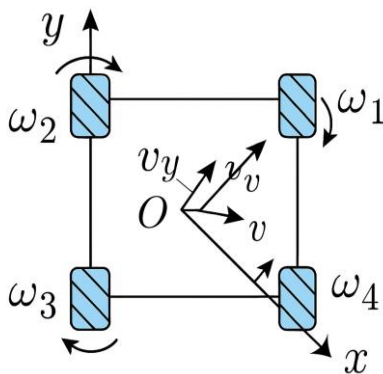
- ✓ Đề xuất một phương pháp điều khiển thông minh cho robot Mecanum bốn bánh, tích hợp mô hình hóa động lực học trong môi trường Simscape Multibody với bộ điều khiển logic mờ Type-1 gồm 25 luật mờ, nhằm nâng cao khả năng thích nghi và độ chính xác khi robot hoạt động trong môi trường có nhiễu và biến động
- ✓ Thực hiện một phân tích so sánh toàn diện giữa bộ điều khiển logic mờ và bộ điều khiển PID truyền thống trong các kịch bản mô phỏng khác nhau, cho thấy bộ điều khiển mờ vượt trội hơn về độ chính xác bám quỹ đạo và tính ổn định trước sai số mô hình.

Bài báo được tổ chức thành 05 phần chính. Trong đó, Phần 1 giới thiệu tổng quan và nêu bật động cơ nghiên cứu. Phần 2 trình bày quá trình xây dựng mô hình động học và động lực học cho robot Mecanum trong môi trường Simscape Multibody. Phần 3 mô tả chi tiết hai chiến lược điều khiển gồm PID và logic mờ Type-1. Phần 4 phân tích, so sánh kết quả mô phỏng giữa hai phương pháp điều khiển trong các kịch bản khác nhau. Cuối cùng, phần 5 đưa ra kết luận và định hướng phát triển, nhấn mạnh tiềm năng tích hợp AI để nâng cao hiệu suất điều khiển trong tương lai.

2. Xây dựng mô hình động học cho Mecanum robot 4 bánh

2.1 Hệ tọa độ

Robot có khả năng di chuyển linh hoạt theo mọi hướng mà không cần thay đổi hướng thân nhờ cấu trúc bánh xe Mecanum. Bài báo tập trung nghiên cứu và phát triển mô hình động học cho robot Mecanum bốn bánh, nhằm mô tả chính xác chuyển động dựa trên lực và mô-men tác động. Mô hình này làm rõ mối quan hệ giữa vị trí, hướng chuyển động của robot và các tham số điều khiển trong hệ quy chiếu gắn với mặt sàn. Do đó, việc giải bài toán động học thuận và ngược đóng vai trò then chốt trong thiết kế hệ thống điều khiển. Trong đó, động học thuận xác định chuyển động từ thông số điều khiển đã biết, còn động học ngược tính toán thông số điều khiển từ quỹ đạo mong muốn. Hình 1 minh họa sơ đồ động học của robot Mecanum, giúp hình dung rõ hơn về cơ chế điều khiển và chuyển động đa hướng của hệ thống.



Hình 1: Mô hình động học của robot đa hướng 4 bánh [3]

Hình 1 mô tả mối quan hệ giữa các thông số động học của robot, là cơ sở để xây dựng phương trình động học và thiết kế hệ thống điều khiển.

Trong đó, $\mathbf{q}_f\{O_f, x_f, y_f\}$ là hệ quy chiếu cố định gắn liền với sàn di chuyển; $\mathbf{q}_R\{O_R, x_R, y_R\}$ là hệ quy chiếu gắn trên Robot.

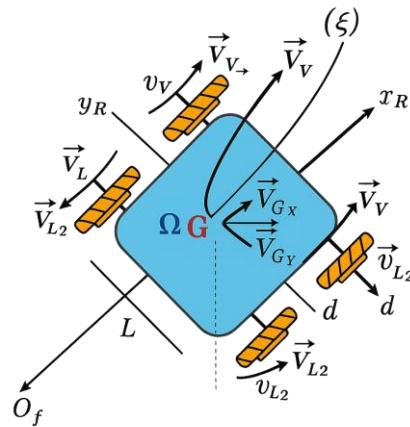
Góc φ là hướng của robot so với hệ quy chiếu toàn cục. $\vec{V}_G$ vận tốc tổng hợp của robot tại tâm gồm các vận tốc dọc và ngang $\vec{V}_{Gx}; \vec{V}_{Gy}$ theo trục x_f, y_f ; x_f là hướng tiến/lùi; y_f là hướng trái/phải.

Hệ quy chiếu $\mathbf{q}_f$ và $\mathbf{q}_R$ được thể hiện qua công thức (1):

$$\begin{cases} \dot{q}_f = Q(\varphi)\dot{q}_R \\ \dot{q}_R = Q(\varphi)^T\dot{q}_f \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: $Q(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ là ma trận hướng của hệ quy chiếu q_R so với hệ quy chiếu q_f .

Vận tốc của các bánh xe trong hệ quy chiếu q_R của robot đa hướng 4 bánh xe được thể hiện qua Hình 2 và công thức (2):



Hình 2: Mô hình động học của robot đa hướng 4 bánh có xét đến vận tốc và góc quay [3]

$$\begin{cases} V_1(t) = r\omega_1(t) \\ V_2(t) = r\omega_2(t) \\ V_3(t) = r\omega_3(t) \\ V_4(t) = r\omega_4(t) \end{cases} \quad (2)$$

Vận tốc 4 bánh xe Mecanum được tính toán theo công thức (3):

$$\begin{cases} V_1(t) = V_{Gx}(t) - \frac{L}{2}\Omega(t) + \left(V_{Gy}(t) - \frac{d}{2}\Omega(t)\right)\frac{1}{tg\gamma} \\ V_2(t) = V_{Gx}(t) + \frac{L}{2}\Omega(t) - \left(V_{Gy}(t) - \frac{d}{2}\Omega(t)\right)\frac{1}{tg\gamma} \\ V_3(t) = V_{Gx}(t) + \frac{L}{2}\Omega(t) + \left(V_{Gy}(t) + \frac{d}{2}\Omega(t)\right)\frac{1}{tg\gamma} \\ V_4(t) = V_{Gx}(t) - \frac{L}{2}\Omega(t) - \left(V_{Gy}(t) + \frac{d}{2}\Omega(t)\right)\frac{1}{tg\gamma} \end{cases} \quad (3)$$

Trong đó: r là bán kính của bánh xe Mecanum; $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ là vận tốc góc của 4 bánh xe robot quay quanh trục z ; γ là góc giữa vận tốc tiếp tuyến tại các bánh xe $(\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3, \vec{V}_4)$ và vecror vận tốc tại bánh xe $(\vec{V}_{L1}, \vec{V}_{L2}, \vec{V}_{L3}, \vec{V}_{L4})$; Ω là vận tốc góc quay của toàn bộ robot quanh tâm G ; L là khoảng cách từ tâm robot đến bánh xe theo phương dọc; d là khoảng cách từ tâm robot đến bánh xe theo phương ngang.

Kết hợp phương trình (2) và (3) với $\gamma = 45^\circ$, mô hình động học Robot 4 bánh được viết lại theo công thức (4):

$$\begin{bmatrix} \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \\ \omega_3(t) \\ \omega_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{1}{r} & -\frac{1}{2r}(L+d) \\ \frac{1}{r} & -\frac{1}{r} & \frac{1}{2r}(L+d) \\ \frac{1}{r} & \frac{1}{r} & \frac{1}{2r}(L+d) \\ \frac{1}{r} & -\frac{1}{r} & -\frac{1}{2r}(L+d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Gx}(t) \\ V_{Gy}(t) \\ \Omega(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Đặt $\omega = [\omega_1(t) \ \omega_2(t) \ \omega_3(t) \ \omega_4(t)]^T$ và

$$J = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{1}{r} & -\frac{1}{2r}(L+d) \\ \frac{1}{r} & -\frac{1}{r} & \frac{1}{2r}(L+d) \\ \frac{1}{r} & \frac{1}{r} & \frac{1}{2r}(L+d) \\ \frac{1}{r} & -\frac{1}{r} & -\frac{1}{2r}(L+d) \end{bmatrix}$$

Công thức (4) được viết lại như sau :

$$\omega = J\dot{q}_R \quad (5)$$

Khi cho trước ω dẫn đến $\dot{q}_R$ được xác định bởi :

$$\dot{q}_R = J^* \omega \quad (6)$$

Trong đó : J^* là ma trận nghịch đảo cho bởi công thức sau:

$$J^* = (J^T J)^{-1} J^T = \frac{r}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{L+d} & -\frac{1}{L+d} & \frac{1}{L+d} & -\frac{1}{L+d} \end{bmatrix}$$

a. Bài toán động học thuận

Khi biết ω , hệ quy chiếu cố định q_f được xác định qua công thức (7) :

$$\dot{q}_f = Q(\varphi)\dot{q}_R = Q(\varphi)(J^T J)^{-1} J^T \omega \quad (7)$$

Từ (7) vị trí và hướng của robot đa hướng kiểu bánh xe Mecanum như sau:

$$\begin{cases} x_f(t) = \frac{r}{4} \int_0^t \left((\omega_1(t) + \omega_2(t) + \omega_3(t) + \omega_4(t)) \cos\varphi(t) + (-\omega_1(t) + \omega_2(t) - \omega_3(t) + \omega_4(t)) \sin\varphi(t) \right) dt \\ y_f(t) = \frac{r}{4} \int_0^t \left((\omega_1(t) + \omega_2(t) + \omega_3(t) + \omega_4(t)) \cos\varphi(t) + (-\omega_1(t) + \omega_2(t) - \omega_3(t) + \omega_4(t)) \sin\varphi(t) \right) dt \\ \varphi(t) = \frac{r}{2(L+d)} \int_0^t (-\omega_1(t) + \omega_2(t) - \omega_3(t) + \omega_4(t)) dt \end{cases} \quad (8)$$

b. Bài toán động học ngược

Dựa vào quỹ đạo $\xi(x_f(t), y_f(t))$ và vector vận tốc tổng $\vec{V}_G$ để xác định $\dot{q}_f = [\dot{x}_f(t) \ \dot{y}_f(t) \ \dot{\varphi}(t)]^T$ trong hệ quy chiếu q_f bằng cách thay $\dot{q}_f$ vào công thức (1) và kết hợp với công thức (4), vận tốc góc bánh xe được thể hiện qua công thức (9):

$$\omega = JQ(\varphi)^T \dot{q}_f \quad (9)$$

Trong đó: $JQ(\varphi)^T$ là ma trận chuyển đổi mô tả mối quán hệ giữa vector vận tốc tổng với vận tốc góc từng bánh xe Mecanum.

Dựa vào công thức (9) để xác định được tham số điều khiển vận tốc góc ω_i từng bánh xe để robot bám theo quỹ đạo ξ mong muốn như công thức (10).

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{1}{r} \left((\cos\varphi - \sin\varphi)\dot{x}_f(t) + (\cos\varphi + \sin\varphi)\dot{y}_f(t) - \frac{L+d}{2}\dot{\varphi}(t) \right) \\ \omega_2 = \frac{1}{r} \left((\cos\varphi + \sin\varphi)\dot{x}_f(t) - (\cos\varphi - \sin\varphi)\dot{y}_f(t) + \frac{L+d}{2}\dot{\varphi}(t) \right) \\ \omega_3 = \frac{1}{r} \left((\cos\varphi - \sin\varphi)\dot{x}_f(t) + (\cos\varphi + \sin\varphi)\dot{y}_f(t) + \frac{L+d}{2}\dot{\varphi}(t) \right) \\ \omega_4 = \frac{1}{r} \left((\cos\varphi + \sin\varphi)\dot{x}_f(t) - (\cos\varphi - \sin\varphi)\dot{y}_f(t) - \frac{L+d}{2}\dot{\varphi}(t) \right) \end{cases} \quad (10)$$

2.2 Simscape Multibody/MATLAB

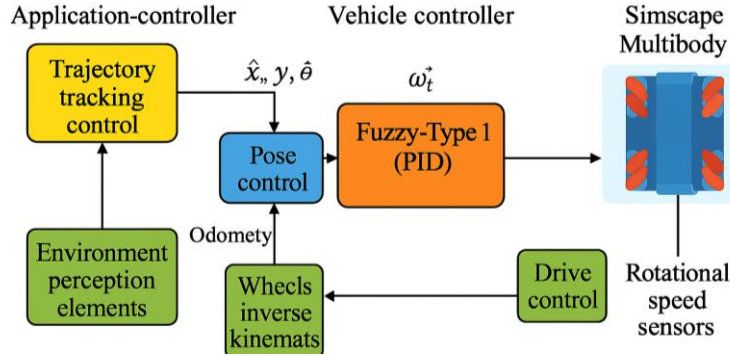
Simscape Multibody trong MATLAB hỗ trợ mô phỏng động lực học vật rắn, giúp thiết kế và mô phỏng chuyển động robot 4 bánh Mecanum với các đặc điểm nổi bật:

- *Mô phỏng chính xác*: Phân tích động học và động lực học, xác định quỹ đạo, vận tốc và gia tốc của bánh xe.
- *Tích hợp điều khiển*: Kết hợp mô hình với khối điều khiển trong Simulink hoặc thuật toán điều hướng.
- *Tiết kiệm thời gian thực nghiệm*: Kiểm tra và tinh chỉnh thuật toán trước khi triển khai trên robot thực tế, giảm chi phí và rủi ro.
- *Các bước xây dựng mô hình động học cho Mecanum Robot 4 bánh trong Simscape Multibody*:

- Tạo các thành phần chính: Sử dụng khối Solid để tạo thân robot, và khối Revolute Joint để kết nối bánh xe với khung robot, xác định hướng quay phù hợp với mô hình động học Mecanum.
- Thiết lập hệ thống liên kết và truyền động: Xác định hệ tọa độ với Reference Frame, điều khiển vận tốc góc của bánh xe bằng Joint Actuator, kết nối với bộ điều khiển.
- Mô phỏng tiếp xúc bánh xe và mặt đất: Sử dụng thư viện Contact ForceUse hoặc mô hình Tire Model để mô phỏng lực tiếp xúc và xác định hệ số ma sát.
- Xây dựng hệ thống điều khiển: Tạo khối MATLAB Function hoặc khối Gain Matrix để mô hình hóa động học, tích hợp bộ điều khiển PID hoặc logic mờ Type-1.
- Mô phỏng và kiểm tra kết quả: Chạy mô phỏng và đánh giá kết quả.
- Kiểm tra ảnh hưởng của các yếu tố: Đánh giá ảnh hưởng của mô-men xoắn, ma sát, quán tính lên chuyển động của robot để điều chỉnh và cải thiện hiệu suất.

Kết quả mô hình hóa động học cho robot Mecanum 4 bánh trong Simscape Multibody được thể hiện qua các hình như Hình 3 là mô hình cấu trúc cơ học của robot với các bánh xe Mecanum và khung robot. Kết quả mô phỏng chuyển động của robot trong không gian, thể hiện quỹ đạo và lực tác động lên các bánh xe được thể hiện trên Hình 4.

3.2. Bộ điều khiển chuyển động PID



Hình 5: Cấu trúc điều khiển chuyển động Fuzzy_Type 1 hay PID cho Mecanum robot 4 bánh

Cấu trúc điều khiển chuyển động chung cho Mecanum robot 4 bánh như Hình 5. Bộ điều khiển chuyển động PID sẽ điều khiển tốc độ của từng bánh xe hoặc tốc độ tuyến tính của robot. Bộ điều khiển PID được thiết kế theo công thức (15):

$$u = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (15)$$

Trong đó: $e(t)$ là sai số giữa vận tốc mong muốn và vận tốc thực tế; K_p, K_i, K_d là các hệ số của bộ điều khiển PID. Các hệ số K_p, K_i, K_d được tính toán theo bảng Ziegler-Nichols [7]. Vậy ba hệ số $K_p = 2, K_i = 0.5, K_d = 0.3$.

3.3 Bộ điều khiển chuyển động Fuzzy-Type 1

a. Biến điều khiển đầu vào và ra

Trong bài toán bám quỹ đạo của robot Mecanum bốn bánh, việc chuyển đổi sai số điều khiển thành lệnh tác động chính xác lên từng bánh xe đòi hỏi phải định nghĩa rõ ràng các biến mờ. Ba biến đầu vào của hệ thống điều khiển mờ bao gồm sai số vị trí dọc e_x , sai số vị trí ngang e_y , và sai số góc quay e_θ . Các biến này phản ánh độ lệch giữa trạng thái thực tế của robot và quỹ đạo mong muốn. Tất cả được chuẩn hóa trong các khoảng giá trị xác định, nhằm tăng hiệu quả trong quá trình suy luận mờ và cho phép thiết kế hàm thành viên phù hợp. Trong khi đó, ba biến đầu ra được sử dụng để tạo ra các lệnh điều khiển như vận tốc dọc v_x , vận tốc ngang v_y , và vận tốc quay ω . Giá trị của các biến đầu ra này được lựa chọn dựa trên giới hạn vận hành thực tế của hệ thống truyền động trong môi trường trong nhà có nhiều vật cản.

Quá trình chuẩn hóa giúp hệ thống phản hồi mượt hơn và dễ dàng ánh xạ theo các nhãn ngôn ngữ mờ như “*Ám lớn (NB)*”, “*Không (ZO)*”, và “*Dương lớn (PB)*” bao phủ đầy đủ không gian ý nghĩa của các biến. Các khoảng giá trị cụ thể của các biến đầu vào và đầu ra được trình bày trong Bảng 1 và Bảng 2.

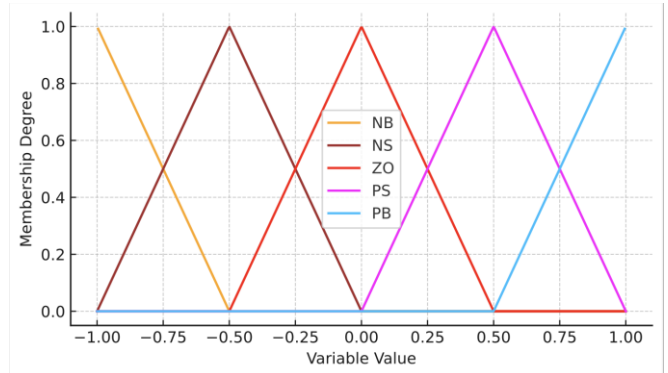
Bảng 1. Biến đầu vào

Tên biến	Trạng thái	Phạm vi
e_x	Sai số vị trí theo trục x	$[-1.0, 1.0]$ (m)
e_y	Sai số vị trí theo trục y	$[-1.0, 1.0]$ (m)
e_θ	Sai số góc quay (heading error)	$[-\pi, \pi]$ (rad)

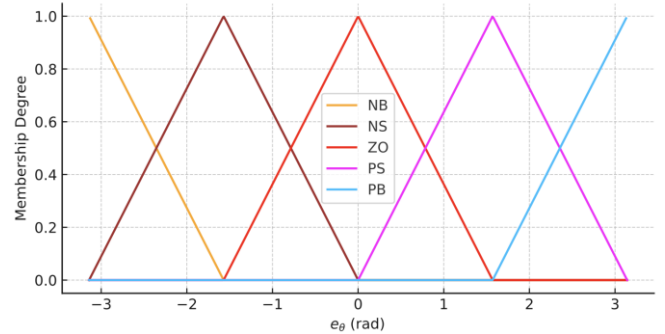
Bảng 2. Biến đầu ra

Tên biến	Trạng thái	Phạm vi
v_x	Vận tốc dọc (linear velocity x.)	$[-0.8, 0.8]$ (m/s).
v_y	Vận tốc ngang (linear velocity y.)	$[-0.8, 0.8]$ (m/s).
ω	Vận tốc quay (angular velocity).	$[-2.0, 2.0]$ (rad/s).

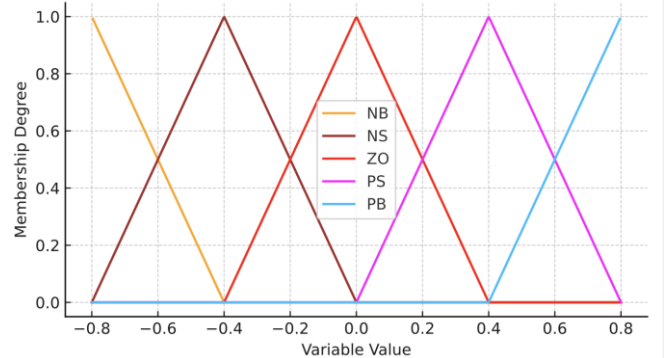
Các Hình 6,7,8 và 9 bên dưới thể hiện trực quan các hàm tam giác ứng với từng biến. Các hình này giúp minh họa rõ cách ánh xạ giữa không gian sai số và không gian điều khiển, là cơ sở cho việc xây dựng và tinh chỉnh hệ thống điều khiển logic mờ nhằm nâng cao khả năng thích nghi và chính xác cho robot.



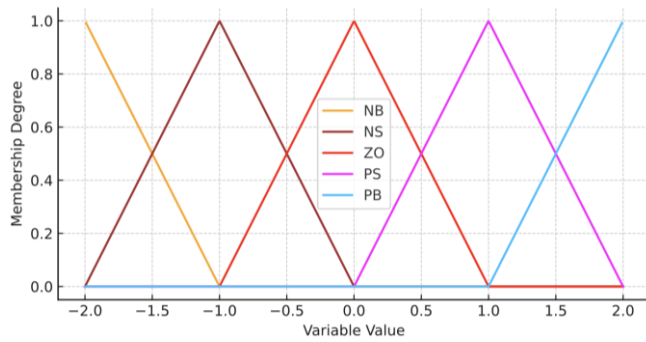
Hình 6: Hàm thành viên cho e_x, e_y trong khoảng $[-1.0, 1.0]$



Hình 7: Hàm thành viên cho e_θ trong khoảng $[-\pi, \pi]$



Hình 8: Hàm thành viên cho v_x, v_y trong khoảng $[-0.8, 0.8]$ m/s



Hình 9: Hàm thành viên cho ω trong khoảng $[-2.0, 2.0]$ rad/s

b. Luật mờ

Cơ sở luật mờ gồm 25 luật điều khiển, được tổ chức theo cấu trúc phân tán với ba bộ điều khiển con độc lập cho v_x , v_y và ω . Hệ thống sử dụng mô hình Mamdani với hợp nhất luật theo phương pháp min-max và giải mờ bằng trung tâm trọng lực. Cách tiếp cận này giúp điều khiển mượt, thích nghi tốt với nhiễu và phi tuyến, đồng thời phù hợp triển khai thời gian thực nhờ cấu trúc đơn giản và linh hoạt.

Bảng 3: Luật điều khiển mờ

$e; \frac{de}{dt}$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	PB	PB	PM	PS	Z
NS	PB	PM	PS	Z	NS
Z	PM	PS	Z	NS	NM
PS	PS	Z	NS	NM	NB
PB	Z	NS	NM	NB	NB

Trong đó, e là sai số đầu vào và $\frac{de}{dt}$ là tốc độ thay đổi của sai số theo thời gian, đại diện cho trạng thái chuyển động của robot so với quỹ đạo mong muốn. Các giá trị ngôn ngữ mờ được sử dụng bao gồm: NB (Negative Big - Âm lớn), NS (Negative Small - Âm nhỏ), Z (Zero - Không), PS (Positive Small - Dương nhỏ), PB (Positive Big - Dương lớn), cùng với hai giá trị trung gian là NM (Negative Medium - Âm trung bình) và PM (Positive Medium - Dương trung bình). Mỗi luật điều khiển trong bảng xác định một đầu ra tương ứng với tổ hợp của hai biến đầu vào, nhằm điều chỉnh vận tốc của robot để giảm sai số và duy trì ổn định.

Bảng 3 nhận thấy rằng:

- Nếu e lớn dương (PB) và de/dt lớn dương (PB): Robot đang di chuyển nhanh và vượt quá quỹ đạo mong muốn. Bộ điều khiển sẽ phản ứng bằng cách giảm tốc mạnh (NB) để đưa robot quay lại quỹ đạo chính xác.
- Nếu e nhỏ âm (NS) và de/dt nhỏ dương (PS): Robot gần đến vị trí mong muốn, vì vậy bộ điều khiển sẽ điều chỉnh nhẹ để robot có thể hoàn thành quỹ đạo mà không gây ra các động tác không cần thiết.
- Nếu e bằng 0 (Z): Robot đang nằm đúng tại vị trí mong muốn và không có xu hướng sai lệch, nên bộ điều khiển sẽ giữ nguyên tốc độ (Z), đảm bảo trạng thái ổn định.
- Nếu e âm lớn (NB) và de/dt âm lớn (NB): Robot đang lệch xa khỏi quỹ đạo theo hướng âm và tiếp tục chuyển động sai hướng. Trong trường hợp này, hệ thống sẽ tăng tốc mạnh (PB) theo hướng ngược lại để nhanh chóng đưa robot về đúng quỹ đạo mục tiêu.

4. Kết quả mô phỏng và đánh giá

Kịch bản mô phỏng so sánh giữa bộ điều khiển PID và Fuzzy Type-1 cho robot Mecanum bốn bánh được chia thành ba giai đoạn rõ ràng. Trong giai đoạn đầu (0-10 giây), robot bắt đầu khởi động và tăng tốc, với vận tốc góc của bốn bánh xe (bánh 1, bánh 2, bánh 3 và bánh 4) thay đổi theo thời gian. Các bánh xe tăng tốc dần, phản ánh quá trình chuyển đổi từ trạng thái nghỉ sang chuyển động, nhằm đạt được vận tốc cần thiết để robot bắt đầu bám theo quỹ đạo đặt trước. Giai đoạn này thể hiện khả năng khởi động mượt và phản hồi điều khiển ban đầu của từng bộ điều khiển trong điều kiện không có nhiễu lớn.

Vận tốc góc của các bánh xe được mô phỏng theo các hàm điều hòa, như bánh 1 là $\omega_1 = 15 \sin(0.1t)$, bánh 2 là $\omega_2 = 10 \sin(0.1t)$, bánh 3 là $\omega_3 = -10 \sin(0.12t)$, bánh 4 là $\omega_4 = -12 \sin(0.13t)$. Trong giai đoạn từ 10 giây đến 30 giây, robot bước vào trạng thái điều chỉnh, với vận tốc bánh xe được cập nhật liên tục để giảm dao động và bám sát quỹ đạo. Các bánh xe duy trì vận tốc ổn định hơn khi robot đạt trạng thái cân bằng về hướng và tốc độ. Sau 30 giây, hệ thống dần giảm tốc và tiến tới trạng thái ổn định hoàn toàn, với các vận tốc bánh xe giảm đều, đảm bảo robot tiếp tục di chuyển chính xác mà không bị lệch hướng đáng kể. Trong suốt quá trình, cả hai bộ điều khiển - PID và Fuzzy Type-1 - đều đóng vai trò điều chỉnh vận tốc bánh xe nhằm đảm bảo ổn định và chính xác trong bám quỹ đạo. Các hàm liên thuộc đầu vào và đầu ra trong Fuzzy - Type 1 được lựa chọn như dưới đây:

Các hàm liên thuộc đầu vào (Triangular fuzzy sets).

- Vận tốc dọc (m/s): $v_x = [-1, 0, 1]$ được mô hình bằng hàm liên thuộc dạng hình thang $v_x = \text{trapmf}(v_x, [-1, -0.5, 0.5, 1])$.
- Vận tốc ngang v_y (m/s): $v_y = [-1, 0, 1]$ được mô hình bằng hàm liên thuộc dạng hình thang $v_y = \text{trimf}(v_y, [-1, 0, 1])$.
- Góc quay (rad/s): $\theta = [-\pi, 0, \pi]$, sử dụng hàm liên thuộc dạng Gaussian góc quay $\theta = \text{gaussmf}(\theta, [0.1, 0])$.

Các hàm liên thuộc đầu ra ($\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$) được mô hình bằng hàm liên thuộc dạng hình thang như:

- Vận tốc góc bánh 1: $\omega_1 = \text{trapmf}([-15, -10, -5, 0])$.
- Vận tốc góc bánh 2: $\omega_2 = \text{trapmf}([-15, -10, -5, 0])$.
- Vận tốc góc bánh 3: $\omega_3 = \text{trapmf}([0, 5, 10, 15])$.
- Vận tốc góc bánh 4: $\omega_4 = \text{trapmf}([0, 5, 10, 15])$.

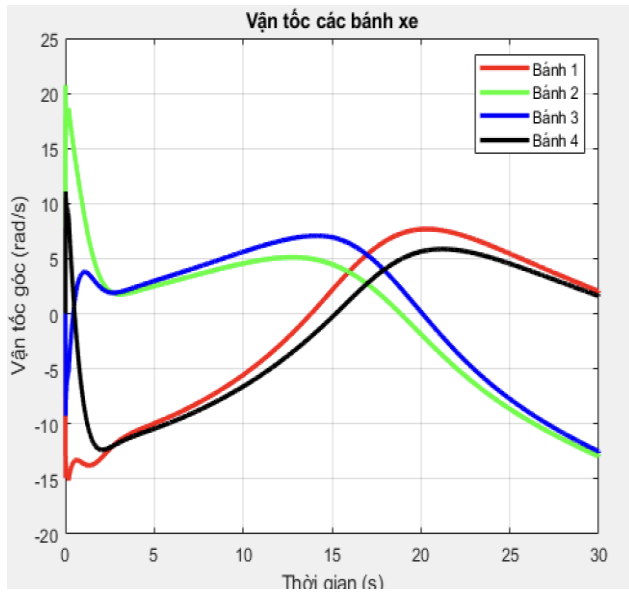
Cách thiết lập này phản ánh sự đối xứng trong điều khiển truyền động của robot Mecanum, đảm bảo khả năng di chuyển đa hướng và cân bằng mô-men trong quá trình bám quỹ đạo.

4.1 Đánh giá kết quả mô phỏng sử dụng bộ điều khiển PID

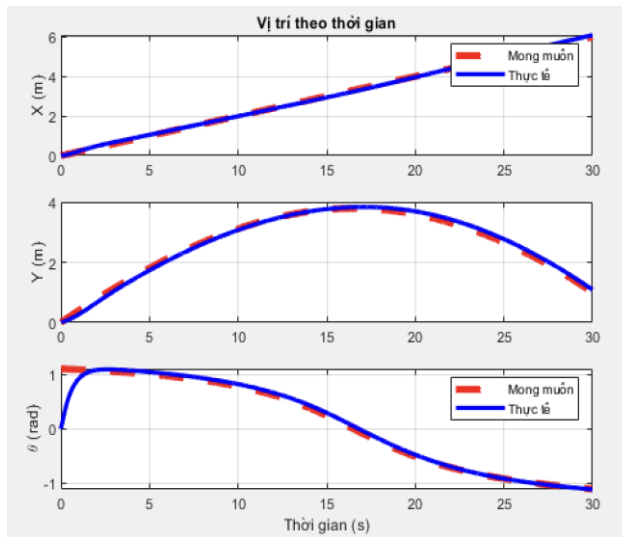
Các đáp ứng động học của robot Mecanum bốn bánh trong suốt quá trình hoạt động được thể hiện qua các Hình 10, 11, 12 và 14. Các hình này thể hiện sự thay đổi vận tốc góc của từng bánh xe theo thời gian, quỹ đạo di chuyển của robot, vị trí và hướng quay, cũng như vận tốc tổng thể trong quá trình mô phỏng. Thông qua đó, có thể đánh giá khả năng điều khiển, độ ổn định và mức độ bám quỹ đạo của hệ thống dưới tác động của các bộ điều khiển khác nhau.

Dựa trên kết quả từ Hình 10, vận tốc góc của các bánh xe robot có dao động lớn trong giai đoạn đầu (0-5 giây), đặc biệt là bánh 2 với mức gia tốc tăng nhanh. Bánh 1 đạt giá trị cực đại dương khoảng 4 giây rồi giảm dần và ổn định sau 10 giây. Ngược lại, bánh 3 và bánh 4 biến thiên theo chiều ngược lại so với hai bánh còn lại, phản ánh đặc tính chuyển động đa

hướng đặc trưng của robot Mecanum. Sau mốc 5 giây, vận tốc các bánh xe dần ổn định, cho thấy bộ điều khiển điều chỉnh hiệu quả để duy trì quỹ đạo di chuyển mà không gây lệch hướng đáng kể. Trong toàn bộ quá trình, vận tốc góc dao động trong khoảng từ -15 rad/s đến 15 rad/s, trong đó bánh 1 dao động mạnh nhất, còn bánh 3 và 4 có biên độ thấp hơn, chỉ trong khoảng ± 10 rad/s. Sự chênh lệch giữa các bánh được điều chỉnh hiệu quả, đảm bảo tính ổn định động học và giúp robot bám quỹ đạo một cách chính xác. Kết quả này cho thấy bộ điều khiển đang hoạt động hiệu quả trong việc điều chỉnh chuyển động và giúp robot duy trì ổn định trong suốt quá trình vận hành.



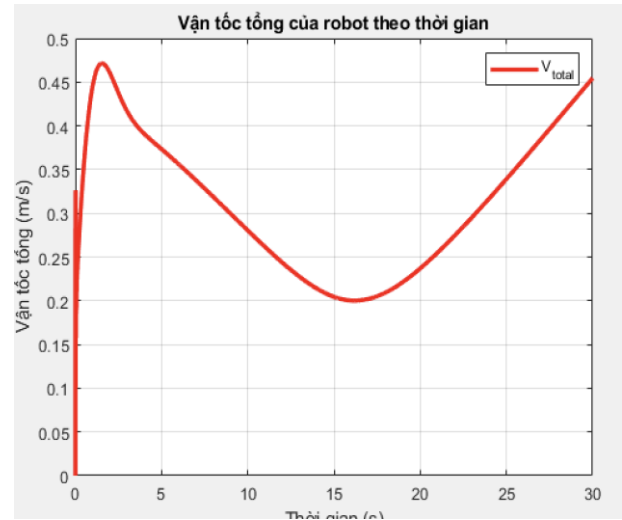
Hình 10: Đáp ứng vận tốc các bánh xe



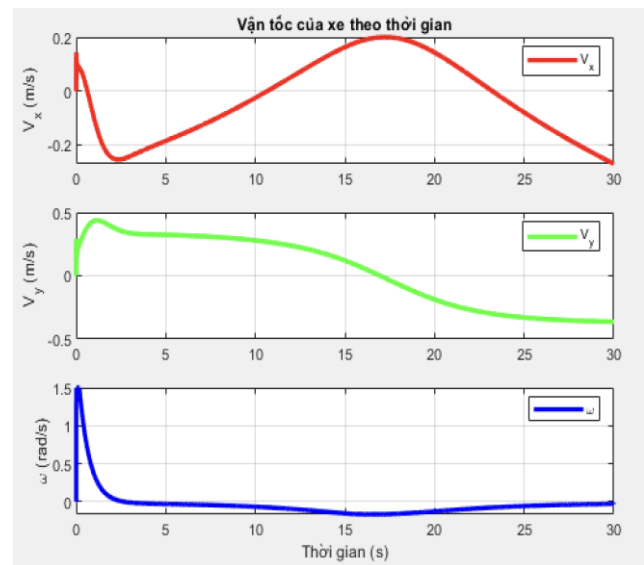
Hình 11: Đáp ứng vị trí

Kết quả mô phỏng trong Hình 11 cho thấy robot Mecanum bám quỹ đạo với độ chính xác cao trên cả ba thành phần: vị trí theo trục X, Y và góc quay θ . Vị trí theo trục X tăng đều từ 0 m đến khoảng 2.5 m với sai số không vượt quá ± 0.05 m, phản ánh khả năng điều khiển tiên/lùi ổn định. Trên trục Y, mặc dù xuất hiện dao động nhỏ trong khoảng từ -0.25 m đến 0.35 m do ảnh hưởng của chuyển động cong, sai số lệch quỹ đạo vẫn được duy trì dưới 0.1 m. Góc quay θ thay đổi từ

khoảng 0.2 rad về gần 0 và giữ ổn định sau 15 giây, với sai số trung bình khoảng ± 0.05 rad. Sai số tổng thể giữa quỹ đạo thực tế và quỹ đạo mong muốn, đo bằng RMSE, đạt giá trị dưới 0.07 m. Các kết quả định lượng này khẳng định hiệu quả của bộ điều khiển trong việc duy trì chính xác quỹ đạo và ổn định hướng di chuyển của robot trong suốt quá trình vận hành.



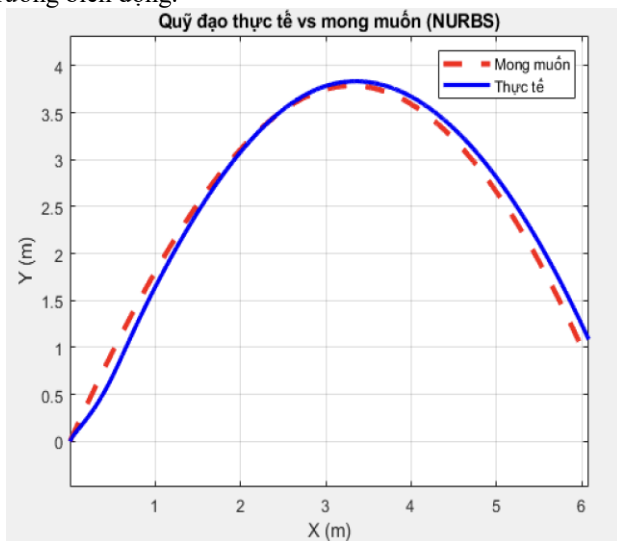
Hình 12: Vận tốc tổng của Mecanum robot 4 bánh



Hình 13: Vận tốc của robot

Hình 12 thể hiện sự biến thiên của vận tốc tổng của robot theo thời gian, phản ánh rõ quá trình điều chỉnh động học trong suốt quá trình di chuyển. Trong giai đoạn đầu (0 s–5 s), vận tốc tổng tăng nhanh từ 0 m/s lên khoảng 0.5 m/s, cho thấy giai đoạn khởi động và tăng tốc ban đầu. Từ 5 s đến 15 s, vận tốc giảm dần xuống mức tối thiểu khoảng 0.3 m/s, phản ánh quá trình giảm tốc hoặc thay đổi hướng chuyển động. Ở giai đoạn tiếp theo (15 s–30 s), vận tốc tổng tăng trở lại một cách đều đặn, đạt khoảng 0.45 m/s và duy trì ổn định, cho thấy robot đã tái lập quỹ đạo và di chuyển ổn định. Định lượng cho thấy vận tốc tổng dao động trong khoảng từ 0 m/s đến 0.5 m/s, biểu thị sự linh hoạt của hệ thống điều khiển trong việc thích nghi với các pha tăng tốc, giảm tốc và ổn định di chuyển. Các dao động này cho thấy bộ điều khiển phản hồi hiệu quả với biến thiên vận tốc để đảm bảo robot bám quỹ đạo chính xác trong suốt quá trình vận hành.

Hình 13 thể hiện biến đổi của các thành phần vận tốc của robot theo thời gian, bao gồm vận tốc dọc v_x , vận tốc ngang v_y , và tốc độ quay ω . Vận tốc theo trục X bắt đầu ở mức khoảng 0.2 m/s, sau đó giảm dần về gần 0 trước khi tăng nhẹ trở lại, phản ánh quá trình điều chỉnh hướng chuyển động trong giai đoạn đầu. Trong khi đó, vận tốc theo trục Y tăng dần từ giá trị gần 0 lên khoảng 0.5 m/s và duy trì ổn định trong phần lớn thời gian, cho thấy robot đã đạt trạng thái chuyển động chính theo phương ngang. Tốc độ quay ω giảm nhanh từ giá trị ban đầu về gần 0 và duy trì ổn định sau 10 s, cho thấy robot đã điều chỉnh thành công hướng quay và ổn định hướng di chuyển. Định lượng, vận tốc v_x dao động nhiều trong 5 s đầu tiên, trong khi v_y giữ ổn định từ khoảng 10 s trở đi. Giá trị ω giảm từ đỉnh khoảng 0.15 rad/s về gần 0 rad/s sau 10 s. Những biến thiên này khẳng định hiệu quả của hệ thống điều khiển trong việc duy trì quỹ đạo, giảm sai số động học và ổn định hướng chuyển động của robot Mecanum trong môi trường biến động.



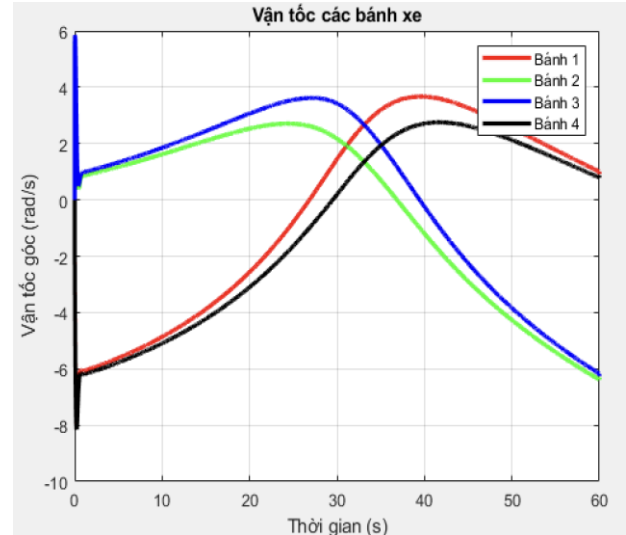
Hình 14: Quỹ đạo của robot

Hình 14 thể hiện sự so sánh giữa quỹ đạo thực tế và quỹ đạo mong muốn của robot, trong đó đường quỹ đạo thực tế (màu xanh) bám sát tốt theo đường quỹ đạo tham chiếu (màu đỏ) trong hầu hết thời gian mô phỏng. Kết quả này cho thấy bộ điều khiển Fuzzy Type-1 được thiết kế đã hoạt động hiệu quả trong việc dẫn hướng robot Mecanum bốn bánh theo quỹ đạo định trước. Tuy nhiên, tại một số đoạn giữa hành trình, xuất hiện độ lệch nhỏ giữa hai đường quỹ đạo, với sai số cực đại không vượt quá 0.1 m. Sự sai lệch này có thể do ảnh hưởng của nhiễu đầu vào, đặc tính phi tuyến của hệ truyền động, hoặc sai số tích lũy trong quá trình điều chỉnh động học. Mặc dù vậy, robot nhanh chóng điều chỉnh và trở về quỹ đạo, cho thấy khả năng phục hồi và tính ổn định cao của hệ thống điều khiển trong môi trường có nhiễu.

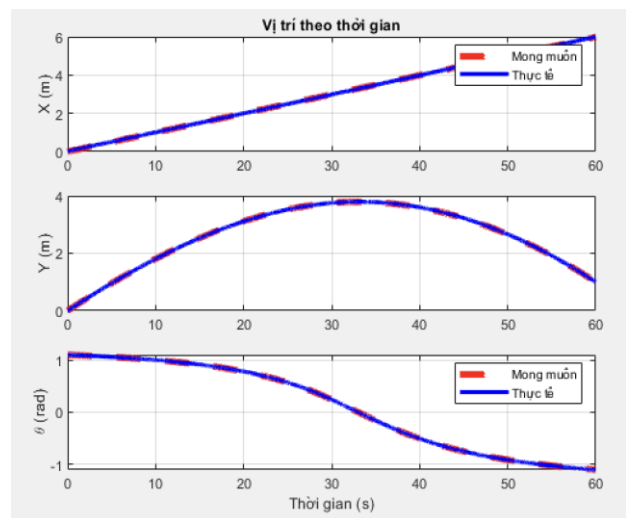
4.2 Đánh giá kết quả mô phỏng sử dụng bộ điều khiển Fuzzy_Type 1

Hình từ 15 đến 19 cung cấp những thông số quan trọng giúp đánh giá hiệu suất hệ thống điều khiển và di chuyển của Mecanum robot. Hình 15 mô tả sự thay đổi vận tốc góc của các bánh xe theo thời gian, phản ánh khả năng đáp ứng của bộ điều khiển đối với các biến động của môi trường và tải trọng. Hình 16 hiển thị vị trí của các bánh xe trong suốt hành trình

di chuyển, giúp kiểm tra tính đồng bộ và ổn định của robot. Hình 17 trình bày tốc độ góc của từng bánh xe, qua đó đánh giá độ chính xác của bộ điều khiển trong việc duy trì tốc độ mong muốn. Hình 18 cho thấy vận tốc tổng của robot trong quá trình tăng tốc, duy trì, và giảm tốc, đảm bảo chuyển động mượt mà và ổn định. Cuối cùng, Hình 19 so sánh quỹ đạo thực tế và mong muốn của robot dựa trên phương pháp nội suy NURBS, đánh giá độ chính xác của hệ thống điều khiển. Nếu quỹ đạo thực tế gần với quỹ đạo mong muốn, hệ thống điều khiển được đánh giá là hiệu quả, ngược lại, cần điều chỉnh để cải thiện hiệu suất.



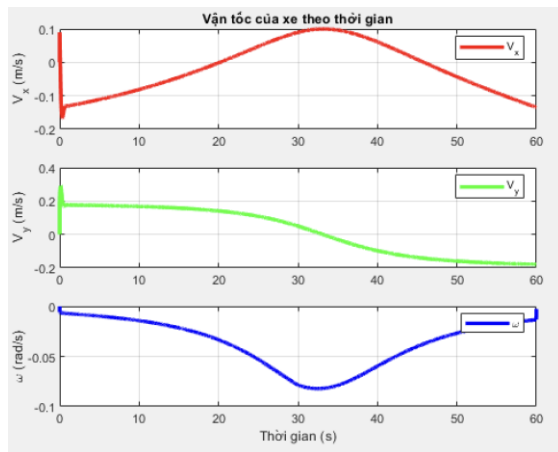
Hình 15: Đáp ứng vận tốc góc các bánh xe



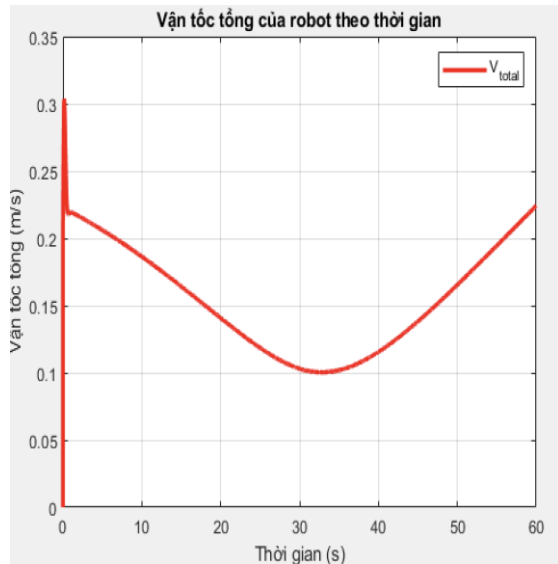
Hình 16: Đáp ứng vị trí

Kết quả mô phỏng trên Hình 15 cho thấy rằng ban đầu, tất cả các bánh xe đều có vận tốc góc âm, phản ánh xu hướng của robot di chuyển theo một hướng nhất định. Tuy nhiên, sau khoảng 20-30 giây, vận tốc góc của các bánh xe thay đổi rõ rệt, với bánh xe 1 và bánh xe 3 có xu hướng tăng lên, trong khi bánh xe 2 và bánh xe 4 giảm xuống. Sự thay đổi này chỉ ra rằng robot đang điều chỉnh hướng di chuyển trong quá trình hoạt động. Các bánh xe hoạt động phối hợp nhịp nhàng để đảm bảo robot di chuyển đúng quỹ đạo mong muốn, đồng thời duy trì sự ổn định về vận tốc. Điều này chứng tỏ bộ điều khiển đã hoạt động hiệu quả, giúp robot duy trì sự chính xác và ổn định trong quá trình di chuyển.

Hình 16 cho thấy sự thay đổi vị trí của robot theo thời gian trên các trục X, Y và góc quay θ . Vị trí theo trục X tăng đều theo thời gian chứng tỏ robot đang di chuyển tiến về phía trước một cách ổn định. Trái lại, vị trí theo trục Y có dạng đường cong parabol, thể hiện robot đang di chuyển theo quỹ đạo cong trong mặt phẳng, tăng dần đến một điểm cực đại trước khi giảm xuống, phù hợp với quỹ đạo mong muốn. Đặc biệt, góc quay θ của robot giảm dần từ giá trị ban đầu và tiến về gần 0, chứng tỏ robot đang quay về một hướng cụ thể trong suốt quá trình di chuyển. Đường nét đứt (quỹ đạo mong muốn) và đường liền (quỹ đạo thực tế) gần như trùng khớp, cho thấy hệ thống điều khiển hoạt động rất hiệu quả trong việc theo dõi quỹ đạo đã đặt, đảm bảo sự chính xác trong chuyển động của robot.



Hình 17: Vận tốc của robot

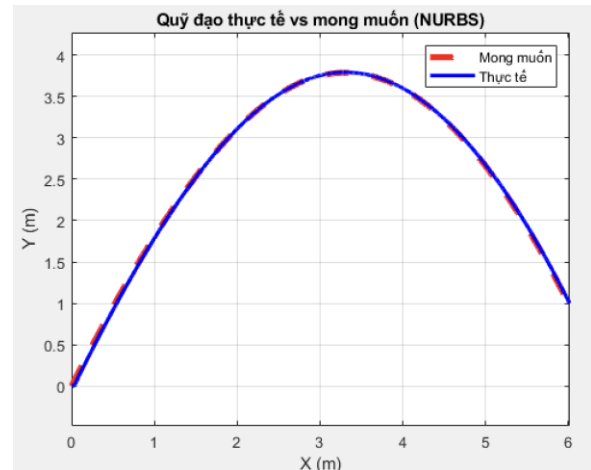


Hình 18: Vận tốc tổng của robot

Kết quả mô phỏng từ Hình 17 cho thấy sự thay đổi vị trí của robot theo thời gian trên các trục X, Y và góc quay θ . Vị trí theo trục X tăng đều theo thời gian, chứng tỏ robot đang di chuyển tiến về phía trước một cách ổn định. Trái lại, vị trí theo trục Y có dạng đường cong parabol, cho thấy robot đang di chuyển theo quỹ đạo cong trong mặt phẳng, tăng dần đến một điểm cực đại trước khi giảm xuống, phù hợp với quỹ đạo mong muốn. Đặc biệt, góc quay θ của robot giảm dần từ giá trị ban đầu và tiến về gần 0, chứng tỏ robot đang quay về một hướng cụ thể trong suốt quá trình di chuyển. Quỹ đạo mong

muốn và quỹ đạo thực tế gần như trùng khớp, cho thấy hệ thống điều khiển hoạt động rất hiệu quả trong việc theo dõi quỹ đạo đã đặt, đảm bảo sự chính xác trong chuyển động của robot.

Kết quả từ Hình 18 cho thấy vận tốc tổng của robot thay đổi theo thời gian. Cụ thể, ở giai đoạn đầu, vận tốc đạt giá trị cao nhất (0.3 m/s) và sau đó giảm dần. Từ khoảng 5 giây trở đi, vận tốc tiếp tục giảm xuống mức thấp nhất (0.1 m/s) ở giữa quá trình di chuyển. Sau đó, robot tăng tốc trở lại và đạt giá trị cao hơn vào cuối quá trình. Đồ thị này cho thấy robot đang di chuyển theo một quỹ đạo có sự thay đổi gia tốc, điều này có thể do yêu cầu từ hệ thống điều khiển hoặc đặc tính quỹ đạo mong muốn.



Hình 19: Quỹ đạo của robot

Hình 19 cho thấy quỹ đạo thực tế của robot gần như trùng khớp với quỹ đạo mong muốn, thể hiện độ chính xác và hiệu quả cao của hệ thống điều khiển. Robot di chuyển theo một đường cong liên tục và tối ưu, cho thấy phương pháp nội suy NURBS đã góp phần tạo ra một quỹ đạo mượt mà, phù hợp với yêu cầu chuyển động của hệ thống. Việc duy trì sai số quỹ đạo rất nhỏ chứng minh bộ điều khiển Fuzzy Type-1 đã được thiết kế tối ưu, đảm bảo khả năng bám quỹ đạo ổn định ngay cả trong môi trường có biến động nhỏ. Kết quả này đặc biệt quan trọng đối với các ứng dụng yêu cầu độ chính xác cao như robot tự hành, robot dịch vụ hoặc robot công nghiệp, nơi mà sự sai lệch quỹ đạo có thể ảnh hưởng đến tính ổn định và hiệu suất hoạt động của toàn hệ thống. Phương pháp nội suy NURBS không chỉ giúp cải thiện độ mượt trong quá trình di chuyển mà còn hạn chế các dao động không mong muốn, từ đó nâng cao hiệu suất điều khiển và đảm bảo robot đạt được chuyển động tối ưu trong thực tiễn.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã phát triển thành công mô hình động học và động lực học cho robot Mecanum bốn bánh trong môi trường Simscape Multibody của MATLAB, đồng thời thiết kế và đánh giá hai chiến lược điều khiển: PID và Fuzzy Type-1. Kết quả mô phỏng cho thấy, bộ điều khiển PID bám quỹ đạo tốt trong điều kiện tuyến tính nhưng dễ bị ảnh hưởng bởi nhiễu và thay đổi môi trường, trong khi Fuzzy Type-1 cho thấy độ ổn định cao và khả năng giảm dao động, đặc biệt hiệu quả với hệ thống phi tuyến hoặc có nhiễu mạnh. Phân tích đồ thị vận

tốc, quỹ đạo, và đáp ứng thời gian khẳng định Fuzzy Type-1 vượt trội, giúp robot vận hành mượt mà, chính xác hơn, nhấn mạnh tiềm năng của hệ điều khiển trí tuệ mềm trong môi trường phức tạp. Nghiên cứu hiện vẫn ở mức mô phỏng, nhưng mở ra khả năng tích hợp thuật toán học máy hoặc trí tuệ nhân tạo (AI) để tối ưu tham số và thích nghi theo thời gian thực. Các bước tiếp theo bao gồm thử nghiệm trên phần cứng, đánh giá hiệu suất thực tế, và mở rộng theo hướng điều khiển thích nghi kết hợp học tăng cường cho robot di động thông minh.

Acknowledgement

Chúng tôi chân thành cảm ơn Trường Đại học Giao thông Vận tải đã hỗ trợ cơ sở vật chất và môi trường nghiên cứu thuận lợi, giúp chúng tôi hoàn thành công trình này.

References

- [1] Wang, C.; Du, D. Research on logistics autonomous mobile robot system. In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China, 7–10 August 2016; pp. 275–280, doi:10.1109/ICMA.2016.7558574.
- [2] Fragapane, G.; de Koster, R.; Sgarbossa, F.; Strandhagen, J.O. Planning and controlling autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda. *Eur. J. Oper. Res.* 2021, doi:10.1016/j.ejor.2021.01.019.
- [3] Semenas, R.; Bausys, R. Modelling of Autonomous Search and Rescue Missions by Interval-Valued Neutrosophic WASPAS Framework. *Symmetry* 2020, 12, 162, doi:10.3390/sym12010162.
- [4] Chatila, R.; Lacroix, S.; Siméon, T.; Herrb, M. Planetary Exploration by a Mobile Robot: Mission Teleprogramming and Autonomous Navigation. *Auton. Robots* 1995, 2, 333–344, doi:10.1007/BF00710798.
- [5] Kriegel, J.; Rissbacher, C.; Reckwitz, L.; Tuttle-Weidinger, L. The requirements and applications of autonomous mobile robotics (AMR) in hospitals from the perspective of nursing officers. *Int. J. Healthc. Manag.* 2021, 1–7, doi:10.1080/20479700.2020.1870353.
- [6] Boloz, L.; Bialy, W. Automation and Robotization of Underground Mining in Poland. *Appl. Sci.* 2020, 10, 7221, doi:10.3390/app10207221.
- [7] Illingworth, J. et al. (2019). Omnidirectional PID Motion Control for Mecanum Wheel Robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8793605.
- [8] Gonzalez-de Santos, P.; Fernández, R.; Sepúlveda, D.; Navas, E.; Emmi, L.; Armada, M. Field Robots for Intelligent Farms -Inhering Features from Industry. *Agronomy* 2020, 10, 1638, doi:10.3390/agronomy10111638.
- [9] Sahin, H.; Guvenc, L. Household robotics-Autonomous devices for vacuuming and lawn mowing. *Control Syst. IEEE* 2007, 27, 20–96, doi:10.1109/MCS.2007.338262. 10.
- [10] Rubio, F.; Valero, F.; Llopis-Albert, C. A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Int. J. Adv. Robotic Syst.* 2019, 16, doi:10.1177/1729881419839596 11.
- [11] Angerer, S.; Strassmair, C.; Staehr, M.; Roettenbacher, M.; Robertson, N. Give me a hand-The potential of mobile assistive robots in automotive logistics and assembly applications. In Proceedings of the IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TEPRA2012), Woburn, Massachusetts, USA, 23–24 April 2012; IEEE Computer Society: Woburn, MA, USA, 2012. doi:10.1109/TePRA.2012.6215663.
- [12] Alatis, M.; Hancke, G. A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods. *IEEE Access* 2020, doi:10.1109/ACCESS.2020.2975643.
- [13] AbdMutilib, M.A.; Azlan, N.Z. Prototype development of mecanum wheels mobile robot: A review. *Appl. Res. Smart Technol. (AR-STech)* 2020, 1, 71–82, doi:10.23917/arstech.v1i2.39.
- [14] Wang, C.; Liu, X.; Yang, X.; Hu, F.; Jiang, A.; Yang, C. Trajectory Tracking of an Omni-Directional Wheeled Mobile Robot Using a Model Predictive Control Strategy. *Appl. Sci.* 2018, 8, 231, doi:10.3390/app8020231.
- [15] Muir, P.; Neuman, C. Kinematic modeling for feedback control of an omnidirectional wheeled mobile robot. In Proceedings of the 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Raleigh, NC, USA, 31 March–3 April 1987; Volume 4, pp. 1772–1778, doi:10.1109/ROBOT.1987.1087767.
- [16] Zijie, N.; Qiang, L.; Yonjie, C.; Zhijun, S. Fuzzy Control Strategy for Course Correction of Omnidirectional Mobile Robot. *Int. J. Control Autom. Syst.* 2019, 17, 2354–2364, doi:10.1007/s12555-018-0633-5.
- [17] Azizi, M.R.; Rastegarpanah, A.; Stolkin, R. Motion Planning and Control of an Omnidirectional Mobile Robot in Dynamic Environments. *Robotics* 2021, 10, 48, doi:10.3390/robotics10010048.
- [18] Ha, V.T. “Adaptive control for mobile robots based on intelligent controller.” *Journal of Applied Science and Engineering* 26(2), 215–230 (2023).
- [19] Ha, V.T. “Intelligent control for mobile robots based on fuzzy logic controller.” *Intelligent Systems and Networks* (2023).
- [20] D. Stober and N. Raguz-Lucic, “Trends, Problems, and Solutions from Point Cloud via Non-Uniform Rational Basis Spline to Building Information Modelling: Bibliometric and Systematic Study,” *Buildings*, vol. 14, no. 3, p. 564, 2024, doi: 10.3390/buildings14030564.