

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Trong cuộc cách mạng công nghiệp 4.0 yêu cầu các nhà máy tự động hóa hoàn toàn, trong đó robot di động là một thành phần không thể thiếu. Các robot di động giúp tối ưu hóa quy trình làm việc, giảm thiểu sự can thiệp của con người, tăng hiệu suất và đảm bảo sự chính xác. Trong các loại robot di động phổ biến hiện nay thì robot di động đa hướng có ưu điểm chuyển động linh hoạt theo mọi hướng mà không cần phụ thuộc vào góc quay của robot, có thể làm việc trong không gian hạn chế.

Thông thường, các loại robot di động đa hướng thường sử dụng bánh xe omni hoặc bánh xe mecanum. Trong đó, robot di động đa hướng sử dụng bánh xe mecanum có khả năng chịu tải trọng lớn, có khả năng hoạt động linh hoạt trong các môi trường phức tạp, hẹp và đông đúc, như trong các nhà kho, bệnh viện, khu vực sản xuất công nghiệp hoặc môi trường đô thị. Tuy nhiên, trong thực tế những môi trường này thường có nhiều yếu tố thay đổi liên tục (chướng ngại vật, mặt sàn di chuyển không bằng phẳng, v.v.), đặc biệt là khi tải trọng thay đổi hoặc trong các tình huống gây mất ổn định (ví dụ, khi robot mang theo các vật liệu không đồng đều), khi đó vị trí trọng tâm của robot thay đổi có thể ảnh hưởng lớn đến chuyển động và khả năng bám quỹ đạo. Do đó, việc nghiên cứu các thuật toán điều khiển thích nghi giúp robot hoạt động chính xác và ổn định hơn trong môi trường làm việc thực tế.

Bài toán điều khiển bám quỹ đạo cho robot di động đa hướng bánh xe mecanum là quan trọng và cấp thiết. Yêu cầu các hệ thống có khả năng điều khiển robot duy trì quỹ đạo mà không bị lệch hoặc mất ổn định, đặc biệt khi mô hình robot là phi tuyến có các thành phần bất định chịu ảnh hưởng của

môi trường làm việc hoặc khi di chuyển trên địa hình không bằng phẳng. Việc phát triển các thuật toán điều khiển bám quỹ đạo giúp giảm thiểu sai số và ổn định trong quá trình vận hành. Các hướng nghiên cứu chính có thể kể đến như sử dụng thuật toán điều khiển PID thông thường, điều khiển PID mờ hay một số nghiên cứu sử dụng bộ điều khiển mặt trượt. Gần đây các thuật toán điều khiển tiên tiến như MPC (Model Predictive Control), LQR (Linear Quadratic Regulator), và các phương pháp học máy (machine learning) được áp dụng và chứng minh tính hiệu quả.

Trong quá trình nghiên cứu, thách thức lớn cần giải quyết là phải phát triển các thuật toán điều khiển có thể thích nghi với các yếu tố môi trường không ổn định, như trọng tâm bất định của robot khi vận chuyển các vật nặng hoặc khi di chuyển trên địa hình không bằng phẳng. Các thuật toán điều khiển học máy, học tăng cường, học sâu dựa trên mạng nơ-ron nhân tạo cũng được nghiên cứu áp dụng vào điều khiển bám quỹ đạo cho robot, đạt được chất lượng điều khiển tốt hơn.

Với những xu hướng như trên, NCS đã lựa chọn đề tài: **Nghiên cứu xây dựng thuật toán thích nghi và học tăng cường cấu trúc Actor-Critic điều khiển bám quỹ đạo cho robot di động đa hướng mecanum**. Nội dung nghiên cứu của luận án sẽ tập trung vào xây dựng các thuật toán điều khiển thích nghi và học tăng cường nhằm nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo cho robot di động đa hướng bốn bánh xe mecanum có vị trí trọng tâm thay đổi. Luận án áp dụng các thuật toán điều khiển truyền thống, đến các thuật toán điều khiển học máy, học tăng cường để so sánh kiểm chứng với chất lượng thuật toán điều khiển được đề xuất.

2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

Mục tiêu nghiên cứu thuật toán điều khiển thích nghi và học tăng cường nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo cho robot di động đa hướng mecanum, trong điều kiện chịu ảnh hưởng của trọng tâm thay đổi và có nhiều ngoại tác động. Luận án đã đặt ra các nhiệm vụ nghiên cứu chính sau:

- Nghiên cứu thuật toán điều khiển thích nghi nhằm nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo cho robot di động đa hướng mecanum có trọng tâm thay đổi.
- Nghiên cứu thuật toán học tăng cường cấu trúc Actor- Critic áp dụng điều khiển bám quỹ đạo cho robot di động đa hướng mecanum có trọng tâm thay đổi.

3. Nội dung nghiên cứu

- Tổng quan về robot di động đa hướng, các nghiên cứu trong và ngoài nước, đưa ra hướng nghiên cứu của luận án.
- Mô hình hóa toán học cho robot di động bốn bánh xe mecanum có trọng tâm thay đổi.
- Áp dụng các thuật toán để điều khiển bám quỹ đạo cho robot mecanum như: PID, SMC, Backstepping-SMC, DSC.
- Nghiên cứu đề xuất thuật toán điều khiển thích nghi dựa trên hệ logic mờ nhằm nâng cao chất lượng bám quỹ đạo của robot di động đa hướng mecanum có trọng tâm thay đổi và nhiều ngoại tác động.
- Nghiên cứu đề xuất thuật toán học tăng cường cấu trúc actor- critic điều khiển bám quỹ đạo cho robot di động đa hướng mecanum chịu ảnh hưởng của nhiều ngoại lực và các tham số bất định của mô hình robot.

- Mô phỏng và thực nghiệm thuật toán trên mô hình robot thực từ đó đánh giá chất lượng và khả năng thực tiễn của thuật toán được đề xuất.

4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

Hiện nay, bài toán điều khiển bám quỹ đạo cho robot di động đa hướng mecanum có tính cấp thiết. Không chỉ phục vụ cho các ngành công nghiệp và sản xuất, nghiên cứu này còn góp phần phát triển công nghệ tự động hóa, tăng cường khả năng ứng dụng robot trong cứu hộ, an ninh, và các lĩnh vực giao thông tự động.

Luận án đề xuất phương pháp điều khiển thích nghi, học tăng cường dựa trên luật logic mờ và sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo là một hướng đi mới cho bài toán điều khiển bám quỹ đạo robot di động đa hướng bốn bánh xe mecanum để thích nghi với ảnh hưởng của thay đổi tâm khối lượng và các nhiễu bất định của mô hình, nhiễu ngoài.

Các kết quả nghiên cứu của luận án là cơ sở khoa học để áp dụng vào thực tiễn, cùng với việc xây dựng mô hình robot thử nghiệm để kiểm chứng thuật toán, từ đó mở ra khả năng áp dụng vào thực tiễn.

5. Đóng góp mới của luận án

Các đóng góp mới của luận án:

- Đề xuất thuật toán điều khiển mặt trượt động chỉnh định thích nghi mờ để nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo cho robot tự hành đa hướng bốn bánh xe mecanum có trọng tâm thay đổi.

- Đề xuất thuật toán học tăng cường cấu trúc Actor-Critic điều khiển tối ưu bám quỹ đạo cho robot tự hành đa hướng bốn bánh xe mecanum có trọng tâm thay đổi.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ ROBOT TỰ HÀNH ĐA HƯỚNG

1.1. Tổng quan về robot tự hành đa hướng bốn bánh xe mecanum

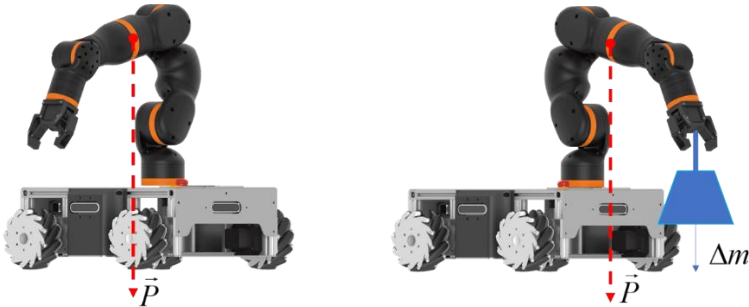
Robot di động đa hướng mecanum (FMWR) được thiết kế sử dụng bốn bánh xe mecanum được truyền dẫn độc lập với nhau bởi bốn động cơ riêng biệt. Các cặp bánh xe được sắp xếp đối xứng nhau tạo một tư thế cân bằng cho robot và đảm bảo tính động học trên mỗi bánh xe. Trên từng bánh xe mecanum được thiết kế với các con lăn vệ tinh thụ động đặt lệch so với trục chính của bánh xe một góc 45° như hình 1.1.



Hình 1.1 Mô hình robot tự hành bốn bánh xe mecanum

Khi robot hoạt động thì các bánh xe được động cơ truyền động quay theo phương vuông góc với trục truyền động, đồng thời các con lăn thụ động của bánh xe chuyển động biến đổi một phần lực tịnh tiến thành lực trượt ngang, nhờ đó các lực ngang giúp robot di theo phương ngang linh hoạt hay phương bất kỳ mà không phụ thuộc vào góc hướng của robot. Nhờ vào các ưu điểm di chuyển linh hoạt và chịu được tải trọng lớn thì FMWR được ứng dụng rộng rãi trong công nghiệp như các robot di động làm nhiệm vụ nâng hạ trong kho hàng, nhà máy, vận chuyển, hay robot được tích hợp tay máy

thao tác và chuyển động trong các dây chuyền sản xuất, robot thám hiểm ở trong những môi trường phóng xạ, robot có thể được sử dụng trong các nhiệm vụ khảo sát địa hình khó tiếp cận hoặc nguy hiểm như trong không gian, dưới nước hoặc các vùng đất khắc nghiệt.

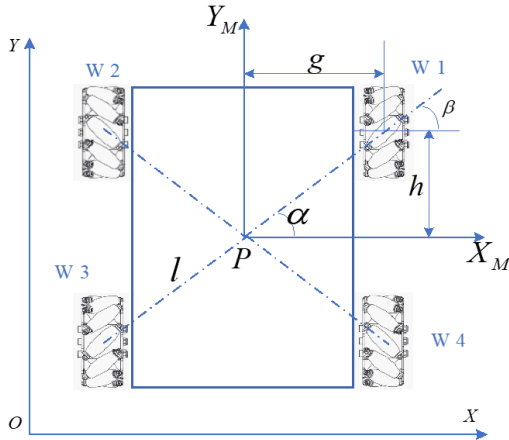


Hình 1.2 Sự thay đổi trọng tâm của robot tích hợp cánh tay cộng tác

Đối với một số ứng dụng của FMWR như: robot vận chuyển hàng hóa trong kho bãi hoặc robot có tích hợp tay máy cộng tác như hình 1.2. Trong quá trình hoạt động khi robot mang thêm một khối lượng hàng hóa điều đó dẫn đến tổng khối lượng của robot bị thay đổi và trọng tâm của robot cũng thay đổi theo. Khi trọng tâm của robot lệch nhiều về một phía (ví dụ khi robot quay hoặc chuyển động theo đường chéo), có thể dẫn đến việc robot mất thăng bằng và ảnh hưởng đến độ ổn định. Từ đó đặt ra vấn đề, nghiên cứu các thuật toán điều khiển có khả năng thích nghi với các thay đổi đó, và tự động điều chỉnh các tham số (như tốc độ, hướng, và lực tác động lên bánh xe) để đảm bảo robot ổn định trong suốt quá trình di chuyển và bám quỹ đạo một cách chính xác.

1.2. Phương trình động học robot di động mecanum

Mô hình robot di động đa hướng mecanum (FMWR) được thiết kế với bốn bánh xe mecanum được sắp xếp đối xứng theo từng cặp như thể hiện trong hình 1.3. Mỗi bánh xe được dẫn động bởi một động cơ riêng biệt, cho phép các bánh xe di chuyển độc lập với nhau nhờ vào thiết kế này mà mỗi bánh xe có thể chuyển động độc lập với nhau để tạo ra lực tịnh tiến và lực trượt ngang khác nhau giúp cho robot có thể di chuyển dọc hay di chuyển ngang mà ko cần thay đổi góc hướng của robot.



Hình 1.3 Mô hình robot di động đa hướng mecanum

Phương trình động học của FMWR trong hệ tọa độ toàn cục được xác định như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \\ \dot{\phi}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

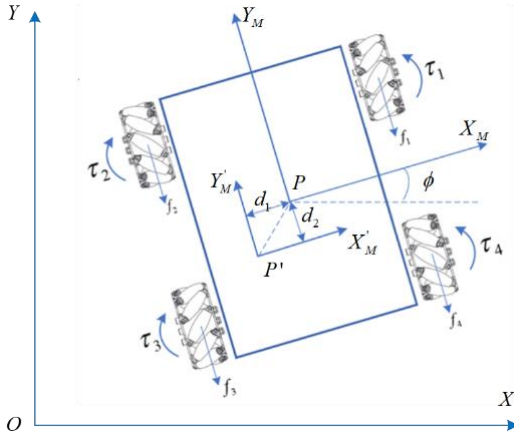
Phương trình động học viết dưới dạng ma trận như sau:

$$\dot{\mathbf{q}}_R = \mathbf{H}(\phi)\dot{\mathbf{q}} \quad (1.2)$$

Trong đó: $\dot{\mathbf{q}}_R = [\dot{x}_R \quad \dot{y}_R \quad \dot{\phi}_R]^T$ - là vận tốc theo trục x, y và góc hướng của robot trên hệ trục tọa độ gắn với robot. $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\phi}]^T$ - là vận tốc theo trục x, y và góc hướng của robot so với hệ trục tọa độ gốc.

1.3. Phương trình động lực học robot di động bốn bánh xe mecanum

Xét mô hình FMWR có trọng tâm thực tế không trùng với tâm hình học của mô hình robot. Điều này có nghĩa là vị trí trọng tâm của robot có thể lệch khỏi trung tâm hình học của cấu trúc robot, và sự khác biệt này ảnh hưởng đến động lực học và các đặc tính điều khiển của robot. Mô hình robot có trọng tâm thay đổi (FMWR-ME) thể hiện trong hình 1.4. Trong đó, vị trí trọng tâm $P = [x \quad y]^T$ được xét đến là vị trí trọng tâm theo hệ quy chiếu của robot và vị trí P' là vị trí trọng tâm thay đổi của robot được xét đến có vị trí tương đối thể hiện bởi $P' = [x - d_1 \quad y - d_2]^T$ theo khung tọa độ của robot. Vị trí trọng tâm P' có thể là cố định hoặc biến thiên trong trường hợp mang tải trọng hàng hóa có trọng tâm khó xác định (hoặc bất định). Để đảm bảo cho FMWR cân bằng, có thể hoạt động ổn định mà không bị lật khi di chuyển thì trong luận án giới hạn độ lệch trọng tâm của robot không vượt quá: $d_1 < \frac{1}{2}g$ và $d_2 < \frac{1}{2}h$.



Hình 1.4 Mô hình FMWR có xét đến độ lệch trọng tâm

Phương trình động lực học có thể được suy ra bằng cách đạo hàm phương trình Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\eta}_i} = \mathbf{Q}_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1.3)$$

Trong đó: $\boldsymbol{\eta}_i$ - là tọa độ tổng quát thứ i ;

Phương trình động lực học của FMWR viết dưới dạng ma trận như sau:

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\eta})\ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\eta}, \dot{\boldsymbol{\eta}})\dot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{D}\boldsymbol{\delta} = \mathbf{D}\boldsymbol{\tau} \quad (1.4)$$

Trong đó: $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3 \quad \tau_4]^T$, $\boldsymbol{\zeta} = [\zeta_1 \quad \zeta_2 \quad \zeta_3 \quad \zeta_4]^T$

$$\boldsymbol{\delta} = r.U.\boldsymbol{\zeta}; \quad \mathbf{U} = \text{diag}[\text{sgn}(\dot{\psi}_1) \quad \text{sgn}(\dot{\psi}_2) \quad \text{sgn}(\dot{\psi}_3) \quad \text{sgn}(\dot{\psi}_4)]$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & m_3 \\ 0 & m_1 & m_4 \\ m_3 & m_4 & m_2 \end{bmatrix}; m_1 = m_b + 4 \left(m_w + \frac{J_w}{r^2} \right);$$

$$m_3 = m_b (d_1 \sin \phi + d_2 \cos \phi); m_4 = m_b (-d_1 \cos \phi + d_2 \sin \phi);$$

$$m_2 = m_b (d_1^2 + d_2^2) + J_b + 8 \left(m_w + \frac{J_w}{r^2} \right) l^2 \sin^2(\pi / 4 - \alpha)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_1 \\ 0 & 0 & c_2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; c_1 = m_b \dot{\phi} (d_1 \cos \phi - d_2 \sin \phi)$$

$$c_2 = m_b \dot{\phi} (d_1 \sin \phi + d_2 \cos \phi)$$

$$\mathbf{D} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} -(c-s) & -(s+c) & -\sqrt{2}l \sin(\frac{\pi}{4} - \alpha) \\ -(c+s) & -(s-c) & -\sqrt{2}l \sin(\frac{\pi}{4} - \alpha) \\ c-s & s+c & -\sqrt{2}l \sin(\frac{\pi}{4} - \alpha) \\ c+s & s-c & -\sqrt{2}l \sin(\frac{\pi}{4} - \alpha) \end{bmatrix}^T; s = \sin \phi, c = \cos \phi$$

Phương trình động lực học (1.4) của FMWR có các tham số d_1, d_2 thể hiện độ lệch của trọng tâm thực tế so với tâm hình học của robot. Các kết quả này được sử dụng để triển khai các thuật toán điều khiển, nhằm đánh giá ảnh hưởng của độ lệch trọng tâm đến chất lượng điều khiển bám quỹ đạo. Từ đó đề xuất các thuật toán điều khiển thích nghi để thích ứng với các thay đổi của tham số mô hình và nâng cao chất lượng điều khiển.

CHƯƠNG 2. THUẬT TOÁN ĐIỀU KHIỂN BÁM QUỠ ĐẠO CHO ROBOT DI ĐỘNG ĐA HƯỚNG MECANUM

Sau khi xây dựng mô hình động học và động lực học cho FMWR, luận án sẽ áp dụng một số thuật toán điều khiển bám quỹ đạo để đánh giá mô hình robot. Đồng thời, phân tích các ưu và nhược điểm của các thuật toán điều khiển từ đó đề xuất thuật toán điều khiển mới giúp nâng cao tính hiệu quả.

2.1. Thuật toán điều khiển mặt trượt động cho FMWR

Thuật toán điều khiển mặt trượt động (DSC – Dynamic Surface Control) được phát triển dựa trên phương pháp điều khiển đa mặt trượt và kỹ thuật Backstepping, giúp khắc phục các nhược điểm liên quan đến các thành phần bất định ảnh hưởng đến mô hình. Đồng thời, thuật toán này giảm thiểu hiện tượng rung "chattering" đáng kể nhờ vào việc sử dụng bộ lọc thông thấp. Thuật toán điều khiển DSC bao gồm hai thành phần chính: khối đa mặt trượt (MSS) và khối lọc thông thấp. Khối đa mặt trượt tiếp nhận các giá trị từ trạng thái hiện tại của hệ thống, cùng với các tín hiệu điều khiển đã được xử lý qua bộ lọc thông thấp. Tín hiệu lọc này giúp giảm nhiễu và làm mịn tín hiệu điều khiển, giúp hệ thống tránh các hiện tượng rung. Mỗi bề mặt trượt tương ứng với một trạng thái điều khiển cụ thể của hệ thống. Bộ lọc bộ lọc thông thấp được áp dụng để xử lý các đầu vào từ hệ thống, giúp tách biệt các tín hiệu tần số cao không mong muốn.

Tín hiệu điều khiển của thuật toán DSC đã thiết kế, tín hiệu điều khiển được xác định:

$$\tau = -\mathbf{D}^T (\mathbf{D}\mathbf{D}^T)^{-1} [\mathbf{M}(-\frac{\bar{\mathbf{x}}_2 - \mathbf{x}_{2d}}{\tau} + \mathbf{K}_2 \mathbf{S}_2) - \mathbf{C}\dot{\eta} - \mathbf{D}\delta] \quad (2.1)$$

Chọn hàm Lyapunov: $\dot{V} = \mathbf{S}_1^T \dot{\mathbf{S}}_1 + \mathbf{S}_2^T \dot{\mathbf{S}}_2$ (2.2)

Đạo hàm (2.2) và sử dụng bất đẳng thức ta thu được:

$$\dot{V} \leq -\left(K_1 - \frac{1}{2}I\right)\mathbf{S}_1^T \mathbf{S}_1 - \left(K_2 - \frac{1}{2}I\right)\mathbf{S}_2^T \mathbf{S}_2 \quad (2.3)$$

Trong đó K_1 và K_2 là các tham số điều khiển được thiết kế sao cho hàm $\dot{V}$ xác định âm. Do đó, nếu $K_1 > \frac{1}{2}I$ và $K_2 > \frac{1}{2}I$ thì, $\dot{V} < 0$ đối với mọi $\mathbf{S}_1$ và $\mathbf{S}_2$. Do đó, $\mathbf{S}_1 \rightarrow 0$ và $\mathbf{S}_2 \rightarrow 0$ khi thời gian $t \rightarrow \infty$, ổn định tiệm cận của hệ thống theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov. Đặc biệt, nếu các sai lệch khác không, phương pháp điều khiển DSC sẽ làm giảm năng lượng của hệ thống ($\dot{V} < 0$), do đó điều chỉnh các sai lệch. Hệ thống nếu $\mathbf{x}_1$ và $\mathbf{x}_2$ bám theo quỹ đạo mong muốn $\mathbf{x}_{1d}$ và $\mathbf{x}_{2d}$, tương ứng khi thời gian $t \rightarrow \infty$

Các thuật toán đã thiết kế được đưa vào mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink để so sánh đánh giá kết quả. Tham số mô phỏng của mô hình FMWR được chọn như sau:

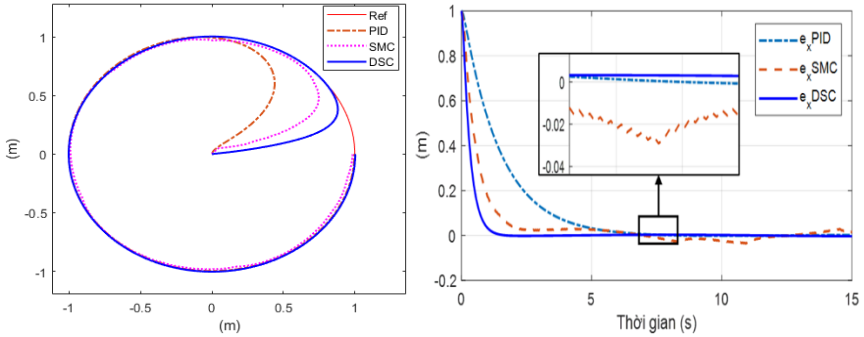
$$\begin{aligned} m &= 30(kg); m_w = 0.9(kg); J_b = 5(kg.m^2); \\ J_w &= 0.1(kg.m^2); g = 0.2(m), h = 0.3(m); r = 0.075(m); \\ g &= 9.8(m/s^2); f = [0.05 \quad 0.05 \quad 0.05 \quad 0.05]^T (N) \end{aligned} \quad (2.4)$$

- Thuật toán PID: $K_I = [15, 15, 15]$; $K_P = [20, 20, 20]$; $K_D = 1$

- Thuật toán SMC: $\Delta=[5,5,5]; K_1=[10,10,10]$

- Thuật toán DSC: $K_1=[5,5,5]; K_2=[10,10,10];$

Mô phỏng với mô hình FMWR-ME có độ lệch trọng tâm $d_1 = d_2 = 0.1m$, khối lượng thay đổi $\Delta m = 5kg$



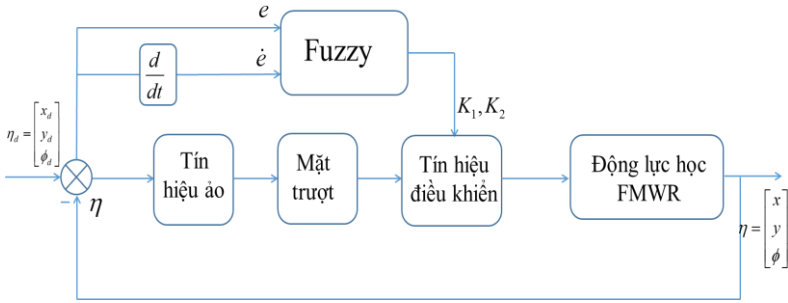
Hình 2.1 Kết quả mô phỏng bám quỹ đạo đường tròn

Từ các kết quả mô phỏng cho thấy rằng thuật toán điều khiển DSC có tham số điều khiển K_1 và K_2 ảnh hưởng đến chất lượng bám quỹ đạo của robot. Cụ thể, tham số K_1 quyết định tốc độ tiến đến mặt trượt, trong khi K_2 ảnh hưởng đến sự ổn định của hệ thống trên mặt trượt. Tuy nhiên, việc lựa chọn các tham số phù hợp để đạt được hiệu suất tối ưu thường phức tạp và phụ thuộc vào nhiều yếu tố. Để cải thiện khả năng thích nghi và nâng cao hiệu suất điều khiển, cần đề xuất sử dụng một bộ chỉnh định mờ nhằm tối ưu hóa các tham số điều khiển. Bộ chỉnh định mờ có thể liên tục điều chỉnh K_1 và K_2 theo trạng thái hiện tại của robot và các ảnh hưởng của môi trường, từ đó đảm bảo chất lượng bám quỹ đạo tốt hơn.

2.2. Đề xuất thuật toán điều khiển mặt trượt động chỉnh định thích nghi mờ cho robot di động đa hướng mecanum (Fuzzy-DSC-FMWR)

2.2.1. Thiết kế thuật toán Fuzzy-DSC-FMWR

Bộ điều khiển logic mờ được tích hợp vào hệ thống để tự động điều chỉnh các tham số K_1 và K_2 của thuật toán điều khiển DSC. Trong quá trình di chuyển trên quỹ đạo, các tín hiệu đầu vào của bộ chỉnh định bao gồm sai lệch vị trí $\mathbf{e}$ và sai lệch vận tốc $\dot{\mathbf{e}}$. Dựa trên những tín hiệu này, bộ điều khiển logic mờ sẽ điều chỉnh các tham số sao cho phù hợp với từng giai đoạn của quá trình điều khiển. Thuật toán điều khiển mặt trượt động chỉnh định thích nghi mờ (Fuzzy-DSC) đã được thiết kế để tối ưu hóa quá trình điều khiển bám quỹ đạo. Sơ đồ cấu trúc của thuật toán hình 2.2.



Hình 2.2 Cấu trúc thuật toán điều khiển Fuzzy-DSC

Đầu vào của bộ chỉnh định mờ là sai lệch bám của quỹ đạo robot $\mathbf{e}_1$ và đạo hàm của sai lệch theo thời gian $\dot{\mathbf{e}}_1$.

2.2.2. Mô phỏng và đánh giá kết quả

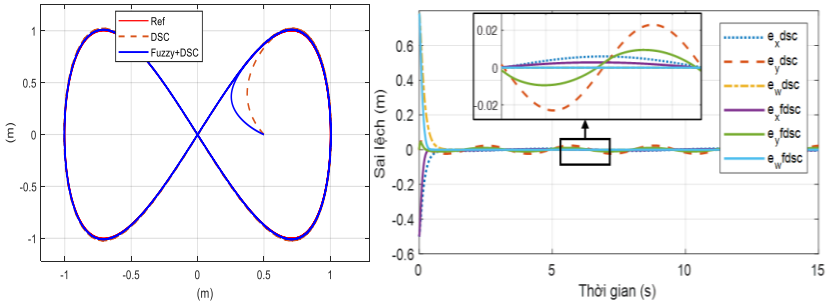
Mô phỏng thuật toán Fuzzy-DSC và DSC thông thường với mô hình robot có trọng tâm và khối lượng thay đổi (FMWR-ME). Thử nghiệm với nhiễu Gaussian: $\epsilon_{Gaus} = \text{normrnd}(0, 50, \text{size}(t))$

$$d_1 = 0.05\sin(0.8t) + 0.025\cos(1.5t) + 0.03\sin(2.5t)$$

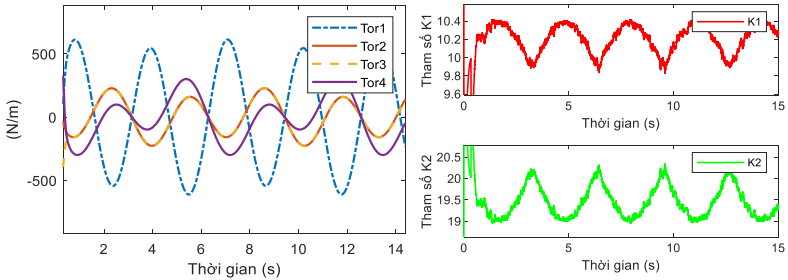
$$d_2 = 0.03\sin(0.3t) + 0.06\cos(1.2t) + 0.05\sin(2.8t) + 0.02\cos(3.5t)$$

$$\Delta m = 5\text{kg}$$

(2.5)



Hình 2.3 Quỹ đạo di chuyển và sai lệch của FMWR



Hình 2.4 Tín hiệu điều khiển và tham số chỉnh định

Kết quả mô phỏng hình 2.3 -2.4 cho thấy khi nhiễu được đưa vào mô hình thì cả hai thuật toán đều điều khiển robot bám theo quỹ đạo đặt. Tuy nhiên, còn gặp phải sự ảnh hưởng từ nhiễu, dẫn đến hiện tượng dao động.

Bảng 2-1: Bảng đánh giá sai lệch của quỹ đạo robot

Thời gian (s)	DSC Sai lệch (%)		Fuzzy-DSC Sai lệch (%)	
	x-axis	y-axis	x-axis	y-axis
1	1.35%	3.30%	0.28%	1.42%
2	0.87%	1.41%	0.33%	1.00%
2.5	0.67%	3.33%	0.25%	1.39%
3	0.31%	2.18%	0.08%	0.74%
4	0.50%	3.23%	0.25%	1.44%

Nhận xét: Thuật toán Fuzzy-DSC tỏ ra vượt trội so với DSC thông thường trong việc xử lý nhiễu và độ lệch trọng tâm nhờ vào khả năng tự điều chỉnh tham số và thích nghi linh hoạt với các tín hiệu nhiễu. Cụ thể, bộ điều khiển mờ Fuzzy có thể thay đổi nhanh chóng các tham số điều khiển như thông qua các luật mờ được thiết lập, giúp hệ thống điều khiển thích nghi với các thay đổi bất ngờ của môi trường hoặc nhiễu. Điều này giúp tối ưu hóa hiệu suất hệ thống điều khiển và duy trì tính ổn định trong suốt quá trình di chuyển của robot.

CHƯƠNG 3. THUẬT TOÁN HỌC TĂNG CƯỜNG ĐIỀU KHIỂN BÁM QUỸ ĐẠO CHO ROBOT DI ĐỘNG ĐA HƯỚNG MECANUM

Trong chương 2, thuật toán Fuzzy-DSC được đề xuất là một giải pháp mạnh mẽ trong điều khiển bám quỹ đạo cho robot di động đa hướng, đặc biệt khi hệ thống là phi tuyến và có các yếu tố bất định. Thuật toán có tốc độ hội tụ nhanh và ổn định với các nhiễu nhỏ khi các tham số và luật mờ được thiết kế phù hợp. Tuy nhiên, thuật toán có khả năng thích nghi hạn chế trong môi trường thay đổi hoặc có nhiễu bất định không dự đoán trước, vì các luật mờ thường được thiết kế trước và khó tự động điều chỉnh trong thời gian thực. Do vậy thuật toán học tăng cường được đề xuất áp dụng điều khiển bám quỹ đạo cho FMWR, để cải thiện khả năng thích nghi với các thay đổi của môi trường thay đổi hoặc chịu các nhiễu bất định của mô hình robot. Thuật toán học tăng cường sử dụng cấu trúc Actor-Critic giúp robot học từ các trải nghiệm thực tế và tối ưu hóa hành động để đạt được mục tiêu bám quỹ đạo mà không cần biết chính xác về các yếu tố bất định của mô hình.

3.1. Thiết kế thuật toán học tăng cường điều khiển bám quỹ đạo cho FMWR

Biến đổi mô hình động lực học của FMWR về dạng như sau:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{F}(\mathbf{z}) + \mathbf{G}(\mathbf{z})\mathbf{u} \quad (3.1)$$

$$\text{Với: } \mathbf{F}(\mathbf{z}) = \begin{pmatrix} f(\mathbf{x}) - h_r(\mathbf{x}_r) + g(\mathbf{x})\boldsymbol{\tau}_r' \\ h_r(\mathbf{x}_r) \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G}(\mathbf{z}) = \begin{pmatrix} g(\mathbf{x}) \\ \mathbf{0}_{6 \times 4} \end{pmatrix}$$

Để đạt được mục tiêu bám quỹ đạo, ta xét quỹ đạo đặt cho robot như sau:

$$\dot{\mathbf{x}}_r = \mathbf{h}_r(\mathbf{x}_r) \quad (3.2)$$

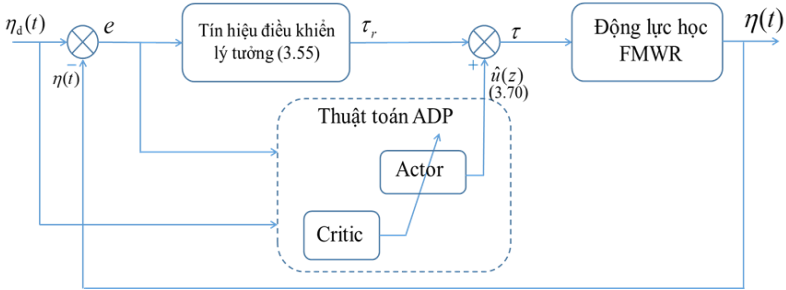
Trong đó, $\mathbf{x}_r = (\boldsymbol{\eta}_r^T, \mathbf{v}_{qr}^T)^T$ và $\dot{\boldsymbol{\eta}}_r = \dot{\mathbf{v}}_r, h_r(\mathbf{x}_r)$ là một hàm liên tục chuyển ma trận Lipschitz, xác định $\mathbf{e} \triangleq \mathbf{x} - \mathbf{x}_r$ là sai lệch bám, tốc độ bám quỹ đạo được mô tả như sau:

$$\dot{\mathbf{e}} = f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})\boldsymbol{\tau} - h_r(\mathbf{x}_r) = f(\mathbf{x}) - h_r(\mathbf{x}_r) + g(\mathbf{x})\boldsymbol{\tau} + g(\mathbf{x})\mathbf{u} \quad (3.3)$$

Trong đó: $\mathbf{u} = \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}_r$, $\boldsymbol{\tau}_r(\mathbf{x}_r) = g^+(\mathbf{x}_r)(h_r(\mathbf{x}_r) - f(\mathbf{x}_r))$ (3.4)

Đặt $\mathbf{z} = (\mathbf{e}^T, \mathbf{x}_r^T)^T$ là biến trạng thái mới

Sơ đồ cấu trúc điều khiển được thể hiện trong hình 3.1:



Hình 3.1 Sơ đồ điều khiển FMWR sử dụng cấu trúc actor-critic

Để điều khiển tối ưu cho hệ thống (3.1) ta xét hàm chi phí sau:

$$V(\mathbf{z}(t)) = \int_t^\infty \mathbf{e}^{-\gamma(s-t)} \mathbf{U}(\mathbf{z}(s), \mathbf{u}(s)) ds \quad (3.5)$$

Phương trình Hamiltonian được cho bởi:

$$\mathbf{H}(\mathbf{z}, \mathbf{u}, \nabla \mathbf{V}) = \lambda_M^2(\mathbf{z}) + \mathbf{z}^T \bar{\mathbf{Q}} \mathbf{z} + \mathbf{u}^T(\mathbf{z}) \mathbf{R} \mathbf{u}(\mathbf{z}) - \gamma \mathbf{V}(\mathbf{z}) + \nabla \mathbf{V}^T(\mathbf{z})(\mathbf{F}(\mathbf{z}) + \mathbf{G}(\mathbf{z})\mathbf{u}(\mathbf{z})) \quad (3.6)$$

Từ đó có thể xác định hàm chi phí tối ưu như sau:

$$\mathbf{V}^*(\mathbf{z}) = \min_{\mathbf{u} \in \pi(\Omega)} \int_t^\infty \mathbf{e}^{-\gamma(s-t)} \left(\lambda_M^2(\mathbf{z}) + \mathbf{z}^T \bar{\mathbf{Q}} \mathbf{z} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u} \right) \quad (3.7)$$

Từ đó, tín hiệu điều khiển tối ưu được xác định như sau:

$$\mathbf{u}^*(\mathbf{z}) = \arg \min_{\mathbf{u} \in \pi(\Omega)} \left[\mathbf{H}(\mathbf{z}, \mathbf{u}, \nabla \mathbf{V}^*(\mathbf{z})) \right] = -\frac{1}{2} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G}^T(\mathbf{z}) \nabla \mathbf{V}^*(\mathbf{z}) \quad (3.8)$$

Để có được tín hiệu điều khiển tối ưu (3.8) ta cần giải bài toán cực trị trong phương trình HJB, việc giải bài toán này là cực kỳ khó giải vậy nên ta áp dụng thuật toán actor-critic vào để giải phương trình này.

Thuật toán Actor-Critic kết hợp với mạng nơ ron trong thời gian thực để thực hiện việc tìm nghiệm gần đúng của phương trình HJB. Dựa trên định lý xấp xỉ bậc cao Weierstrass, hàm chi phí $\mathbf{V}^*(\mathbf{z})$ có thể được xấp xỉ bằng cách sử dụng mạng nơ ron một lớp như sau:

$$\mathbf{V}^*(\mathbf{z}) = \mathbf{W}^T \phi(\mathbf{z}) + \varepsilon_v(\mathbf{z}) \quad (3.9)$$

Tín hiệu điều khiển tối ưu trở thành:

$$\mathbf{u}^*(\mathbf{z}) = -\frac{1}{2} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G}^T(\mathbf{z}) \left(\nabla \phi^T(\mathbf{z}) \mathbf{W} + \nabla \varepsilon_v(\mathbf{z}) \right) \quad (3.10)$$

Dựa trên công thức (3.9) và (3.10) critic NN xấp xỉ cho hàm chi phí tối ưu và actor NN xấp xỉ cho chính sách tối ưu được đưa ra như sau:

$$\hat{\mathbf{V}}(\mathbf{z}, \hat{\mathbf{W}}_c) = \hat{\mathbf{W}}_c^T \phi(\mathbf{z}) \quad (3.11)$$

$$\hat{\mathbf{u}}(\mathbf{z}, \hat{\mathbf{W}}_a) = -\frac{1}{2} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G}^T(\mathbf{z}) \nabla \phi^T(\mathbf{z}) \hat{\mathbf{W}}_a \quad (3.12)$$

Trong đó, $\hat{\mathbf{W}}_a, \hat{\mathbf{W}}_c$ là ước lượng các trọng số lý tưởng $\mathbf{W}$. Từ đó bộ điều khiển bám quỹ đạo cho FMWR có thể thu được như sau:

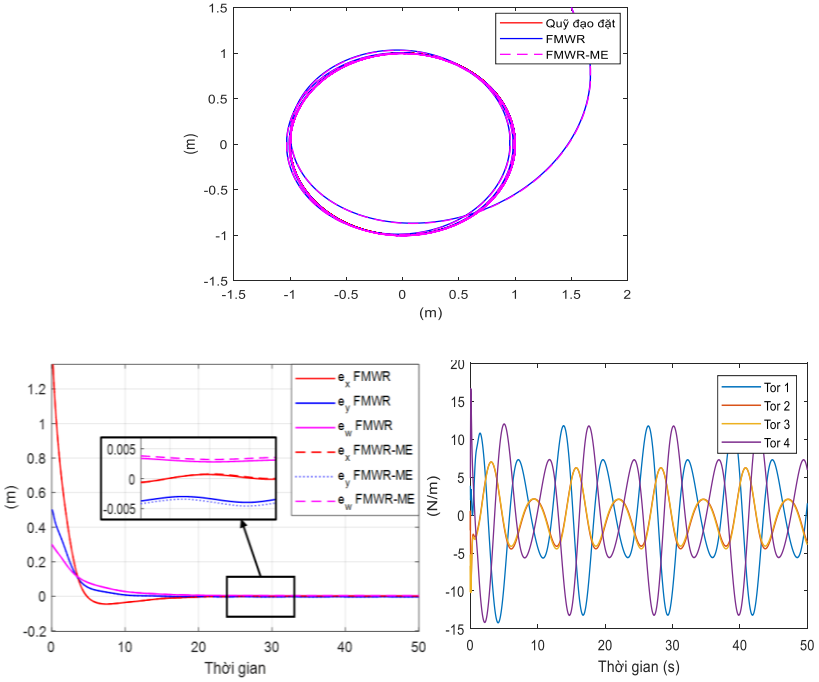
$$\boldsymbol{\tau} = -\frac{1}{2} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{G}^T(\mathbf{z}) \nabla \phi^T(\mathbf{z}) \hat{\mathbf{W}}_a + g^+(x_r) (h_r(x_r) - f(x_r)) \quad (3.13)$$

Để giải quyết bài toán tối ưu điều khiển ta sử dụng phương pháp bình phương tối thiểu được thiết kế để đào tạo mạng nơ-ron critic sao cho giảm thiểu sai lệch tích phân $E_c = \int_0^t \delta^2(s) ds$ như sau:

$$\hat{\mathbf{W}}_c = -\eta_c \Gamma(t) \frac{\sigma(t)}{m_\sigma^2(t)} \delta \quad (3.14)$$

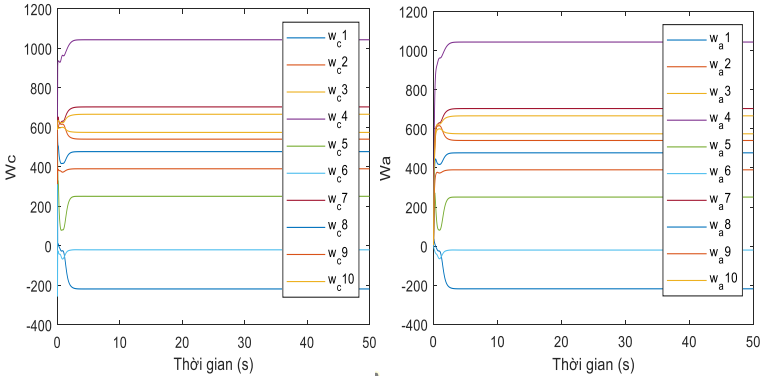
Xác định sai lệch ước lượng của trọng số critic là $\tilde{\mathbf{W}}_c = \mathbf{W} - \hat{\mathbf{W}}_c$ và sai lệch ước lượng của trọng số actor là $\tilde{\mathbf{W}}_a = \mathbf{W} - \hat{\mathbf{W}}_a$ từ đó sai lệch Bellman có thể được xác định: $\boldsymbol{\delta} = -\tilde{\mathbf{W}}_c^T \boldsymbol{\sigma} + \frac{1}{4} \tilde{\mathbf{W}}_a^T \mathbf{D}_1 \tilde{\mathbf{W}}_a - \boldsymbol{\varepsilon}_H$ (3.15)

Mô phỏng với tham số của mô hình robot như (2.5)



Hình 3.2 So sánh quỹ đạo FMWR và FMWR-ME

Trong khoảng thời gian đầu tiên, robot di chuyển tiến gần đến quỹ đạo đặt và tự động học để điều chỉnh hành động của mình, giúp bám theo quỹ đạo một cách chính xác hơn. Trong suốt quá trình này, thuật toán học tăng cường cho phép robot điều chỉnh các trọng số điều khiển sao cho phù hợp, dần dần cải thiện khả năng bám sát quỹ đạo mong muốn, dù có một vài sai lệch nhỏ cụ thể là $[0.00062, -0.00374, 0.00318]$ m theo các trục x, y và góc quay. Dạng tín hiệu điều khiển trong hình 3.2.



Hình 3.3 Sự hội tụ của trọng số nơ-ron Actor- Critic

Sau khoảng thời gian 6 giây, quá trình tự học và thích nghi với tín hiệu nhiễu hoàn thành khi đó các trọng số trong mạng NNs đã hội tụ hình 3.3 và robot đã bắt đầu di chuyển ổn định để bám sát quỹ đạo đặt.

Nhận xét: Kết quả cho thấy thuật toán không chỉ đảm bảo hiệu quả bám quỹ đạo mà còn có tính ổn định cao, kể cả khi có sự tác động của nhiễu bất định từ mô hình. Hơn nữa, thuật toán này có khả năng thích nghi với các thay đổi về khối lượng và trọng tâm của robot.

So sánh thuật toán Fuzzy- DSC và học tăng cường cấu trúc actor-critic thì hai thuật toán đều có những ưu nhược điểm riêng, và phù hợp với từng ứng dụng nhau. Nếu yêu cầu robot có khả năng tối ưu hóa dài hạn, khả năng tự học từ môi trường thì thuật toán RL-AC là lựa chọn phù hợp, mặc dù quá trình học có thể kéo dài và yêu cầu cấu hình máy tính tính toán lớn. Mặt khác, nếu yêu cầu ổn định ngay lập tức và khả năng thích nghi với nhiễu mạnh mẽ thì thuật toán Fuzzy-DSC là lựa chọn tốt, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu tính ổn định cao và môi trường ít thay đổi.

CHƯƠNG 4. THỰC NGHIỆM VỚI MÔ HÌNH ROBOT DI ĐỘNG ĐA HƯỚNG MECANUM

Mô hình FMWR được thiết kế và chế tạo sử dụng trong phòng thí nghiệm.

4.1. Thiết kế chế tạo mô hình FMWR

Mô hình robot được thiết kế với tổng trọng lượng robot: 30kg, tốc độ di chuyển: 0.5m/s, tải trọng 20kg, thời gian hoạt động 30 phút.

Mạch điều khiển sử dụng Jetson_Tx2, chạy hệ điều hành ROS, STM32



Hình 4.1 Mô hình thực nghiệm FMWR

4.2. Kết quả chạy thực nghiệm

Thuật toán Fuzzy- DSC được đề xuất áp dụng vào mô hình robot để chạy thực nghiệm đạt kết quả tốt, cho thấy khả năng áp dụng thực tế.



Hình 4.2 Kết quả chạy thực nghiệm mô hình FMWR

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Trong luận án đã trình bày các nghiên cứu và đề xuất các thuật toán nhằm nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo cho robot di động đa hướng bốn bánh xe mecanum có trọng tâm thay đổi. Đóng góp chính của luận án:

➤ **Đề xuất thuật toán điều khiển mặt trượt động chỉnh định thích nghi mờ để nâng cao chất lượng điều khiển bám quỹ đạo cho robot tự hành đa hướng bốn bánh xe mecanum có trọng tâm thay đổi.** Thuật toán được thiết kế với đầu vào của bộ chỉnh định mờ là sai lệch vị trí và vận tốc thông qua mô hình mờ sugeno, để chỉnh định trực tuyến các tham số điều khiển của thuật toán điều khiển mặt trượt động.

➤ **Đề xuất thuật toán học tăng cường cấu trúc Actor-Critic điều khiển tối ưu bám quỹ đạo cho robot tự hành đa hướng bốn bánh xe mecanum có trọng tâm thay đổi.** Thuật toán sử dụng mạng nơ-ron với cấu trúc Actor – Critic để giải xấp xỉ nghiệm phương trình HJB. Trong đó, mạng Actor NNs dùng để xấp xỉ luật điều khiển tối ưu, Critic NNs dùng để xấp xỉ hàm Bellman. Thuật toán được chứng minh tính ổn định theo tiêu chuẩn hàm Lyapunov. Các kết quả mô phỏng của thuật toán được áp dụng điều khiển bám quỹ đạo cho FMWR cho thấy khả năng bám quỹ đạo của robot và ổn định ngay cả với trọng tâm của robot thay đổi, chịu được ảnh hưởng của các nhiễu ngoại lực tác động và hoạt động ổn định với sai lệch nhỏ.

➤ **Hướng phát triển của luận án:** Trong tương lai việc nghiên cứu các thuật toán có thể được phát triển như sau: Phát triển thuật toán với giải thuật ADP sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo nhiều lớp. Nghiên cứu áp dụng thuật toán học tăng cường vào mô hình thực tế và đánh giá kết quả để có thể đưa vào ứng dụng thực tiễn.