

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT THÍCH NGHI VỚI LUẬT TIẾP CẬN HÀM SỐ MŨ CHO XE TỰ HÀNH AGV

DESIGN OF AN ADAPTIVE SLIDING MODE CONTROLLER WITH EXPONENTIAL REACHING LAW FOR AUTOMATED GUIDED VEHICLES AGV

Nguyễn Đình Long¹,
Lê Văn Tuấn^{1,*}, Võ Quốc Đạt²

DOI: <https://doi.org/10.57001/huic5804.2025.279>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một phương pháp thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi với luật tiếp cận hàm số mũ cho xe tự hành AGV dạng hai bánh lái chủ động và bốn bánh tự lựa, giúp xe bám tốt theo quỹ đạo mẫu dù có nhiễu và các tham số không chắc chắn thay đổi với biên độ lớn. Thuật toán đề xuất đảm bảo ước lượng được giá trị lớn hơn hoặc bằng biên độ giới hạn của hàm chứa nhiễu và thành phần không chắc chắn, qua đó đưa trạng thái hệ thống hội tụ nhanh về miền ổn định, giúp tăng khả năng hoạt động của xe AGV trong những điều kiện khắc nghiệt của môi trường. Kết quả mô phỏng chứng minh cho hiệu quả của phương pháp đề xuất.

Từ khóa: Xe tự hành AGV, mô hình động học, mô hình động lực học, điều khiển trượt thích nghi, hàm số mũ, ổn định Lyapunov.

ABSTRACT

The paper presents a method for designing an adaptive sliding mode controller with an exponential reaching law for AGVs of two-wheel drive and four-wheel self-steering type, helping the vehicle to follow the reference trajectory well despite noise and uncertain parameters changing with large amplitudes. The proposed algorithm ensures that the estimated value is greater than or equal to the limit amplitude of the function containing noise and uncertain components, thereby bringing the system state to converge quickly to the stable region, helping to increase the operating capacity of AGVs in harsh environmental conditions. Simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Automated guided vehicle AGV, kinematic model, dynamic model, adaptive sliding mode control, exponential function, Lyapunov stability.

¹Viện Tự động hóa Kỹ thuật quân sự, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

²Học viện Kỹ thuật Quân sự

*Email: visaosang89@gmail.com

Ngày nhận bài: 20/4/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 29/5/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/7/2025

1. GIỚI THIỆU

Xe tự hành AGV đã được phát triển từ lâu và ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau như: sản xuất, đời sống, quân sự, khoa học vũ trụ... Việc điều khiển xe AGV bám tốt theo quỹ đạo mẫu là một vấn đề được nhiều nhà khoa học quan tâm. Ban đầu để đơn giản hóa trong vấn đề điều khiển một số nghiên cứu chỉ tập trung vào mô hình động học và bỏ qua các yếu tố về động lực học, như trong [1-3]. Tuy nhiên thực tế khi xe di chuyển các tham số của xe sẽ bị thay đổi gây ra bởi tải trọng, moment quán tính, ma sát bề mặt, trượt bánh xe và các thành phần không chắc chắn khác. Vì vậy mà nhiều công trình nghiên cứu đã thiết kế thêm bộ điều khiển cho phần động lực học và sau đó kết hợp hai bộ điều khiển này lại với nhau. Có rất nhiều phương pháp điều khiển, như: điều khiển sử dụng mạng nơ-ron [4, 5], điều khiển thích nghi [6, 7], điều khiển mờ [8], điều khiển cuốn chiếu [9], điều khiển trượt [10, 11]... Các phương pháp nêu trên đều có ưu điểm, nhược điểm riêng của mình và chỉ giải quyết bài toán đặt ra trong các tình huống cụ thể khác nhau.

Điều khiển trượt hiện nay được xem là bộ điều khiển đơn giản, mang tính ổn định và bền vững đối với các mô hình phi tuyến có các tham số không chắc chắn và nhiễu tác động [13]. Việc áp dụng bộ điều khiển này cho xe AGV cũng đã có nhiều nghiên cứu, như trong [10-12]. Nghiên cứu [10, 11] sử dụng mặt trượt với luật tiếp cận căn bản nên dễ gây ra hiện tượng dao động và sự hội tụ của trạng thái hệ thống cũng chậm. Trong nghiên cứu [12] đã đề cập một phương pháp cải tiến là sử dụng điều khiển trượt với luật tiếp cận theo hàm số mũ. Phương pháp này đã hạn chế được hiện tượng dao động cũng như sự hội tụ nhanh hơn. Tuy nhiên sự hội tụ sẽ bị dao động nếu như hàm của thành phần không chắc chắn và nhiễu thay đổi với biên độ lớn,

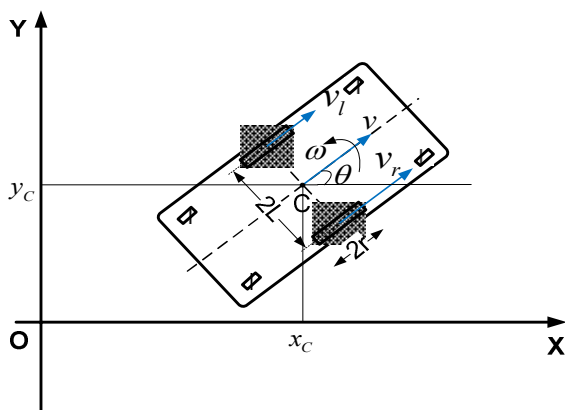
khi đó hệ số điều khiển sẽ không đáp ứng được. Để khắc phục hạn chế trên, trong bài báo này đề xuất một thuật toán thích nghi giúp ước lượng được giá trị lớn hơn hoặc bằng biên độ giới hạn của hàm đã nêu, qua đó sẽ giúp hiệu chỉnh online hệ số điều khiển để đưa trạng thái quỹ đạo của hệ thống hội tụ tiệm cận về miền ổn định.

Bài báo được bố cục thành 5 phần: phần 1 là mở đầu; phần 2 miêu tả về mô hình xe tự hành AGV; phần 3 trình bày về phương pháp thiết kế bộ điều khiển động học cũng như bộ điều khiển trượt thích nghi cho phần động lực học của AGV; phần 4 mô phỏng, đánh giá hiệu quả của phương pháp đề xuất và phần 5 kết luận.

2. MÔ HÌNH XE TỰ HÀNH AGV

2.1. Mô hình động học

Xét một xe tự hành AGV có thiết kế dạng 2 bánh lái chủ động và bốn bánh tự lựa như hình 1. Xe di chuyển đi thẳng, lùi, hoặc quay phải, quay trái nhờ điều khiển vị sai 2 bánh chủ động.



Hình 1. Mô hình xe AGV trong hệ trục tọa độ XOY

Giả định xe AGV di chuyển trong hệ trục tọa độ XOY và các bánh xe chủ động của AGV chỉ quay và không trượt, tức là:

$$\dot{y} \cos \theta - \dot{x} \sin \theta = 0$$

Khi đó phương trình động học của xe tự hành AGV sẽ được mô tả như sau [1-3]:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = J(q) \mathcal{G}, \quad (1)$$

$$\text{trong đó, } J(q) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathcal{G} = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}; v = (v_r + v_l) / 2 -$$

vận tốc tịnh tiến; $\omega = (v_r - v_l) / 2L$ - vận tốc góc; $q = [x \ y \ \theta]^T$; x, y, θ - vị trí và góc hướng của AGV.

2.2. Mô hình động lực học

Giả thiết xe AGV có khối lượng m , momen quán tính quanh tâm xe I , bán kính các bánh xe chủ động r và khoảng cách giữa 2 bánh xe chủ động $2L$. Khi đó mô hình động lực học của AGV được mô tả theo phương trình dạng Euler-Lagrange [4, 5, 10] như sau:

$$M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) + \tau_d = B(q)\tau - A^T(q)\lambda \quad (2)$$

$$\text{với } M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} - \text{ma trận quán tính,}$$

$$B(q) = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \theta \\ \sin \theta & \sin \theta \\ L & -L \end{bmatrix} - \text{ma trận chuyển đổi đầu vào,}$$

$$A^T(q) = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} - \text{ma trận liên quan đến các ràng buộc}$$

nonholonomic, $\tau = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix}$ - momen đầu vào điều khiển các

bánh xe, $\lambda = -m(\dot{x}_c \cos \theta + \dot{y}_c \sin \theta)\dot{\theta}$ - nhân tử Lagrange liên quan đến các ràng buộc, $V(q, \dot{q})$ - ma trận hướng tâm và Coriolis, $F(\dot{q})$ - thành phần ma sát bề mặt, $G(q)$ - vector trọng lực, τ_d - nhiễu bị chặn (gồm nhiễu đo lường, nhiễu hệ thống và thành phần chưa chắc chắn của mô hình động lực học), $\dot{q}$ và $\ddot{q}$ - vector vận tốc và gia tốc.

Với mô hình xe AGV dạng 2 bánh chủ động như hình 1, khoảng cách từ trọng tâm xe đến trục nối giữa 2 bánh xe bằng 0, nên theo công thức đã được xây dựng trong [4, 5] ta sẽ có $V(q, \dot{q}) = 0$. Ngoài ra nếu giả sử khi xe di chuyển tư thế xe nằm song song với mặt đất, do vậy vector trọng lực vuông góc với mặt ngang nên ta cũng có $G(q) = 0$.

Vì $J^T(q)A^T(q) = 0$ nên khi nhân hai vế của (2) với $J^T(q)$ ta sẽ có:

$$\bar{M}(q)\ddot{q} + \bar{V}(q, \dot{q})\dot{q} + \bar{F}(\dot{q}) + \bar{\tau}_d = \bar{B}(q)\tau \quad (3)$$

$$\text{với: } \bar{M} = J^T M J \in \mathbb{R}^{2 \times 2}, \quad \bar{V} = J^T (M \dot{J} + V J) \in \mathbb{R}^{2 \times 2}, \\ \bar{F} = J^T F \in \mathbb{R}^{2 \times 1}, \quad \bar{\tau}_d = J^T \tau_d \in \mathbb{R}^{2 \times 1}, \quad \bar{B}(q) = J^T B \in \mathbb{R}^{2 \times 2}.$$

Khai triển các thành phần trong (3), ta nhận được:

$$\bar{M}(q) = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad \bar{B}(q) = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ L & -L \end{bmatrix}, \quad \bar{V}(q, \dot{q}) = 0.$$

Đặt $\Delta \tau = \bar{F}(\dot{q}) + \bar{\tau}_d \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ chứa thành phần ma sát bề mặt và nhiễu. Giả sử $\Delta \tau$ bị chặn, từ (3) ta có:

$$\bar{M}(q)\dot{\theta} + \Delta\tau = \bar{B}(q)\tau. \quad (4)$$

Từ (4) ta biểu diễn lại như sau:

$$\dot{\theta} = E\tau + \xi \quad (5)$$

$$\text{với } E = \bar{M}(q)^{-1}\bar{B}(q) = \frac{1}{mrl} \begin{bmatrix} l & l \\ Lm & -Lm \end{bmatrix}, \quad \xi = -\bar{M}(q)^{-1}\Delta\tau \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$$

- được xem như thành phần nhiễu bị chặn.

Lưu ý: Thực tế khi xe AGV hoạt động khối lượng m và momen quán tính I sẽ bị thay đổi như: xe di chuyển có tải và không có tải, tải chở theo bị lệch tâm xe... Vì vậy phương trình (5) sẽ được biểu diễn lại như sau:

$$\dot{\theta} = E_n\tau + \Delta E\tau + \xi \quad (6)$$

với E_n - thành phần danh nghĩa của ma trận E , ΔE - thành phần không chắc chắn của ma trận E tạo ra bởi sự biến đổi của m và I .

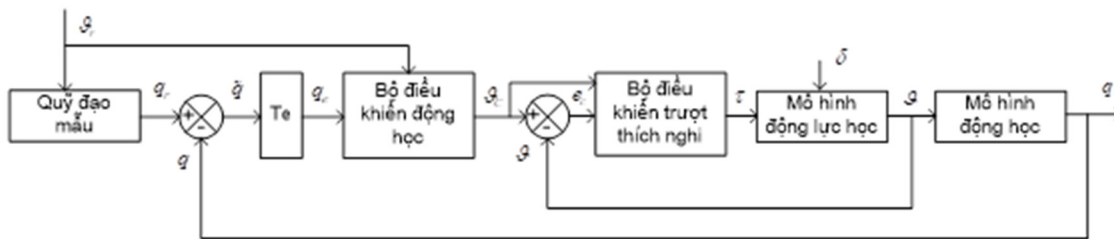
$$\text{Đặt: } \delta = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix} = \Delta E\tau + \xi. \text{ Khi đó phương trình (6) được}$$

viết lại như sau:

$$\dot{\theta} = E_n\tau + \delta. \quad (7)$$

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Bộ điều khiển được nghiên cứu trong bài báo này gồm 2 phần: bộ điều khiển vòng ngoài cho phần động học của xe AGV và bộ điều khiển trượt thích nghi vòng trong cho phần động lực học. Cấu trúc tổng quát của bộ điều khiển được thể hiện trên hình 2.



Hình 2. Sơ đồ cấu trúc bộ điều khiển trượt thích nghi cho xe AGV

3.1. Bộ điều khiển cho phần động học

Để xe tự hành AGV di chuyển theo quỹ đạo được vạch ra khi yêu cầu các nhiệm vụ vận chuyển hàng hóa, một quỹ đạo tham chiếu được tạo ra như sau:

$$\dot{q}_r = J(\theta_r)\dot{\theta}_r \quad (8)$$

với $J(\cdot)$ là ma trận chứa thành phần góc hướng như trong biểu thức (1), $\dot{\theta}_r$ là vận tốc mẫu và q_r là quỹ đạo mẫu.

Bài toán: Thiết kế bộ điều khiển bám theo quỹ đạo mẫu $q_r = [x_r, y_r, \theta_r]^T$ cho xe AGV.

Đầu tiên ta xác định sai số giữa quỹ đạo mẫu và quỹ đạo thực của AGV:

$$\tilde{q} = q_r - q = \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix}$$

Mặt khác ta biểu diễn vector sai số q_e như sau:

$$q_e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix}$$

$$q_e = T_e \tilde{q}$$

trong đó, T_e được gọi là ma trận xoay (hay ma trận chuyển hệ tọa độ).

Như quan sát trên hình 2 bộ điều khiển được thiết kế ở đây có đầu vào là sai số q_e và vận tốc mẫu $\dot{\theta}_r$. Nhiệm vụ là thiết kế bộ điều khiển có đầu ra là vận tốc $\dot{\theta}_c$, để cung cấp cho việc điều khiển 2 bánh xe phải trái giúp xe bám tốt theo quỹ đạo mẫu q_r , hay $\lim_{t \rightarrow \infty} (q_e(t)) = 0$. Bộ điều khiển

cho phần động học được xác định như sau:

$$\mathcal{G}_c = \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_r \cos e_3 + \lambda_1 e_1 \\ \omega_r + \lambda_2 v_r e_2 + \lambda_3 v_r \sin e_3 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$\mathcal{G}_c = f_c(q_e, \mathcal{G}_r, \lambda),$$

trong đó, $\lambda_i > 0, i = 1, 2, 3$ và $v_r > 0$.

Bộ điều khiển này sẽ đưa q_e hội tụ về 0 trong một thời gian hữu hạn. Thực ra đây là bộ điều khiển phổ biến được

thiết kế dựa trên tiêu chuẩn Lyapunov và đã được đề cập trong nhiều nghiên cứu [4, 5, 10]. Phần chứng minh tính ổn định bộ điều

khiển này có thể tham khảo trong các tài liệu nêu trên.

3.2. Bộ điều khiển trượt thích nghi cho phần động lực học

Sai số vận tốc được xác định như sau:

$$e_c(t) = \begin{bmatrix} e_v(t) \\ e_\omega(t) \end{bmatrix} = \mathcal{G}_c(t) - \mathcal{G}(t) = \begin{bmatrix} v_c - v \\ \omega_c - \omega \end{bmatrix},$$

với $\mathcal{G}_c(t)$ là vector vận tốc mong muốn được tạo ra bởi bộ điều khiển động học, $\mathcal{G}(t)$ là vector vận tốc thực tế của các bánh xe chủ động được tạo ra bởi bộ điều khiển moment τ phần động lực học, thể hiện như trên hình 2.

Bài toán: Thiết kế bộ điều khiển để θ bám theo θ_c hay $\lim_{t \rightarrow \infty} (e_c(t)) = 0$.

Trong nghiên cứu này ta sử dụng bộ điều khiển trượt và mặt trượt là dạng PI như sau:

$$S(t) = \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \end{bmatrix} = e_c(t) + \beta \int_0^t e_c(t) dt \quad (10)$$

với $\beta > 0$.

Đạo hàm hai vế của (10) ta nhận được:

$$\dot{S}(t) = \dot{e}_c(t) + \beta e_c(t) \quad (11)$$

Theo phương trình (7) của mô hình động lực học xe AGV thì tín hiệu điều khiển là moment τ , do đó bộ điều khiển trượt được thiết kế ở đây phải đảm bảo đưa ra được tín hiệu điều khiển τ sao cho đưa được quỹ đạo trạng thái hệ (7) tiến về mặt trượt $S(t) = 0$ và giữ hệ ở lại trên mặt trượt $S(t) = 0$.

Tín hiệu điều khiển τ xác định như sau:

$$\tau = \tau_{eq} + \tau_N$$

trong đó, τ_{eq} là thành phần giữ quỹ đạo trạng thái của hệ (7) ở lại trên mặt trượt và τ_N là thành phần đưa quỹ đạo trạng thái của hệ (7) tiến về mặt trượt.

Để xác định thành phần τ_{eq} , ta giả sử hệ nằm trên mặt trượt $S(t) = 0$, do đó $\dot{S}(t) = 0$. Giả định $\delta(t) = 0$, từ (7) và (11) ta sẽ có:

$$[\dot{e}_c(t) - E_n \tau(t)] + \beta e_c(t) = 0.$$

Vì vậy thành phần τ_{eq} được xác định như sau:

$$\tau_{eq}(t) = E_n^{-1} [\dot{e}_c(t) + \beta e_c(t)] \quad (12)$$

$$\text{với: } E^{-1} = -\frac{r}{2L} \begin{bmatrix} -Lm & -I \\ -Lm & I \end{bmatrix}.$$

Còn đối với thành phần τ_N là thành phần chứa luật tiếp cận mặt trượt. Trong nghiên cứu [9] đã đề xuất một luật tiếp cận mặt trượt theo hàm số mũ, có dạng như sau:

$$\tau_N(t) = E_n^{-1} [\epsilon \text{sign}(S) + kS], \quad (13)$$

$$\text{với } \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 & 0 \\ 0 & \epsilon_2 \end{bmatrix}, \epsilon_1, \epsilon_2 > 0, \quad k = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}, k_1, k_2 > 0.$$

Ngoài ra để hệ ổn định thì $\epsilon_i \geq |\delta_i(t)|$, $i = 1, 2$.

Với luật tiếp cận này quỹ đạo trạng thái của hệ sẽ tiến về mặt trượt nhanh hơn và giảm được hiện tượng dao động so với luật tiếp cận căn bản. Tuy nhiên khi biên độ dao động của hàm chứa nhiễu và các thành phần không chắc chắn $\delta(t)$ biến đổi lớn, việc lựa chọn hệ số điều khiển

$\epsilon = \text{const}$ thủ công sẽ khó đáp ứng được và dễ gây ra hiện tượng dao động xung quanh vị trí cân bằng của hệ thống. Vì theo thực tế thì hàm $\delta(t)$ là không biết trước và khó có thể xác định được. Ngoài ra theo nghiên cứu [14, 15], đối với luật tiếp cận mặt trượt theo hàm số mũ nếu ta chọn giá trị ϵ lớn quá thì dễ gây ra hiện tượng chattering, còn nhỏ quá thì tốc độ hội tụ sẽ chậm. Do đó trong bài báo này, đề xuất một thuật toán thích nghi, giúp ước lượng được trực tiếp hệ số điều khiển $\epsilon(t)$ thỏa mãn điều kiện lớn hơn hoặc bằng cận biên của hàm $\delta(t)$, qua đó sẽ đưa quỹ đạo trạng thái hội tụ về miền ổn định.

Giả sử như hàm $\delta(t)$ bị chặn, tức tồn tại cận biên δ^* , hay $|\delta(t)| \leq \delta^*$. Tương tự như vậy, đối với hệ số ϵ , giả sử như cũng thay đổi theo thời gian t và tồn tại cận biên ϵ^* , hay $|\epsilon(t)| \leq \epsilon^*$. Khi đó ta đề xuất thuật toán thích nghi để ước lượng hệ số $\epsilon(t)$ như sau:

$$\dot{\hat{\epsilon}} = \begin{bmatrix} \dot{\hat{\epsilon}}_1 & 0 \\ 0 & \dot{\hat{\epsilon}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_1 S_1 \text{sign}(S_1) & 0 \\ 0 & \gamma_2 S_2 \text{sign}(S_2) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Từ (12), (13) và (14) tín hiệu điều khiển sẽ là:

$$\tau = E_n^{-1} [\dot{e}_c(t) + \beta e_c(t) + \hat{\epsilon} \text{sign}(S) + kS] \quad (15)$$

Chứng minh sự ổn định:

Biểu diễn sai số ước lượng của $\epsilon(t)$ như sau:

$$\tilde{\epsilon}(t) = \hat{\epsilon}(t) - \epsilon^*$$

Hàm Lyapunov được chọn:

$$V(t) = \frac{1}{2} S^T(t) S(t) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\gamma_1} \right) \tilde{\epsilon}_1^2(t) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\gamma_2} \right) \tilde{\epsilon}_2^2(t) \quad (16)$$

Để thấy hàm $V(t)$ là nửa xác định dương. Thực hiện đạo hàm (16), ta sẽ có:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= S^T(t) \dot{S}(t) + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{\epsilon}_1(t) \dot{\tilde{\epsilon}}_1(t) + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{\epsilon}_2(t) \dot{\tilde{\epsilon}}_2(t) \\ &= S^T(t) [\dot{e}_c(t) - \dot{e}_c(t) + \beta e_c(t)] + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{\epsilon}_1(t) \dot{\tilde{\epsilon}}_1(t) + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{\epsilon}_2(t) \dot{\tilde{\epsilon}}_2(t) \\ \text{Mặt khác: } \dot{\tilde{\epsilon}}_i(t) &= \dot{\hat{\epsilon}}_i(t), \quad i = 1, 2. \text{ Kết hợp với (7), ta có:} \\ \dot{V}(t) &= S^T(t) [\dot{e}_c(t) - E_n \tau(t) - \delta(t) + \beta e_c(t)] \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{\epsilon}_1(t) \dot{\hat{\epsilon}}_1(t) + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{\epsilon}_2(t) \dot{\hat{\epsilon}}_2(t) \end{aligned} \quad (17)$$

Thay τ từ công thức (15) vào (17), ta nhận được:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= S^T(t) [-\hat{\epsilon}(t) \text{sign}(S) - kS - \delta(t)] \\ &\quad + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{\epsilon}_1(t) \dot{\hat{\epsilon}}_1(t) + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{\epsilon}_2(t) \dot{\hat{\epsilon}}_2(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= S^T(t) \left[-(\varepsilon^* + \tilde{\varepsilon}(t)) \text{sign}(S) - kS - \delta(t) \right] \\
&\quad + \frac{1}{\gamma_1} \tilde{\varepsilon}_1(t) \dot{\tilde{\varepsilon}}_1(t) + \frac{1}{\gamma_2} \tilde{\varepsilon}_2(t) \dot{\tilde{\varepsilon}}_2(t) \\
&= S^T(t) \left[-\varepsilon^* \text{sign}(S) - kS - \delta(t) \right] \\
&\quad + \sum_{i=1}^2 \tilde{\varepsilon}_i(t) \left[\frac{1}{\gamma_i} \dot{\tilde{\varepsilon}}_i(t) - S_i \text{sign}(S_i) \right].
\end{aligned}$$

Kết hợp với (14), dễ dàng nhận được:

$$\dot{V}(t) = S^T(t) \left[-\varepsilon^* \text{sign}(S) - kS - \delta(t) \right]. \quad (18)$$

Khai triển (18) ta sẽ có:

$$\begin{aligned}
\dot{V}(t) &= S^T(t) \left[-\varepsilon^* \text{sign}(S(t)) - \delta(t) \right] - S^T(t) kS(t) \\
&= \left[\varepsilon_1^* S_1 \text{sign}(S_1) + \varepsilon_2^* S_2 \text{sign}(S_2) + \delta_1(t) S_1 + \delta_2(t) S_2 \right] \\
&\quad - \left[k_1 S_1 \text{sign}(S_1) + k_2 S_2 \text{sign}(S_2) \right] \\
&\leq |\delta_1(t)| S_1 \text{sign}(S_1) + |\delta_2(t)| S_2 \text{sign}(S_2) - \varepsilon_1^* S_1 \text{sign}(S_1) \\
&\quad - \varepsilon_2^* S_2 \text{sign}(S_2) - \left[k_1 S_1 \text{sign}(S_1) + k_2 S_2 \text{sign}(S_2) \right] \\
&= -\sum_{i=1}^2 \left(S_i \text{sign}(S_i) (\varepsilon_i^* - |\delta_i(t)|) + k_i S_i \text{sign}(S_i) \right) \quad (19)
\end{aligned}$$

Từ (14) ta có ước lượng của cận biên ε^* :

$$\hat{\varepsilon}_i(t) = \gamma_i \int_0^t S_i \text{sign}(S_i) dt + \hat{\varepsilon}_i(0). \quad (20)$$

Theo công thức (20) thì giá trị ước lượng của $\hat{\varepsilon}_i(t)$ sẽ tăng theo thời gian t và có giá trị khởi đầu là $\hat{\varepsilon}_i(0)$. Vì vậy nếu ta chọn hệ số γ_i và $\hat{\varepsilon}_i(0)$ phù hợp thì $\hat{\varepsilon}_i(t)$ sẽ tiến về một giá trị của ε_i^* (đây là giá trị phụ thuộc vào cận biên của $\varepsilon_i(t)$), qua đó $\varepsilon_i^* \geq |\delta_i(t)|$ và $\dot{V}(t) \leq 0$, hay hệ ổn định, tức là $e_c(\infty) \rightarrow 0$.

Nhận xét: Bằng cách kết hợp sử dụng bộ điều khiển (9) cho phần động học với bộ điều khiển trượt thích nghi (15) cho phần động lực học sẽ đưa xe AGV bám tốt theo quỹ đạo mẫu (8).

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

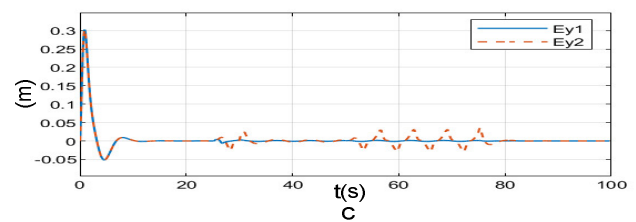
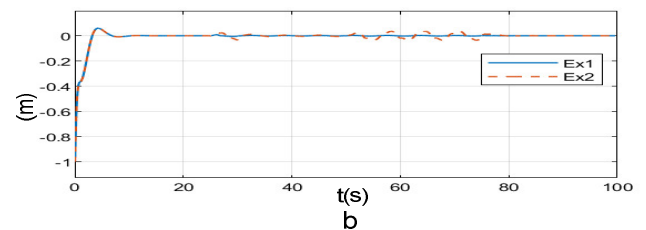
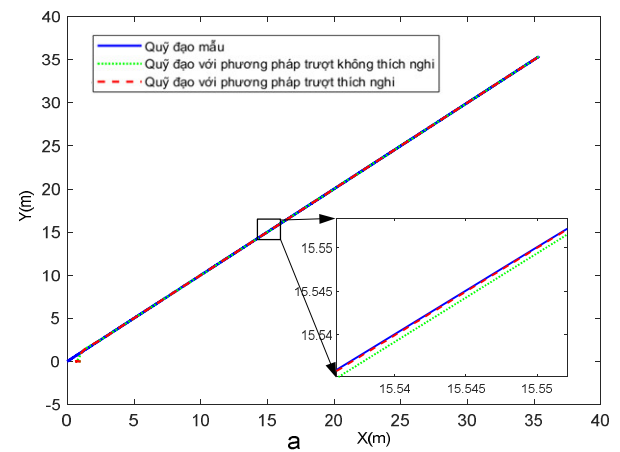
Để đánh giá chất lượng của bộ điều khiển ta sử dụng phần mềm Matlab/Simulink cho việc mô phỏng. Các thông số của xe AGV được chọn như sau: $m = 150\text{kg}$; $I = 25\text{kgm}^2$; $L = 0,26\text{m}$; $r = 0,08\text{m}$.

Trong mô phỏng này ta giả thiết rằng quỹ đạo tham chiếu của xe AGV là một đường thẳng và vị trí ban đầu của quỹ đạo tham chiếu là $q_r(0) = [0 \ 0 \ 45^\circ]^T$. Ngoài

ra, vận tốc của quỹ đạo tham chiếu là $v_r = \begin{bmatrix} 0,5 \text{ m/s} \\ 0 \text{ rad} \end{bmatrix}$. Giả

sử như ban đầu xe AGV có vị trí thực tế là $q(0) = [1 \ 0 \ 0^\circ]^T$, xe di chuyển đến 20s thì khối lượng của xe thay đổi từ 150kg lên 300kg và moment quán tính tăng từ 25kgm² lên 50kgm², khi đến 30s thì khối lượng xe giảm về 150kg và moment quán tính giảm về 25kgm². Lúc đầu xe không chịu ảnh hưởng của nhiễu, đến 25s thì xe bị tác động bởi nhiễu bị chặn có dạng: $\delta(t) = \begin{bmatrix} 10 \sin(t) \\ -10 \sin(t) \end{bmatrix}$, đến 50s xe bị

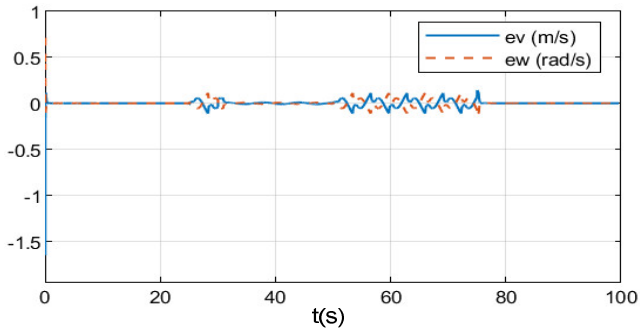
tác động bởi nhiễu có dạng: $\delta(t) = \begin{bmatrix} 20 \sin(t) \\ -20 \sin(t) \end{bmatrix}$ và đến 75s thì xe không bị tác động bởi nhiễu nữa.



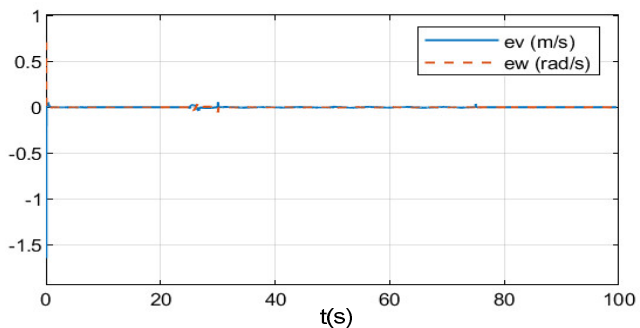
Hình 3. Quỹ đạo di chuyển của AGV (a); sai số quỹ đạo theo trục X (b) và Y (c) khi sử dụng phương pháp trượt không thích nghi Ex2, Ey2 và thích nghi Ex1, Ey1

Đối với bộ điều khiển động học vòng ngoài ta chọn các tham số như sau: $\lambda_1 = 2$, $\lambda_2 = 4$, $\lambda_3 = 2$. Đối với bộ điều khiển động lực học vòng trong: phương pháp điều khiển trượt theo luật tiếp cận là hàm số mũ không thích nghi: $\beta = 100$, $\varepsilon_1 = 10$, $\varepsilon_2 = 10$, $k_1 = 1$, $k_2 = 1$; phương pháp điều khiển trượt theo luật tiếp cận là hàm số mũ thích nghi:

$\beta = 100, \gamma_1 = 10, \gamma_2 = 10, \hat{\varepsilon}_1(0) = 0, \hat{\varepsilon}_2(0) = 0, k_1 = 1, k_2 = 1$. Ngoài ra để giảm hiện tượng chattering và tối ưu việc xử lý thuật toán mô phỏng trong matlab khi sử dụng hàm $\text{sign}(S)$, ta sẽ thay bằng hàm $\text{sat}(S, \rho)$.



a)

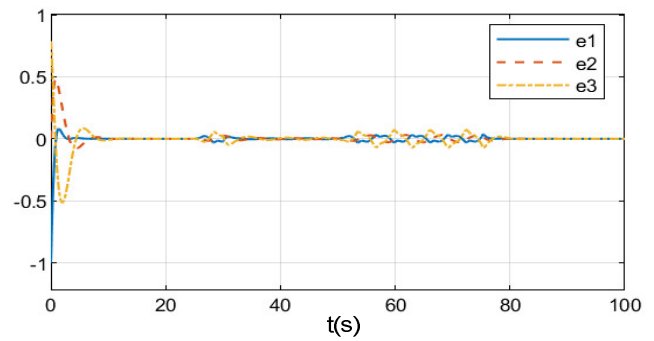


b)

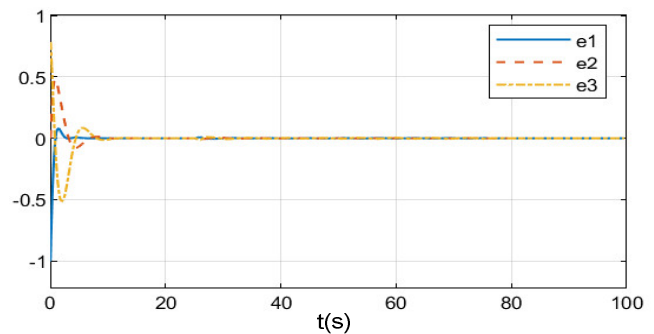
Hình 4. Sai số vận tốc khi sử dụng phương pháp trượt không thích nghi (a) và thích nghi (b)

Kết quả mô phỏng thể hiện ở hình 3 ÷ 5. Theo hình 3a dễ dàng nhận thấy cả hai phương pháp xe AGV đều bám tốt theo quỹ đạo tham chiếu mặc dù có sự thay đổi khối lượng xe, moment quán tính, cũng như nhiều tác động. Tuy vậy, khi ta phóng to hình ảnh ra và quan sát thêm ở hình 3b, 3c sẽ thấy rằng phương pháp trượt thích nghi sẽ cho kết quả tốt hơn so với phương pháp trượt không thích nghi, đặc biệt từ thời điểm ta tác động nhiễu vào hệ thống. Điều này được thể hiện rõ hơn ở các hình 4, 5. Trên các hình 4, 5, ở thời điểm 0 - 25s khi chưa có nhiễu tác động vào hệ thống, cả hai phương pháp đều cho kết quả tốt, nhưng từ thời điểm 25s trở đi ta tác động nhiễu vào hệ thống và dễ thấy rằng với luật tiếp cận mặt trượt theo hàm số mũ có thích nghi chất lượng hệ thống sẽ tốt hơn, khi sai số vận tốc sẽ nhanh chóng hội tụ về 0, còn phương pháp trượt không thích nghi thì sai số luôn bị dao động quanh điểm 0, đặc biệt nếu ta tác động một nhiễu có biên độ lớn hơn ở thời điểm 50 - 75s thì sai số vận tốc dao động càng lớn do hệ số điều khiển ε không thay đổi theo và do đó không đáp ứng được. Giá trị ε theo thời gian và tín hiệu điều khiển τ cho 2 bánh xe phải, trái theo phương

pháp trượt thích nghi như hình 6.

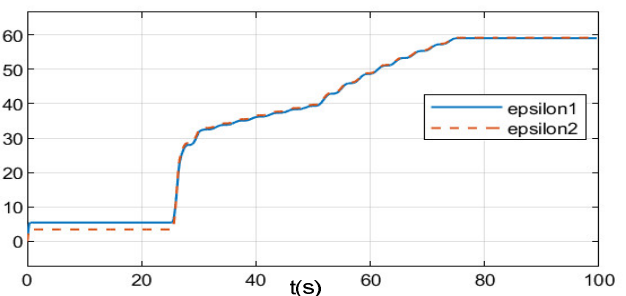


a)

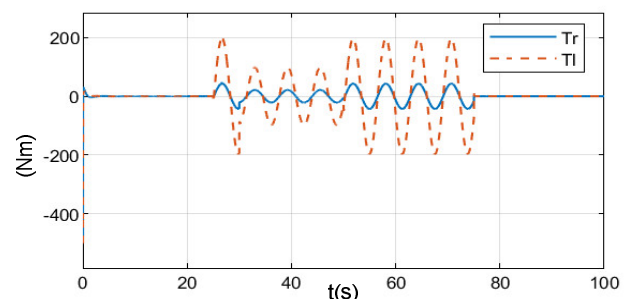


b)

Hình 5. Sai số quỹ đạo q_e khi sử dụng phương pháp trượt không thích nghi (a) và thích nghi (b)



a)



b)

Hình 6. Giá trị của hệ số điều khiển $\varepsilon(t)$ theo thời gian (a) và tín hiệu điều khiển τ (b) của phương pháp trượt thích nghi

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày một phương pháp thiết kế bộ điều khiển trượt thích nghi với luật tiếp cận theo hàm số mũ cho xe tự hành AGV dạng 2 bánh lái chủ động vi sai. Phương pháp đề xuất có hiệu quả hơn khi so sánh với phương pháp cũ là điều khiển trượt với luật tiếp cận theo hàm số mũ không thích nghi. Mô phỏng cho thấy phương pháp đề xuất luôn đảm bảo cho các sai số hội tụ về 0, mặc dù có nhiễu tác động vào hệ thống thay đổi với biên độ lớn. Kết quả đó chứng minh rằng phương pháp đề xuất có thể áp dụng vào thực tế để tăng độ chính xác di chuyển cho xe AGV ở những môi trường khắc nghiệt như: mặt sàn gỗ ghe, xe bị nhiễu nhiễu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Gregor Klancar, Drago Matko, Saso Blazic, "Mobile Robot Control on a Reference Path," in *Proceedings of the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 1343-1348, June 27-29, 2005. doi: 10.1109/.2005.1467211.
- [2]. Lê Bá Yến, Chu Văn Hoạt, Lê Văn Tuấn, Vũ Xuân Vương, "Phương pháp điều hướng xe tự hành AGV dùng cảm biến quán tính và đường dẫn ảo, phục vụ vận chuyển hàng trong các môi trường đặc thù," *Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự, Số Đặc san Hội thảo quốc gia FEE*, 57-65, 2020.
- [3]. T. A. Sơn, N. H. Q. Thịnh, "Research and manufacture of automated guided vehicle for the service of storehouse," *Tạp chí phát triển khoa học và công nghệ - Chuyên san kỹ thuật & công nghệ*, 1, 1, 5-12, 2018.
- [4]. R. Fierro, F.L. Lewis, "Control of a nonholonomic mobile robot: backstepping kinematics into dynamics," *Journal of Robotic Systems*, 14, 3, 149-163, 1997. doi: 10.1002/(SICI)1097-4563(199703)14:3<149::AID-ROB1>3.0.CO;2-R.
- [5]. R. Fierro, F. L. Lewis, "Control of a Nonholonomic Mobile Robot Using Neural Networks," *IEEE Transactions on neural networks*, 9, 4, 589-600, 1998. doi: 10.1109/72.701173.
- [6]. Felipe N. Martin, et al., "An adaptive dynamic controller for autonomous mobile robot trajectory tracking," *Control Engineering Practice*, 16, 11, 1354-1363, 2008. doi: 10.1016/j.conengprac.2008.03.004.
- [7]. T. Fukao, H. Nakagawa, N. Adachi, "Adaptive tracking control of a nonholonomic mobile robot," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16, 5, 609-615, 2000. doi: 10.1109/70.880812.
- [8]. T. Das, I. N. Kar, "Design and Implementation of an Adaptive Fuzzy Logic-Based Controller for Wheeled Mobile Robots," *IEEE Trans. on CST*, 14, 3, 501-510, 2006. doi: 10.1109/TCST.2006.872536.

[9]. Bouzgou Kamel, Ibari Benaoumeur, Benchikh Laredj, Ahmed-foitih Zoubir, "Integral Backstepping Approach for Mobile Robot Control," *Telkomnika*, 15, 3, 1173-1180, 2017. doi: 10.12928/telkomnika.v15i3.5667.

[10]. Ghania Zidani, et al., "Robust Nonlinear Control of a Mobile Robot," *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 11, 4, 1012-1019, 2016. doi: 10.5370/JEET.2016.11.4.1012.

[11]. Yandong Li, Zongyi Wang, Ling Zhu, "Adaptive Neural Network PID Sliding Mode Dynamic Control of Nonholonomic Mobile Robot," in *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation*, 753-757, June 2010. doi: 10.1109/ICINFA.2010.5512467.

[12]. Nguyễn Đình Long, "Tổng hợp bộ điều khiển trượt bám quỹ đạo cho xe tự hành AGV," *Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự, Số Đặc san "Kỹ thuật điều khiển và Tự động hoá"*, 112-118, 2024. doi: 10.54939/1859-1043.j.mst.CAPITI.2024.112-118.

[13]. Nguyễn Doãn Phước, "Điều khiển trượt cơ bản và trượt bậc cao," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Thái Nguyên*, 118, 4, 3-13, 2014.

[14]. Paweł Latosiński, "Sliding mode control based on the reaching law approach - a brief survey," in *22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, 519-524, 2017. doi: 10.1109/MMAR.2017.8046882.

[15]. Shuai Li, Hai Wang, Henian Li, Chunlai Yang, "PMSM sliding mode control based on novel reaching law and extended state observer," *Advances in Mechanical Engineering*, 14, 8, 1-16, 2022. doi: 10.1177/16878132221119960.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Dinh Long¹, Le Van Tuan¹, Vo Quoc Dat²

¹Control, Automation in Production and Improvement of Technology Institute (CAPITI), Academy of Military Science and Technology, Vietnam

²Le Quy Don Technical University, Vietnam