

KẾT HỢP PHƯƠNG PHÁP RRT VÀ STANLEY CHO Ô TÔ TỰ HÀNH VÀO BÃI ĐẬU XE

COMBINATION OF RRT AND STANLEY METHODS FOR AUTONOMOUS VEHICLES INTO A PARKING AREA

Bùi Đức Tiến¹, Vũ Văn Tấn^{2*}, Trần Văn Đà²

TÓM TẮT

Ô tô tự hành là lĩnh vực đang được các nhà nghiên cứu quan tâm hiện nay. Trong đó, bãi đậu xe tự động được coi là một phần quan trọng trong nghiên cứu về ô tô tự hành. Khi số lượng ô tô ngày càng tăng lên, việc đậu xe ngày càng trở thành một vấn đề nan giải, do vậy bãi đậu xe tự động là một phần không thể thiếu trong tương lai. Bài báo này, nhóm tác giả tập trung vào áp dụng phương pháp cây ngẫu nhiên RRT để tìm đường đi tham chiếu tối ưu cho ô tô và phương pháp Stanley để điều khiển ô tô đi theo đường đi tham chiếu. Kết quả mô phỏng đã thể hiện rõ hiệu quả của bộ điều khiển để xuất khi sai lệch của tín hiệu đường đi tham chiếu và điều khiển luôn dưới mức 3%. Góc đánh lái và quỹ đạo chuyển động thể hiện ô tô luôn nằm trong ngưỡng đánh lái và đảm bảo tính ổn định của xe.

Từ khóa: Động lực học ô tô; cây ngẫu nhiên RRT; phương pháp Stanley; đường tham chiếu; ô tô tự hành; bãi đậu xe.

ABSTRACT

Autonomous vehicles are an area of interest for researchers nowadays. In which, automatic parking is considered an important part of autonomous vehicles. As the number of cars is increasing, parking area is becoming more and more a problem, so automatic parking is an indispensable part of the future. This article focuses on the application of the RRT random tree method to find the optimal reference path for the car and the Stanley method to control the car in order to follow the reference path. The simulation results have clearly shown the effect of the proposed controller PI when the error of the reference path and the control signals is always below 3%. The steering angle and vehicle trajectory show that the car is always within the steering threshold and always ensures its stability.

Keywords: Vehicle dynamics; random tree RRT; stanley method; reference path; autonomous cars; parking area.

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Thủy lợi

²Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông Vận tải

*Email: vvtan@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 20/12/2020

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/3/2021

Ngày chấp nhận đăng: 25/4/2021

1. GIỚI THIỆU

Tự động đỗ xe là một trong những lĩnh vực được các nhà nghiên cứu quan tâm hiện nay. Hệ thống tự động của ô tô sẽ kiểm soát và hướng ô tô đến điểm đỗ có sẵn. Một chức năng như vậy cần rất nhiều cảm biến bao gồm: camera phía trước và bên hông để phát hiện vạch kẻ làn

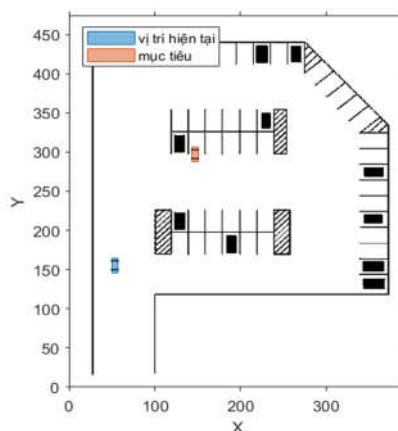
đường, biển báo đường (biển báo dừng, vạch kẻ đường ra,...), các phương tiện khác và người đi bộ. Cảm biến nắp và siêu âm để phát hiện chướng ngại vật và tính toán các phép đo khoảng cách chính xác; cảm biến siêu âm để phát hiện chướng ngại vật.

Về kế hoạch và kiểm soát đường đi, hiện nay các nhà nghiên cứu đề ra nhiều phương pháp điều khiển có thể kể đến: đỗ xe song song cho xe tự hành sử dụng đường cong Compertz [1]; phương pháp tiệm cận thuật toán di truyền đối với phương tiện thông minh tự hành [2]; kiểm soát lái xe với điều khiển dự báo MPC để theo dõi quỹ đạo theo mục tiêu của bãi đậu xe [3]; bãi đậu xe tự động dành cho xe tự hành dựa trên Vehicular AD Hoc Networking [4].

Ở bài báo này, nhóm tác giả đề xuất phương pháp dựa trên động lực học của ô tô và các ràng buộc để lập một đường đi hình học khả thi. Sau đó sử dụng luật điều khiển PI để điều khiển quỹ đạo ô tô đi theo đường tham chiếu. Cách tiếp cận này yêu cầu độ chính xác điều khiển cao về tốc độ và hướng chuyển động. Do vậy nó phù hợp cho việc áp dụng vào xe tự hành. Nhóm tác giả sử dụng thuật toán cây ngẫu nhiên RRT [5, 6] để tìm đường tham chiếu tối ưu cho ô tô và sử dụng thuật toán bám theo quỹ đạo [7] để đảm bảo về mặt động lực học của xe và an toàn của người lái.

2. THIẾT LẬP ĐƯỜNG ĐI THAM CHIẾU

2.1. Lập kế hoạch tuyến đường



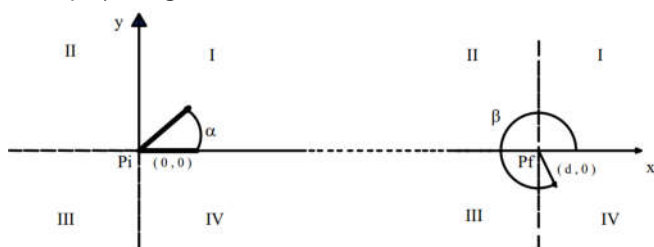
Hình 1. Mô hình lập kế hoạch đến điểm đỗ xe

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sử dụng một kế hoạch toàn cầu tính được lưu trữ nhưng thường là thuật

toán định tuyến được cung cấp bởi cơ sở hạ tầng bãi đậu xe cục bộ. Kế hoạch tuyến đường toàn cầu được mô tả như một chuỗi các đoạn đường đi qua đến điểm đỗ xe như hình 1.

2.2. Thiết kế thuật toán tạo đường tham chiếu

Ở đây tác giả thiết kế thuật toán tìm đường đi ngắn nhất giữa hai điểm trong mặt phẳng, điểm đầu và điểm cuối ký hiệu là P_i và P_f . Mỗi điểm được liên kết với góc định hướng riêng của nó và tương ứng xác định hướng chuyển động thể hiện trong hình 2. Kết hợp P_i và P_f được gọi là cấu hình ban đầu và cuối cùng, xác định hai điểm trong không gian cấu hình tương ứng (không gian X) và các điều kiện biên của bài toán. Với hai điểm P_i và P_f được cho nhiệm vụ là tìm đường đi ngắn nhất giữa hai điểm và phải trơn mịn, sao cho nó bắt đầu và kết thúc hướng chuyển động và tương ứng với độ cong giới hạn là $1/\rho$, trong đó ρ là bán kính quay vòng nhỏ nhất của ô tô.



Hình 2. Hệ tọa độ, cấu hình ban đầu (P_i, α) và cấu hình cuối cùng (P_f, β), các góc định hướng chia thành các góc phần tư

Từ đó xây dựng nên thuật toán tìm đường đi tối ưu cho ô tô. Với vị trí ô tô được cung cấp là $(x, y, \theta) \in \mathbb{R}^3$ để xây dựng lên con đường có thể chấp nhận, tác giả giới thiệu ba chuyển động cơ bản: quay sang trái R, rẽ sang phải L, chuyển động theo đường thẳng S như sau:

$$\begin{aligned}
 Lv(x, y, \phi) &= (x + \sin(\phi + v) - \sin(\phi), y - \cos(\phi + v) + \cos(\phi), \phi + v), \\
 Rv(x, y, \phi) &= (x - \sin(\phi - v) + \sin(\phi), y + \cos(\phi - v) - \cos(\phi), \phi - v), \quad (1) \\
 Sv(x, y, \phi) &= (x + v \cos \phi, y - c \sin \phi, \phi),
 \end{aligned}$$

Trong đó v biểu thị rằng chuyển động dọc theo đoạn (Circle hoặc Straight) có độ dài v . Với các phép biến đổi cơ bản này, từ đó tạo nên luật điều khiển ô tô nằm trong $D = [LSL, RSR, RSL, LSR, RLR, LRL]$ [8], có thể được biểu diễn dưới dạng các phương trình tương ứng.

Thuật toán cây ngẫu nhiên RRT được thể hiện tóm tắt trong bảng 1.

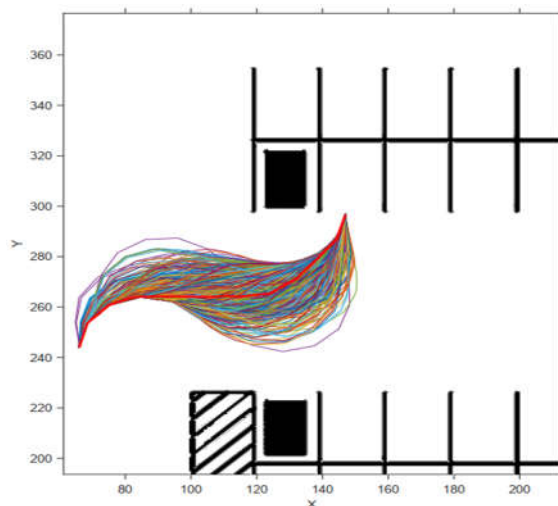
Đối với thuật toán cây ngẫu nhiên RRT đưa ra trong bảng 1. Trong không gian cấu hình X cho trước (bao gồm không gian tự do X_{free} không chứa vật cản và không gian vật cản X_{obs}), cây RRT sẽ được triển khai như sau. Đầu tiên, cây RRT bắt đầu tại x_{init} là đỉnh duy nhất của nó và không có cạnh. Trong mỗi vòng lặp, chọn ngẫu nhiên một cấu hình $x_{rand} \in X_{free}$ (bằng cách sử dụng thuật toán tìm kiếm va chạm loại bỏ những mẫu trong X_{obs}) và sau đó mở rộng cây về phía mẫu này sau mỗi lần lặp. Chọn một khoảng cách cho 2 điểm và xây dựng những ràng buộc xung quanh và chọn x_{near} gần với x_{rand} nhất được tìm thấy trong một giới hạn của cho phép. Từ đó tiếp tục chọn x_{new} di chuyển từ

x_{near} một khoảng cách gia tăng Δt với sự định hướng của x_{rand} . Cuối cùng một đường nối mới được thêm vào từ x_{near} đến x_{new} . Hình 3 thể hiện kết quả của việc sử dụng thuật toán cây ngẫu nhiên RRT.

Bảng 1. Thuật toán cây ngẫu nhiên RRT

```

V.add( $x_{init}$ )
2 for i to K do
 $x_{rand}$  = trạng thái ngẫu nhiên
 $x_{near}$  = điểm lân cận trong cây T đến  $x_{rand}$ 
 $x_{new}$  = mở rộng  $x_{near}$  về phía  $x_{rand}$ 
and kiểmtra_vacham( $x_{new}$ )
if  $x_{new}$  không thể kết nối tới  $x_{near}$  then
V.addVertex( $x_{new}$ );
V.addEdge( $x_{near}, x_{new}$ );
End
If kiểmtra( $x_{new}, x_{goal}$ ) < distanceToGoal then
Break;
End
End
    
```



Hình 3. Mô phỏng thuật toán cây ngẫu nhiên RRT

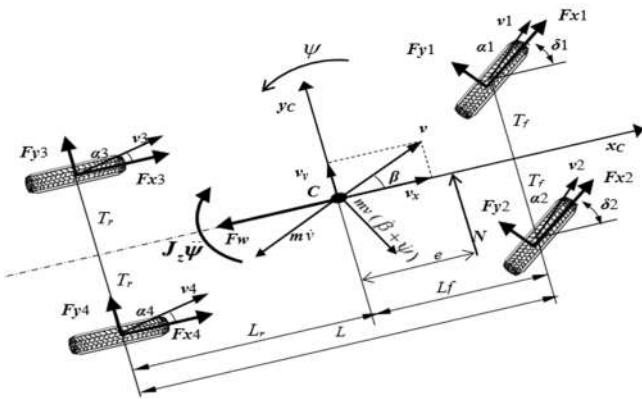
3. ĐIỀU KHIỂN THEO ĐƯỜNG ĐI THAM CHIẾU DỰA TRÊN PHƯƠNG PHÁP STANLEY

3.1. Giới thiệu phương pháp Stanley

Phương pháp Stanley là phương pháp sử dụng góc đánh lái để điều khiển quỹ đạo chuyển động của ô tô. Luật điều khiển lái được thiết kế bằng cách sử dụng các phương trình động lực học của chuyển động, trong đó tính ổn định tiệm cận đã được chứng minh trên toàn cầu. Luật điều khiển này sau đó được bổ sung để xử lý các động lực của lớp khí nén và của vô lăng truyền động bằng servo. Để kiểm soát tốc độ xe, phanh và bàn đạp được kích hoạt bởi bộ điều khiển tích phân tỉ lệ chuyển đổi PI. Hệ thống điều khiển hoàn chỉnh tiêu thụ không đáng kể tài nguyên CPU trên ô tô tự hành. Và nó được thực hiện trên chiếc Volkswagen Touareg, hạng mục của đội đua Stanford trong

“DARPA Grand Challenge 2005”, một cuộc đua địa hình cho xe tự hành. Kết quả thí nghiệm của Stanley chứng minh khả năng của bộ điều khiển theo dõi quỹ đạo giữa các chướng ngại vật, trên địa hình dốc và gợn sóng, qua vùng bùn sâu và dọc theo các cạnh vách đá, với sai số đo đường trung bình bình phương (RMS) là dưới 0,1m.

3.2. Mô hình động học của ô tô



Hình 4. Mô hình động lực học ô tô

Hình 4 minh họa mô hình ô tô hai vết nghiên cứu chuyển động lệch của ô tô trong trường hợp tổng quát chịu tác dụng của lực gió xiên với giả thiết các lực tác dụng lên bánh xe F_{xi} , F_{yi} ($i = 1,2,3,4$) đặt tại tâm vết tiếp xúc của bánh xe với mặt đường, bỏ qua các lực cản ở bánh xe và tải trọng tĩnh phân bố đối xứng theo phương chuyển động của ô tô. Các thông số, ký hiệu của mô hình được trình bày trong [9].

Ta có phương trình (2) mô tả chuyển động của ô tô có kể đến ảnh hưởng của lực cản không khí được viết như sau:

$$\begin{aligned}
 -m\dot{v}_x + m\dot{v}_y(\dot{\beta} + \dot{\psi}) + F_{x1} \cos(\delta_1) + F_{x2} \cos(\delta_2) \\
 + F_{x3} + F_{x4} - F_{y1} \sin(\delta_1) - F_{y2} \sin(\delta_2) - F_w = 0 \\
 -m\dot{v}_y - m\dot{v}_x(\dot{\beta} + \dot{\psi}) + F_{x2} \sin(\delta_2) + F_{x1} \sin(\delta_1) \\
 + F_{y1} \cos(\delta_1) + F_{y2} \cos(\delta_2) + F_{y3} + F_{y4} + N = 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

Phương trình mô men đối với trọng tâm xe được viết như sau:

$$\begin{aligned}
 -J_z\ddot{\alpha} + F_{y1} \cos(\delta_1)L_f + F_{y2} \cos(\delta_2)L_f - F_{y3}L_r \\
 - F_{y4}L_r + F_{y1} \sin(\delta_1)Tf - F_{y2} \sin(\delta_2)Tf + \\
 F_{x1} \sin(\delta_1)L_f + F_{x2} \sin(\delta_2)L_f - F_{x1} \cos(\delta_1)Tf \\
 + F_{x2} \cos(\delta_2)Tf + F_{x4}Tr - F_{x3}Tr + Ne = 0
 \end{aligned} \tag{3}$$

Từ phương trình (3) và (4), ta có hệ phương trình mô tả chuyển động của ô tô theo quỹ đạo:

$$\begin{cases}
 \dot{v}_x = v_y(\dot{\beta} + \dot{\psi}) + \frac{1}{m} \left(F_{x1} \cos(\delta_1) + F_{x2} \cos(\delta_2) + F_{x3} \right. \\
 \left. + F_{x4} - F_{y1} \sin(\delta_1) - F_{y2} \sin(\delta_2) - F_w \right) \\
 \dot{v}_y = -v_x(\dot{\beta} + \dot{\psi}) + \frac{1}{m} \left(F_{x2} \sin(\delta_2) + F_{x1} \sin(\delta_1) \right. \\
 \left. + F_{y1} \cos(\delta_1) + F_{y2} \cos(\delta_2) + F_{y3} + F_{y4} + N \right) \\
 \ddot{\alpha} = \frac{1}{J_z} \left(F_{y1} \cos(\delta_1)L_f + F_{y2} \cos(\delta_2)L_f - F_{y3}L_r - F_{y4}L_r + F_{y1} \sin(\delta_1)Tf \right. \\
 \left. - F_{y2} \sin(\delta_2)Tf + F_{x1} \sin(\delta_1)L_f + F_{x2} \sin(\delta_2)L_f - F_{x1} \cos(\delta_1)Tf \right. \\
 \left. + F_{x2} \cos(\delta_2)Tf + F_{x4}Tr - F_{x3}Tr + Ne \right)
 \end{cases} \tag{4}$$

3.3. Xây dựng thuật toán điều khiển bên

Chuyển động của ô tô cùng với vận tốc $v(t)$ có thể được miêu tả dưới dạng sai số của góc quay thân xe và góc lái:

$$e(t) = \psi(t) - \delta(t) \tag{5}$$

Đối với lái xe về phía trước, bánh xe dẫn hướng là bánh trước và đạo hàm của sai số là:

$$\dot{e}(t) = \dot{\psi}(t) - \dot{\delta}(t) \tag{6}$$

Trong đó, $|\delta(t)| < \delta_{max}$

Đạo hàm của góc quay thân xe là vận tốc quay thân xe được xác định là:

$$\dot{\psi}(t) = r(t) = -\frac{v(t)\sin(\delta(t))}{a+b} \tag{7}$$

Từ phương trình động học trên ta xây dựng luật điều khiển lái như sau:

$$\delta(t) = \psi(t) + \arctan\left(\frac{ke(t)}{v(t)}\right) \text{ nếu } \left| \psi(t) + \arctan\left(\frac{ke(t)}{v(t)}\right) \right| < \delta_{max}$$

$$\delta(t) = \delta_{max} \text{ nếu } \psi(t) + \arctan\left(\frac{ke(t)}{v(t)}\right) \geq \delta_{max}$$

$$\delta(t) = -\delta_{max} \text{ nếu } \psi(t) + \arctan\left(\frac{ke(t)}{v(t)}\right) \leq -\delta_{max}$$

3.4. Xây dựng thuật toán điều khiển dọc

Bộ điều khiển dọc nhận yêu cầu từ: bộ lập kế hoạch quỹ đạo, bộ đề xuất tốc độ an toàn. Bộ điều khiển sử dụng mức tối thiểu của các tốc độ này làm điểm đặt. Coi áp suất xilanh và mức độ nhấn ga là hai bộ truyền động tác động đơn lẻ độc lập nhau tạo ra lực dọc lên ô tô. Thục nghiệm cho thấy điều này gần đúng với hệ thống phanh. Bộ điều khiển tính toán số liệu tích phân sai số tỷ lệ (PI), ở lần lặp điều khiển rời rạc (i+1) như sau:

$$e_v(i+1) = k_{p,v}(v(i+1) - v_c(i+1)) + k_{i,v}e_{int}(i+1) \tag{8}$$

Trong đó, số hạng tích phân được cho bởi:

$$e_{int}(i+1) = e_{int}(i) + (v(i+1) - v_c(i+1)) \tag{9}$$

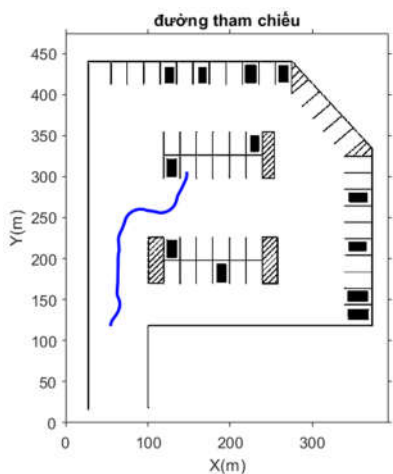
Trong đó, v_c là tốc độ theo lệnh nằm trong tốc độ cho phép của xe khi vào bãi đỗ, ở đây tác giả để vận tốc giới hạn là 7 (m/s). Các giá trị k_p và k_i xác định sự cân bằng loại bỏ nhiễu và độ vọt lố.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ

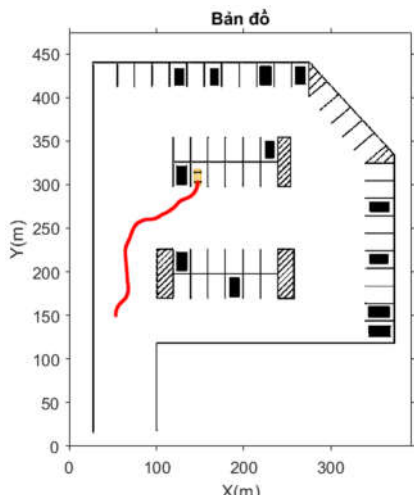
Trong quá trình mô phỏng tác giả đánh giá hiệu quả của bộ điều khiển với các vị trí đỗ xe khác nhau. Kết quả sau đây là một ví dụ cụ thể với đường nét đứt là đường tham chiếu và đường nét liền là đường đi của xe với bộ điều khiển.

Trường hợp mô phỏng này, nhóm tác giả cho xe đi vào điểm đỗ vuông góc. Hình 5a là đường đi tham chiếu tối ưu được tác giả sử dụng bằng thuật toán cây ngẫu nhiên RRT với những ràng buộc động lực học của xe và tránh va chạm. Hình 5b thể hiện ô tô đi vào điểm đỗ dựa trên đường đi tham chiếu bằng cách sử dụng thuật toán dựa trên phương pháp Stanley. Để thể hiện rõ hơn tác giả sử dụng hình 6 để

miêu tả độ hiệu quả của thuật toán, ta thấy xe tự hành luôn bám sát đường đi tham chiếu. Hình 7 nhóm tác giả so sánh vận tốc tham chiếu và vận tốc thực của ô tô, ta thấy vận tốc ô tô luôn bám sát vận tốc tham chiếu và khi ô tô thực hiện góc đánh lái lớn sai lệch vận tốc là không đáng kể.

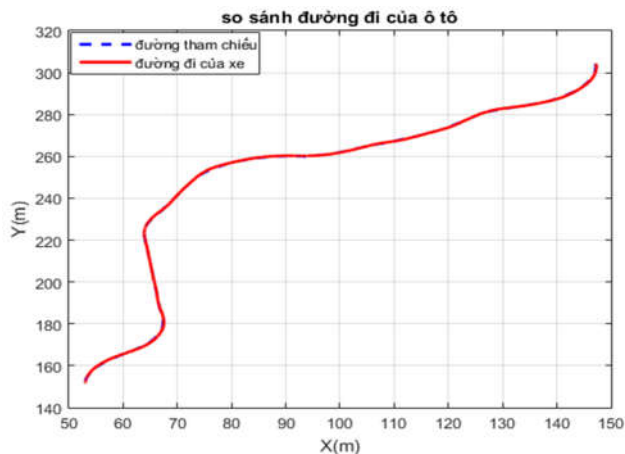


a)

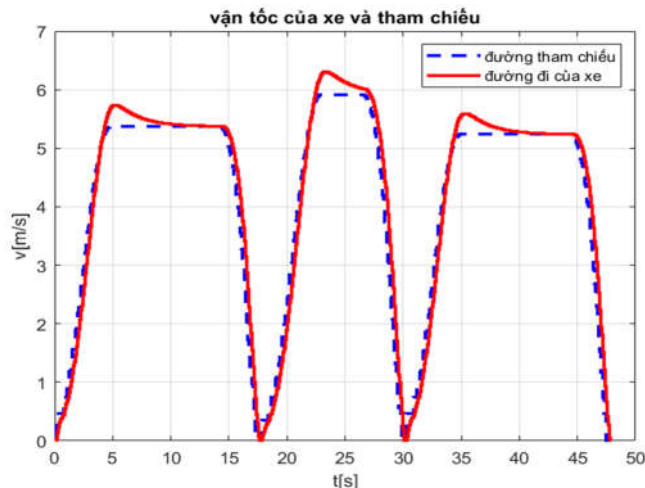


b)

Hình 5. Đường tham chiếu (a), mô phỏng vào vị trí (b) dựa trên thuật toán cây ngẫu nhiên RRT



Hình 6. So sánh đường đi thực tế của ô tô và đường tham chiếu



Hình 7. Vận tốc thực tế của ô tô và tham chiếu

Để thấy rõ hơn hiệu quả của thuật toán điều khiển đã đề xuất, tác giả thống kê giá trị sai lệch bình phương trung bình RMS của xe tự hành khi đi trên đường tham chiếu. Bảng 2 đã cho thấy rõ các sai lệch giá trị bình phương trung bình RMS đều nhỏ hơn mức 3% nhất là đường đi của quỹ đạo dựa trên đường tham chiếu là dưới mức 0,3%. Kết quả mô phỏng ở trường hợp này đã cho thấy rõ độ hiệu quả của thuật toán dựa trên phương pháp Stanley.

Bảng 2. So sánh giá trị RMS giữa đường đi tham chiếu và đường điều khiển

	Đường đi (m)	Vận tốc ô tô (m/s)
Đường đi tham chiếu	53,8970	1,6628
Đường đi thực tế	53,7663	1,7120
Độ giảm	0,242%	-2,95%

5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã tập trung vào việc xây dựng mô hình ô tô và áp dụng thuật toán cây ngẫu nhiên RRT để tạo ra đường đi tham chiếu. Sau đó sử dụng thuật toán dựa trên phương pháp Stanley để điều khiển xe đi theo đường tham chiếu. Kết quả mô phỏng đã cho thấy ô tô tự hành trang bị bộ điều khiển dựa trên phương pháp Stanley đã đảm bảo độ định của xe khi góc đánh lái luôn nằm trong ngưỡng cho phép, vận tốc xe luôn bám sát vận tốc tham chiếu và đặc biệt hơn nữa quỹ đạo của xe tự hành luôn bám sát quỹ đạo đường tham chiếu. Để thể hiện rõ hơn về hiệu quả của phương pháp tác giả đã xác định được sai lệch bình phương trung bình RMS đều nhỏ hơn mức 3%. Đặc biệt quỹ đạo đường đi của xe tự hành và đường đi tham chiếu luôn nhỏ hơn mức 0,3%.

Hướng nghiên cứu tiếp theo có thể kể đến là xây dựng bộ điều khiển cho xe tự hành dựa trên phương pháp điều khiển dự báo MPC (Model Predictive Control) để xe tự hành vào vị trí đỗ và sau đó xem xét độ hiệu quả khi so sánh với bộ điều khiển dựa trên phương pháp Stanley.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Aneesh N. Chand, Michihiro Kawanishi, Tatsuo Narikiyo, 2014. *Fast Parallel Parking for Autonomous Vehicles using Gompertz Curves*. The 11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [2]. Diya Thomas, Binsu C. Kovoorb, 2017. *A Genetic Algorithm Approach to Autonomous Smart Vehicle Parking system*. 6th International Conference on Smart Computing and Communications, Kurukshetra, India.
- [3]. Tsutomu Tashiro, 2013. *Vehicle Steering Control with MPC for Target Trajectory Tracking of Autonomous Reverse Parking*. IEEE International Conference on Control Applications, India.
- [4]. Michel Ferreira, Luís Damas, Hugo Conceicao, Pedro M. d'Orey, Ricardo Fernandes, Peter Steenkiste, 2014. *Self-Automated Parking Lots for Autonomous Vehicles based on Vehicular Ad Hoc Networking*. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Dearborn, Michigan, USA.
- [5]. Karaman Sertac, Emilio Frazzoli, 2014. *Optimal Kinodynamic Motion Planning Using Incremental Sampling-Based Methods*. 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC).
- [6]. Hoffmann Gabriel M., Claire J. Tomlin, Michael Montemerlo, Sebastian Thrun, 2007. *Autonomous Automobile Trajectory Tracking for Off-Road Driving: Controller Design, Experimental Validation and Racing*. American Control Conference, pp. 2296-2301.
- [7]. Reeds J. A., L. A. Shepp, 1990. *Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards*. *Pacific Journal of Mathematics* Volume 145(2), pp. 367-393.
- [8]. Dubins Le, 1957. *On Curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents*. *American Journal of Mathematics*, Volume 79(3), pp. 497-516.
- [9]. Nguyen Cong Tuan, 2012. *Dieu khien luc phanh nham on dinh quy dao chuyen dong*. Master thesis, University of Transport and Communications.

AUTHORS INFORMATION

Bui Duc Tien¹, Vu Van Tan², Tran Van Da²

¹Faculty of Mechanical Engineering, ThuyLoi University

²Faculty of Mechanical Engineering, University of Transport and Communications