

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TRƯỢT KHÔNG DAO ĐỘNG CHO XE TỰ HÀNH CHỊU TÁC ĐỘNG CỦA NHIỄU VÀ MA SÁT TRƯỢT BÁNH KHÔNG BIẾT TRƯỚC

CHATTERING FREE SLIDING MODE TRACKING CONTROLLER FOR WHEEL MOBILE ROBOT WITH UNKNOWN DISTURBANCES AND WHEEL SLIPS

Phạm Thị Hương Sen

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 03/4/2025, ngày chấp nhận đăng: 20/4/2025. Phản biện: PGS. TS. Phạm Tuấn Thành

Tóm tắt:

Bài báo trình bày một phương pháp thiết kế điều khiển trượt dựa trên mô hình trạng thái của xe tự hành. Các thành phần bất định, trượt bánh và nhiễu ngoài của hệ thống được loại bỏ thông qua bộ điều khiển kết hợp với bộ ước lượng nhiễu. Tiến hành biến đổi đưa mô hình động học của xe về dạng phương trình trạng thái để có thể áp dụng được thuật toán điều khiển trượt đơn giản và hiệu quả. Thiết kế bộ điều khiển đảm bảo ổn định Lyapunov và các kết quả mô phỏng cho thấy chất lượng điều khiển bám tốt, không còn hiện tượng chattering, loại bỏ được ảnh hưởng của các loại nhiễu.

Từ khóa: Xe tự hành, ma sát trượt bánh, điều khiển trượt, ước lượng nhiễu.

Abstract:

The article presents a control designing method that estimates disturbances based on the state of autonomous wheel mobile robot. Uncertainties, wheel slips and external disturbances of the system are eliminated through the controller combined with disturbance estimation. ~~Transferring kinematic model to state space model that be able to apply sliding control simply and efficiently.~~ The controller design ensures Lyapunov stability and simulation results illustrate the high quality of tracking control, disappearing of chattering phenomena and disturbances.

Key words: Wheel mobile robot, wheel slips, sliding mode tracking controller, disturbance estimation.

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Robot di động đã được biết đến từ lâu với khả năng thay thế con người thực hiện các công việc nặng, nguy hiểm, khó khăn. Một trong các loại robot di động phổ biến là xe tự hành (WMR). Đây là đối tượng điều khiển khó vì có tính phi tuyến, nhiều đầu vào nhiều đầu ra, thiếu cơ cấu chấp hành và có điều kiện ràng buộc nonholonomic. Đặc biệt trong môi trường làm việc thực tế, khi xe di chuyển vào những khúc cua hoặc di chuyển với tốc độ cao,

mặt sàn trơn hoặc có vật cản, xảy ra hiện tượng trượt bánh ảnh hưởng đến quỹ đạo di chuyển của xe thì vai trò của bộ điều khiển càng trở nên cần thiết. Đã có nhiều công bố nghiên cứu về các phương pháp điều khiển cho xe tự hành, như: Điều khiển trượt [1-4], điều khiển thích nghi [5, 6], điều khiển thích nghi nơ ron [7-9], điều khiển dựa trên bộ ước lượng nhiễu [10, 11]. Các phương pháp điều khiển hiện đại không những làm hệ ổn định mà còn xử lý loại bỏ được ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài, ma sát trượt bánh, các yếu tố bất định của mô

hình. Một trong những giải pháp hiệu quả để bù ảnh hưởng của nhiễu là thiết kế bộ quan sát nhiễu, hoặc sử dụng mạng nơron để xấp xỉ thành phần nhiễu chưa biết trước. Như trong [4], nhóm tác giả sử dụng bộ điều khiển thích nghi khi chưa biết tham số trượt dọc trục bánh xe và một bộ quan sát để ước lượng góc hướng của WMR. Một phương pháp khác xử lý nhiễu là sử dụng một bộ quan sát nhiễu với bộ lọc Kalman mở rộng để quan sát và bù thành phần ma sát trượt bánh [11]. Mấy năm gần đây, việc xem xét đưa thành phần ma sát trượt vào mô hình để thuận tiện cho việc thiết kế điều khiển cũng được nghiên cứu nhiều [3,8]. Alipour [3] xây dựng mô hình có chứa thành phần ma sát trượt và thiết kế điều khiển trượt bám quỹ đạo mà không bị ảnh hưởng bởi các yếu tố bất định. Điều khiển trượt đã được ứng dụng điều khiển mạch vòng động lực học cho WMR từ khá lâu. Tuy nhiên, đa số các bộ điều khiển trượt đều có nhược điểm là có hiện tượng chattering do có sự tham gia của thành phần $\text{sign}(s)$, làm ảnh hưởng tới chất lượng đầu ra. Giải pháp điều khiển để giảm dao động do trượt là cần thiết và cũng được nghiên cứu và đề xuất.

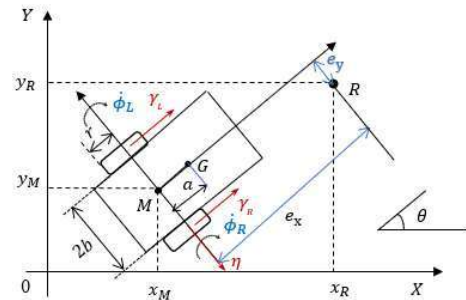
Trong bài báo này, tác giả đề xuất một phương pháp điều khiển trượt đưa sai số bám quỹ đạo về 0, đồng thời khắc phục dao động tự do quanh mặt trượt. Thiết kế bộ điều khiển trượt êm, giảm hiện tượng chattering, giảm ảnh hưởng xấu đến cơ cấu chấp hành.

2. MÔ HÌNH XE TỰ HÀNH

2.1. Mô hình động học

Hình 1 minh họa mô hình xe tự hành ba bánh gắn trên hệ tọa độ cố định OXY với các thông

số: r là bán kính bánh xe, b là một nửa của khoảng cách giữa 2 bánh sau của xe, a là khoảng cách giữa M và G . Xe được điều khiển bám theo quỹ đạo cho trước, gọi điểm mục tiêu di chuyển của xe là $R(x_R, y_R)$, vị trí của xe được xác định bởi vector tọa độ $q = [x \ y \ \theta]^T$.



Hình 1. Mô hình xe tự hành ba bánh

Khi xe di chuyển sẽ xuất hiện hiện tượng trượt giữa bánh xe và mặt sàn. Gọi γ_R và γ_L là độ trượt dọc trục của bánh xe bên phải và bên trái, η là độ trượt ngang trục bánh xe. Trong trường hợp này, vận tốc tuyến tính của WMR theo hướng dọc và vận tốc quay thực tế như sau [8]:

$$\Omega = \frac{r(\dot{\phi}_R + \dot{\phi}_L)}{2} + \frac{\dot{\gamma}_R + \dot{\gamma}_L}{2} = v + \dot{\chi} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{r(\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L)}{2b} + \frac{(\dot{\gamma}_R - \dot{\gamma}_L)}{2b} = \mu + \dot{\vartheta} \quad (2)$$

$$\text{Trong đó: } \chi = \frac{\gamma_R + \gamma_L}{2} \quad \vartheta = \frac{(\dot{\gamma}_R - \dot{\gamma}_L)}{2b}$$

Phương trình chuyển động của xe xét tại điểm tâm khối G :

$$\begin{cases} \dot{x}_G = \Omega \cos \theta - \eta \sin \theta - a\omega \sin \theta \\ \dot{y}_G = \Omega \sin \theta + \eta \cos \theta + a\omega \cos \theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (3)$$

Điều kiện ràng buộc nonholonomic:

$$\begin{cases} \dot{\gamma}_R = -r\dot{\phi}_R + \dot{x}_M \cos \theta + \dot{y}_M \sin \theta + b\omega \\ \dot{\gamma}_L = -r\dot{\phi}_L + \dot{x}_M \cos \theta + \dot{y}_M \sin \theta - b\omega \\ \dot{\eta} = -\dot{x}_M \sin \theta + \dot{y}_M \cos \theta - a\dot{\theta} \end{cases} \quad (4)$$

2.2. Mô hình động lực học

Theo [8,13], mô hình động lực học của xe được biến đổi thành:

$$M\dot{v} + Bv + Q\ddot{\gamma} + C\dot{\eta} + G\ddot{\eta} + \tau_d = \tau \quad (5)$$

Các thông số trong mô hình:

$\tau = [\tau_1 \quad \tau_2]^T$ là vec tơ đầu vào, τ_1 và τ_2 là mô men lực đặt vào bánh xe phải, trái tương ứng, τ_d là vector gồm thành phần bất định trong mô hình và nhiễu ngoài, vector vận tốc góc $v = [\dot{\phi}_R \quad \dot{\phi}_L]^T$ và vector ma sát trượt dọc trục $\gamma = [\gamma_R \quad \gamma_L]^T$

$$G = m_G \frac{ar}{2b} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}, B = m_G \frac{ar^2}{2b} \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 \\ m_2 & m_1 \end{bmatrix}; Q = \begin{bmatrix} q_1 & q_2 \\ q_2 & q_1 \end{bmatrix};$$

$$C = m_G \frac{r}{2} \omega \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$m_1 = m_G \left(\frac{r^2}{4} + \frac{a^2 r^2}{4b^2} \right) + \frac{r^2}{4b^2} (I_G + 2I_D) + m_w r^2 + I_w$$

$$m_2 = m_G \left(\frac{r^2}{4} - \frac{a^2 r^2}{4b^2} \right) - \frac{r^2}{4b^2} (I_G + 2I_D);$$

$$q_{1,2} = m_G \frac{r}{4} \left(1 \pm \frac{a^2}{b^2} \right) \pm \frac{r}{4b} (I_G + 2I_D).$$

Các kí hiệu tham số: m_G - khối lượng thân xe; m_w - khối lượng bánh xe; I_G - hệ số mômen

quán tính của thân xe quanh trục thẳng đứng đi qua điểm G ; I_w - hệ số mômen quán tính của bánh xe quanh trục quay; I_D - hệ số mômen quán tính của bánh xe quanh trục đường kính của bánh xe (theo hướng trục thẳng đứng).

Từ phương trình động lực học (5), nhân cả 2 vế với M^{-1} biến đổi ta được:

$$\dot{v} = -M^{-1}Bv + M^{-1}\tau - M^{-1}(Q\ddot{\gamma} + C\dot{\eta} + G\ddot{\eta} + \tau_d) \quad (6)$$

Đặt thành phần nhiễu là $d_2 = -M^{-1}(Q\ddot{\gamma} + C\dot{\eta} + G\ddot{\eta} + \tau_d)$, thì (6) viết thành:

$$\dot{v} = -M^{-1}Bv + M^{-1}\tau + d_2 \quad (7)$$

Điều khiển xe tự hành bám theo một quỹ đạo cho trước, gọi điểm mục tiêu di chuyển của xe là $R(x_R, y_R)$, sai lệch vị trí giữa điểm giữa hai bánh xe (điểm M) với điểm mục tiêu R trên hệ tọa độ OXY:

$$e_p = \begin{bmatrix} e_{p1} \\ e_{p2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_R - x_M \\ y_R - y_M \end{bmatrix} \quad (8)$$

Đạo hàm theo thời gian công thức (8), xem xét đến điều kiện ràng buộc, phương trình chuyển động (3) thì có được:

$$\dot{e}_p = \begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \end{bmatrix} = hv + d_1 \quad (9)$$

Trong đó:

$$h = \begin{bmatrix} \left(\frac{e_y}{b} - 1 \right) \frac{r}{2} & - \left(\frac{e_y}{b} + 1 \right) \frac{r}{2} \\ - \frac{e_x r}{2b} & \frac{e_x r}{2b} \end{bmatrix},$$

$$d_1 = \begin{bmatrix} \left(\frac{\dot{\gamma}_R - \dot{\gamma}_L}{2b} \right) e_y - \frac{\dot{\gamma}_R + \dot{\gamma}_L}{2} \\ - \left(\frac{\dot{\gamma}_R - \dot{\gamma}_L}{2b} \right) e_x - \dot{\eta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_R \\ \dot{y}_R \end{bmatrix}$$

2.3. Mô hình trạng thái

Biến đổi hệ về mô hình trạng thái, định nghĩa biến trạng thái: $x_1 = e_p$; $x_2 = \dot{x}_1 + \lambda x_1$, λ là hằng số xác định dương.

Đạo hàm biến x_2 theo thời gian:

$$\dot{x}_2 = \ddot{x}_1 + \lambda \dot{x}_1 \quad (10)$$

Thay lần lượt các công thức (7), (9) vào (10):

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= h\dot{v} + \dot{h}v + \dot{d}_1 + \lambda(hv + d_1) \\ &= hM^{-1}Bv + hM^{-1}\tau + hd_2 + \dot{h}v + \dot{d}_1 + \lambda hv + cd_1 \\ &= P_1v + E\tau + d_3 \end{aligned} \quad (11)$$

Trong đó: $P_1 = -hM^{-1}B$, $E = hM^{-1}$,

$$d_3 = hd_2 + \dot{h}v + \dot{d}_1 + \lambda hv + \lambda d_1$$

Rút v từ công thức (9):

$$v = h^{-1}(\dot{e}_p - d_1) = h^{-1}(x_2 - \lambda x_1 - d_1) \quad (12)$$

Thay công thức (12) vào (11) và đặt $P = P_1h^{-1} = M^{-1}B$, $d = d_3 - h^{-1}d_1$ thì có công thức (13):

$$\dot{x}_2 = Px_2 - \lambda Px_1 + E\tau + d \quad (13)$$

Như vậy, mô hình WMR đưa về được dạng mô hình trạng thái là:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 - \lambda x_1 \\ \dot{x}_2 = Px_2 + E\tau - \lambda Px_1 + d \end{cases} \quad (14)$$

Trong công thức (13), hằng số λ chưa biết cần chỉnh định, nếu λ lớn sẽ làm cho tín hiệu sai lệch tiến về mặt trượt nhanh nhưng lại gây dao động lớn và ngược lại. Do đó, chúng tôi đề xuất ý tưởng là coi thành phần λx_1 là nhiễu chưa biết trước, đặt $D_1 = -\lambda x_1$, $D_2 = d - \lambda Px_1$. Đặt vector biến trạng thái $x = [x_1 \ x_2]^T$, $f(x) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & P \end{bmatrix}$, $g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ E \end{bmatrix}$, $D = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix}$, thì mô hình (14) đưa về dạng vec tơ tổng quát là:

$$\dot{x} = f(x)x + g(x)\tau + D \quad (15)$$

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Mô hình trạng thái (15) được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển cho WMR, trước hết cần xác định tín hiệu điều khiển τ để hệ bám quỹ đạo và loại bỏ được ảnh hưởng của thành phần nhiễu.

3.1. Thiết kế bộ điều khiển trượt

Trước hết, chọn mặt trượt như sau [14]:

$$s = \dot{x}_2 + k_2x_2 + k_1x_1 \quad (16)$$

Thay (14) vào mặt trượt (16):

$$s = Px_2 + E\tau + D_2 + k_2x_2 + k_1x_1 \quad (17)$$

Chọn luật điều khiển trượt gồm hai thành phần:

$$\tau = E^{-1}(\tau_e + \tau_n) \quad (18)$$

Trong đó, thành phần giữ hệ ở mặt trượt được chọn như sau:

$$\tau_e = -Px_2 - k_2x_2 - k_1x_1 \quad (19)$$

Với k_1, k_2 là các hằng số dương.

Thay luật điều khiển trong công thức (18), (19) vào (17) sẽ có:

$$s = \tau_n + D_2 \quad (20)$$

Thành phần thứ hai τ_n của luật điều khiển trượt, để đưa hệ về mặt trượt được chọn như công thức (21) để giảm bớt dao động:

$$\begin{aligned} \dot{\tau}_n + K\tau_n &= \varepsilon \\ \varepsilon &= -(\rho + k_n + \mu) \operatorname{sgn}(s) \end{aligned} \quad (21)$$

Giả thiết: $K > 0$ và μ là hằng số xác định dương, $k_n \geq K|D_2|$ và $\rho > |\dot{D}_2|$.

Khi hệ đạt tới chế độ mặt trượt $s = 0$, thì từ (14) và (16) có được công thức (22):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + D_1 \\ \dot{x}_2 = -k_1 x_1 - k_2 x_2 \end{cases} \quad (22)$$

Biến đổi (22) về phương trình vi phân bằng cách đạo hàm hai vế phương trình trên $\dot{x}_1 = x_2 + D_1$, thay $\dot{x}_2$ từ phương trình dưới vào sẽ có:

$$\ddot{x}_1 + k_2 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = \dot{D}_1 + k_2 D_1 \quad (23)$$

Nhận thấy nếu $D_1 = 0$ thì hệ ổn định, tuy nhiên D_1 là tồn tại và ảnh hưởng đến biến trạng thái x_1 . Do đó, đề xuất một bộ quan sát nhiễu để thiết kế lại mặt trượt.

3.2. Thiết kế bộ quan sát nhiễu

Đặt z_1 là đại lượng ước lượng của x_1 và z_2 là đại lượng ước lượng của D_1 [14]:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - a_1(z_1 - x_1) + x_2 \\ \dot{z}_2 = -a_2 \tanh(b(z_1 - x_1)) \end{cases} \quad (24)$$

Định nghĩa thêm biến sai lệch của x_1 là $e_1 = z_1 - x_1$, của nhiễu D_1 là $e_d = D_1 - z_2$ và $e_2 = -e_d - a_1 e_1$, kết hợp với công thức (22) và (24):

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = -a_2 \tanh(b e_1) - \dot{D}_1 - a_1 e_1 \end{cases} \quad (25)$$

Thay (24), (25) vào (23) ta có phương trình vi phân:

$$\ddot{x}_1 + k_2 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = \dot{e}_d + k_2 e_d \quad (26)$$

Công thức (26) cho thấy, với sai lệch ước lượng nhiễu e_d bị chặn thì $x_1 \rightarrow 0$, sai số quỹ đạo của hệ tiến về 0.

Khi đó, mặt trượt (16) viết thành:

$$s = \dot{x}_2 + k_2(x_2 + z_2) + k_1 x_1 + \dot{z}_2 \quad (27)$$

Và thay (14) vào (27) thì:

$$s = P x_2 + E \tau + D_2 + k_2(x_2 + z_2) + k_1 x_1 + \dot{z}_2 \quad (28)$$

Luật điều khiển trong (19) được viết lại:

$$\tau_e = -P x_2 - k_2(x_2 + z_2) - k_1 x_1 - \dot{z}_2 \quad (29)$$

Chứng minh:

Đạo hàm 2 vế công thức (20) và kết hợp với (21):

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \dot{\tau}_n + \dot{D}_2 \\ &= \dot{\tau}_n + K\tau_n - K\tau_n + \dot{D}_2 \\ &= -(\rho + k_n + \mu) \operatorname{sgn}(s) - K\tau_n + \dot{D}_2 \end{aligned} \quad (30)$$

Chọn hàm Lyapunov xác định dương:

$$V = \frac{1}{2} s^T s \quad (31)$$

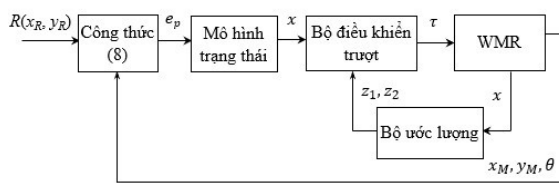
Đạo hàm 2 vế (31) theo thời gian:

$$\dot{V} = s^T \dot{s} \quad (32)$$

Thay (30) vào (32), kết hợp với các điều kiện $\rho > |\dot{D}_2|$, $k_n \geq K|\tau_n|$ [15]:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= s^T \left[-(\rho + k_n + \mu) \operatorname{sgn}(s) - K\tau_n + \dot{D}_2 \right] \\ &= (s^T \dot{D}_2 - \rho|s|) + (-k_n|s| - Ks^T \tau_n) - \mu|s| \\ &< -\mu|s|\end{aligned}\quad (33)$$

Như vậy, $\dot{V} \leq 0$, hệ (15) sẽ đạt trạng thái $s = 0$ trong khoảng thời gian hữu hạn.



Hình 2. Sơ đồ khối cấu trúc điều khiển

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Chọn các thông số của WMR:

$$m_G = 10\text{kg}, m_w = 2\text{kg}, b = 0.3\text{m}, r = 0.15\text{m}, a = 0.2\text{m}$$

$$I_G = 4\text{kgm}^2, I_w = 0.1\text{kgm}^2, I_D = 0.05\text{kgm}^2$$

Tham số bộ điều khiển:

$$\lambda = 9.5, k_1 = 10, k_2 = 10, K = 98, \mu = 10, \rho = 5$$

Thực hiện mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink, giả sử tác động tín hiệu nhiễu đầu vào:

$$\tau_d = [2 + \sin(0.1t) \quad 1 + \cos(0.1t)]^T$$

Và thành phần trượt dọc trục và ngang trục tác động vào xe $[\dot{\gamma}_R, \dot{\gamma}_L, \dot{\eta}]^T$:

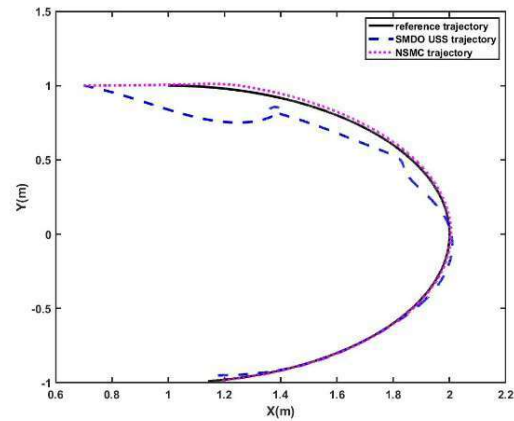
$$\begin{cases} [0, 0, 0]^T \text{ (m/s)} & t < 2 \text{ (s)} \\ [0.3\sin(2t), 0.3\cos(2t), 0.2]^T \text{ (m/s)} & t \geq 2 \text{ (s)} \end{cases}$$

Kiểm chứng kết quả của phương pháp đề xuất, tiến hành đồng thời mô phỏng thuật toán thiết kế trong bài (đường NSMC) và đối sánh với một phương pháp điều khiển trượt truyền

thông công bố trong [1] (đường SMDO). Về thông số mô hình, ảnh hưởng nhiễu ngoài và tác động độ trượt bánh xe là giống nhau. Mô phỏng với mục tiêu R di chuyển theo quỹ đạo oval: $x_R = 1 + \sin(t)$, $y_R = \cos(t)$.

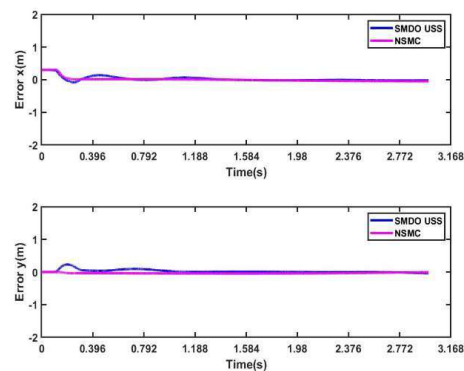
Vị trí và góc hướng ban đầu của xe:

$$[x_M(0), y_M(0), \theta(0)] = [0.7, 1, 0]$$

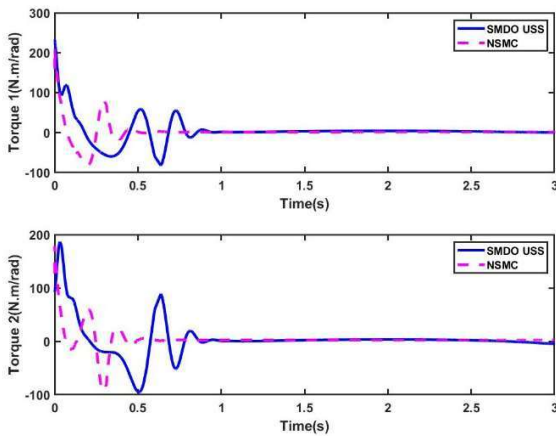


Hình 3. Xe bám quỹ đạo oval

Đáp ứng đường quỹ đạo Hình 3, và đặc tính sai số theo tọa độ x,y Hình 4 cho thấy đặc tính quỹ đạo điều khiển theo thuật toán trong bài (NSMC trajectory) bám quỹ đạo đặt (reference trajectory) nhanh và chính xác, sai số quỹ đạo nhỏ, chỉ khoảng sau tầm 0.3s là bám về không.



Hình 4. Đặc tính sai số vị trí theo phương X, Y



Hình 5. Đặc tính mô men quay giữa hai phương pháp điều khiển

Quan sát đặc tính mô men quay động cơ bánh trái và bánh phải ở Hình 5 cho thấy mô men quay thay đổi với biên độ nhỏ, tín hiệu điều khiển mômen đưa vào xe êm, có lợi cho cơ cấu chấp hành. So sánh với phương pháp điều khiển trượt thông thường trong [1] (đường

SMDO USS) thấy rằng chất lượng điều khiển tốt hơn, tín hiệu điều khiển mô men dao động ít hơn.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày một phương pháp điều khiển trượt dựa trên mô hình trạng thái của WMR khi xe chịu tác động của nhiễu ngoài và ma sát trượt bánh. Cấu trúc điều khiển đơn giản hơn do chỉ cần sử dụng một bộ điều khiển, thay vì dùng hai bộ điều khiển cho hai mạch vòng động học và động lực học. So với các phương pháp điều khiển trượt truyền thống thì đã giảm được hiện tượng chattering, chất lượng điều khiển bám tốt, ảnh hưởng của nhiễu ngoài và ma sát trượt bánh được loại bỏ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Jinhua, Ye, Yang Suzhen, and Jin Xiao, "Trajectory tracking control of WMR based on sliding mode disturbance observer with unknown skidding and slipping," In 2017 2nd International Conference on Cybernetics, Robotics and Control (CRC), pp. 18-22, IEEE, 2017.
- [2]. Goswami, N. K., & Padhy, P. K., "Sliding mode controller design for trajectory tracking of a non-holonomic mobile robot with disturbance," Computers & Electrical Engineering, 72, pp. 307-323, 2018.
- [3]. Alipour, K., Robat, A. B., & Tarvirdizadeh, B., "Dynamics modeling and sliding mode control of tractor-trailer wheeled mobile robots subject to wheels slip," Mechanism and Machine Theory, 138, pp. 16-37, 2019.
- [4]. Lee, Jun-Ku, Jin-Bae Park, and Yoon-Ho Choi, "Tracking control of nonholonomic wheeled mobile robot based on new sliding surface with approach angle," IFAC Proceedings Volumes 46.29, pp. 38-43, 2013.
- [5]. 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, pp. 1789-1807, 2018.
- [6]. Guo, Pengfei, et al, "Adaptive trajectory tracking of wheeled mobile robot based on fixed-time convergence with uncalibrated camera parameters," ISA transactions 99, pp. 1-8, 2020.

- [7]. S. J. Yoo, "Adaptive neural tracking and obstacle avoidance of uncertain mobile robots with unknown skidding and slipping," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 238, pp. 176-189, 2013.
- [8]. T. Nguyen, L. Le, "Neural network-based adaptive tracking control for a nonholonomic wheeled mobile robot with unknown wheel slips, model uncertainties, and unknown bounded disturbances," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 26, pp. 378-392, 2018.
- [9]. Li, Shu, et al. "Adaptive neural network tracking control-based reinforcement learning for wheeled mobile robots with skidding and slipping." *Neurocomputing* 283, pp.20-30, 2018.
- [10]. Huang, Dawei, et al. "Disturbance observer-based robust control for trajectory tracking of wheeled mobile robots." *Neurocomputing*, 198, 2016, pp.74-79.
- [11]. Li, Li, et al. "Trajectory tracking control for wheeled mobile robots based on nonlinear disturbance observer with extended Kalman filter." *Journal of the Franklin Institute*, 357.13, 2020, pp.8491-8507.
- [12]. Cui, M., "Observer-based adaptive tracking control of wheeled mobile robots with unknown slipping parameters," *IEEE Access*, 7, pp. 169646-169655, 2019.
- [13]. Van Doan, H., & Vu, N. T. T., "Adaptive sliding mode control for uncertain wheel mobile robot" *International Journal of Electrical & Computer Engineering* 13(4), pp. 2088-8708, 2023.
- [14]. Shi, Sheng-Li, Jian-Xiong Li, and Yi-Ming Fang, "Extended-state-observer-based chattering free sliding mode control for nonlinear systems with mismatched disturbance," *IEEE Access* 6, pp. 22952-22957, 2018.
- [15]. Feng, Yong, Fengling Han, and Xinghuo Yu, "Chattering free full-order sliding-mode control," *Automatica* 50.4, pp. 1310-1314, 2014.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả **Phạm Thị Hương Sen** tốt nghiệp kỹ sư ngành Điều khiển tự động Trường Đại học Bách khoa Hà Nội năm 2004, Thạc sỹ chuyên ngành Điều khiển và Tự động hoá năm 2008, nhận bằng tiến sĩ chuyên ngành Điều khiển và Tự động hoá năm 2022 tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

Lĩnh vực nghiên cứu: lý thuyết điều khiển nâng cao, điều khiển quá trình công nghệ, điều khiển robot tự hành.