

XỬ LÝ PHÂN LUỒNG HIỆU QUẢ CHO Ô TÔ TỰ LÁI TRONG BÃI ĐỖ TỰ ĐỘNG SỬ DỤNG THUẬT TOÁN HYBRID A*

EFFICIENT TRAFFIC FLOW MANAGEMENT FOR AUTONOMOUS VEHICLES IN AUTOMATED PARKING LOT USING HYBRID A* ALGORITHM

Vũ Văn Tấn^{1,*}, Đào Đức Thiện¹, Hà Trung Bình², Tạ Như Thuận¹, Đỗ Văn Huy¹,
Nguyễn Minh Nhật¹, Phạm Tất Thắng¹, Nguyễn Đức Minh³, Nguyễn Quang Minh³

¹Bộ môn Cơ khí ô tô, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Giao thông vận tải, Hà Nội, Việt Nam

²Khoa Tự động và Phương tiện kỹ thuật phòng cháy, chữa cháy, cứu nạn, cứu hộ, Trường Đại học
Phòng cháy Chữa cháy, Hà Nội, Việt Nam

³Khoa Công nghệ và Kỹ thuật, Ngành Kỹ thuật Ô tô,
Trường Đại học Khoa học và Công nghệ Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

*Email tác giả liên hệ: vvtan@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Sự phát triển nhanh chóng của công nghệ xe tự lái đã đặt ra thách thức lớn cho hạ tầng bãi đỗ xe. Để tối ưu diện tích, các bãi đỗ hiện đại thường bố trí điểm vào và điểm ra sát nhau, khiến không gian phân làn trở nên chật hẹp và dễ xảy ra va chạm. Các giải pháp truyền thống dựa chủ yếu vào cảm biến phần cứng (LiDAR, camera, radar) đòi hỏi chi phí cao và độ phức tạp lớn. Do đó, bài báo tập trung vào hướng tiếp cận thuật toán: sử dụng thuật toán Hybrid A để lập kế hoạch đường đi thời gian thực, kết hợp cơ chế phân luồng động và xử lý va chạm thông minh. Phương pháp này giúp giảm đáng kể sự phụ thuộc vào cảm biến, đồng thời đảm bảo vận hành an toàn và hiệu quả cho toàn bộ hệ thống bãi đỗ tự động.*

Từ khóa: Ô tô tự lái; Thuật toán Hybrid A*; Tránh va chạm; Phân luồng; Bãi đỗ tự động.

ABSTRACT

The rapid development of autonomous vehicle technology has posed a significant challenge to parking infrastructure. To optimize space, modern parking lots often place entrances and exits close together, resulting in cramped lane spaces and a high risk of collisions. Traditional solutions rely primarily on hardware sensors (LiDAR, cameras, radar), which are costly and complex. Therefore, this paper focuses on an algorithmic approach: using the Hybrid A algorithm for real-time route planning, combined with dynamic traffic flow management and intelligent collision handling. This method significantly reduces reliance on sensors while ensuring safe and efficient operation of the entire automated parking system.*

Keywords: Autonomous vehicles; Hybrid A* algorithm; Collision checking; Traffic flow; Automated parking lot.

1. GIỚI THIỆU

Ô tô tự lái đang phát triển mạnh mẽ trong những năm gần đây và được xem là một trong những hướng công nghệ quan trọng của ngành giao thông thông minh. Theo phân loại của SAE International, hệ thống tự lái đã tiến tới các cấp độ cao, cho phép phương tiện vận hành tự động trong nhiều điều kiện khác nhau [1]. Việc ứng dụng xe tự lái không chỉ giúp nâng cao an toàn giao thông mà còn góp phần tối ưu hóa hạ tầng, đặc biệt trong các bãi đỗ xe đô thị có không gian hạn chế. Trong các bài toán lập kế hoạch đường đi, các phương pháp truyền thống như A*, Dijkstra hay RRT chủ yếu hoạt động trên không gian rời rạc và phù hợp với hệ không có ràng buộc [2, 3]. Tuy nhiên, xe ô tô là hệ có ràng buộc động học, do vậy cần các thuật toán có khả năng sinh quỹ đạo liên tục và khả thi về mặt động học. Trong bối cảnh đó, thuật toán Hybrid A* được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng kết hợp tìm kiếm rời rạc với mô hình động học, cho phép tạo quỹ đạo mượt và phù hợp thực tế. Tuy nhiên, khi áp dụng trong môi trường bãi đỗ chật hẹp với nhiều phương tiện xuất hiện ngẫu nhiên, thuật toán vẫn gặp các vấn đề như xung đột quỹ đạo, tăng thời gian tính toán lại và thiếu cơ chế điều phối hiệu quả giữa các xe. Do đó, bài báo này đề xuất một phương pháp kết hợp Hybrid A* với cơ chế phân luồng động nhằm nâng cao hiệu quả và độ an toàn trong môi trường bãi đỗ tự động. Phương pháp này giúp giảm đáng kể sự phụ thuộc vào cảm biến phân cứng, đảm bảo vận hành an toàn, hiệu quả và chi phí thấp cho bãi đỗ tự động.

2. THUẬT TOÁN HYBRID A*

Thuật toán Hybrid A* là mở rộng của thuật toán A*, được thiết kế cho các hệ có ràng buộc động học như xe ô tô tự lái [4, 5]. Thuật toán Hybrid A* tìm kiếm trong không gian

trạng thái liên tục $z = (x, y, \theta)$, cho phép tạo quỹ đạo khả thi về động học [4, 5]. Thuật toán phát triển từ mô hình xe một vết:

$$\dot{x} = v \cos \theta \quad (1)$$

$$\dot{y} = v \sin \theta \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = \frac{v}{L} \tan \delta \quad (3)$$

Trong đó, v là vận tốc, L là chiều dài cơ sở và δ là góc lái bị giới hạn [2]. Trạng thái mới được sinh ra bằng cách tích phân theo thời gian với tập điều khiển rời rạc (trái – thẳng – phải) [5]. Thuật toán có hàm đánh giá:

$$f(z) = g(z) + h(z) \quad (4)$$

Với $g(z)$ là chi phí thực từ điểm đầu và $h(z)$ là hàm chi phí ước lượng đến đích [6, 7]. Trong thực tế, hàm chi phí thường sử dụng quỹ đạo Dubins hoặc Reeds-Sheep để đảm bảo tính khả thi và tăng tốc độ hội tụ. Mỗi trạng thái sinh ra đều được kiểm tra va chạm trước khi đưa vào quá trình tìm kiếm, đảm bảo quỹ đạo cuối cùng liên tục, phù hợp ràng buộc động học của xe. Nhờ đó, thuật toán Hybrid A* đặc biệt phù hợp với các bài toán lập kế hoạch đường đi thời gian thực trong môi trường hẹp và phức tạp [4, 8].

3. XÂY DỰNG BÀI TOÁN PHÂN LUỒNG QUỸ ĐẠO

Bãi đỗ xe thực tế lấy từ bãi đỗ tại Đại học Kỹ thuật Munich bên Đức (Parkplatz Zufahrt Nord TUM, Unnamed Road, 85748, Garching bei München, Germany) và được mô hình hóa dưới dạng bản đồ nhị phân để thực hiện mô phỏng. Bài toán đặt ra là điều phối một xe tự lái (xe đen) di chuyển từ điểm vào đến ô đỗ trống, đồng thời xuất hiện ngẫu nhiên các

xe khác (xe trắng) tại các vị trí trống trong bãi với cùng mục tiêu di chuyển ra điểm thoát. Để đảm bảo tính thực tế và khả thi trong nhiều tình huống, các vật cản được mô phỏng dưới dạng xe ngẫu nhiên không cố định (không được xác định trước). Do điểm vào và điểm ra của bãi đỗ nằm sát nhau, việc phát hiện và xử lý va chạm trở nên dễ dàng và trực quan. Sử dụng tất cả các xe đều là xe tự lái với chung thuật toán lập kế hoạch đường đi Hybrid A*, có vận tốc hằng số thấp và bằng nhau nhằm đảm bảo an toàn động học. Việc kiểm soát đồng thời nhiều xe trong cùng một môi trường là hoàn toàn khả thi. Các tác giả lần lượt đề xuất và thực hiện cả bốn phương pháp tối ưu như sau:

* Phương pháp 1 – Ưu tiên vận tốc theo khoảng cách, cụ thể xe đen di chuyển với vận tốc cố định từ điểm vào đến ô đỗ, trong khi các xe trắng được điều chỉnh vận tốc theo khoảng cách Euclid đến điểm thoát. Xe gần điểm thoát nhất có vận tốc lớn nhất, các xe còn lại giảm dần (ví dụ: $v, 0.7v, 0.4v$).

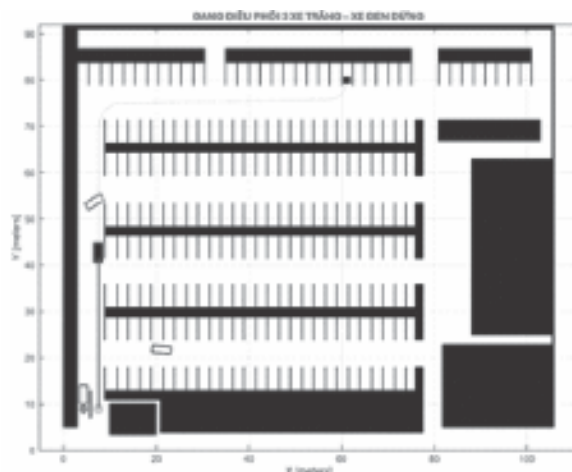
* Phương pháp 2 – Dự đoán va chạm theo thời gian: Do thuật toán Hybrid A* không xử lý tốt vật cản xuất hiện sau khi lập kế hoạch, hệ thống dự đoán trước thời điểm va chạm tiềm năng giữa các xe dựa trên quỹ đạo và vận tốc đã biết.

* Phương pháp 3 – Dừng xe để tạo không gian: Khi phát hiện nguy cơ va chạm, xe đen dừng tại vị trí an toàn và được coi là vật cản tĩnh. Các xe trắng sau đó thực hiện lập kế hoạch lại quỹ đạo bằng Hybrid A* trên bản đồ cập nhật.

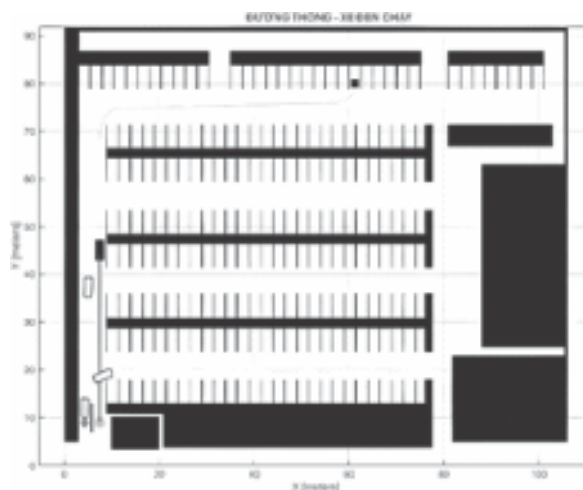
* Phương pháp 4 – Lùi xe hỗ trợ tái lập kế hoạch: Trước khi lập kế hoạch lại, các xe trắng lùi một đoạn ngắn (khoảng 5 m hoặc xoay $\pm 30^\circ$) nhằm tạo không gian, giúp tăng khả năng tìm được quỹ đạo trong môi trường hẹp.

Các phương pháp này đã được triển khai và kiểm chứng qua mô phỏng, đảm bảo hoạt động ổn định trên mọi tình huống va chạm

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ



Hình 1. Xe đen dừng lại để xe trắng đi trước



Hình 2. Khi đường thông, xe đen về bãi đỗ

Hình 1 và hình 2 minh họa tình huống xe đen chủ động dừng lại khi phát hiện nguy cơ va chạm với các xe trắng đang di chuyển ra điểm thoát. Trong thời gian này, các xe trắng tiếp tục di chuyển và thực hiện tính toán lại quỹ đạo thành công nhờ cơ chế lùi ngắn (5 m) đã được tích hợp. Sau khi vùng nguy hiểm được giải phóng, xe đen tiếp tục di chuyển đến vị

trí đồ mà không cần lập kế hoạch lại toàn bộ quỹ đạo, đồng thời vẫn đảm bảo tính mượt và khả thi về động học. Kết quả mô phỏng trên nhiều kịch bản cho thấy không xảy ra va chạm trong toàn bộ quá trình. Xe đen chỉ dừng trung bình 2–3 lần, mỗi lần tối đa khoảng 8 bước mô phỏng. Tỷ lệ tính toán lại đường đi của các xe trắng đạt 100%, với thời gian trung bình 0,35–0,72 s, đáp ứng yêu cầu thời gian thực. Điều này chứng minh hiệu quả của phương pháp đề xuất, trong đó việc dừng tạm thời xe đen kết hợp cơ chế lùi ngắn của xe trắng giúp khắc phục hiện tượng “treo thuật toán” trong không gian hẹp.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất và triển khai thành công một giải pháp xử lý phân luồng và tránh va chạm cho xe ô tô tự lái trong bãi đỗ tự động chật hẹp bằng thuật toán Hybrid A*. Thay vì phụ thuộc hoàn toàn vào hệ thống cảm biến đắt tiền, phương pháp tập trung vào việc tối ưu lập kế hoạch đường đi thời gian thực kết hợp cơ chế điều phối động giữa các xe. Giải pháp này góp phần quan trọng vào việc xây dựng bãi đỗ tự động thông minh, chi phí thấp và an toàn cao – hướng đi thiết thực cho công nghệ xe tự lái tại Việt Nam và trên thế giới.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, các tác giả sẽ tiếp tục cải tiến bằng cách tối ưu hóa bộ tính toán đường song song, kết hợp dự đoán chuyển động, thử nghiệm trên xe mô hình thực tế và mở rộng sang môi trường đô thị phức tạp hơn. ❖

Ngày nhận bài: 08/4/2026

Ngày phản biện: 20/4/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. T. SAE, “Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles (Standard No. J3016)”. SAE International, 2021.
- [2]. B. Paden, M. Čáp, S. Z. Yong, D. Yershov, and E. Frazzoli, “A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles”. IEEE Transactions on intelligent vehicles, vol. 1, no. 1, pp. 33-55, 2016.
- [3]. S. Karaman and E. Frazzoli, “Sampling-based algorithms for optimal motion planning”. The international journal of robotics research, vol. 30, no. 7, pp. 846-894, 2011.
- [4]. W. Schwarting, J. Alonso-Mora, and D. Rus, “Planning and decision-making for autonomous vehicles”. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, vol. 1, no. 1, pp. 187-210, 2018.
- [5]. K. Kurzer, “Path planning in unstructured environments: A real-time hybrid A* implementation for fast and deterministic path generation for the KTH research concept vehicle”, ed, 2016.
- [6]. L. E. Dubins, “On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents”. American Journal of mathematics, vol. 79, no. 3, pp. 497-516, 1957.
- [7]. J. Reeds and L. Shepp, “Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards”. Pacific Journal of Mathematics, vol. 145, no. 2, pp. 367-393, 1990.
- [8]. C. Badue et al., “Self-driving cars: A survey”. Expert Systems with Applications, vol. 165, p. 113816, 2021.