

HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN ỔN ĐỊNH ROBOT DI ĐỘNG SỬ DỤNG ĐIỀU KHIỂN MỜ

Trần Như Chí, Chu Thị Phương Dung, Nguyễn Thị Thanh Vân
Khoa Điện tử Viễn thông
Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội
Email: trannhuchi@gmail.com, dungctp@vnu.edu.vn, vanntt@vnu.edu.vn

Abstract— Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất mô hình hệ thống điều khiển chuyển động ổn định cho robot di động hai bánh vi sai với tham số của luật điều khiển được lựa chọn bằng bộ điều khiển mờ. Hệ thống đề xuất cho phép dễ dàng lựa chọn tham số của luật điều khiển dựa trên trạng thái của robot, thu được quỹ đạo đi tốt nhất và đảm bảo tính ổn định của hệ thống điều khiển. Hiệu quả hoạt động của hệ thống đề xuất được chứng minh qua các trường hợp so sánh với phương pháp lựa chọn tham số theo cách thông thường.

Keywords – robot di động, điều khiển ổn định, Lyapunov, điều khiển mờ.

I. GIỚI THIỆU

Điều khiển chuyển động ổn định liên quan đến vấn đề điều khiển robot di động từ cấu hình (vị trí và góc) bất kỳ ổn định tới đích trong điều kiện môi trường không có chướng ngại vật [1]. Đây là một trong các bài toán quan trọng liên quan đến hoạt động tự quản trị của robot di động hay vấn đề dẫn đường trong robot di động. Vấn đề này đã và đang được quan tâm nghiên cứu trong lĩnh vực Robotics.

Đối với các hệ thống phi tuyến thì các luật điều khiển ổn định sử dụng tiêu chuẩn ổn định Lyapunov. Tiêu chuẩn Lyapunov liên quan đến việc xác định hàm Lyapunov [2]. Luật điều khiển được lựa chọn sao cho hàm Lyapunov luôn dương và đạo hàm luôn âm. Đối với các robot di động có cơ cấu di chuyển bánh xe thì biến điều khiển là các biến vận tốc tuyến tính và vận tốc góc của robot hay vận tốc góc riêng biệt của từng bánh xe. Một số các nghiên cứu đã đề xuất lựa chọn luật điều khiển chuyển động ổn định thỏa mãn tiêu chuẩn Lyapunov cho robot di động hai bánh và bốn bánh [3-5].

Các luật điều khiển chuyển động ổn định của các nghiên cứu đề xuất ở trên đều liên quan các biến điều khiển và tham số của luật điều khiển. Thông thường các tham số có điều kiện nhất định để luật điều khiển thỏa mãn tiêu chuẩn ổn định Lyapunov. Tuy nhiên, trong các nghiên cứu thì giá trị của các tham số này chỉ được chỉ ra ở điều kiện chung nhất, ví dụ lớn hơn không, sau đó sẽ được lựa chọn một cách chung nhất. Trong khi sự ảnh hưởng của các tham số tới dạng đường đi hay thời gian tới đích lại một trong những vấn đề quan trọng, cần được quan tâm đánh giá. Các nghiên cứu cũng chưa đề cập tới phương pháp xác định giới hạn cụ thể của các tham số. Trong nhiều trường hợp, việc lựa chọn tham số theo điều kiện chung mà không xét tới giới hạn có thể dẫn đến dạng đi đường

không tối ưu, thời gian lâu và thậm chí có trường hợp không về được đích.

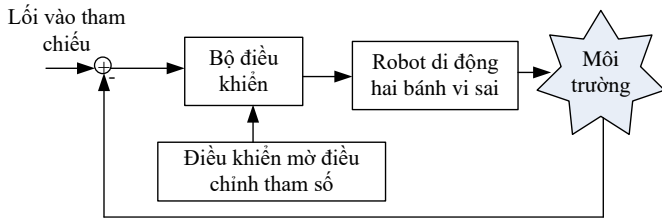
Để khắc phục hạn chế của việc lựa chọn các tham số trong luật điều khiển chuyển động ổn định, bài báo đề xuất một hệ thống điều khiển chuyển động ổn định trong đó sử dụng bộ điều khiển mờ để xác định tham số của luật điều khiển. Hệ thống bao gồm bộ điều khiển để xác định điều khiển theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov và giới hạn của các tham số trong luật điều khiển. Bộ điều khiển mờ dựa trên thông tin về lỗi vào tham chiếu để xác định giá trị tham số của luật điều khiển. Robot di động trong hệ thống là một loại robot di động phổ biến trong các ứng dụng có cấu trúc di chuyển là hai bánh vi sai dẫn động và một bánh điều hướng.

Sự khác biệt của hệ thống điều khiển chuyển động ổn định đề xuất so với các hệ thống điều khiển chuyển động ổn định thông thường ở phương pháp sử dụng bộ điều khiển mờ. Bộ điều khiển mờ được xây dựng dựa trên lý thuyết về logic mờ [6-7] thích hợp với những hệ thống chưa đầy đủ thông tin, hoặc không có mô hình cụ thể của đối tượng, hoặc môi trường hoạt động có nhiễu. Bộ điều khiển mờ được sử dụng rất nhiều trong các ứng dụng của robot di động liên quan đến vấn đề tránh vật, lập kế hoạch đường đi và dẫn đường tự động [8-12]. Việc xác định được mối quan hệ giữa tham số của luật điều khiển với biến trạng thái của hệ thống mà không cần mô hình cụ thể của bộ điều khiển đã làm cho hệ thống điều khiển chuyển động ổn định đề xuất có cấu trúc đơn giản, dễ thực thi và mang lại hiệu quả hơn so hệ thống điều khiển thông thường.

Cấu trúc bài báo được chia thành bốn phần. Mô hình hệ thống đề xuất được mô tả chi tiết trong phần II. Phần III là một số trường hợp mô phỏng để đánh giá hiệu quả hoạt động của hệ thống đề xuất. Một số kết luận và hướng phát triển tiếp theo được đề cập trong phần IV.

II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

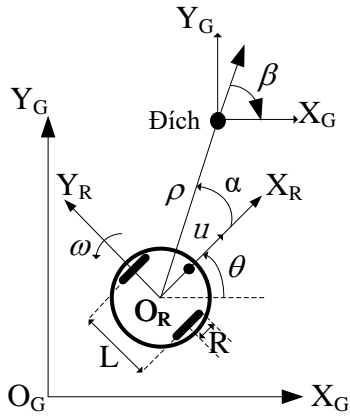
Hệ thống điều khiển chuyển động ổn định cho robot di động hai bánh vi sai được mô tả như Hình 1 dưới đây. Hệ thống bao gồm bộ điều khiển đưa ra luật điều khiển ổn định, tham số của luật điều khiển được điều khiển bởi bộ điều khiển mờ. Robot di động được lựa chọn là robot di động phổ biến trong các ứng dụng hiện nay với cấu trúc hai bánh vi sai. Chi tiết từng phần được mô tả trong các mục tiếp theo của phần này.



Hình 1: Mô hình hệ thống điều khiển chuyển động ổn định

A. Mô hình động học robot di động hai bánh vi sai

Robot di động hai bánh vi sai bao gồm hai bánh chuyển động và một bánh dẫn động. Hoạt động vi sai là sự chênh lệch tốc độ quay giữa hai bánh xe làm robot chuyển động theo một cung tròn có tâm nằm trên trục bánh xe. Mô hình hình học của robot di động hai bánh vi sai trong hệ tọa độ Đề các được thể hiện như Hình 2.



Hình 2: Mô hình robot di động hai bánh vi sai

Trong đó (X_G, Y_G) là hệ tọa độ toàn cục, (X_R, Y_R) là hệ tọa độ gắn với robot. Tư thế của robot được biểu diễn thông qua biến trạng thái (x, y, θ) , với (x, y) là vị trí và θ là góc hướng của robot so với hệ tọa độ toàn cục. Hai biến vận tốc liên quan đến chuyển động của robot là vận tốc tuyến tính u và vận tốc góc ω . Mô hình động học biểu diễn sự thay đổi trạng thái của robot thông qua biến lối vào vận tốc như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = u(t) \cos(\theta(t)) \\ \dot{y}(t) = u(t) \sin(\theta(t)) \\ \dot{\theta}(t) = \omega(t) \end{cases} \quad (1)$$

Mô hình (1) với ràng buộc không khả tích, vì thế khi điều khiển chuyển động ổn định từ một điểm bất kỳ tới một điểm đích, mô hình (1) sử dụng thêm các biến: $\rho > 0$ là khoảng cách từ vị trí hiện tại tại (x_k, y_k) tới vị trí đích (x_d, y_d) của robot; α là góc lệch giữa véc tơ khoảng cách và véc tơ hướng; β là góc hướng của robot khi về đích.

$$\rho = \sqrt{(x_k - x_d)^2 + (y_k - y_d)^2} \quad (2)$$

$$\alpha_k = \arctan(y_d - y_k, x_d - x_k) - \theta_k \quad (3)$$

$$\beta = -\alpha - \theta \quad (4)$$

Với giới hạn của $\alpha \in [-\pi/2, \pi/2]$, tương ứng với robot luôn đi theo chiều tiến, thì phương trình (1) liên quan tới các biến mới sẽ có dạng như sau:

$$\begin{cases} \dot{\rho} = -u \cos(\alpha) \\ \dot{\alpha} = (u \sin(\alpha) / \rho) - \omega \\ \dot{\beta} = (u \sin(\alpha) / \rho) \end{cases} \quad (5)$$

B. Điều khiển chuyển động ổn định theo tiêu chuẩn Lyapunov

Để điều khiển chuyển động ổn định robot từ vị trí bất kỳ tới đích thì theo tiêu chuẩn ổn định Lyapunov cần chọn hàm Lyapunov V thỏa mãn điều kiện:

$$\begin{cases} V(\mathbf{x}) > 0 \\ \dot{V}(\mathbf{x}) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

Theo mô hình của (5) và thỏa mãn điều kiện đầu tiên của (6), hàm Lyapunov được chọn như sau:

$$V(\rho, \alpha, \beta) = \frac{1}{2} \rho^2 + \frac{1}{2} \alpha^2 + \frac{1}{2} h \beta^2 > 0 \quad (7)$$

với $h > 0$. Để thỏa mãn điều kiện thứ 2 của (6), luật điều khiển cho vận tốc tuyến tính và vận tốc góc được lựa chọn tùy thuộc vào quan hệ giữa vận tốc, khoảng cách và góc lệch như dưới đây:

$$\begin{aligned} u &= \gamma \tanh(\rho) \cos(\alpha) \\ \omega &= k\alpha + \gamma \frac{\sin(\alpha) \tanh(\rho)}{\alpha \rho} \cos(\alpha) [\alpha + h\beta] \end{aligned} \quad (8)$$

với $\gamma > 0$ và $k > 0$. Khi đó thành phần

$$\dot{V}(\rho, \alpha, \beta) = \rho \dot{\rho} + \alpha \dot{\alpha} + \beta \dot{\beta} \quad (9)$$

Trong đó

$$\begin{aligned} \rho \dot{\rho} &= -\rho u \cos(\alpha) = -\rho \gamma \tanh(\rho) \cos^2(\alpha) \leq 0 \\ \alpha \dot{\alpha} + \beta \dot{\beta} &= \alpha((u \sin(\alpha) / \rho) - \omega) + \beta(u \sin(\alpha) / \rho) \\ &= -k\alpha^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Như vậy điều kiện thứ 2 của (6) được thỏa mãn.

C. Xác định giới hạn các tham số của luật điều khiển

Luật điều khiển được chọn ở (8) thỏa mãn điều kiện (6) với các tham số $h > 0$, $\gamma > 0$ và $k > 0$. Giá trị của các tham số này ảnh hưởng tới dạng đường chuyển động của robot. Trên thực tế việc lựa chọn giá trị của các tham số sao cho phù hợp với giới hạn về vận tốc của robot.

Giả sử giới hạn vận tốc tuyến tính và vận tốc góc của robot là u_{\max} và ω_{\max} . Từ phương trình (8) xác định được giới hạn của vận tốc như sau:

$$\begin{cases} |u_{\max}| = \gamma \\ |\omega_{\max}| = k \frac{\pi}{2} + \gamma \left(\frac{\pi}{2} + h\pi \right) \end{cases} \quad (11)$$

Như vậy giới hạn γ_{\max} của luật điều khiển vận tốc tuyến tính được chọn dựa vào giới hạn của u_{\max} . Phương thức lựa chọn này tương đương với điều khiển robot tới đích với vận tốc nhanh nhất. Giới hạn của k và h phụ thuộc vào giới hạn của ω_{\max} như sau:

$$\begin{cases} k = \frac{2}{\pi} \omega_{\max} - \gamma(1 + 2h) \\ h = \frac{\omega_{\max}}{\gamma\pi} - \frac{k}{2\gamma} - \frac{1}{2} \end{cases} \quad (12)$$

Kết hợp với điều kiện ban đầu $h > 0, k > 0$ thì giới hạn của k và h được xác định bởi:

$$\begin{aligned} 0 < h < \frac{\omega_{\max}}{\lambda\pi} - \frac{1}{2} \\ 0 < k < \frac{2\omega_{\max}}{\pi} - \gamma \end{aligned} \quad (13)$$

Như vậy việc lựa chọn đồng thời tham số k và h cho vận tốc góc ω ở phương trình (8) theo cách thức là có thể lựa chọn một tham số trước rồi suy ra giá trị của tham số còn lại theo quan hệ trong phương trình (12) và đảm bảo giới hạn ở điều kiện (13). Một phương pháp lựa chọn tham số hiệu quả được đề xuất như sau:

- Dựa trên thành phần $k\alpha$ của luật điều khiển vận tốc góc ω ở phương trình (8). Chọn k tùy thuộc vào giá trị của α sao cho robot luôn hướng đích. Phương thức này sẽ cho quãng đường di chuyển tới đích ngắn nhất.
- Việc lựa chọn k tùy thuộc vào giá trị của α được thực hiện trên bộ điều khiển mờ.

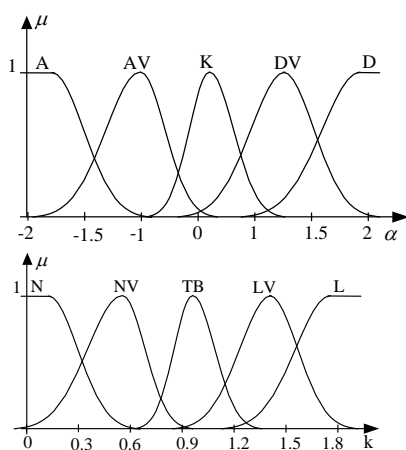
D. Bộ điều khiển mờ xác định tham số của luật điều khiển

Bộ điều khiển mờ bao gồm một biến lối vào là giá trị α và một biến lối ra k . Tập giá trị của các biến là $\alpha \in [-\pi/2, \pi/2]$, $k \in [0, 2\omega_{\max} / \pi - \gamma]$. Biến ngôn ngữ cho các biến lối vào/ra được lựa chọn như sau:

- α : Âm (A), Âm Vừa (AV), Không (K), Dương Vừa (DV), Dương (D)
- k : Nhỏ (N), Nhỏ Vừa (NV), Trung Bình (TB), Lớn Vừa (LV), Lớn (L)

Dạng hàm thuộc của các tập mờ của α và k được lựa chọn là hàm dạng Sigmoid - f_S ($\mu_A, \mu_D, \mu_N, \mu_L$), Gauss - f_G ($\mu_{AV}, \mu_K, \mu_{DV}, \mu_{NV}, \mu_{TB}, \mu_{LV}$) có công thức tương ứng (14) và dạng hàm như thể hiện trên Hình 3. Các tham số (a, b, c, d, m, σ) có các giá trị riêng biệt cho từng hàm thuộc.

$$f_S = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}, \quad f_G = e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (14)$$



Hình 3: Hàm thuộc của các biến α và k .

Luật mờ được xây dựng theo nguyên tắc sao cho robot điều chỉnh góc α luôn hướng đích:

- Nếu α Âm thì k Nhỏ
- Nếu α Âm Vừa thì k Nhỏ Vừa
- Nếu α Không thì k Trung Bình
- Nếu α Dương Vừa thì k Lớn Vừa
- Nếu α Dương thì k Lớn

Giá trị của mỗi luật điều khiển R_k được xác định theo luật min, ví dụ luật thứ 1 như sau:

$$\begin{aligned} \mu_{R_1}(k) &= \min\{H, \mu_N(k)\} \\ H &= \min\{\mu_A(k)\} \end{aligned} \quad (15)$$

Kết quả của 5 luật điều khiển được xác định theo luật hợp thành max-min:

$$\mu_R(k) = \max\{\mu_{R_1}(k), \mu_{R_2}(k), \mu_{R_3}(k), \mu_{R_4}(k), \mu_{R_5}(k)\} \quad (16)$$

Giải mờ theo phương pháp điểm trọng tâm để xác định hệ số k theo công thức (17) dưới đây, trong đó x_i là giá trị miền thứ i và $\mu(x_i)$ là giá trị hàm thuộc của điểm i tương ứng.

$$k = \frac{\sum x_i \mu_R(x_i)}{\sum \mu_R(x_i)} \quad (17)$$

III. ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG

Hiệu quả của hệ thống điều khiển chuyển động ổn định robot di động hai bánh vi sai đề xuất được đánh giá thông qua chương trình mô phỏng viết bằng ngôn ngữ Matlab.

A. Cài đặt hệ thống

Mô hình của robot di động hai bánh vi sai được thiết lập với các tham số như sau:

- Mô hình động học theo phương trình (1) và các điều khiển chuyển động theo phương trình (5)
- Đường kính bánh xe: $R = 0.05$ m
- Khoảng cách giữa hai bánh: $L = 0.6$ m
- Thời gian lấy mẫu: $T_s = 100$ ms
- Vận tốc tuyến tính cực đại: $u_{\max} = 0.5$ m/s
- Vận tốc góc cực đại $\omega_{\max} = 6$ rad/s
- Tham số $\gamma = 0.5$
- Giới hạn tham số $h = [1.5 \ 3]$, $k = [0.2967 \ 1.8197]$

Các tham số của bộ điều khiển mờ với:

- $\alpha \in [-\pi/2, \pi/2]$
- $k = [0.2967 \ 1.8197]$
- Các hàm thuộc, luật điều khiển, giải mờ theo mục D phần II.

B. Mô phỏng hệ thống

Một số trường hợp mô phỏng để đánh giá hiệu quả của hệ thống điều khiển chuyển động ổn định. Robot xuất phát tại vị trí bất kỳ và tới đích tại điểm (0,0). Hình 4 thể hiện kết quả hệ thống thực hiện điều khiển chuyển động robot từ vị trí (-8.5, -8.5) với các hướng xuất phát khác nhau 0°, 90°, 270° tới vị trí đích (0,0) so sánh giữa hai trường hợp sau:

- Trường hợp hệ thống điều khiển chuyển động ổn định với các tham số của luật điều khiển được chọn theo cách thông thường. Có nghĩa là chọn giá trị của

k bất kỳ trong giới hạn [0.2967 1.8197] và giá trị tương ứng của h được xác định theo công thức (12). Đánh giá tất cả các khả năng có thể của k với mỗi bước nhảy là 0,05. Kết quả thu được một tập hợp các đường đi của robot có các dạng khác nhau theo tham số k và h. Chương trình tính chiều dài quãng đường đi tương ứng, quãng đường nhỏ nhất D_{min} , quãng đường lớn nhất D_{max} , và quãng đường trung bình D_{tb} .

- Trường hợp hệ thống điều khiển chuyển động ổn định với tham số k được chọn theo bộ điều khiển mờ và giá trị tương ứng của h được xác định theo công thức (12). Chương trình tính chiều dài quãng đường D của robot.

Kết quả ở Hình 4 cho thấy, nếu sử dụng lựa chọn tham số theo cách thông thường thì có thể thu được các dạng đường đi bất kỳ. Bảng 1 thể hiện kết quả so sánh độ lệch giữa giá trị D_{min} trong tập hợp các giá trị của k và h với khoảng cách D với tham số k được lựa chọn bằng bộ điều khiển mờ. Giá trị độ lệch thu được trong cả ba trường hợp đường đi khác nhau cho đều có kết quả rất nhỏ, trung bình dưới 0.9 %. Điều này chứng tỏ hiệu quả của bộ điều khiển mờ sử dụng để điều chỉnh tham số k.

Bảng 1: So sánh độ lệch đường đi

Trường hợp	Độ lệch so với D_{min} (m)	Độ lệch so với D_{min} (%)
1	0.1081	0.89
2	0.0471	0.38
3	0.1089	0.87

Một trường hợp khác để so sánh hiệu quả của hệ thống điều khiển ổn định đề xuất với hệ thống thông thường trong Hình 5. Trường hợp này xét hệ thống thông thường lựa chọn tham số ngoài giới hạn của k và h sẽ dẫn đến không thỏa mãn điều kiện ổn định, dạng đường đi không tối ưu, hoặc robot không về được đích. Trong khi sử dụng bộ điều khiển mờ để lựa chọn tham số k phụ thuộc vào góc lệch α luôn cho kết quả đường đi ổn định, quãng đường tốt nhất và không rơi vào các trường hợp ngoài giới hạn của tham số.

Hình 6 là ứng dụng hệ thống điều khiển chuyển động ổn định đối với các trường hợp vị trí xuất phát khác nhau trên vòng tròn. Kết quả đường đi ở Hình 6(a) cho thấy robot đều chuyển động ổn định về đích. Giá trị k được tạo ra từ bộ điều khiển mờ và giá trị h tương ứng theo phương trình (12) được trình bày ở Bảng 2. Trong tất cả các trường hợp thì giá trị k và h đều nằm trong giới hạn, tương ứng với hoạt động ổn định của hệ thống. Đáp ứng vận tốc tuyến tính và vận tốc góc đều ở Hình 6(b) phù hợp với giới hạn vận tốc và phương thức điều khiển.

Bảng 2: Tham số k và h trong của các đường đi khác nhau trong Hình 6

Điểm xuất phát (theo góc trên vòng tròn)	k	h
$-\pi$	1.0502	2.2695
$-3\pi/4$	1.0862	2.2335
$-\pi/2$	1.3046	2.0151
$-\pi/4$	1.5308	1.7890

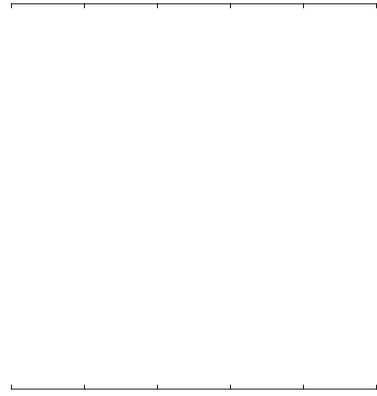
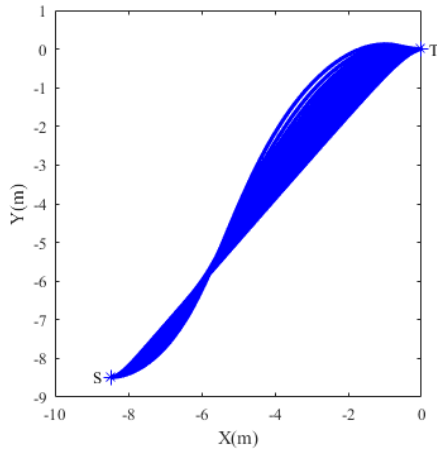
0	1.6745	1.6452
$\pi/2$	0.4962	2.8235
$\pi/4$	0.7095	2.6102
$3\pi/4$	1.0109	2.3088
π	1.0502	2.2695

IV. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất một hệ thống điều khiển dẫn đường ổn định cho robot di động sử dụng điều khiển mờ. Trong đó bộ điều khiển mờ được sử dụng để xác định tham số của luật điều khiển dựa trên giá trị tham chiếu và trạng thái của hệ thống. Hệ thống đề xuất cho phép xác định giới hạn các tham số của luật điều khiển, xác định giá trị tham số tốt nhất, từ đó tối ưu được đường đi của robot và tăng hoạt động ổn định của hệ thống điều khiển. Hiệu quả hoạt động của hệ thống đề xuất đã được kiểm chứng thông qua các đánh giá so sánh với các hệ thống thông thường. Kết quả nghiên cứu hoàn toàn ứng dụng trong các hệ thống điều khiển chuyển động hay hệ thống dẫn đường cho robot di động thực tế, góp phần nâng cao chất lượng của các ứng dụng robot.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

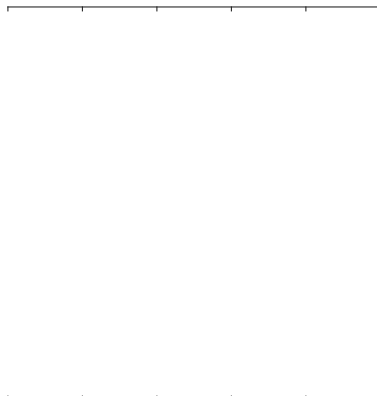
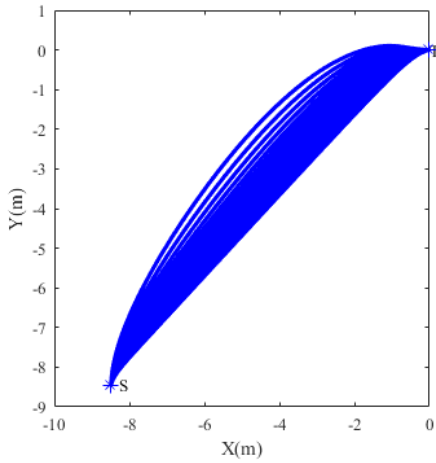
- [1] Roland Siegwart, Illah R Noubakhs, "Introduction to Autonomous Mobile Robot", MIT Press, London, England, 2004
- [2] Glad & Ljung "Lyapunov Stability", Lecture note
- [3] M. Aicardi, G. Casalino, A. Bicchi and A. Balestrino, - Closed loop steering of unicycle-like vehicles via Lyapunov techniques, IEEE Robot. & Autom. Mag., 2 (1) (1995) 27-35
- [4] C. Chen, T. S. Li, Y. Yeh, C. Chang, - Design and implementation of an adaptive sliding-mode dynamic controller for wheeled mobile robots, J. Mechatronics 19 (2009) 156-166
- [5] B. M. Kim and P. Tsiotras, - Controllers for unicycle-type wheeled robots: Theoretical results and experimental validation, IEEE Trans. Robot. & Autom., 18 (3) (2002) 294-30
- [6] Phan Xuân Minh, Nguyễn Doãn Phước, "Lý thuyết điều khiển mờ", Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2006
- [7] D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrank, "An introduction to Fuzzy Control", Springer, 2010.
- [8] T. Takeuchi, Y. Nagai and N. Enomoto, "Fuzzy control of a mobile robot for obstacle avoidance", Inform. Sci, vol.43, pp. 231-248, 1988
- [9] J. Yen and N. Pfluger, "Path planning and execution using fuzzy logic", in AIAA Guidance, Navigation and Control Conf, vol 3, New Orleans, LA, Aug.1991, 1691-1998
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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



Lựa chọn tham số theo cách thông thường: $D_{\min} = 12.0589$ (m), $D_{\max} = 12.9745$ (m), $D_{tb} = 12.2770$ (m)

Lựa chọn tham số theo bộ điều khiển mờ: $D = 12.167$ (m)

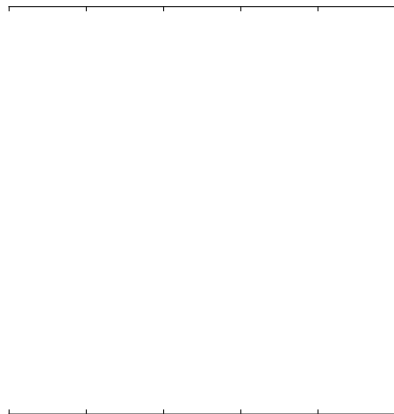
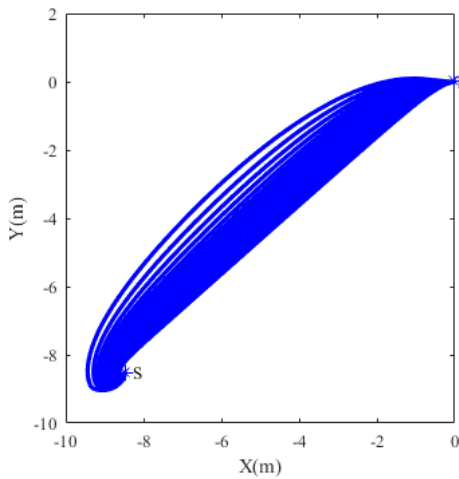
(a) Điểm xuất phát $(-8,5 -8,5, 0^0)$



Lựa chọn tham số theo cách thông thường: $D_{\min} = 12.1597$ (m), $D_{\max} = 13.5762$ (m), $D_{tb} = 12.4948$ (m)

Lựa chọn tham số theo bộ điều khiển mờ: $D = 12.2068$ (m)

(b) Điểm xuất phát $(-8,5 -8,5, 90^0)$

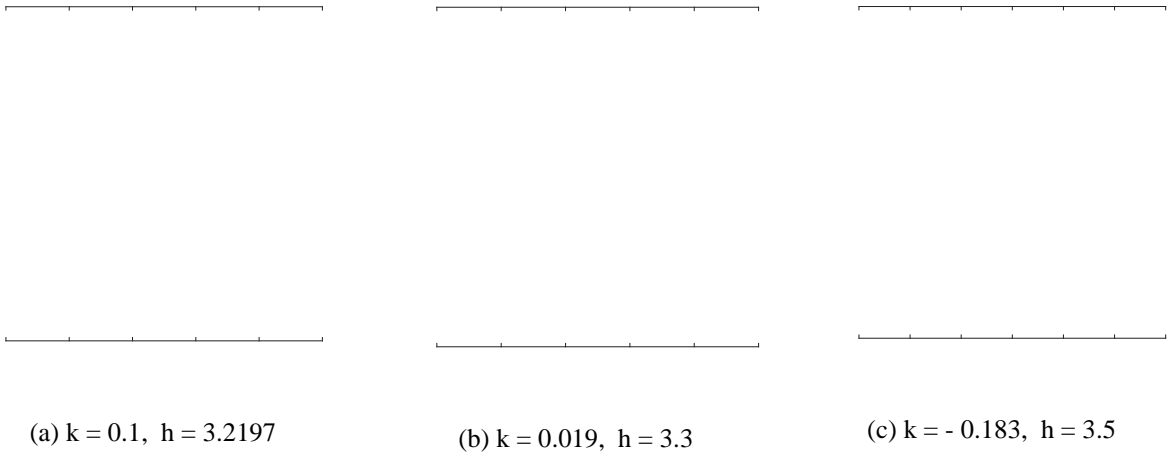


Lựa chọn tham số theo cách thông thường: $D_{\min} = 12.4314$ (m), $D_{\max} = 15.2767$ (m), $D_{tb} = 13.0982$ (m)

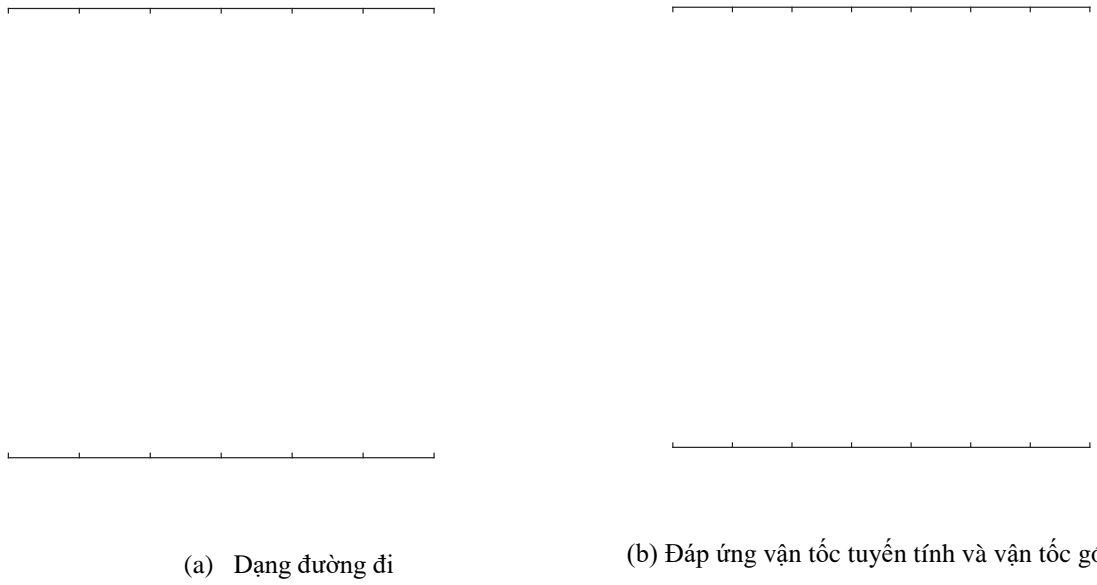
Lựa chọn tham số theo bộ điều khiển mờ: $D = 12.5403$ (m)

(c) Điểm xuất phát $(-8,5 -8,5, 270^0)$

Hình 4: Lựa chọn tham số theo cách thông thường và theo bộ điều khiển mờ tại các trường hợp xuất phát khác nhau



Hình 5: Đường đi trong trường hợp lựa chọn tham số k và h ngoài giới hạn



Hình 6: Đường đi của robot với các điểm xuất phát khác nhau