THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN MỜ TRƯỢT TẦNG BACKSTEPPING CHO XE TỰ HÀNH BA BÁNH THIẾU CƠ CẤU CHẤP HÀNH

DESIGN CONTROLLER FOR UNDERACTUATED WHEEL MOBILE ROBOTS BASED ON FUZZY HIERARCHICAL SLIDING MODE AND BACKSTEPPING TECHNIQUES

Phạm Thị Hương Sen

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 14/12/2022, Ngày chấp nhận đăng: 26/5/2023, Phản biện: PGS. TS. Phạm Tuấn Thành

Tóm tắt:

Bài báo trình bày một phương pháp điều khiển bám quĩ đạo cho xe tự hành dựa trên kỹ thuật backstepping, kỹ thuật trượt tầng kết hợp chỉnh định mờ. Thuật toán điều khiển đảm bảo hệ kín ổn định Lyapunov, chất lượng điều khiển bám vẫn chính xác trong điều kiện xem xét đến các yếu tố nhiễu ngoài tác động và thành phần bất định của mô hình. Các kết quả mô phỏng trên Mallab simulink cho thấy tính đúng đắn và khả năng ứng dụng trong thực tế của giải thuật được đề xuất.

Từ khóa:

Xe tự hành, điều khiển trượt tầng, backstepping, điều khiển mờ.

Abstract:

This paper proposes a trajectory tracking control algorithm for a wheel mobile robot, which incorporates backstepping control routines and fuzzy hierarchical sliding mode. The proposed controller guarantees the closed-loop stability and the position tracking errors converge to zero, under the conditions that the system uncertainties, input disturbances. Numerical simulation results show the effective-ness and the capability for practical applications of the proposed control method.

Keywords:

Wheel mobile robot (WMR), hierarchical sliding mode control (HSMC), backstepping technique, fuzzy controll.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Ngày nay, các hệ robot di động xuất hiện ngày càng phổ biến trong các lĩnh vực như ngành công nghiệp vận chuyển, dịch vụ, y tế, quân sự... Phân loại robot di động theo phương thức di chuyển có: robot di chuyển bằng chân, di chuyển bằng bánh, di chuyển bằng băng xích. Trong đó robot di động di chuyển bằng bánh (Wheel Mobile Robots- WMR) là đơn giản hơn trong việc thiết kế thi công và điều khiển, phù hợp với các ứng dụng di chuyển trên địa hình bằng phẳng. WMR có đặc điểm thiếu cơ cấu chấp hành, góc hướng của xe không có cơ cấu chấp hành để can thiệp trực tiếp, là đối tượng phi tuyến có điều kiện ràng buộc nonholonomic [1], [2]. Do đó việc điều khiển WMR là một bài toán

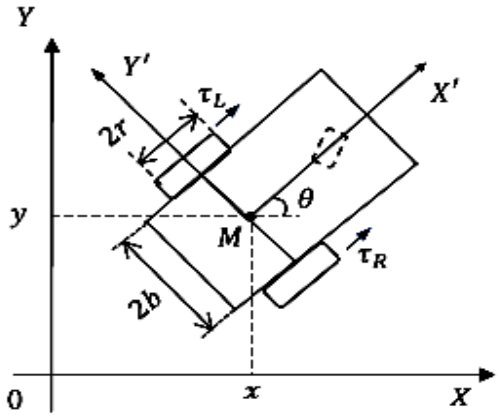
khó, thu hút được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học trong nước và trên thế giới.

Đối với các hệ thiếu cơ cấu chấp hành nói chung và WMR nói riêng, các phương pháp điều khiển hiện đại đã được nghiên cứu ứng dụng như là điều khiển trên nền thích nghi [3]-[7], điều khiển trượt, trượt tầng [8]-[10], kết hợp với điều khiển mờ [11]. Trong [5]-[9], các tác giả thiết kế cấu trúc điều khiển cho xe tự hành sử dụng hai mạch vòng, một mạch vòng điều khiển động học và một mạch vòng điều khiển động lực học.

Trong bài báo này, tác giả đề xuất cấu trúc một mạch vòng, sử dụng bộ điều khiển trượt tầng để điều khiển xe bám vị trí. Đây là phương pháp thiết kế phù hợp cho các hệ thiếu cơ cấu chấp hành, dựa trên nguyên lý điều khiển trượt xếp chồng lần lượt các mặt trượt để xác định được tín hiệu điều khiển ở bước cuối cùng đảm bảo ổn định theo hàm Lyapunov. Đề xuất thêm kỹ thuật Backstepping thiết kế điều khiển bám góc hướng cho xe. Thuật toán mô phỏng thử nghiệm có xem xét đến điều kiện làm việc chịu ảnh hưởng bởi các yếu tố ngoại cảnh như tham số bất định, ngoại lực từ môi trường tác động lên hệ.

2. MÔ HÌNH XE TỰ HÀNH

Xe tự hành có hai bánh chủ động phía sau và một bánh lái bị động phía trước như Hình 1. Tọa độ OXY là hệ tọa độ cố định và MX'Y' là hệ tọa độ cục bộ gắn trên xe, khi đó (*x*,*y*) là tọa độ của trọng tâm xe trong hệ tọa độ cố định. Góc θ là góc quay của trục X' so với trục X, là góc hướng của xe. Như vậy, vị trí của xe được xác định bởi vector tọa độ $\underline{q} = \begin{bmatrix} x & y & \theta \end{bmatrix}^T$.



Hình 1. Mô hình xe tự hành ba bánh

Trong hình 1 ta gọi *r* là bán kính của bánh xe và *b* là một nửa của khoảng cách giữa 2 bánh đằng sau của xe. Khi xe di chuyển sẽ thực hiện chuyển động tịnh tiến và chuyển động quay, phụ thuộc vào tốc độ góc của hai động cơ nối hai bánh sau. Gọi v là vận tốc tịnh tiến và ω là vận tốc quay tại điểm M, thì:

$$v = \frac{r\left(\dot{\phi}_R + \dot{\phi}_L\right)}{2};\ \omega = \frac{r\left(\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L\right)}{2b} \quad (1)$$

Các biến $\dot{\phi}_R$, $\dot{\phi}_L$ là vận tốc góc của động cơ bánh xe phải và trái. Khi đó, chuyển động của xe được mô tả bằng phương trình động học:

$$\begin{cases} \dot{x} = v\cos\theta \\ \dot{y} = v\sin\theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (2)$$

Giả thiết giá trị tốc độ bị chặn: $|v| \le v_{\max}$, $|\omega| \le \omega_{\max}$; với $v_{\max}$, $\omega_{\max}$ là giá trị tốc độ lớn nhất. Khi xe chuyển động lăn không

trượt thì điều kiện ràng buộc nonholonomic:

$$\dot{x}sin\theta - \dot{y}cos\theta = 0 \quad (3)$$

Xe tự hành di chuyển trên mặt sàn ngang, trọng tâm xe trùng với trọng tâm hình học, mô hình động học được xác định dựa trên công thức Lagrange [1]:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \underline{\dot{q}}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \underline{q}} = F - \sum_{j=1}^{m} \lambda_j a_j \quad (4)$$

Trong đó $L = W_K - W_P$ là hàm Lagrangian, bằng hiệu giữa động năng và thế năng của hệ thống.

λ là vectơ lực ràng buộc Lagrange; F là lực tác động vào hệ thống.

Hàm Lagrange:

$$L = W_K - W_P = \frac{m}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{J}{2}\dot{\theta}^2 \quad (5)$$

Tính các đạo hàm và thay vào phương trình (4) ta có phương trình động lực học của xe [1]:

$$\begin{cases} m\ddot{x} - \lambda \sin\theta - \frac{1}{r}\left(\tau_R + \tau_L\right)\cos\theta = 0 \\ m\ddot{y} + \lambda \cos\theta - \frac{1}{r}\left(\tau_R + \tau_L\right)\sin\theta = 0 \\ J\ddot{\theta} - \frac{b}{r}\left(\tau_R - \tau_L\right) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó:

τ_R, τ_L: momen của động cơ bánh phải, bánh trái. Hệ số lực ràng buộc Lagrange $\lambda = -m\dot{\theta}(\dot{x}\cos\theta + \dot{y}\sin\theta)$. Các thông số *m, J* lần lượt là khối lượng và momen quán tính tương ứng của xe.

Bằng cách đặt: $b_1 = 1/(rm),\ b_2 = b/(rJ)$

$u_1 = \tau_R + \tau_L,\ u_2 = \tau_R - \tau_L$

Mô hình động học (6) được viết lại:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{\lambda}{m}\sin\theta + b_1 u_1 \cos\theta \\ \ddot{y} = -\frac{\lambda}{m}\cos\theta + b_1 u_1 \sin\theta \\ \ddot{\theta} = b_2 u_2 \end{cases} \quad (7)$$

Gọi $\underline{q_r}$ là quỹ đạo mong muốn, định nghĩa một vector sai số quỹ đạo $\underline{e}$:

$$\underline{e} = \underline{q} - \underline{q_r} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - x_r \\ y - y_r \\ \theta - \theta_r \end{bmatrix} \quad (8)$$

Mục tiêu thiết kế bộ điều khiển bám quỹ đạo là vector sai số quỹ đạo $\underline{e}$ tiến nhanh về không.

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Mô hình WMR (7) sẽ chia thành hai hệ con. Một hệ con chỉ phụ thuộc vào tín hiệu điều khiển u_1 và một hệ con phụ thuộc vào tín hiệu điều khiển u_2. Bộ điều khiển bám quĩ đạo cho WMR tương ứng gồm hai thành phần: bộ điều khiển mờ trượt tầng cho tín hiệu điều khiển u_1 và bộ điều khiển backstepping để tổng hợp tín hiệu điều khiển u_2.

3.1. Tổng hợp bộ điều khiển mờ trượt tầng

Điều khiển trượt tầng (HSMC) ứng dụng cho đối tượng có thể phân chia thành các hệ con, sau đó định nghĩa mặt trượt cho từng hệ con. Từ các mặt trượt con sẽ tổng hợp lên mặt trượt chung cho cả hệ, và từ đó tìm ra luật điều khiển. Lược đồ kỹ thuật trượt tầng được mô tả như trong hình 2. Các bước tổng hợp bộ điều khiển trượt tầng cho xe theo hướng chuyển động

X và Y tiến hành như phần trình bày dưới đây.

Từ phương trình (7), ta xét riêng mô hình của hệ theo tín hiệu u_1:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \dfrac{\lambda}{m}\sin\theta + b_1 u_1 \cos\theta \\ \ddot{y} = -\dfrac{\lambda}{m}\cos\theta + b_1 u_1 \sin\theta \end{cases} \quad (9)$$

Đặt biến trạng thái: $\underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \end{bmatrix}^T$ với $x_1 = x, x_2 = \dot{x}, x_3 = y, x_4 = \dot{y}$

Hệ (9) biến đổi sang mô hình trạng thái:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1(\underline{x}) + g_1(\underline{x})u_1 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_2(\underline{x}) + g_2(\underline{x})u_1 \end{cases} \quad (10)$$

Trong đó:

$$f_1(\underline{x}) = \frac{\lambda}{m}\sin\theta,\ f_2(\underline{x}) = -\frac{\lambda}{m}\cos\theta$$
$$g_1(\underline{x}) = b_1\cos\theta, g_2(\underline{x}) = b_1\sin\theta$$

Bằng cách đặt $e_1 = e_x$ và $e_3 = e_y$, $e_2 = \dot{e}_1, e_4 = \dot{e}_3$ chuyển phương trình (10) về phương trình trạng thái theo sai lệch:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = f_1(\underline{x}) + g_1(\underline{x})u_1 - \ddot{x}_r \\ \dot{e}_3 = e_4 \\ \dot{e}_4 = f_2(\underline{x}) + g_2(\underline{x})u_1 - \ddot{y}_r \end{cases} \quad (11)$$

Bước 1: Xét hệ con thứ nhất:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = f_1(\underline{x}) + g_1(\underline{x})u_1 - \ddot{x}_r \end{cases} \quad (12)$$

Định nghĩa mặt trượt:

$$S_1 = c_1 e_1 + e_2 \quad (13)$$

Chọn hàm Lyapunov thành viên:

$$V_{11} = \frac{1}{2}S_1^2 \quad (14)$$

Đạo hàm V_{11} theo thời gian:

$$\dot{V}_{11} = S_1\dot{S}_1 \quad (15)$$

Để V_{11} thoả mãn là hàm Lyapunov thì đơn giản có thể chọn $\dot{S}_1$ bằng $-k_1S_1 - \eta_1\operatorname{sgn}S_1$, các hằng số $c_1, k_1, \eta_1 > 0$. Khi đó:

$$\dot{V}_{11} = -k_1S_1^2 - \eta_1 S_1\operatorname{sgn}S_1 \quad (16)$$

Đạo hàm 2 vế công thức (13):

$$\dot{S}_1 = c_1\dot{e}_1 + \dot{e}_2 = c_1e_2 + f_1 + g_1u_1 - \ddot{x}_r$$
$$= -k_1S_1 - \eta_1\operatorname{sgn}S_1 \quad (17)$$

Tín hiệu điều khiển là:

$$u_1 = \frac{-c_1\dot{e}_1 - f_1}{g_1} - \frac{k_1S_1 + \eta_1\operatorname{sgn}S_1 - \ddot{x}_r}{g_1} \quad (18)$$

Bước 2: Xét hệ con thứ hai:

$$\begin{cases} \dot{e}_3 = e_4 \\ \dot{e}_4 = f_2(\underline{x}) + g_2(\underline{x})u_1 - \ddot{y}_r \end{cases} \quad (19)$$

Định nghĩa thêm mặt trượt bậc hai:

$$S_2 = \lambda_1S_1 + \beta_1 s_2, s_2 = c_2e_3 + e_4 \quad (20)$$

Chọn hàm Lyapunov cho hàm thành viên thứ 2:

$$V_{12} = \frac{1}{2}S_2^2 \quad (21)$$

Đạo hàm V_{12} theo thời gian:

$$\dot{V}_{12} = S_2\dot{S}_2 \quad (22)$$

Tương tự như ở bước 1, chọn tín hiệu điều khiển để

$$\dot{S}_2 = -k_2S_2 - \eta_2\operatorname{sgn}S_2 \quad (23)$$

$$\Rightarrow \dot{V}_{12} = -k_2S_2^2 - \eta_2 S_2\operatorname{sgn}S_2 \quad (24)$$

Trong đó các hằng số c_2, k_2, η_2 là xác định dương.

Đạo hàm 2 vế công thức (20):

$$\dot{S}_2 = \lambda_1\dot{S}_1 + \beta_1\dot{s}_2 \quad (25)$$

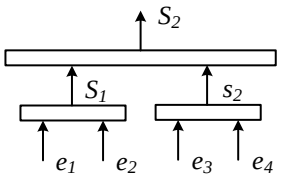
Thay công thức (17), (19) vào (25), biến đổi và rút ra được tín hiệu điều khiển u_1:

$$u_1 = \frac{-\lambda_1(f_1(\underline{x}) + c_1 e_2 - \ddot{x}_r) - \beta_1(f_2(\underline{x}) + c_2 e_4 - \ddot{y}_r) + \dot{S}_2}{\lambda_1 g_1(\underline{x}) + \beta_1 g_2(\underline{x})} \quad (26)$$

Để giảm hiện tượng chattering ở tần số cao, hàm dấu sgn trong biểu thức của $\dot{S}_2$ trong (23) sẽ được thay thế bằng hàm *sat*:

$$sat(S_2) = \begin{cases} \text{sgn}(S_2), |S_2| > 1 \\ S_2 \quad , |S_2| \le 1 \end{cases} \quad (27)$$

Như vậy, với tín hiệu điều khiển xác định trong (26) thì hệ có hàm Lyapunov V_{12} xác định dương, $\dot{V}_{12}$ xác định âm ở công thức (24), đảm bảo cho hệ (9) ổn định tiệm cận.

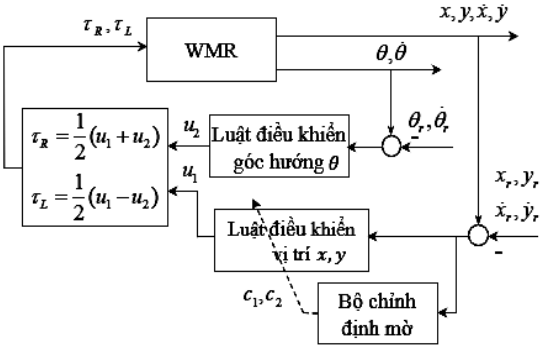


Hình 2. Minh họa lược đồ kỹ thuật trượt tầng

Tham số mặt trượt c_1, c_2 trong luật điều khiển (26) sẽ ảnh hưởng đến chất lượng bộ điều khiển trượt. Việc xác định được tham số bộ điều khiển phù hợp là quan trọng, thay vì dò tìm thì bài báo đề xuất sử dụng thêm một bộ điều khiển mờ theo mô hình Sugeno để chỉnh định tham số c_1, c_2. Biến ngôn ngữ đầu vào $e_x, \dot{e}_x$ và $e_y, \dot{e}_y$ được chọn gồm 3 tập mờ tam giác tên lần lượt –1, 0, 1. Biến đầu ra là hằng số được đặt tên –2, –1, 0, 1, 2. Xây dựng hệ luật suy diễn cho bộ chỉnh mờ như trong bảng 1. Sơ đồ cấu trúc hệ điều khiển thể hiện trong hình 3.

Bảng 1. Luật suy diễn bộ chỉnh định mờ

$c_1(c_2)$		$e_x(e_y)$		
		-1	0	1
$\dot{e}_x(\dot{e}_y)$	1	0	-1	-2
	0	1	0	-1
	-1	2	1	0



Hình 3. Cấu trúc điều khiển mờ trượt tầng backstepping

3.2. Tổng hợp bộ điều khiển góc hướng sử dụng kỹ thuật backstepping

Thiết kế bộ điều khiển backstepping cho góc hướng bám tín hiệu đặt dựa trên mô hình:

$$\ddot{\theta} = b_2 u_2 \quad (28)$$

Đặt biến trạng thái mới:

$$z_1 = e_\theta, \dot{z}_1 = \dot{\theta} - \dot{\theta}_r \quad (29)$$

$$z_2 = \dot{\theta} + \alpha_1 \quad (30)$$

Hàm Lyapunov cho (29):

$$V_{21} = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (31)$$

Chọn tín hiệu điều khiển ảo $\alpha_1 = l_1 z_1 - \dot{\theta}_r$ thì:

$$\dot{V}_{21} = -l_1 z_1^2 + z_1 z_2 \quad (32)$$

Đạo hàm hai vế phương trình (30) theo thời gian:

$$\dot{z}_2 = \ddot{\theta} + \dot{\alpha}_1 \quad (33)$$

Thay (28) vào (33):

$$\dot{z}_2 = b_2 u_2 + \dot{\alpha}_1 \quad (34)$$

Hàm Lyapunov cho hệ (34):

$$V_2 = V_{21} + \frac{1}{2} z_2{}^2 \quad (35)$$

Tính đạo hàm V_2 và kết hợp với (32), (34):

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_{21} + z_2 \dot{z}_2 = -l_1 z_1{}^2 + z_1 z_2 + z_2 \dot{z}_2$$

$$= -l_1 z_1{}^2 + z_2 (z_1 + b_2 u_2 + \dot{\alpha}_1)$$

Lựa chọn tín hiệu điều khiển:

$$u_2 = -\frac{1}{b_2}(z_1 + l_2 z_2 + \dot{\alpha}_1) \quad (36)$$

Trong đó $l_2 > 0$, khi đó:

$$\dot{V}_2 = -l_1 z_1{}^2 - l_2 z_2{}^2 < 0 \quad (37)$$

Với các hằng số $l_i > 0, i = \overline{1,2}$, đảm bảo cho hệ ổn định Lyapunov, góc θ luôn bám theo giá trị đặt θ_r.

3.3. Phân tích tính ổn định của hệ kín

Chọn hàm Lyapunov cho hệ kín:

$$V = \frac{1}{2} S_2{}^2 + \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2{}^2 = V_{12} + V_2 \quad (38)$$

Đạo hàm *V* theo thời gian:

$$\dot{V} = \dot{V}_{12} + \dot{V}_2 \quad (39)$$

Theo công thức (24) thì:

$$\dot{V}_{12} = S_2 \dot{S}_2 = -k_2 S_2^2 - \eta_2 S_2 sgn(S_2) < 0$$

Và theo công thức (37) đã có:

$$\dot{V}_2 = -a_1 z_1^2 - a_2 z_2^2 < 0$$

Do vậy:

$$\dot{V} = \dot{V}_{12} + \dot{V}_2 < 0 \quad (40)$$

Điều đó chứng tỏ hệ kín ổn định Lyapunov.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Tiến hành mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink để kiểm chứng hiệu quả của bộ điều khiển. Chọn các thông số của WMR như sau: $r = 0,025$ m; $b = 0,075$ m; $m = 1,08$ kg; $J = 0,818$ kg / m^2

Bảng 2. Chọn các tham số bộ điều khiển

λ_1	β_1	η_2	k_2	l_1	l_2
120	200	5	5	2	4

Xuất phát từ điểm ban đầu: $\underline{q}_0 = [0.4, 1.01, \pi/9]^T$, quỹ đạo đặt $\underline{q}_r = [\sin 0.125\pi t, \cos 0.125\pi t, \pi/2 - 0.125\pi t]^T$.

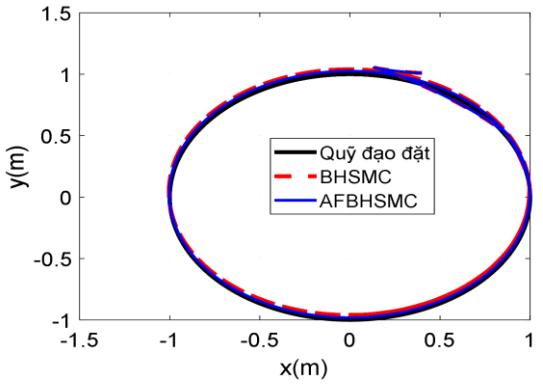
Trên hình 4 - 7 biểu diễn các kết quả mô phỏng thuật toán thiết kế với hai trường hợp:

Bộ điều khiển trượt tầng backstepping (BHSMC).

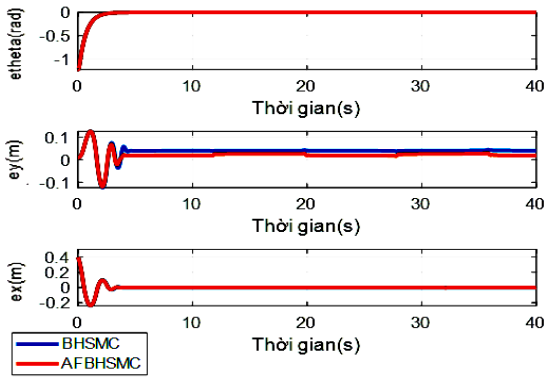
Bộ điều khiển mờ trượt tầng backstepping (AFBHSMC), sử dụng thêm một bộ điều khiển mờ để chỉnh định tham số c_1, c_2 trong các mặt trượt.

Trong hình 4 ta thấy với cả 2 bộ điều khiển BHSMC và AFBHSMC đáp ứng quỹ đạo của xe đều có chất lượng bám tốt. Tuy nhiên, khi sử dụng thêm bộ chỉnh định mờ (AFBHSMC) thì quỹ đạo bám

chính xác hơn. Hình 5 cho thấy sai số quỹ đạo tiến về không rất nhanh ở cả hai phương pháp, sai số tọa độ *x, y* về gần không trong khoảng thời gian 4s, sai số góc hướng về gần không chỉ mất 2 s. Thử nghiệm với các trường hợp khi thay đổi thông số của xe (tăng khối lượng, momen lên gấp 3 lần), hoặc tác động nhiễu xung thì chất lượng điều khiển gần như không bị ảnh hưởng.

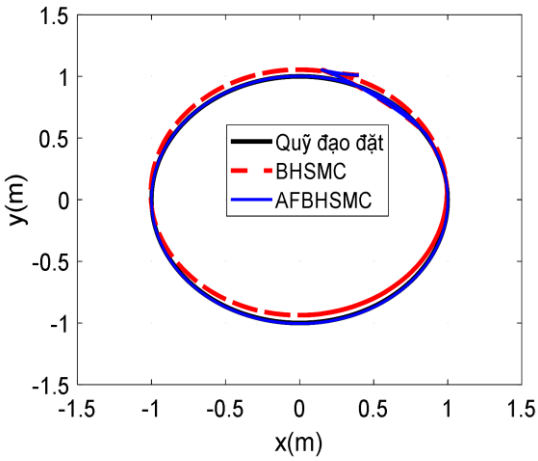


Hình 4. Đáp ứng xe bám quỹ đạo tròn

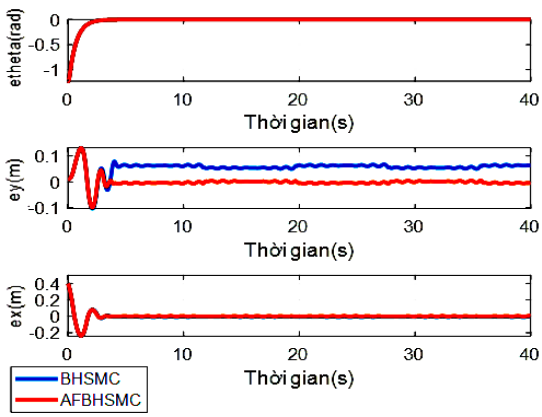


Hình 5. Đặc tính sai số vị trí

Khi tác động nhiễu sin biên độ 0.1, nhìn vào hình 6, 7 ta thấy bộ điều khiển AFBHSMC vẫn đáp ứng bám tốt, bộ điều khiển BHSMC có sai số theo trục y là 0.05m, sai số theo trục x và sai số góc hướng là gần bằng không.



Hình 6. Đáp ứng quỹ đạo khi có nhiễu



Hình 7. Đáp ứng sai số quỹ đạo khi có nhiễu

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất một cấu trúc điều khiển cho WMR, kết hợp kỹ thuật backstepping, kỹ thuật trượt tầng và chỉnh định mờ để tổng hợp bộ điều khiển bám quĩ đạo. Bộ điều khiển thiết kế đơn giản, chỉ cần một mạch vòng điều khiển nhưng vẫn đảm bảo tính ổn định, loại bỏ được ảnh hưởng của các thành phần bất định. Kết quả mô phỏng chất lượng điều khiển cho thấy thuật toán có khả năng ứng dụng thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Klancar, Gregor, et al, "Wheeled Mobile Robotic," *from fundamentals towards autonomous systems*. Butterworth-Heinemann, 2017.

[2] Rubio, F., Valero, F., & Llopis-Albert, C. "A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications". *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(2), 2019, 1729881419839596.

[3] Huang, An-Chyau, Yung-Feng Chen, and Chen-Yu Kai. *Adaptive control of underactuated mechanical systems*. World Scientific, 2015.

[4] Kulkarni, A., and A. Kumar. "Terminal adaptive control for a class of uncertain underactuated systems." Sādhanā 44.9, 2019, pp. 1-11.

[5] Yoo, S. J. "Adaptive tracking control for a class of wheeled mobile robots with unknown skidding and slipping." *IET control theory & applications* 4.10, 2010, pp. 2109-2119.

[6] Shu, Panfeng, Masahiro Oya, and Junjie Zhao. "A new adaptive tracking control scheme of wheeled mobile robot without longitudinal velocity measurement." *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 28.5, 2018, pp. 1789-1807.

[7] Koubaa, Yasmine, Mohamed Boukattaya, and Tarak Dammak. "Adaptive control of nonholonomic wheeled mobile robot with unknown parameters." *2015 7th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*. IEEE, 2015.

[8] Goswami, Niraj Kumar, and Prabin Kumar Padhy. "Sliding mode controller design for trajectory tracking of a non-holonomic mobile robot with disturbance." *Computers & Electrical Engineering* 72, 2018, pp. 307-323.

[9] Alipour, Khalil, Arsalan Babaei Robat, and Bahram Tarvirdizadeh. "Dynamics modeling and sliding mode control of tractor-trailer wheeled mobile robots subject to wheels slip." *Mechanism and Machine Theory* 138, 2019, pp. 16-37.

[10] Sankaranarayanan, Velupillai, and Arun D. Mahindrakar. "Control of a class of underactuated mechanical systems using sliding modes." *IEEE transactions on robotics* 25.2, 2009, pp. 459-467.

[11] Hwang, Chih-Lyang, Chiang-Cheng Chiang, and Yao-Wei Yeh. "Adaptive fuzzy hierarchical sliding-mode control for the trajectory tracking of uncertain underactuated nonlinear dynamic systems." *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 22.2, 2013, pp. 286-299.

Giới thiệu tác giả:

Tác giả Phạm Thị Hương Sen tốt nghiệp đại học ngành điều khiển tự động năm 2004; nhận bằng Thạc sĩ ngành điều khiển và tự động hoá năm 2008, nhận bằng Tiến sĩ ngành điều khiển và tự động hoá năm 2022 tại Đại học Bách khoa Hà Nội.

Lĩnh vực nghiên cứu: lý thuyết điều khiển, điều khiển quá trình công nghệ, điều khiển chuyển động.