

TRÁNH VẬT CẢN CHO ROBOT DI ĐỘNG BẰNG PHƯƠNG PHÁP TRƯỜNG THỂ NĂNG POTENTIAL FIELD METHOD: OBSTACLE AVOIDANCE FOR MOBILE ROBOTS

Dương Ngọc Lan
Ngô Văn Thuyên

TÓM TẮT

Phương pháp trường thể năng là một phương pháp phổ biến trong tránh vật cản cho robot di động. Phương pháp này được thu hút bởi tính đơn giản và hiệu quả của nó trong việc di chuyển cục bộ của robot trong môi trường có vật cản. Trong bài báo này cũng trình bày các phương pháp tránh vật cản khác như giải thuật Bug, phương pháp cửa sổ động. Kết quả mô phỏng robot hoạt động trong môi trường có vật cản trên Player/Stage chạy trên nền Linux cho thấy tính hiệu quả của phương pháp này.

ABSTRACT

Potential field method is a universal method in obstacle avoidance applications for mobile robots. This method is particularly attractive because of its elegance and efficiency for obstacle avoidance. Other methods such as Bug algorithm, dynamic window approach are also presented in this paper. Simulation results on Player/Stage (run on Linux) show that the potential field methods are very efficient for local obstacle avoidance and navigation.

I. GIỚI THIỆU

Robot di động đang ngày càng chiếm được sự quan tâm của các nhà nghiên cứu và xã hội. Vì theo các nhà nghiên cứu, môi trường hoạt động của robot rất đa dạng có thể là đất, nước, không khí, không gian vũ trụ hay sự tổ hợp giữa chúng. Địa hình bề mặt mà Robot di chuyển trên đó có thể bằng phẳng hoặc thay đổi, lồi lõm.

Tiềm năng ứng dụng của robot di động hết sức rộng lớn. Các ứng dụng tiêu biểu của robot di động có thể kể đến như: robot dùng trong các lĩnh vực thám hiểm không gian, robot dùng trong các lĩnh vực quân sự (robot dò mìn), robot dùng trong các lĩnh vực công nghiệp (như robot làm sạch công nghiệp) và phục vụ đời sống con người như robot hút bụi.

1.1 Phân loại

Có nhiều loại robot di động khác nhau, chúng được phân loại theo môi trường làm việc và phương thức di chuyển. Dựa vào môi trường mà làm việc, có thể phân loại robot di động thành [1]:

- Robot mặt đất hoặc robot gia dụng: chúng có nhiều bánh xe, nhưng cũng bao gồm robot chân với hai hoặc nhiều chân hơn (giống người, động vật hoặc côn trùng như hình 1.1)
- Robot trên không: thường được mệnh danh là phi thuyền không gian không người điều khiển (UAVs).
- Robot dưới nước: thường được gọi là phi thuyền dưới nước tự điều khiển. Dựa vào cách di chuyển (đây loại chủ yếu), robot di động có thể được phân loại thành:
 - Robot di chuyển bằng chân (hình

1.2): chuyển động nhờ các chân cơ khí bắt chước chuyển động giống như chân người hoặc chân động vật. Loại robot này có thể di chuyển rất tốt trên các định hình lồi lõm phức tạp.

— Robot di chuyển bằng bánh: loại này thực tế hơn, chúng làm việc tốt trên hầu hết các địa hình do con người tạo



Hình 1.1



Hình 1.2



Hình 1.3



Hình 1.4

ra, điều khiển robot chuyển động cũng đơn giản hơn. Thường có các loại: loại di chuyển bằng bánh xe (phổ biến): có 2 bánh, 3 bánh, 4 bánh hoặc 6 bánh (hình 1.3); loại di chuyển bằng vòng xích: (hình 1.4); loại hỗn hợp bánh xe và xích (ít gặp).

1.2 Mô hình toán học robot di động

Mỗi loại robot di động được mô tả bằng các mô hình toán học riêng biệt. Trong hình 1.5 trình bày một dạng mô hình của robot di động ba bánh xe được lắp trên cùng một trục và hoạt động trong không gian 2 chiều. Với (x, y) là vị trí tâm của robot, θ là hướng của robot, r là bán kính của bánh xe, b là một nửa khoảng cách giữa hai bánh xe, v là vận tốc hướng lái của robot, ω là vận tốc góc của robot,

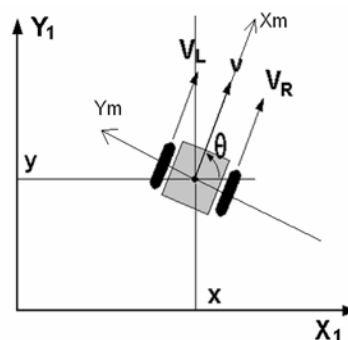
Phương trình động học:

$$q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Với điều kiện ràng buộc về vận tốc:

$$-V_{\max} \leq v \leq V_{\max}$$

$$-\omega_{\max} \leq \omega \leq \omega_{\max}$$



Hình 1.5 Mô hình robot

II. CÁC PHƯƠNG PHÁP TRÁNH VẬT CẢN

1. Thuật toán Bug

Thuật toán Bug [2,3] có lẽ là một thuật toán tránh vật cản đơn giản nhất. Ý tưởng của phương pháp này là khi gặp vật cản robot sẽ đi theo đường bao của vật cản và xem robot như một điểm hoạt động trong mặt phẳng, di chuyển từ s đến g và có gắn cảm biến để phát hiện vật cản.

Với Bug 1 khi robot tìm thấy được vật cản i thì robot làm một đường bao kín quanh

nó, bắt đầu tại một điểm va chạm H_i . Đường bao này nhằm để ước lượng điểm có khoảng cách L_i ngắn nhất tới mục tiêu. Sau đó robot tiếp tục di chuyển theo đường bao cho đến khi nó tìm thấy điểm đó lần nữa kể từ lúc nó rời khỏi dọc theo đường đi thẳng đến đích. L_i được gọi là điểm rời khỏi. Quá trình được lặp lại khi phát hiện vật cản mới. Phương pháp này không hiệu

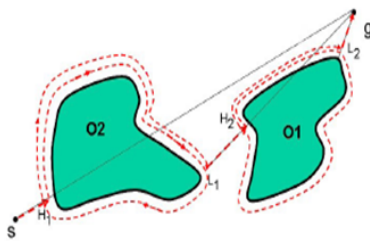
quả nhưng nó đảm bảo là robot sẽ tìm thấy mục tiêu. Hình 2.1 mô tả đường đi của robot để tránh vật cản theo thuật toán Bug 1 với hai vật cản O_1 và O_2 ; s là điểm xuất phát; g là đích đến; H_1 và H_2 là điểm va chạm; L_1 và L_2 là điểm rời khỏi.

Với Bug 2 robot cũng bắt đầu đi theo đường bao của vật cản, bắt đầu tại điểm va chạm H_i nhưng kết thúc khi nào robot cắt ngang đường đến đích. L_i là điểm rời khỏi của việc đi theo đường biên vật cản.

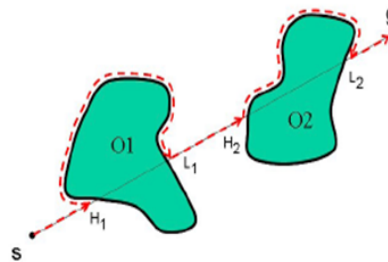
Từ L_i robot di chuyển trực tiếp đến đích. Quá trình được lặp lại nếu có nhiều vật cản được phát hiện. Để thấy rằng, thuật toán

Bug 2 có thời gian di chuyển ngắn hơn và hiệu quả hơn Bug 1. Hình 2.2 mô tả đường đi của robot được tạo ra bởi thuật toán Bug 2 cũng với hai vật cản như ở Bug 1.

Tuy nhiên có những tình huống làm nó trở nên không tối ưu. Trong thực tế robot có thể bị bẫy trong cấu trúc ma lộ. Ngoài ra, phương pháp này có hạn chế là chuyển động của robot tại một thời điểm chỉ phụ thuộc vào giá trị đọc của cảm biến gần nhất. Vì vậy, có thể dẫn đến những vấn đề không mong muốn và những vấn đề chưa dự phòng khi những cảm biến không cung cấp đủ thông tin, khi đó phương pháp này không cho kết quả tốt.

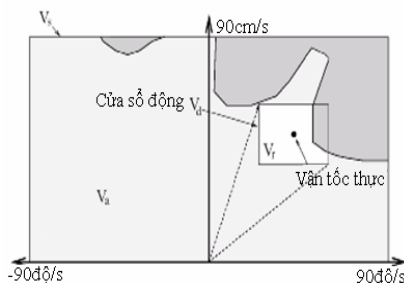


Hình 2.1. Đường đi của robot khi gặp vật cản



Hình 2.2. Đường đi của robot khi gặp vật cản

2. Phương pháp cửa sổ động.



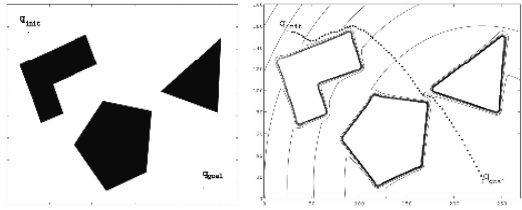
Hình 3.3. Dạng của sổ động hình chữ nhật với giá trị (v, ω) theo phương pháp cửa sổ động

Đây là phương pháp được đề xuất bởi Fox, Burgard và Thrun [4]. Trong phương pháp này, các ràng buộc về động học của robot được xét đến bằng cách xác định vận tốc cho robot một không gian tốc độ (v, ω) . Không gian tốc độ này là tập hợp tất cả các giá trị (v, ω) , robot có thể thực hiện với giả thiết rằng robot chỉ di chuyển trong cung

tròn được xác định bởi giá trị giới hạn của trong một chu kỳ điều khiển. Với vận tốc hiện thời của robot, ta có một cửa sổ động của tất cả các vận tốc mà robot có thể thực hiện ở chu kỳ điều khiển kế tiếp. Sau đó, kích thước của cửa sổ động được giảm xuống bằng cách loại bỏ các giá trị vận tốc mà robot có thể chạm vật cản, các giá trị vận tốc còn lại được gọi vận tốc cho phép. Hướng di chuyển của robot ở chu kỳ kế tiếp được xác định từ tập các vận tốc cho phép theo một hàm mục tiêu. Hàm mục tiêu này thường được xác định sao cho robot có chuyển động tiến nhanh, khoảng cách đến vật cản lớn và sai lệch giữa hướng di chuyển của robot và vị trí đích là nhỏ. Phương pháp này rất hiệu quả cho mô hình động nhưng chi phí tính toán rất cao và đây cũng là hạn chế của phương pháp này.

Hình 2.3 mô tả phương pháp của số động.

III. PHƯƠNG PHÁP TRƯỜNG THẾ NĂNG



Hình 3.1. Đường đi của robot trong phương pháp trường thế năng khi gặp vật cản

Ý tưởng của những lực ảo tác dụng vào robot được đưa ra bởi Andrews và Hogan [5] và Khatib [6]. Robot được khảo sát như là một điểm được biểu diễn trong không gian có cấu hình như là một hạt dưới ảnh hưởng của trường thế năng nhân tạo $U(q)$, được tạo ra bởi mục tiêu và vật cản có mặt

trong môi trường. Trong phương pháp này, vật cản tác dụng một lực đẩy vào robot, trong khi đó đích sẽ tạo ra một lực hút đến robot. Nếu vật cản mới xuất hiện trong suốt quá trình chuyển động của robot thì trường thế năng có thể cập nhật để tổng hợp những thông tin mới này. Tổng của tất cả các lực này tạo ra một lực tổng hợp. Lực tổng hợp này quyết định đến hướng và tốc độ của robot (tìm vị trí mới cho robot). Như vậy trường thế năng nhân tạo sẽ dẫn hướng cho robot hướng đến mục tiêu đồng thời biết tránh vật cản. Hình 3.1 mô tả đường đi của robot bằng phương pháp trường thế năng. Trong trường hợp đơn giản nhất, chúng ta giả định rằng robot là một điểm, vì vậy định hướng θ của robot được bỏ qua và kết quả trường thế năng chỉ còn 2D (x, y) . Nếu chúng ta giả định hàm trường thế

năng $U(q)$ khả vi thì chúng ta có thể tìm thấy lực nhân tạo $F(q)$ tác động tại vị trí của robot $q(x, y)$:

$$F(q) = -\nabla U(q) \quad (3.1)$$

với $\nabla U(q)$ là vectơ gradient của U tại vị trí q :

$$\nabla U = \begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Trường thế năng hoạt động trong robot thì được tính bằng tổng trường thế hút của mục tiêu và trường thế đẩy của vật cản

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{rep}(q) \quad (3.3)$$

Trong đó $U_{att}(q)$ là thế hút; $U_{rep}(q)$ là thế đẩy. Tương tự, lực cũng tách riêng gồm lực hút và lực đẩy:

$$\begin{aligned} F(q) &= F_{att}(q) + F_{rep}(q) \\ &= -\nabla U_{att}(q) - \nabla U_{rep}(q) \end{aligned} \quad (3.4)$$

1. Thế hút $U_{att}(q)$ (attractive potential)

Thế hút $U_{att}(q)$ được xác định như một hàm bậc 2:

$$U_{att}(q) = \frac{1}{2} \cdot k_{att} \cdot \rho_{goal}^2(q) \quad (3.5)$$

k_{att} : hệ số tỉ lệ (dương)

$\rho_{goal}(q)$: Là khoảng cách ơclit (khoảng cách hình học) của robot (tại vị trí q) đến mục tiêu

$$\rho_{goal}(q) = \|q - q_{goal}\|$$

Hàm $U_{att}(q)$ có thể dương hoặc không và đạt nhỏ nhất tại q_{goal} : $U_{att}(q_{goal}) = 0$

Lực hút $F_{att}(q)$ được suy ra từ $U_{att}(q)$:

$$\begin{aligned} F_{att}(q) &= -\nabla U_{att}(q) &= -\nabla \left(\frac{1}{2} \cdot k_{att} \cdot \rho_{goal}^2(q) \right) &= -\frac{1}{2} \cdot k_{att} \cdot 2\rho_{goal}(q) \cdot \nabla \rho_{goal}(q) \\ &= -k_{att} \cdot \rho_{goal}(q) \cdot \nabla \rho_{goal}(q) \end{aligned}$$

$$\text{Với } \left\{ \nabla \rho_{goal}(q) = \frac{q - q_{goal}}{\rho_{goal}(q)} \right\} \Rightarrow F_{att}(q) = -k_{att} \cdot (q - q_{goal}) \quad (3.6)$$

Hàm thế năng bậc 2 cho đặc tính ổn định tốt. Nó tạo ra lực hút $F_{att}(q)$ hội tụ tuyến tính về 0 khi robot gần mục tiêu. Mặt khác, $F_{att}(q)$ tăng khi khoảng cách đến mục tiêu tăng và cuối cùng tiến đến vô cùng khi $\rho_{goal}(q) \rightarrow \infty$

2. Thế đẩy $U_{rep}(q)$ (repulsive potential)

Ý tưởng của thế đẩy là tạo một lực từ tất cả những vật cản đã biết, thế đẩy này sẽ rất lớn khi robot gần chạm đối tượng, nhưng sẽ không ảnh hưởng đến chuyển động của nó khi robot ở xa đối tượng.

Điều kiện này có thể đạt được hàm thế đẩy như sau:

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot k_{rep} \cdot \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right) & \text{if } \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0 & \text{if } \rho(q) > \rho_0 \end{cases} \quad (3.7)$$

Với: k_{rep} : hệ số tỉ lệ dương; $\rho(q)$: khoảng cách nhỏ nhất từ q đến đối vật cản; ρ_0 : khoảng cách ảnh hưởng của vật cản (là một hằng số dương)

Hàm thế đẩy là hàm dương hoặc bằng 0 và tiến đến vô cùng khi $q \rightarrow$ đối tượng.

Nếu đường bao của đối tượng là lồi và vi phân từng phần được, $\rho(q)$ vi phân được tại mọi điểm trong không gian cấu hình tự do. Điều này dẫn đến lực đẩy $F_{rep}(q)$ như sau:

$$F_{rep}(q) = -\nabla U_{rep}(q) = \begin{cases} k_{rep} \cdot \left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \cdot \frac{q - q_{obstacle}}{\rho(q)} & \text{if } \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0 & \text{if } \rho(q) > \rho_0 \end{cases} \quad (3.8)$$

Mỗi vật cản được phát hiện bởi cảm biến sẽ gây ra một lực đẩy. Công thức trên là công thức để tính lực đẩy gây ra bởi một vật cản. Vì vậy, kết quả lực đẩy ảo cuối cùng là tổng của trường thế đẩy được tạo ra bởi mỗi cảm biến độc lập.

Lực tổng cộng tác dụng vào robot:

$$F(q) = F_{att}(q) + F_{rep}(q) \quad (3.9)$$

Công thức 3.9 cho thấy lực tác dụng lên robot được trình bày dưới dạng lực đẩy và lực hút di chuyển robot lệch xa vật cản và hướng về mục tiêu. Dưới điều kiện lý tưởng, vector vận tốc robot tỉ lệ với vector lực trường, robot có thể hướng thẳng đến mục tiêu.

Phương pháp trường thế năng được áp dụng phổ biến nhờ tính đơn giản và hiệu quả của nó. Phương pháp này có thể được thực hiện nhanh chóng và bước đầu cung cấp những kết quả chấp nhận được mà không đòi hỏi nhiều tính toán chính xác [6]

Bên cạnh sự đơn giản và hiệu quả thì phương pháp này cũng có những hạn chế như sau:

-Vị trí bẫy hay cực trị địa phương: đây là vấn đề được biết nhiều nhất của phương pháp trường thế năng. Vị trí bẫy xảy ra khi robot di chuyển vào điểm chết (điểm cực)

được tạo ra do hình dạng của vật cản (ví dụ vật cản chữ U)

-Không có lối đi giữa những vật cản gần nhau

-Robot chuyển động không ổn định trong sự có mặt của vật cản

-Dao động trong lối đi hẹp.

IV. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

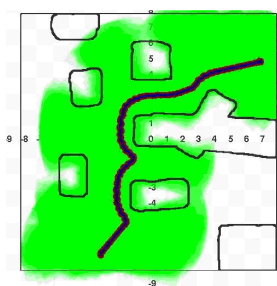
Kết quả mô phỏng sau đây được thực hiện trên robot Pioneer 2DX, mô phỏng robot hoạt động trong môi trường có vật cản trên phần mềm Player/Stage chạy trên nền Linux sẽ cho thấy tính hiệu quả của phương pháp này.

Trong mô phỏng này, robot có các thông số về độ lớn hệ số lực đẩy η , độ lớn hệ số lực hút và khoảng cách tác động của vật cản

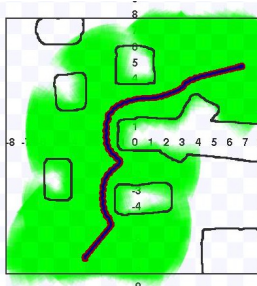
ρ_0 khác nhau. Kết quả mô phỏng cho thấy với các thông số khác nhau, đường đi của robot cũng sẽ khác nhau. Cụ thể như sau:

1. Thay đổi độ lớn hệ số lực đẩy η

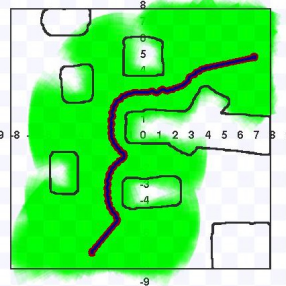
Trong trường hợp này robot xuất phát tại điểm ban đầu có tọa độ $(-3, -7)$ về vị trí đích có tọa độ $(7, 5)$ chỉ thay đổi η , các thông số còn lại không đổi. Ta có các kết quả mô phỏng trong hình 1:



Hình 1a: Kết quả mô phỏng với $n=10$



Hình 1b: Kết quả mô phỏng với $\eta = 5$



Hình 1c: Kết quả mô phỏng với $n=14$

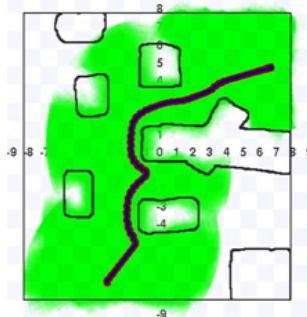
Kết quả mô phỏng cho thấy đường đi của robot bị dao động càng lớn khi η càng lớn.

2. Thay đổi độ lớn hệ số lực hút

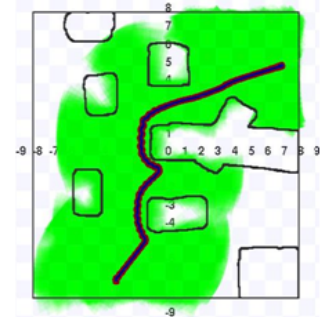
Trong trường hợp này chỉ thay đổi độ lớn hệ số lực hút, các thông số còn lại không đổi. Ta có các kết quả mô phỏng trong hình 2:



Hình 2a: Kết quả mô phỏng với hệ số lực hút bằng 15



Hình 2b: Kết quả mô phỏng với hệ số lực hút bằng 50

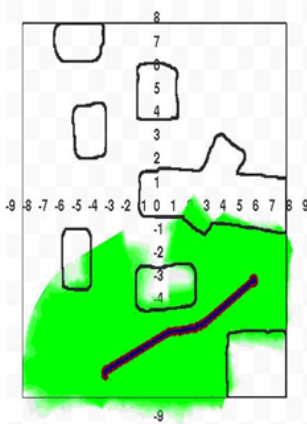


Hình 2c: Kết quả mô phỏng với hệ số lực hút bằng 100

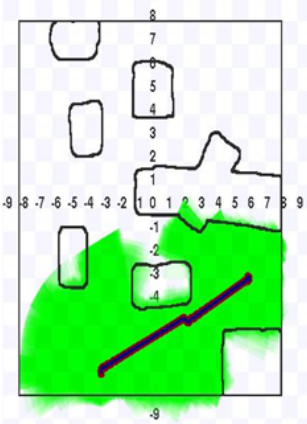
Kết quả mô phỏng cho thấy khi độ lớn hệ số lực hút càng lớn thì robot sẽ di chuyển càng gần vật cản hơn, khi đó đường đi của robot bị dao động nhiều hơn.

3. Thay đổi khoảng cách tác động của vật cản ρ_0

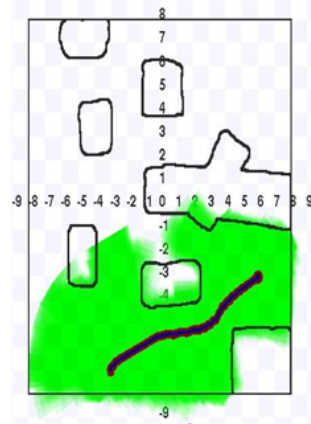
Trong trường hợp này robot xuất phát tại điểm ban đầu có tọa độ $(-3, -7)$ về vị trí đích có tọa độ $(6, -3)$ chỉ thay đổi ρ_0 , các thông số còn lại không đổi. Ta có các kết quả mô phỏng trong hình 3



Hình 3a: Kết quả mô phỏng với $\rho_0 = 1$



Hình 3b: Kết quả mô phỏng với $\rho_0 = 0.5$



Hình 3c: Kết quả mô phỏng với $\rho_0 = 1.5$

Nhận xét kết quả: Kết quả mô phỏng cho thấy khi khoảng cách tác động ρ_0 của vật cản càng lớn thì đường đi của robot càng cong. Khi khoảng cách tác động này lớn quá thì robot không đến được đích mà sẽ bị va vào vật cản.

Từ các kết quả mô phỏng ta thấy rằng phương pháp trường thế năng hoạt động hiệu quả khi tránh vật cản cục bộ. Luật

điều khiển cho robot được tạo ra trực tiếp từ tổng lực tác động lên robot. Tuy nhiên phương pháp này không thích hợp cho trường hợp di chuyển robot toàn cục.

V. KẾT LUẬN

- Trình bày phương pháp trường thế trong bài toán tránh vật cản cho robot di động
- Kết quả mô phỏng robot hoạt động trong

môi trường có vật cản bằng phương pháp trường thế năng trên Player/Stage chạy trên nền Linux

— Hướng phát triển của nghiên cứu là nghiên cứu các phương pháp để khắc phục tình trạng cục bộ địa phương.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Andrews, J. R. and Hogan, N., “Impedance Control as a Framework for Implementing Obstacle Avoidance in a Manipulator.” *Control of Manufacturing Processes and Robotic Systems*, Eds. Hardt, D. E. and Book, W., ASME, Boston, 1983, pp. 243-251
- Fox, D., Burgard, W., Thrun, S., “The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance.” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 4:23–33, 1997.
- Khatib, O., “Real-Time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots.” *1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, St. Louis, Missouri, March 25-28, 1990, pp. 500-505.
- Lumelsky, V., Skewis, T., “Incorporating Range Sensing in the Robot Navigation Function.” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 20:1990, pp.1058–1068.
- Lumelsky, V., Stepanov, A., “Path-Planning Strategies for a Point Mobile Automaton Moving Amidst Unknown Obstacles of Arbitrary Shape”.
- Siegwart, R., and Nourbakhsh, I. R., “Introduction to Autonomous Mobile Robots,” 2004.