

Mô hình hóa và điều khiển robot di động non-holonomic có trượt ngang

Nguyễn Văn Tính^{1*}, Phạm Thượng Cát¹, Phạm Minh Tuấn²

¹Viện Công nghệ Thông tin, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam

²Viện Công nghệ Vũ trụ, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam

Ngày nhận bài 5.10.2015, ngày chuyển phản biện 12.10.2015, ngày nhận phản biện 18.11.2015, ngày chấp nhận đăng 25.11.2015

Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu đã xây dựng một cách có hệ thống phương pháp mô hình hóa hệ động lực học của một robot di động bánh xe non-holonomic có trượt ngang. Sau đó, nhóm tác giả thiết kế một luật điều khiển bằng phương pháp tuyến tính hóa phản hồi vào ra để điều khiển robot di động này bám theo một quỹ đạo cho trước mà có thể bù được trượt ngang. Các kết quả mô phỏng được thực hiện bằng Matlab-Simulink đã chứng minh tính đúng đắn của luật điều khiển.

Từ khóa: robot di động non-holonomic, trượt ngang, tuyến tính hóa phản hồi.

Chỉ số phân loại 2.2

MODELLING AND CONTROLLING A NON-HOLONOMIC WHEELED MOBILE ROBOT WITH LATERAL SLIP

Summary

This paper presents the systematic development to model the dynamics of a non-holonomic wheeled mobile robot with lateral slip, followed by the design of a control law using the input-output feedback linearization method to drive the mobile robot to track a given trajectory while lateral slipping exists. Matlab-Simulink simulation results showed the correctness and performances of the control law.

Keywords: input-output feedback linearization, lateral slip, non-holonomic wheeled mobile robot.

Classification number 2.2

Đặt vấn đề

Robot di động bánh xe đã được nghiên cứu và ứng dụng trong nhiều ngành công nghiệp và là một lĩnh vực thu hút sự quan tâm của nhiều nhà khoa học trên thế giới. Lý do robot di động được ứng dụng rộng rãi trên thế giới là do nó có thể chuyển động thông minh mà không có tác động của con người, phạm vi hoạt động không bị giới hạn. Đặc biệt, nó có thể thay thế con người trong các nhiệm vụ nguy hiểm như: tìm kiếm vật liệu nổ, vận chuyển hàng hóa trong môi trường độc hại, giám sát an ninh... Nhiều công trình nghiên cứu về robot di động tập trung vào việc giải quyết bài toán điều khiển chuyển động. Nhiều công trình nghiên cứu đã thiết kế các bộ điều khiển tương ứng mà chúng đã tích hợp mô hình động học có ràng buộc non-holonomic với mô hình động lực học của robot di động [1-4]. Ở đó, các tác giả đã giả sử điều kiện ràng buộc non-holonomic luôn được đảm bảo (các bánh xe chỉ có chuyển động lăn mà không trượt). Tuy nhiên, trong thực tế, không phải lúc nào điều kiện ràng buộc non-holonomic cũng luôn được thỏa mãn. Ràng buộc non-holonomic phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố như độ căng của lốp, độ trơn của mặt sàn, độ phẳng của địa hình... Khi đó, nếu muốn giải quyết bài toán điều khiển chuyển động thì động học, động lực học trượt phải được tính đến khi thiết kế bộ điều khiển cho robot di động. Trong [5], các tác giả đã phát triển một mô hình động học suy rộng mà ở đó đã chứa đựng các loại trượt khác nhau như trượt dọc, trượt ngang, trượt quay. Trong [6], điều khiển lực ngang đã được đề xuất bằng các bộ điều khiển lực và vị trí, trong đó các yếu tố trượt đã được tính đến. Trong [7], các tác giả giới thiệu một bộ điều khiển bền vững để bám theo quỹ đạo bằng cách tích hợp động học trượt vào động học robot di động bánh xe dưới dạng các hàm và tính ổn định được kiểm chứng bằng toán tử Lie. Trong [8], các tác giả đã xây dựng mô hình động lực học robot di động bánh xe mà ở đó đã chứa đựng động lực học trượt ngang. Sau

*Tác giả liên hệ: Email: nvtinh@ioit.ac.vn

đó, mô hình động lực học này được sử dụng để thiết kế bộ lập quỹ đạo và bộ điều khiển để cho phép dẫn đường (navigation) có hiệu quả robot di động trong điều kiện có trượt ngang.

Trong trường hợp có trượt ngang hoặc trượt dọc thì yếu tố ma sát ở điểm tiếp xúc giữa bánh xe và mặt sàn được chú ý đến. Hệ số ma sát phụ thuộc mạnh mẽ vào dạng địa hình, độ căng của lốp và vận tốc robot di động. Đối với điều khiển trượt dọc, trong [9], hệ số ma sát được xem như một hàm của tỷ số trượt. Trong [10], các tác giả đã trình bày một xe tự hành cho nông nghiệp với giả sử vận tốc của xe này nhỏ, chỉ có trượt dọc được chú ý đến, còn trượt ngang bị bỏ qua. Trong [11], đã nghiên cứu bằng thực nghiệm các ảnh hưởng của các tham số như bán kính bánh xe, khoảng cách giữa hai bánh, tải trọng lên hiệu quả điều khiển khi tồn tại trượt dọc. Trong [12], các tác giả đã xây dựng một bài toán path-following khi tồn tại cả trượt ngang và trượt dọc. Dựa trên mô hình trượt, bộ điều khiển chuyển động được tổng hợp có tính đến trượt dọc. Đối với trượt ngang, bộ điều khiển được dựa trên mô hình ma sát ngang.

Nội dung nghiên cứu

Mô hình động học

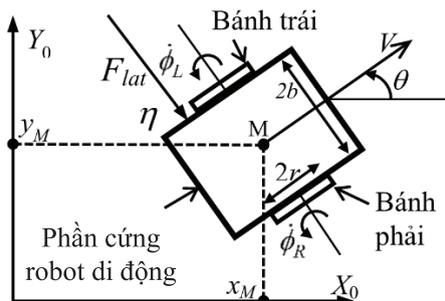
Xét 1 robot di động bánh xe có trượt ngang như hình 1, với giả thiết độ trượt dọc của xe có thể bỏ qua, mô hình động học của xe được mô tả như sau:

$$r\dot{\phi}_R = \dot{x}_M \cos \theta + \dot{y}_M \sin \theta + b\dot{\theta} \quad (1)$$

$$r\dot{\phi}_L = \dot{x}_M \cos \theta + \dot{y}_M \sin \theta - b\dot{\theta} \quad (2)$$

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

Trong đó, η là độ trượt ngang của robot di động.



Hình 1: robot di động bánh xe có trượt ngang

Mô hình động lực học của robot di động

Động năng của thân robot di động là:

$$K_M = \frac{1}{2} m_M (\dot{x}_M^2 + \dot{y}_M^2) + \frac{1}{2} I_M \dot{\theta}^2 \quad (4)$$

Trong đó, m_M là khối lượng của thân robot di động, I_M là mô men quán tính của thân này xung quanh trục thẳng đứng đi qua điểm M.

Động năng của bánh trái và bánh phải lần lượt là:

$$K_L = \frac{1}{2} m_W (r^2 \dot{\phi}_L^2 + \dot{\eta}^2) + \frac{1}{2} I_W \dot{\phi}_L^2 + \frac{1}{2} I_D \dot{\theta}^2 \quad (5)$$

$$K_R = \frac{1}{2} m_W (r^2 \dot{\phi}_R^2 + \dot{\eta}^2) + \frac{1}{2} I_W \dot{\phi}_R^2 + \frac{1}{2} I_D \dot{\theta}^2 \quad (6)$$

Tổng động năng của hệ là:

$$\begin{aligned} K &= K_M + K_L + K_R \\ &= \frac{1}{2} m_M (\dot{x}_M^2 + \dot{y}_M^2) + \frac{1}{2} m_W r^2 (\dot{\phi}_L^2 + \dot{\phi}_R^2) \\ &\quad + m_W \dot{\eta}^2 + \frac{1}{2} I_W (\dot{\phi}_L^2 + \dot{\phi}_R^2) + \left(I_D + \frac{1}{2} I_M \right) \dot{\theta}^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Trong đó, I_W và I_D lần lượt là mô men quán tính của bánh xe xung quanh trục quay và trục thẳng đứng.

Vì thế năng của robot di động bằng 0, nên hàm Lagrange của nó là: $L=K$.

Gọi véc tơ tọa độ Lagrange của robot di động là: $q = [x_M, y_M, \theta, \eta, \phi_R, \phi_L]^T$, phương trình ràng buộc được

biểu diễn theo dạng sau:

$$A(q)\dot{q} = 0 \quad (8)$$

Kết hợp các phương trình (1), (2), (3) và (8), ta xác định được ma trận $A(q)$ như sau:

$$A(q) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & -b & 0 & -r & 0 \\ \cos \theta & \sin \theta & b & 0 & 0 & -r \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Phương trình Lagrange của chuyển động của robot di động là:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = u + A^T \lambda \quad (10)$$

Trong đó, $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]^T$ là một véc tơ nhân tử

Lagrange biểu diễn các lực ràng buộc của robot di động, u là véc tơ lực suy rộng tương ứng với các tọa độ suy rộng q . Bằng cách giải phương trình Lagrange, phương trình động lực học của robot di động có dạng như sau:

$$M\ddot{q} = N_1\tau + N_2F_{lat} + A^T\lambda \quad (11)$$

với $N_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$, $N_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$ là

các ma trận đầu vào,

$$M = \begin{bmatrix} m_M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_M + 2I_D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2m_W & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_W r^2 + I_W & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_W r^2 + I_W \end{bmatrix},$$

$v = [\tau_R, \tau_L]^T$ là véc tơ đầu vào gồm mô men quay bánh phải, bánh trái; F_{lat} là lực đẩy tác động vào thân robot theo hướng ngang như hình 2.

Gọi $v = [\dot{\phi}_R, \dot{\phi}_L]^T$, $S_1(q)$, và $S_2(q)$ là ma trận thỏa

mãn phương trình sau:

$$\dot{q} = S_1(q)v + S_2(q)\dot{\eta} \quad (12)$$

Để dàng tìm được ma trận

$$S_1(q) = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \theta & \frac{r}{2} \cos \theta \\ \frac{r}{2} \sin \theta & \frac{r}{2} \sin \theta \\ \frac{r}{2b} & -\frac{r}{2b} \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; S_2(q) = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Đạo hàm 2 vế phương trình (12):

$$\ddot{q} = \dot{S}_1(q)v + S_1(q)\dot{v} + \dot{S}_2(q)\dot{\eta} + S_2(q)\ddot{\eta} \quad (14)$$

Hơn nữa, ta cũng có:

$$S_1^T(q)A^T(q) = 0 \quad (15)$$

$$S_1^T(q)N_1 = I$$

$$S_1^T(q)N_2 = 0$$

Nhân cả 2 vế của phương trình (11) với $S_1^T(q)$, ta có:

$$\tau = [S_1(q)^T MS_1(q)]\dot{v} + [S_1(q)^T M\dot{S}_1(q)]v + [S_1(q)^T MS_2(q)]\dot{\eta} + [S_1(q)^T MS_2(q)]\ddot{\eta} \quad (16)$$

Ta dễ thấy,

$$S_1(q)^T M\dot{S}_1(q) = 0 \quad (17)$$

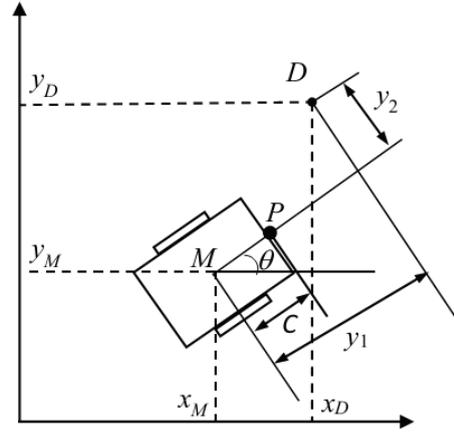
$$S_1(q)^T MS_2(q) = 0$$

Thay (17) vào (16) ta được:

$$[S_1(q)^T MS_1(q)]\dot{v} + [S_1(q)^T M\dot{S}_2(q)]\ddot{\eta} = \tau \quad (18)$$

$$\Leftrightarrow m\dot{v} + b\dot{\eta}\omega = \tau \quad (19)$$

Trong đó, $m = S_1(q)^T MS_1(q) = \begin{bmatrix} \bar{m}_{11} & \bar{m}_{12} \\ \bar{m}_{21} & \bar{m}_{22} \end{bmatrix}$



Hình 2: các biến đầu ra $y(x)$

$$\bar{m}_{11} = \bar{m}_{22}$$

$$= m_M \left(\frac{r}{2}\right)^2 + (I_M + 2I_D) \left(\frac{r}{2b}\right)^2 + (m_W r^2 + I_W)$$

$$\bar{m}_{12} = \bar{m}_{21}$$

$$= m_M \left(\frac{r}{2}\right)^2 - (I_M + 2I_D) \left(\frac{r}{2b}\right)^2$$

$$b\omega = S_1(q)^T MS_2(q)$$

$$b = \begin{bmatrix} -m_M \frac{r}{2} & -m_M \frac{r}{2} \end{bmatrix}^T$$

$$\omega = \frac{r}{2b} (\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L)$$

Thiết kế luật điều khiển

Gọi $D(x_D, y_D)$ là điểm mục tiêu di chuyển với vận tốc dài V_D không đổi theo hướng θ_D , ta có:

$$\dot{x}_D = V_D \cos \theta_D \quad (20)$$

$$\dot{y}_D = V_D \sin \theta_D$$

Gọi trạng thái của robot di động là:

$$x = [x_M, y_M, \theta, \eta, \phi_R, \phi_L, \dot{\phi}_R, \dot{\phi}_L]^T \quad (21)$$

Mô hình trạng thái của robot di động được biểu diễn dưới dạng sau:

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} S_1 v + S_2 \dot{\eta} \\ -m^{-1}(b\dot{\eta}\omega) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ m^{-1} \end{bmatrix} \tau \\ y = [y_1(x), y_2(x)]^T, \end{cases} \quad (22)$$

trong đó,

$$y = \begin{bmatrix} y_1(x) \\ y_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_D - x_M \\ y_D - y_M \end{bmatrix} \quad (23)$$

Tính đạo hàm bậc nhất của (23):

$$\dot{y} = \begin{bmatrix} y_2 \omega - V + V_D \cos(\theta - \theta_D) \\ -y_1 \omega - \dot{\eta} - V_D \sin(\theta - \theta_D) \end{bmatrix}, \quad (24)$$

trong đó $\omega = \dot{\theta} = \frac{r}{2b}(\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L)$, $V = \frac{r}{2}(\dot{\phi}_R + \dot{\phi}_L)$

Tiếp tục đạo hàm 2 vế (24), ta được:

$$\ddot{y} = -\begin{bmatrix} V \\ y_1 \end{bmatrix} + f, \quad (25)$$

trong đó, f là một véc tơ phụ thuộc vào quỹ đạo của mục tiêu D. Nếu D chuyển động theo đường thẳng thì f được thay bởi f_L như sau:

$$f_L = \begin{bmatrix} \dot{y}_2 \cdot \omega + y_2 \cdot \dot{\omega} - V_D \omega \sin(\theta - \theta_D) \\ -\dot{y}_1 \omega - \dot{\eta} - V_D \omega \cos(\theta - \theta_D) \end{bmatrix} \quad (26)$$

Nếu điểm D(x_D, y_D) chuyển động với vận tốc dài V_D không đổi theo đường tròn có dạng:

$$(x_D - x_O)^2 + (y_D - y_O)^2 = R^2 \quad (27)$$

thì f được thay bởi f_C như sau:

$$f_C = \begin{bmatrix} \dot{y}_2 \cdot \omega + y_2 \cdot \dot{\omega} - V_D (\omega - \dot{\theta}_D) \sin(\theta - \theta_D) \\ -\dot{y}_1 \omega - \dot{\eta} - V_D (\omega - \dot{\theta}_D) \cos(\theta - \theta_D) \end{bmatrix} \quad (28)$$

Ta có thể viết lại (25) dưới dạng:

$$\ddot{y} = -h\dot{y} + f \quad (29)$$

trong đó $h = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ y_1 \frac{r}{2b} & -\left(y_1 \frac{r}{2b}\right) \end{bmatrix}$

Nếu $y_1 > 0$, thì h luôn khả nghịch.

Kết hợp (22) và (29), ta có:

$$\ddot{y} = -hm^{-1}(\tau - b\dot{\eta}\omega) + f \quad (30)$$

Ta chọn luật điều khiển:

$$\tau = b\dot{\eta}\omega + mh^{-1}(f - \ddot{y}_{desired} + K_D\dot{e} + K_P e) \quad (31)$$

trong đó, $e = y - y_{desired}$, K_P , K_D là các ma trận hằng xác

định dương. Sơ đồ khối của hệ thống điều khiển được mô tả như hình 3.

Yêu cầu của bài toán điều khiển là điểm P (hình 2) phải bám tiệm cận theo điểm D với sai lệch bám tiến về không. Do vậy, ta chọn $y_{desired} = [C, 0]^T$.

Thay (31) vào (30), ta được:

$$\ddot{e} + K_D\dot{e} + K_P e = 0 \quad (32)$$

Từ phương trình động lực học sai lệch này, sai lệch

e sẽ tiến tiệm cận về 0. Tức $y_1 \rightarrow C; y_2 \rightarrow 0$.

Tiến hành mô phỏng bằng Matlab-Simulink. Các tham số của robot di động được tiến hành mô phỏng được chọn như sau: $m_M = 17$ kg; $r = 0,095$ m; $b = 0,24$ m; $I_D = 0,023$ kgm²; $I_W = 0,011$ kgm²; $I_M = 0,537$ kgm²; $m_W = 0,5$ kg. Khoảng cách mong muốn: $C = 0,3$ m. Các tham số điều khiển

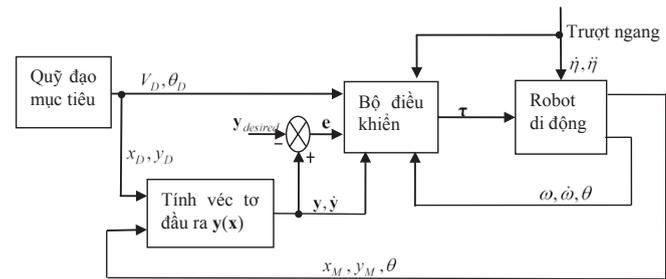
$$K_P = K_D = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix}.$$

Không mất tính tổng quát, tỷ số trượt được giả sử là: $sa = \frac{\dot{\eta}}{V} = 0,2$.

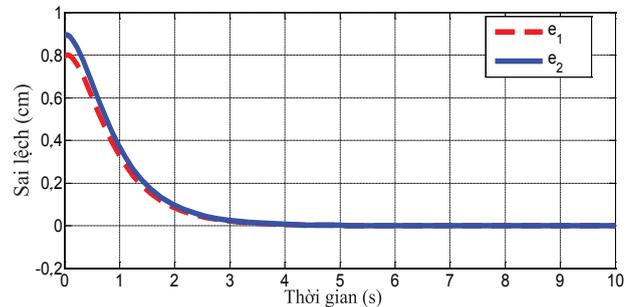
Kết quả mô phỏng

Ta sẽ tiến hành mô phỏng theo 2 trường hợp:

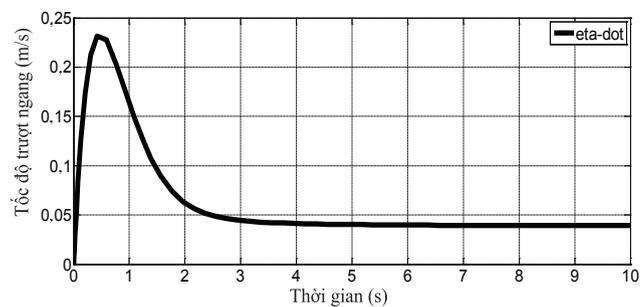
Trường hợp 1: mục tiêu D(x_D, y_D) di chuyển theo đường thẳng có hệ số góc $\theta_D = \pi/6$ với vận tốc 0,2 m/s.



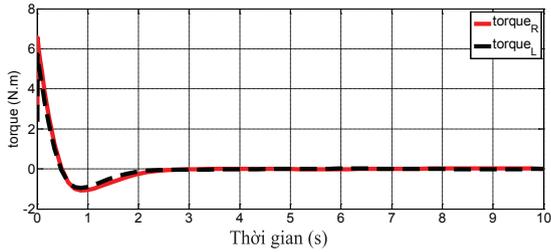
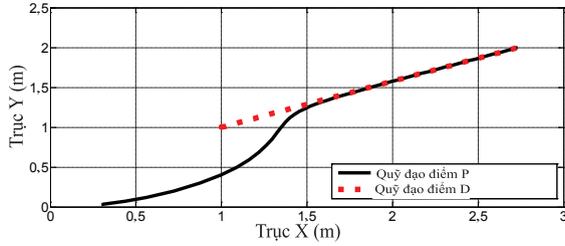
Hình 3: sơ đồ khối để điều khiển robot di động non-holonomic có trượt ngang



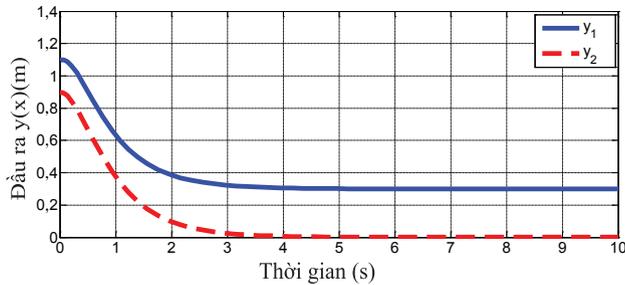
Hình 4: đồ thị sai lệch $e = y - y_{desired}$



Hình 5: đồ thị tốc độ trượt ngang $\dot{\eta}$ khi robot bám theo đường thẳng

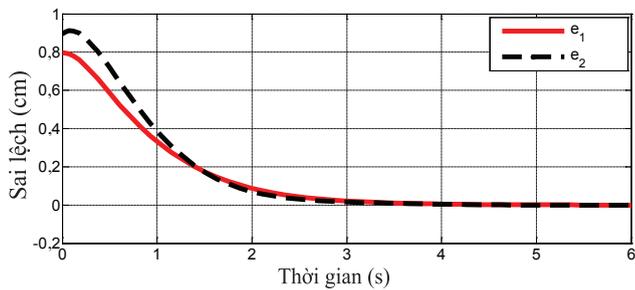


Hình 7: mô men quay ở hai bánh xe robot di động

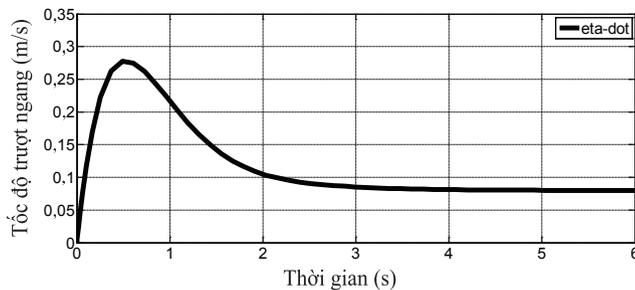


Hình 8: véc tơ đầu ra $y(x)$

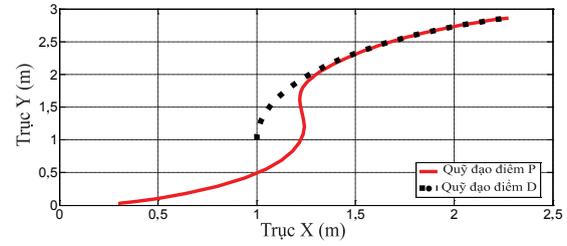
Trường hợp 2: mục tiêu di chuyển theo đường tròn có phương trình (27) với vận tốc dài $V_D = 0,4$ m/s.



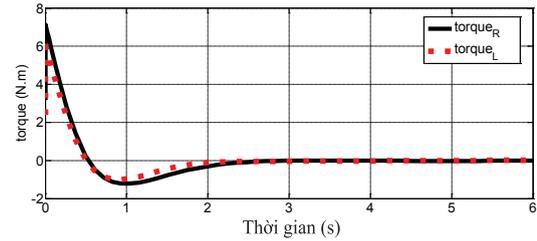
Hình 9: đồ thị sai lệch $e = y - y_{desired}$



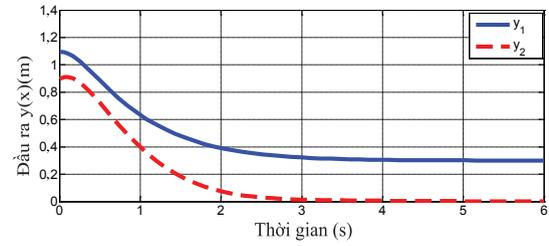
Hình 10: đồ thị tốc độ trượt ngang $\dot{\eta}$ khi rô bốt bám theo đường tròn



Hình 11: quỹ đạo điểm P và điểm D



Hình 12: mô men quay ở hai bánh xe robot di động



Hình 13: véc tơ đầu ra $y(x)$

Tốc độ trượt ngang tương ứng với các trường hợp 1 và 2 được mô tả qua các hình vẽ 5 và 10.

Các hình 4, 6, 9, 11 đã minh họa tính ổn định tiệm cận của luật điều khiển. Trong các hình 8 và 13, giá trị $y_1(x) > 0$ với $\forall t > 0$ nên ma trận h trong phương trình (31) luôn khả nghịch. Hình 7 và 12 minh họa đồ thị mô men quay luôn liên tục và hữu hạn. Do vậy, luật điều khiển là khả thi.

Kết luận

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã xây dựng thành công mô hình động học, động lực học của robot di động khi có trượt ngang. Trong các mô hình động học, động lực học đều chứa đựng động học, động lực học của trượt ngang. Sau đó, chúng tôi đã đề xuất một luật điều khiển theo phương pháp tuyến tính hóa phản hồi vào ra. Tính ổn định của luật điều khiển đã được kiểm chứng bằng Matlab-Simulink khi tiến hành mô phỏng cho robot bám theo quỹ đạo thẳng và quỹ đạo tròn. Trong tương lai, chúng tôi sẽ khảo sát và thiết kế bộ điều khiển cho robot di động khi vừa có trượt dọc, vừa có trượt ngang.

Tài liệu tham khảo

- [1] T Hu, S Yang, F Wang, G Mittal (2002), *A neural network for a non-holonomic mobile robot with unknown robot parameters*, Proc. of the 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation.
- [2] T Hu and S Yang (2001), "A novel tracking control method for a wheeled mobile robot", *Proc. of 2nd Workshop on Computational Kinematics*, pp.104-116.
- [3] R. Fierro and F.L Lewis (1998), "Control of a nonholonomic mobile robot using neural networks", *IEEE Trans. on Neural Networks*, **9(4)**, pp.389-400.
- [4] E Zalama, P Gaudiano and J Lopez Coronado (1995), "A real-time, unsupervised neural network for the low-level control of a mobile robot in a nonstationary environment", *Neural Networks*, **8**, pp.103-123.
- [5] M Tarokh, G.J McDermott (2005), "Kinematics modeling and analyses of articulated rover", *IEEE Trans. on Robotics*, **21(4)**, pp.539-553.
- [6] S Jung, T.C Hsia (2005), *Explicit lateral force control of an autonomous mobile robot with slip*, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 388-393.
- [7] X Zhu, G Dong, D Hu, Z Cai (2006), *Robust tracking control of wheeled mobile robots not satisfying nonholonomic constraints*, Proc. of the 6th Int. Conf. on Intelligent Systems Design and Applications ISDA'06.
- [8] N Sidek, N Sarkar, SARKAR (2008), *Dynamic modeling and control of nonholonomic mobile robot with lateral slip*, Proc. of the 7th WSEAS Int. Conf. on Signal Processing, Robotics and Automation (ISPRA '08), University of Cambridge, UK.
- [9] Zielinska T, Chmielniak A (2010), *Controlling the slip in mobile robots*, Proc. 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, pp.13-20.
- [10] J Sánchez-Hermosilla, F Rodriguez, R González, et al (2010), *A mechatronic description of an autonomous mobile robot for agricultural tasks in greenhouses*, Mobile Robots Navigation, Barreira, A. (Ed.), InTech, Croatia, pp.583-607.
- [11] L Ding, H Gao, Z Deng, et al (2011), "Experimental study and analysis on driving wheels' performance for planetary exploration rovers moving in deformable soil", *J. Terramech*, **48(1)**, pp.27-45.
- [12] H Khan, J Iqbal, K Baizid, T Zielinska, *Longitudinal and lateral slip control of autonomous wheeled mobile robot for trajectory tracking*, Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, ISSN 2095-9184 (print); ISSN 2095-9230 (online).