

ĐIỀU KHIỂN ỔN ĐỊNH ROBOT DI ĐỘNG ĐA HƯỚNG

Trần Như Chí, Nguyễn Thị Thanh Vân

Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà Nội

Email: vanntt@vnu.edu.vn

Tóm tắt—Bài báo đề xuất luật điều khiển chuyển động ổn định cho robot di động ba bánh đa hướng với tham số của luật điều khiển được điều chỉnh bằng bộ điều khiển mờ. Luật điều khiển đề xuất cho phép tham số luật điều khiển thay đổi thích nghi với trạng thái của robot, cải thiện đáp ứng của hệ thống. Hiệu quả của phương pháp đề xuất được kiểm nghiệm qua một số trường hợp hoạt động và so sánh với phương pháp thông thường.

Từ khóa—robot di động đa hướng, ổn định tiệm cận, Lyapunov, logic mờ, điều khiển mờ

I. GIỚI THIỆU

Khả năng hoạt động tự quản trị của robot di động tạo ra các ứng dụng đa dạng trong nhiều lĩnh vực. Một trong các vấn đề liên quan đến khả năng tự trị của robot di động là điều khiển ổn định. Bài toán điều khiển ổn định từ một vị trí bất kỳ trong môi trường làm việc tới vị trí đích có ý nghĩa trong trường hợp robot hoạt động trong môi trường chưa biết trước [1]. Trường hợp này không yêu cầu đường đi cho trước mà chỉ cần thông tin về vị trí ban đầu và vị trí đích. Bộ điều khiển ổn định tiệm cận sẽ điều khiển robot từ vị trí bất kỳ về đích. Ứng dụng trong các bài toán điều khiển bám đường đi biết trước hoặc dẫn đường trong môi trường không biết trước.

Cơ cấu di động của các robot hiện nay là cơ cấu bánh xe, 2 bánh, 3 bánh hay 4 bánh. Trong đó cơ cấu ba bánh với bánh đa hướng (Omni) [2]-[3] cho phép robot di chuyển theo các hướng thường được sử dụng. Mô hình động học của robot đa hướng là mô hình phi tuyến vì tiêu chuẩn ổn định Lyapunov [4] được sử dụng để đánh giá tính ổn định của hệ thống này. Tiêu chuẩn ổn định liên quan đến việc xác định hàm Lyapunov $V > 0$ và đạo hàm $\dot{V} < 0$. Biến điều khiển liên quan đến vận tốc tuyến tính và vận tốc góc của robot hay vận tốc góc riêng của từng bánh xe. Một số các nghiên cứu đã đề xuất lựa chọn luật điều khiển vận tốc thỏa mãn tiêu chuẩn ổn định Lyapunov. [5], [6], [7].

Các luật điều khiển chuyển động ổn định trong các đề xuất ở trên liên quan đến các biến điều khiển và tham

số của luật điều khiển. Khi áp dụng các tham số có điều kiện nhất định để luật điều khiển thỏa mãn tiêu chuẩn Lyapunov. Trong khi đó hình dạng đường đi và đáp ứng của hệ thống lại phụ thuộc vào việc lựa chọn các tham số này. Việc đánh giá lựa chọn tham số điều khiển để thu được kết quả tốt nhất cần được quan tâm xem xét.

Bài báo đề xuất một hệ thống điều khiển chuyển động ổn định robot di động đa hướng với luật điều khiển thỏa mãn tiêu chuẩn Lyapunov và tham số luật điều khiển được điều chỉnh bằng bộ điều khiển mờ. Cơ sở của việc điều chỉnh tham số của luật điều khiển dựa trên mục tiêu cải tiến tốc độ đáp ứng của hệ thống. Mỗi quan hệ hay sự thay đổi thích nghi giữa tham số của luật điều khiển với khoảng cách tới đích tương ứng phù hợp với lý thuyết về logic mờ [8]. Bộ điều mờ [10]-[9] được xây dựng dựa trên lý thuyết về tập mờ và logic mờ thích hợp với những hệ thống chưa đầy đủ thông tin hay mô hình của đối tượng do đó được sử dụng rất nhiều trong các ứng dụng robot di động liên quan đến vấn đề tránh vật và dẫn đường trong môi trường không biết trước [11], [12], [13], [14], [15]. Bộ điều mờ cho phép xác định mối quan hệ giữa tham số của luật điều khiển và tốc độ đáp ứng mà không cần mô hình cụ thể làm cho hệ thống điều khiển ổn định có cấu trúc đơn giản, dễ thực thi và khắc phục được hạn chế của bộ điều khiển ổn định thông thường.

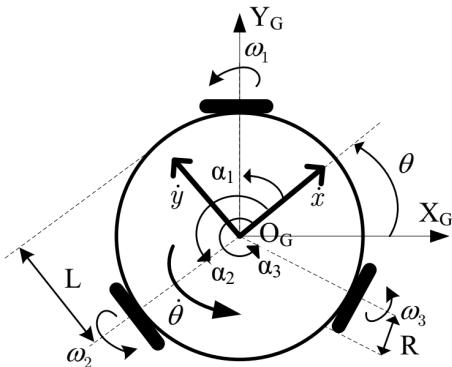
Cấu trúc bài báo được trình bày thành bốn phần. Trong đó mô hình hệ thống được mô tả chi tiết trong phần II. Phần III đánh giá hiệu quả của hệ thống đề xuất thông qua chương trình mô phỏng. Một số kết luận và hướng phát triển tiếp theo được đề cập trong phần IV.

II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

A. Mô hình robot di động đa hướng

Robot di động đa hướng có cấu trúc 3 bánh đặt cách đều nhau trên đế hình tròn của robot, cách đều nhau 120° và hoạt động độc lập. Mỗi bánh có cấu tạo dạng con lăn để vừa có thể di chuyển theo chiều ngang vừa di chuyển theo hướng thẳng. Hình 1 thể hiện mô hình

robot di động đa hướng, trong đó $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ (rad/s) là vận tốc góc của các bánh; \dot{x}, \dot{y} (m/s) là vận tốc tuyến tính của robot theo trục X và Y; $\dot{\theta}$ (rad/s) là vận tốc góc của robot; R là bán kính của bánh và L là khoảng cách từ tâm robot tới bánh. Phương trình động học thuận của



Hình 1: Biểu diễn hình học robot di động đa hướng.

robot được biểu diễn dưới dạng ma trận như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{R}{3} \begin{bmatrix} \sin(\alpha_1) & \sin(\alpha_2) & \sin(\alpha_3) \\ -\cos(\alpha_1) & -\cos(\alpha_2) & -\cos(\alpha_3) \\ -1/L & -1/L & -1/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

hay có thể biểu diễn rút gọn như sau:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Phương trình động học ngược là:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

B. Điều khiển ổn định tiệm cận

Yêu cầu của điều khiển ổn định tiệm cận robot từ vị trí bất kỳ (x, y, θ) tới vị trí đích (x_d, y_d, θ_d) . Ứng dụng của điều khiển ổn định này liên quan tới các yêu cầu về điều khiển ổn định tiệm - điểm hay các bài toán bám đường. Đặt (x_e, y_e, θ_e) thể hiện sự sai lệch giữa điểm hiện tại và điểm đích:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ \theta_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

Nếu coi vị trí đích (x_d, y_d, θ_d) là $(0, 0, 0)$ thì phương trình (3) trở thành:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Để điều khiển robot ổn định tiệm cận về vị trí đích, tương ứng với (x_e, y_e, θ_e) tiệm cận về $(0, 0, 0)$, thì hàm Lyapunov V được chọn như sau:

$$V = \frac{1}{2}x_e^2 + \frac{1}{2}y_e^2 + \frac{1}{2}\theta_e^2 > 0 \quad (6)$$

Chọn luật điều khiển đối với các vận tốc góc là bộ điều khiển tỷ lệ:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = M^{-1}(-K_p) \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{bmatrix} \quad (7)$$

Thay (7) vào (5) thu được:

$$\dot{V} = [x_e \ y_e \ \theta_e] \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = -(K_p)((x_e)^2 + (y_e)^2 + (\theta_e)^2) \quad (8)$$

Như vậy, với luật điều khiển (7) thì $\dot{V} < 0$, $\forall K_p > 0$ nên (x_e, y_e, θ_e) ổn định tiệm cận về đích.

C. Lựa chọn hệ số của bộ điều khiển

Luật điều khiển (7) là điều khiển tỷ lệ với hệ số $K_p > 0$. Giá trị K_p không chỉ ảnh hưởng tới tính ổn định của hệ thống mà còn ảnh hưởng tới tốc độ của đáp ứng của hệ thống và bị giới hạn bởi vận tốc góc ω_i của mỗi bánh. Trong trường hợp vận tốc góc của 3 bánh có thông số như nhau, từ (7) và (1) suy ra giới hạn của K_p là $[0, \omega_{max}/(3x_{e_{max}})]$.

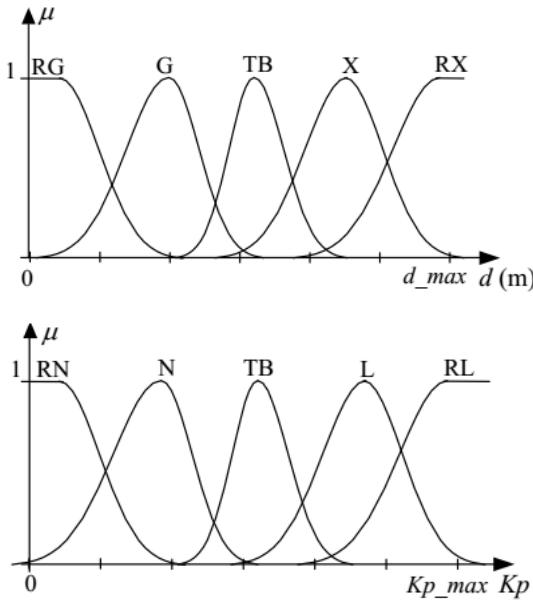
Bộ điều khiển mờ được sử dụng để lựa chọn giá trị K_p tốt nhất trong giới hạn trên. Cơ sở sử dụng điều khiển mờ là dựa trên mối quan hệ giữa tốc độ đáp ứng, khoảng cách tới đích và sự ổn định. Việc thay đổi giá trị K_p theo khoảng cách sẽ làm tăng hiệu quả đáp ứng và sự ổn định của hệ thống so với việc chỉ chỉ định giá trị $K_p > 0$ cố định thỏa mãn điều kiện ổn định tiệm cận (8).

Bộ điều khiển mờ với biến lối vào là khoảng cách giữa vị trí hiện tại của robot và vị trí đích $d = \sqrt{(x_e)^2 + (y_e)^2}$, biến lối ra là K_p . Giá trị các biến vào/ra được định nghĩa như sau:

- $d =$ Rất Gần (RG), Gần (G), Trung Bình (TB), Xa (X), Rất Xa (RX)
- $K_p =$ Rất Nhỏ (RN), Nhỏ (N), Trung Bình (TB), Lớn (L), Rất Lớn (RL)

Hàm thuộc của các tập mờ của biến vào/ra có dạng hàm Gauss f_G và Sigmoid f_S được thể hiện trên Hình 2

$$f_G = e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, f_S = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (9)$$



Hình 2: Hàm thuộc các tập mờ của biến vào/ra.

Luật điều khiển mờ được xây dựng theo nguyên tắc sao cho tốc độ đáp ứng tốt nhất tùy thuộc vào vị trí của robot:

- R_1 : Nếu d là Rất Gần thì K_p là Rất Nhỏ
- R_2 : Nếu d là Gần thì K_p là Nhỏ
- R_3 : Nếu d là Trung Bình thì K_p là Trung Bình
- R_4 : Nếu d là Xa thì K_p là Lớn
- R_5 : Nếu d là Rất Xa thì K_p là Rất Lớn

Giá trị của mỗi luật R_k ở trên được xác định theo quy tắc hợp thành Min, ví dụ đối với luật thứ nhất như sau:

$$\begin{aligned} \mu_{R_k}(k) &= \min(H, \mu_{RN}(k)) \\ H &= \min(\mu_{RG}(k)) \end{aligned} \quad (10)$$

Giá trị hợp thành của các luật điều khiển được xác định bởi quy tắc Max:

$$\mu_R(k) = \max\{\mu_{R_1}(k), \mu_{R_2}(k), \mu_{R_3}(k), \mu_{R_4}(k), \mu_{R_5}(k)\} \quad (11)$$

Giải mờ theo phương pháp điểm trọng tâm để xác định giá trị K_p theo công thức (12), trong đó x_i là miền giá trị thứ i và $\mu(x_i)$ là giá trị hàm thuộc của điểm i tương

ứng:

$$K_p = \frac{\sum x_i \mu_R(x_i)}{\sum \mu_R(x_i)} \quad (12)$$

III. ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG

Chương trình mô phỏng trên Matlab để đánh giá hiệu quả của hệ thống điều khiển ổn định tiệm cận cho robot di động đa hướng với hệ số của luật điều khiển được xác định bằng điều khiển mờ. Hệ thống hoạt động trong một số trường hợp khác nhau.

A. Cài đặt hệ thống

Mô hình của robot di động đa hướng được thiết lập với các thông số như sau:

- Mô hình động học thuận và ngược như công thức (2) và (3)
- Ba bánh xe giống nhau, đặt cách nhau 120° , bán kính $R = 0.1$ (m)
- Khoảng cách từ tâm robot tới mỗi bánh xe là $L = 0.4$ (m)
- Thời gian lấy mẫu $T_s = 100$ (ms)
- Vận tốc góc cực đại $\omega_{max} = 15$ (rad/s)
- Khoảng cách cực đại giữa điểm đầu và đích là $x_e = 10$ (m)
- Giới hạn của $K_p = [0, 0.5]$
- Miền xác định biến vào/ra của bộ điều khiển mờ: $dist = [0, 12]$ (m), $K_p = [0, 0.5]$

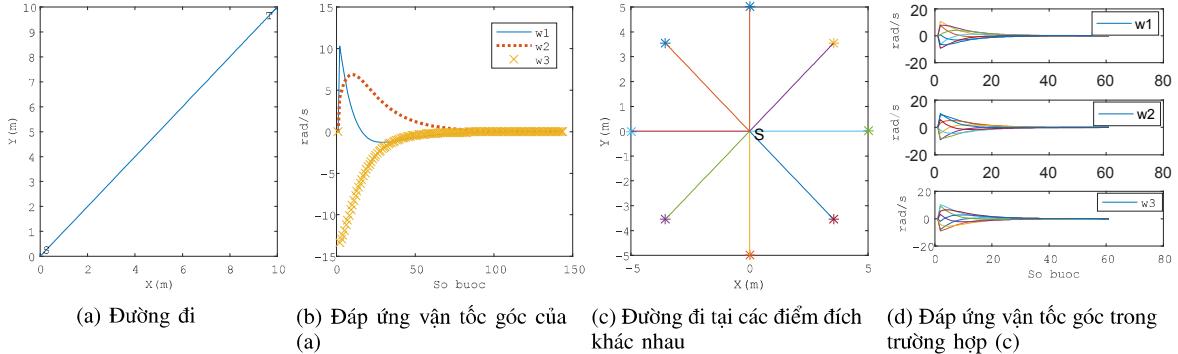
B. Mô phỏng

1) Điều khiển ổn định tiệm cận điểm - điểm

Trường hợp này đánh giá luật điều khiển ổn định tiệm cận (7). Robot xuất phát tại vị trí S với cấu hình $(0, 0, 90^\circ)$, kết thúc tại vị trí đích T $(10, 10, 0^\circ)$, $K_p = 0.5$. Hình 3(a) thể hiện đường đi của robot từ vị trí S tới T. Kết quả cho thấy robot đi theo đường thẳng, dạng đường đi ngắn nhất, tiệm cận ổn định tới T. Đáp ứng vận tốc góc (Hình 3(b)) của mỗi bánh $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ phù hợp với hoạt động của robot và nằm trong giới hạn thiết lập. Hình 3(c) là trường hợp mở rộng khi robot xuất phát tại một vị trí S $(0, 0, 90^\circ)$ tới đích tại các điểm nằm trên đường tròn bán kính 5 (m) và đáp ứng vận tốc góc tương ứng với các trường hợp các điểm đích khác nhau. Kết quả cho thấy với luật điều khiển ở (7), thì robot đều có khả năng tiệm cận về các vị trí đích khác nhau.

2) Đáp ứng với các giá trị khác nhau của K_p

Robot hoạt động như điều kiện ở trường hợp điều khiển ổn định điểm - điểm, xuất phát từ S $(0, 0, 90^\circ)$ và kết thúc tới T $(10, 10, 0^\circ)$ theo luật (7) với các giá trị lựa chọn K_p thay đổi trong khoảng $[0, K_{p_{max}}]$. Trong trường hợp này K_p thay đổi từ $[0, 0.5]$ phụ thuộc vào tham số thiết lập trong Phần (III-A) với mỗi bước tăng



Hình 3: Điều khiển ổn định điểm - điểm

0.05. Kết quả thu được thể hiện trên Hình 4 theo các trục X, Y và θ . Kết quả cho thấy giá trị của K_p ảnh hưởng tới tốc độ đáp ứng của hệ thống và việc lựa chọn giá trị nào để hệ thống hoạt động hiệu quả là vấn đề cần quan tâm.

3) Lựa chọn giá trị K_p bằng điều khiển mở

Yêu cầu hoạt động của robot trong trường hợp này giống như trường hợp (1) khi robot xuất phát từ S (0, 0, 90°) và kết thúc tới T (10, 10, 0°) theo luật (7) với giá trị lựa chọn K_p bằng bộ điều khiển mờ như được thiết lập trong Phần (II-C). Hình 5(a) là đáp ứng của hệ thống theo trục X, Y và θ. Đáp ứng theo trục X và Y gần như trùng nhau do robot di theo đường thẳng ổn định tiệm cận tới đích (10, 10). Đáp ứng góc hướng robot θ thay đổi theo đúng hoạt động bắt đầu từ góc khởi tạo 90°, hay $\pi/2$ (rad), tới góc đích 0°. Hình 5(b) thể hiện giá trị của K_p thay đổi theo mỗi bước dịch chuyển của khoảng cách từ vị trí hiện tại tới vị trí đích. Từ giá trị K_p cho thấy sự thay đổi theo hướng tại thời điểm ban đầu khi khoảng cách robot còn xa đích thì K_p lớn để tốc độ đáp ứng nhanh, khi khoảng cách robot gần tới đích thì K_p giảm dần và hội tụ tới giá trị không đổi về đích để đảm bảo ổn định và an toàn cho robot. Như vậy bộ điều khiển mờ cho phép K_p thay đổi thích nghi với khoảng cách tới đích. Phương thức điều khiển này hiệu quả hơn so với trường hợp phải lựa chọn một giá trị K_p cố định trong dải giới hạn như trường hợp (3).

4) So sánh K_p khi sử dụng và không sử dụng mờ

Ưu điểm của phương pháp điều khiển thích nghi giá trị của K_p theo khoảng cách tới đích sẽ được kiểm chứng tiếp trong trường hợp so sánh luật điều khiển ổn định tiêm cận (7) với giá trị K_p cố định và K_p thay đổi bằng bộ điều khiển mờ. Robot xuất phát từ S (0, 0, 90⁰) và kết thúc tới T (10, 10, 0⁰). Hình 6 thể hiện đáp ứng theo trục X, Y và θ với giá trị K_p cố định $K_p = K_{min}$, K_p

= K_{max} và K_{fuzzy} thay đổi theo bộ điều khiển mờ. Cả ba đáp ứng theo trục X, Y và θ cho thấy với K_{max} hệ thống đáp ứng nhanh, K_{min} đáp ứng chậm hơn. Trong khi đó K_{fuzzy} vừa cho đáp ứng gần với đáp ứng của K_{max} vừa thay đổi thích ứng phù hợp với khoảng cách tới đích.

IV. KẾT LUẬN

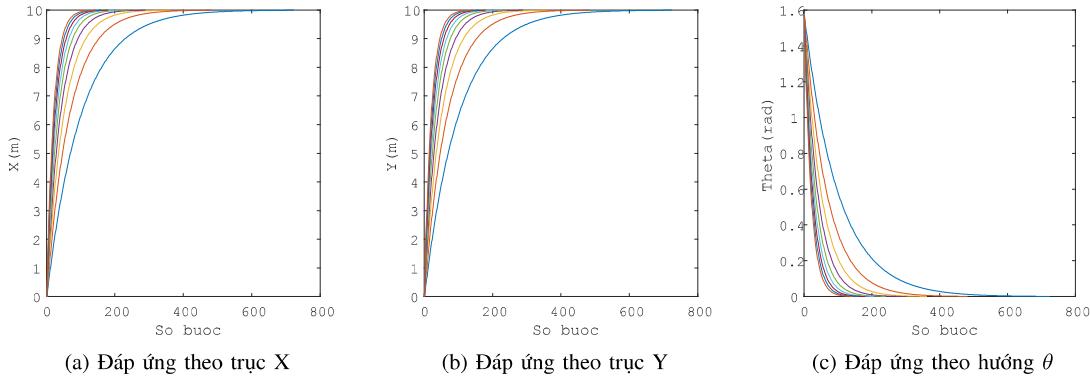
Bài báo đề xuất luật điều khiển ổn định tiêm cho robot di động 3 bánh đa hướng theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov và điều khiển mờ. Trong đó tham số của luật điều khiển thay đổi thích nghi với trạng thái robot thông qua bộ điều khiển mờ. Luật điều khiển đề xuất cho phép xác định giá trị tối ưu của tham số, cải thiện đáp ứng của hệ thống. Hiệu quả hoạt động của phương pháp đề xuất đã được kiểm chứng thông qua các hoạt động trong các trường hợp khác nhau và đánh giá so sánh với luật điều khiển thông thường. Kết quả nghiên cứu sẽ được áp dụng trong các hệ thống bám đường hay dẫn đường trong môi trường chưa biết trước.

LỜI CẢM ƠN

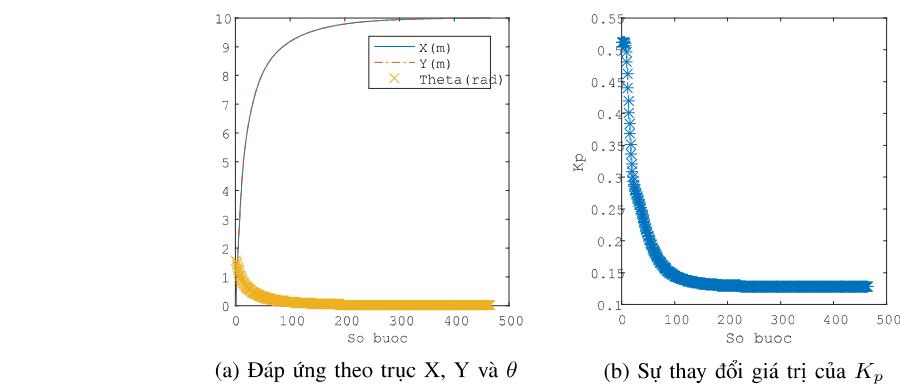
Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà Nội theo đề tài mã số CN19.07

TÀI LIỆU THAM KHẢO

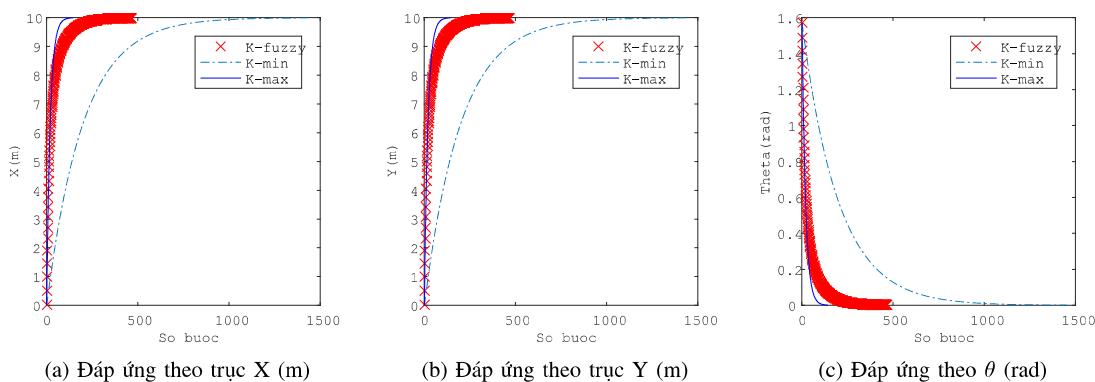
- [1] Roland Siegwart, Illah R Nourbakhsh, "Introduction to Autonomous Mobile Robot", MIT Press, London, England, 2004
 - [2] Watanabe K., Shiraishi Y., Tzafestas S. G., Tang J., and Fukuda T., 1998. "Feedback Control of an Omnidirectional Autonomous Platform for Mobile Service Robots", Journal of Intelligent and Robotic Systems, 22(3-4), 315-330.
 - [3] Liu Y., Zhu J.J., Williams II R.L., Wu J., 2008. "Omnidirectional mobile robot controller based on trajectory linearization" Robotics and Autonomous Systems 56, 461-479
 - [4] Glad & Ljung "Lyapunov Stability", Lecture note



Hình 4: Đáp ứng với các giá trị khác nhau của K_p



Hình 5: Lựa chọn giá trị của K_p bằng bộ điều khiển mờ



Hình 6: So sánh K_p khi dùng và không dùng bộ điều khiển mờ

- [5] Ching-Chih Tsai*, Li-Bin Jiang, Tai-Yu Wang, Tung-Sheng Wang, "Kinematics Control of an Omnidirectional Mobile Robot", roceedings of 2005 CACS Automatic Control Conference, Taiwan, Nov 18-19, 2005
- [6] Xiang Li, Andreas Zell, "Motion Control of an omnidirectional mobile robot", Departmant of Computer Architecture, University of Tubingen, Sand 1, 72076 Tubingen, Germany
- [7] Chao Ren, Yi Sun, and Shugen Ma, "Passivity-based control of an omnidirectional mobile robot", Robotics and Biomimetics, Springer, Doi 10.1186/s40638-016-0037-z
- [8] Lofti A. Zadeh "Fuzzy Logic", Journal Computer, Vol 21, Issue 4, April 1988, page 83-93
- [9] Phan Xuân Minh, Nguyễn Doãn Phước, "Lý thuyết điều khiển mờ", Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật, 2006
- [10] D. Drianc, H. Hellendoorn, M. Reinfrank, "An introduction to Fuzzy Control", Springer, 2010
- [11] T.Takeuchi, Y.Nagai and N. Enomoto, "Fuzzy control of a mobile robot for obstacle avoidance", Inform, Sci, vol.43, pp. 231-248, 1988
- [12] J. Yen and N.Pfluger, "Path planning and excution using fuzzy logic", in AIAA Guidance, Navigation and Control Conf, vol 3, New Orleans,LA, Aug.1991, 1691-1998
- [13] Anmin Zhu and Simon X.Yang, "Neurofuzzybased approach to mobile robot navigation in unknown environments", IEEE transactions on systems, man and cybernetics, part c: application and reviews, vol 37, no 4, july 2007
- [14] Xiaoyu Yang, Mehrdad Moallem, and Rajni V.Patel, "A layered goal-oriented fuzzy motion planning strategy for mobile robot navigation", IEEE Transactions on systems, Vol 35.No 6 December 2005
- [15] Petru Rusu, Emil M. Petriu, Fellow, IEEE, Thom E. Whalen, Aurel Cornell, and Hans J. W. Spoelder, "Behavior-Based Neuro-Fuzzy Controller for Mobile Robot Navigation", IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol 52, No 4, August 2003