

VỀ MỘT PHƯƠNG PHÁP LẬP QUỸ ĐẠO CHO NHÓM ROBOT DI ĐỘNG CÓ DẪN TRONG MÔI TRƯỜNG CÓ NHIỀU

A TRAJECTORY PLANNING METHOD FOR A GROUP OF LEADER-FOLLOWER MOBILE ROBOTS IN A NOISY ENVIRONMENT

Dương Phú Tuấn¹, Nguyễn Tuấn Minh³,
Nguyễn Hoàng Việt⁴, Nguyễn Quang Vinh^{2,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huic5804.2025.324>

TÓM TẮT

Bài báo giới thiệu một hướng tiếp cận mới trong lập kế hoạch và điều khiển đội hình cho hệ thống robot di động đa hướng theo chiến lược Dẫn - Theo trong môi trường có vật cản tĩnh. Đề xuất tập trung vào việc kết hợp một phiên bản A* có cải tiến - sử dụng hàm phạt gần vật cản nhằm tăng độ an toàn của quỹ đạo - với thuật toán tối ưu chuyển động bằng hàm tương quan Hamilton (CHOMP) để làm trơn đường đi đầu ra, tạo ra một đường đi tham chiếu vừa tối ưu toàn cục, vừa trơn tru và khả thi về mặt động học. Quỹ đạo chất lượng cao này chính là nền tảng vững chắc cho hệ thống điều khiển bám theo của nhóm robot Dẫn-Theo. Tại đây, mỗi robot sử dụng điều khiển dự báo phân tán (DMPC), với bài toán tối ưu được giải bằng SQP, để không chỉ bám sát quỹ đạo đã được làm trơn mà còn chủ động duy trì đội hình và tránh va chạm. Các kết quả mô phỏng trên MATLAB đã chứng minh rằng phương pháp kết hợp A*-CHOMP này là yếu tố then chốt giúp hệ thống vận hành hiệu quả, duy trì ổn định đội hình chữ V trong môi trường phức tạp nhiều vật cản.

Từ khóa: Lập quỹ đạo, A*, CHOMP, điều khiển đội hình, Dẫn - Theo.

ABSTRACT

This paper presents a novel hierarchical framework for the formation control and planning of omnidirectional mobile robots in static, obstacle-laden environments. Our central contribution is a hybrid path-planning method that synergizes an improved A* algorithm with the CHOMP trajectory optimizer. The enhanced A* utilizes an obstacle proximity penalty function to generate safer global paths, which are then refined by CHOMP into smooth, dynamically feasible reference trajectories. This superior trajectory provides the foundation for a robust Leader-Follower control system, where each robot utilizes Distributed Model Predictive Control (DMPC) and Sequential Quadratic Programming (SQP). This allows the robots to precisely track the path while concurrently maintaining their V-shaped formation and ensuring collision avoidance. Simulations conducted in MATLAB validate our proposed A*-CHOMP approach, proving it is crucial for navigating effectively and maintaining a stable formation in complex environments.

Keywords: Path planning, A*, CHOMP, Formation control, Leader-Follower.

¹Viện Công nghệ thông tin - Điện tử, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

²Viện Tên lửa, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

³Trường Đại học Công nghệ Thái Nguyên

⁴Viện Tự động hóa, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

*Email: vinhquang2808@gmail.com

Ngày nhận bài: 11/6/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 28/8/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/9/2025

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, điều khiển phối hợp cho các hệ thống robot bầy đàn ngày càng thu hút nhiều sự

quan tâm trong cộng đồng nghiên cứu do tiềm năng ứng dụng cao trong các lĩnh vực như giám sát, tìm kiếm - cứu hộ, và vận chuyển hàng hóa. Một cấu trúc phổ biến trong

robot bầy đàn là mô hình Dẫn - Theo, trong đó robot Dẫn định hướng di chuyển còn các robot Theo bám theo nhằm duy trì đội hình và hoàn thành nhiệm vụ chung.

Một trong những thách thức lớn của mô hình này là lập kế hoạch quỹ đạo khả thi cho cả nhóm robot trong môi trường có vật cản, đồng thời đảm bảo duy trì đội hình, tránh va chạm và đáp ứng yêu cầu tính toán thời gian thực. Để giải quyết các bài toán này, nhiều nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc kết hợp các thuật toán tìm kiếm suy nghiệm (heuristic) như A* hoặc RRT với các phương pháp tối ưu hóa quỹ đạo liên tục như CHOMP và GPMP2. Các phương pháp lai này tận dụng ưu điểm của từng thuật toán: bảo đảm tìm được đường đi khả thi toàn cục nhờ A* hoặc RRT, đồng thời tối ưu hóa độ mượt và an toàn quỹ đạo nhờ CHOMP hoặc GPMP2 [1-5]. Ví dụ, nghiên cứu RRT-GPMP2 cho thấy việc kết hợp giữa RRT và GPMP2 giúp tăng hiệu quả lập kế hoạch chuyển động trong môi trường mê cung phức tạp, giảm đáng kể thời gian tính toán mà vẫn duy trì chất lượng đường đi so với RRT thuần túy [1]. Các nghiên cứu khác cũng đề xuất các thuật toán lai như RRT*-TEB, PRM-GA nhằm tối ưu hóa cả về độ dài, độ mượt và khả năng tránh vật cản cho nhiều robot cùng lúc [2, 3].

Bài báo này đề xuất một phương pháp tích hợp giữa thuật toán lập kế hoạch đường đi toàn cục A* (có cải tiến), kỹ thuật làm trơn quỹ đạo CHOMP và điều khiển dự đoán mô hình phân tán với bài toán tối ưu được giải bằng phương pháp lập trình bậc hai tuần tự. Cả robot Dẫn và robot Theo đều được điều khiển phân tán nhằm tăng tính phản ứng với môi trường và đảm bảo tính phối hợp trong đội hình. Phương pháp được kiểm chứng qua mô phỏng trên MATLAB với kịch bản đội hình chữ V di chuyển qua môi trường có nhiều chướng ngại vật tĩnh, chứng minh tính đúng đắn và hiệu quả của thuật toán đề xuất.

2. GIẢI QUYẾT BÀI TOÁN

2.1. Lập đường đi bằng A*

Trong giai đoạn đầu của quá trình lập kế hoạch chuyển động, thuật toán A* (A-star) được sử dụng để tìm đường đi ngắn nhất từ vị trí xuất phát đến vị trí đích trong môi trường dạng lưới hai chiều với các chướng ngại vật tĩnh. A* là một thuật toán tìm kiếm suy nghiệm, tối ưu về mặt chi phí nhờ sử dụng hàm đánh giá tổng hợp:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

trong đó:

- $g(n)$ là chi phí tích lũy từ điểm bắt đầu đến nút hiện tại n .
- $h(n)$ là ước lượng chi phí còn lại từ nút n đến đích.

Để đường đi tìm được tránh xa vật cản tĩnh giúp cho thuật toán tránh được tối thiểu cục bộ đồng thời cũng giúp đội hình robot di chuyển thuận lợi hơn, cần thiết bổ sung thêm chi phí tránh vật cản tĩnh, khi này thuật toán A* được cải tiến và hàm chi phí tổng hợp (1) được thiết kế lại như sau:

$$f(n) = g(n) + h(n) + \alpha \cdot \phi(n) \quad (2)$$

trong đó:

- $\phi(n)$ là hàm chi phí tránh vật cản, phụ thuộc vào khoảng cách từ nút n đến vật cản gần nhất.
- α là hệ số phạt (trọng số).

Không gian môi trường được mô hình hóa dưới dạng ma trận nhị phân $M \in \{0,1\}^{H \times W}$, trong đó:

- $M(i,j) = 1$ biểu thị ô chứa vật cản (không thể đi qua).
- $M(i,j) = 0$ biểu thị ô trống (có thể di chuyển).

Thuật toán bắt đầu từ điểm xuất phát và mở rộng các nút có giá trị $f(n)$ thấp nhất trong hàng đợi ưu tiên. Tại mỗi bước, các nút lân cận được xét đến nếu không bị chặn bởi vật cản. Quá trình dừng lại khi nút đích được chọn hoặc hàng đợi rỗng (không tồn tại đường đi).

Kết quả là một chuỗi các điểm rời rạc $\{p_0, p_1, \dots, p_k\}$ tạo thành quỹ đạo khởi tạo. Quỹ đạo này có thể tồn tại các đoạn không trơn mượt và khó khả thi về mặt điều khiển, do đó sẽ được xử lý tiếp theo bằng thuật toán CHOMP nhằm cải thiện độ khả thi và độ mượt của đường đi.

2.2. Làm trơn quỹ đạo bằng CHOMP

Một trong những hạn chế quan trọng của quỹ đạo rời rạc được tạo bởi thuật toán A* là tính không liên tục, không khả vi và thường không phù hợp với các ràng buộc động học thực tế của robot. Nếu sử dụng trực tiếp quỹ đạo này để điều khiển robot, các tín hiệu vận tốc và gia tốc thu được có thể dao động đột ngột, gây mất ổn định hoặc khó thực thi trong hệ thống điều khiển thực tế. Do đó, cần thiết phải làm trơn quỹ đạo nhằm tạo ra một đường đi liên tục, khả vi và mượt mà hơn, đồng thời vẫn duy trì được tính tối ưu và độ an toàn khi di chuyển gần các vật cản.

Để giải quyết vấn đề này, thuật toán tối ưu chuyển động hàm tương quan Hamilton, CHOMP, được sử dụng nhằm tối ưu quỹ đạo ban đầu theo một hàm chi phí tổng hợp. Thuật toán này được giới thiệu bởi Kalakrishnan và cộng sự, đã chứng minh hiệu quả cao trong việc xử lý các ràng buộc mềm về độ mượt và an toàn [6, 7]. Các nghiên cứu gần đây tiếp tục cải tiến và áp dụng CHOMP trong các hệ thống robot hiện đại [8, 9]. CHOMP cho phép cải thiện

tính khả thi và độ mượt của quỹ đạo bằng cách cực tiểu hóa một hàm chi phí năng lượng tổng hợp, bao gồm hai thành phần chính:

- Thành phần trơn mượt (smooth): đánh giá độ cong và sự thay đổi vận tốc trên quỹ đạo, thường được biểu diễn dưới dạng tích phân bình phương đạo hàm bậc hai theo thời gian.

- Thành phần tránh vật cản (obstacle): được định nghĩa trên bản đồ chướng ngại vật, phản ánh mức độ vi phạm không gian an toàn khi quỹ đạo đi gần các vật thể.

Hàm chi phí $\mathcal{U}[\xi]$ được định nghĩa trên không gian các đường cong $\xi(t) \in \mathbb{R}^n$ như sau:

$$\mathcal{U}[\xi] = \mathcal{U}_{\text{smooth}}[\xi] + \lambda \mathcal{U}_{\text{obs}}[\xi] \tag{3}$$

Trong đó:

- $\mathcal{U}_{\text{smooth}}[\xi] = \frac{1}{2} \int \left\| \frac{d^2 \xi}{dt^2} \right\|^2 dt$ là thành phần đánh giá độ mượt của quỹ đạo.

- $\mathcal{U}_{\text{obs}}[\xi] = \int c(\xi(t)) dt$ là chi phí tránh vật cản, với $c(x)$ là hàm chi phí không gian từ bản đồ chướng ngại vật.

- $\lambda > 0$ là hệ số điều chỉnh mức độ ưu tiên giữa độ mượt và độ an toàn.

CHOMP sử dụng phương pháp di chuyển theo hướng ngược lại với đạo hàm của hàm mục tiêu (gradient descent) trong không gian Riemann có ma trận A để tối thiểu hóa $\mathcal{U}[\xi]$. Quỹ đạo được cập nhật theo công thức:

$$\xi^{k+1} = \xi^k - \alpha A^{-1} \nabla \mathcal{U}[\xi^k] \tag{4}$$

Trong đó:

- A là ma trận đạo hàm bậc hai (ma trận Laplace).
- α là hệ số học.
- $\nabla \mathcal{U}[\xi^k]$ là đạo hàm của hàm chi phí tại bước lặp k .

Bản đồ chi phí tránh vật cản $c(x)$ được làm trơn bằng hàm phân phối chuẩn Gaussian để đảm bảo tính liên tục và khả vi. Thuật toán lặp cho đến khi $\mathcal{U}[\xi]$ giảm dưới ngưỡng hội tụ hoặc đạt số vòng lặp tối đa.

Kết quả của CHOMP là một quỹ đạo liên tục, khả vi và mượt mà, đảm bảo phù hợp với các ràng buộc động học, và có thể sử dụng làm đầu vào cho bộ điều khiển dự đoán DMPC.

2.3. Điều khiển hệ thống bằng DMPC + SQP

Sau khi có được quỹ đạo trơn, mượt từ CHOMP, cả robot Dẫn và các robot Theo đều sử dụng điều khiển dự đoán mô hình phân tán (DMPC) để theo sát quỹ đạo mục tiêu. Trong mô hình này, mỗi robot (bao gồm cả leader và follower) giải một bài toán tối ưu riêng biệt ở mỗi bước thời gian, trong đó các ràng buộc được áp dụng để đảm

bảo tránh va chạm với vật cản và với các robot khác, đồng thời duy trì đội hình đã định.

Bài toán tối ưu được định nghĩa trên mô hình động học rời rạc của robot di động đa hướng với biến trạng thái là vị trí và hướng chuyển động, và biến điều khiển là vận tốc tuyến tính theo hai trục và vận tốc góc. Hàm chi phí bao gồm:

$$J_i(x_i, \hat{x}_j, \mathcal{N}_i) = \sum_{k=0}^{N_p-1} \left[\|x_i(k) - x_{\text{ref},i}(k)\|_Q^2 + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \|x_i(k) - \hat{x}_j(k)\|_{Q_c}^2 + \|u_i(k)\|_R^2 \right] + \|x_i(N_p) - x_{\text{ref},i}(N_p)\|_{Q_f}^2 \tag{5}$$

trong đó:

$x_i(k)$ là trạng thái dự đoán của robot i ở thời điểm k ;

$x_{\text{ref},i}(k)$ là điểm tham chiếu của quỹ đạo dự đoán mà robot i cần bám theo;

$\hat{x}_j(k)$ là trạng thái dự đoán của các robot j ($j \in \mathcal{N}_i$ tập các robot có trao đổi thông tin với robot i);

$u_i(k)$ là tín hiệu điều khiển dự đoán của robot i tại thời điểm k ;

N_p là độ dài bước dự đoán;

Q, Q_c, R, Q_f là các ma trận trọng số điều khiển của các chi phí bám quỹ đạo, chi phí ràng buộc đồng thuận, chi phí điều khiển và chi phí cuối tương ứng.

Phương pháp lập trình bậc hai tuần tự SQP, được sử dụng để giải bài toán tối ưu phi tuyến có ràng buộc này. SQP cho phép chuyển bài toán phi tuyến về một chuỗi các bài toán bậc hai (QP) và giải tuần tự cho đến khi hội tụ. Tại mỗi bước lặp, ràng buộc được tuyến tính hóa và hàm mục tiêu được xấp xỉ bậc hai nhằm đảm bảo hiệu quả tính toán và độ chính xác trong điều kiện thực tế. Trình giải SQP sẽ lặp lại quá trình giải một chuỗi các bài toán QP gần đúng với dạng:

$$\min_d \nabla J_i(U)^T d + \frac{1}{2} d^T H d \tag{6}$$

ràng buộc: $l_b \leq U + d \leq u_b$

trong đó:

$\nabla J_i(U)$ là đạo hàm của hàm chi phí theo biến điều khiển.

H là xấp xỉ ma trận Hessian của hàm Lagrange.

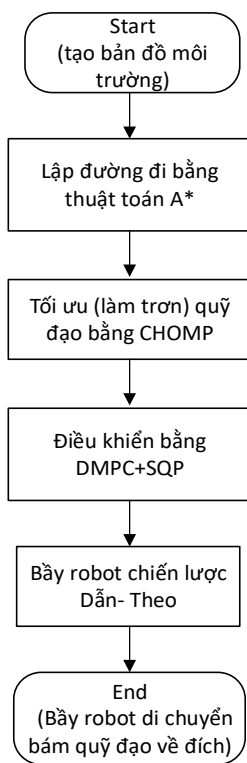
l_b, u_b là giới hạn dưới và trên của vận tốc và góc quay.

Việc đồng thời áp dụng DMPC cho cả robot Dẫn và robot Theo giúp tăng tính phản ứng cục bộ, giảm phụ thuộc vào việc truyền thông liên tục từ leader, và nâng cao khả năng thích ứng của toàn đội hình trước sự thay đổi của môi trường hoặc cấu trúc chướng ngại vật.

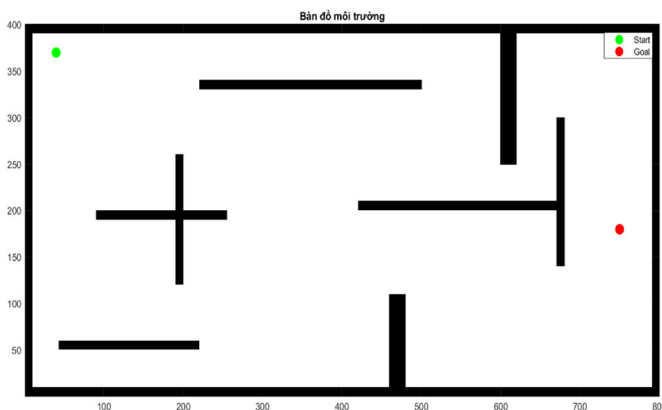
3. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ

Bài báo này xây dựng mô phỏng hệ thống gồm 5 robot di động đa hướng di chuyển đội hình chữ V có chiến lược Dẫn - Theo. Robot Dẫn có thông tin về quỹ đạo (được xây dựng từ A*+CHOMP) cần di chuyển, các robot Theo trao đổi thông tin dựa trên lý thuyết đồ thị để duy trì đội hình. Các robot Theo không có thông tin về quỹ đạo di chuyển chỉ dựa vào trạng thái robot Dẫn và robot lân cận để bám và duy trì đội hình theo yêu cầu. Cả hệ thống dùng chung bộ điều khiển DMPC để tránh va chạm và động thuận về khoảng cách, góc hướng trong đội hình di chuyển.

Hệ thống được thiết kế theo chu trình thể hiện trong hình 1.

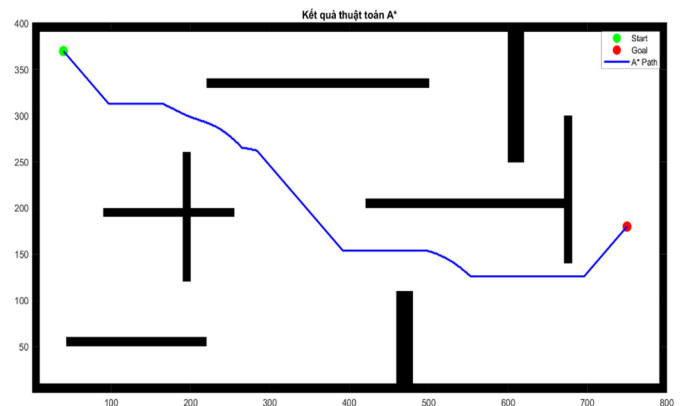


Hình 1. Lưu đồ thiết kế hệ thống



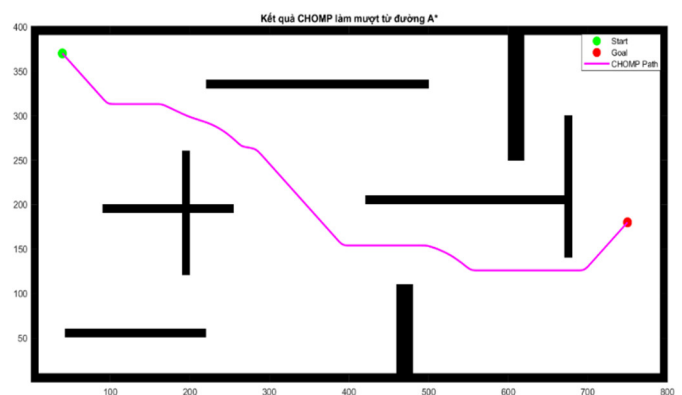
Hình 2. Bản đồ môi trường chứa điểm bắt đầu và điểm đích

Quy trình lập kế hoạch đường đi bắt đầu bằng việc thiết lập một bản đồ môi trường dạng lưới, xác định rõ điểm bắt đầu (xanh), điểm đích (đỏ) và các vật cản tính như tường chắn. Sau đó, thuật toán A* được thực thi để phác thảo lộ trình tổng thể ngắn nhất. Vì lộ trình này bao gồm các đoạn thẳng rời rạc, nó cần được tinh chỉnh để robot có thể di chuyển mượt mà. Một bước xử lý hậu kỳ là bắt buộc để làm trơn và liên tục hóa quỹ đạo, tạo ra một đường đi tham chiếu tương thích với thuật toán điều khiển DMPC.



Hình 3. Quỹ đạo tìm được bằng thuật toán A*

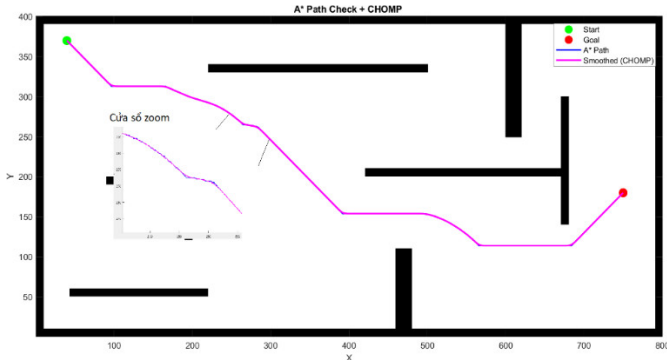
Hình 3 mô tả quá trình thuật toán A* (công thức (3)), giải quyết bài toán tìm đường đi trong môi trường có chướng ngại vật. Thuật toán được giao nhiệm vụ tìm ra lộ trình ngắn nhất từ điểm Start (màu xanh) đến điểm Goal (màu đỏ). Thuật toán đã phân tích bản đồ và các vật cản màu đen để vạch ra đường đi hiệu quả nhất, được thể hiện bằng đường màu xanh dương. Lộ trình này đã thành công trong việc điều hướng qua các không gian hẹp và các ngõ cụt để đến được đích mà không xảy ra va chạm. Đặc điểm của đường đi này là nó được tạo thành từ nhiều đoạn thẳng, tạo ra các góc cua đột ngột, cho thấy đây là kết quả tối ưu về mặt khoảng cách trên bản đồ lưới.



Hình 4. Quỹ đạo tối ưu A* bằng CHOMP

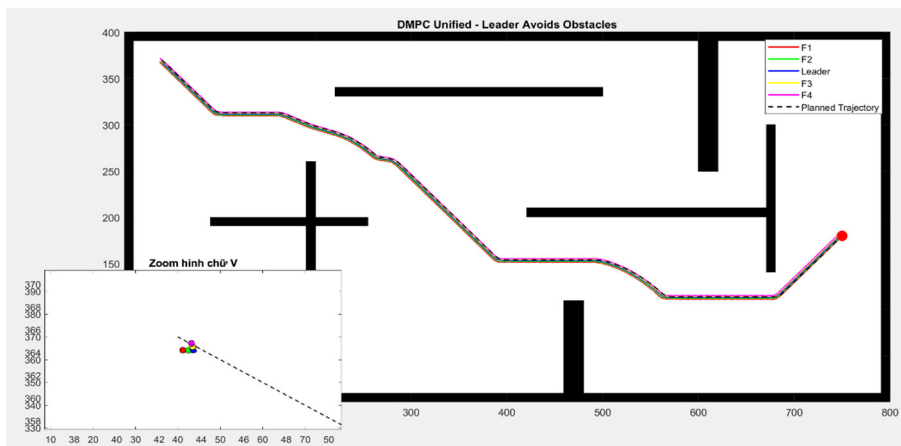
Hình 4 minh họa một quỹ đạo đã được tối ưu hóa bằng thuật toán CHOMP với đầu vào là kết quả từ thuật toán

A*. Đường cong màu tím ("CHOMP Path") biểu diễn một quỹ đạo tham chiếu trơn, liên tục và khả thi về mặt động học. Thuật toán CHOMP đã lấy đường đi gấp khúc của A* làm điểm khởi tạo và thực hiện tối ưu hóa để giảm thiểu các góc chuyển hướng đột ngột và tránh va chạm. Kết quả là một quỹ đạo trơn, mượt, không còn các điểm gián đoạn về đạo hàm (các góc nhọn), giúp nó trở nên lý tưởng để làm đầu vào cho bộ điều khiển DMPC. Quỹ đạo này vẫn đảm bảo đi từ điểm Start (xanh) đến Goal (đỏ) và tránh tất cả các vật cản tĩnh (đen).



Hình 5. So sánh quỹ đạo A* và quỹ đạo được tối ưu bằng CHOMP

Hình 5 minh họa trực quan quá trình tối ưu hóa quỹ đạo cho robot. Đường A* (màu xanh), đây là lộ trình ban đầu, có đặc tính gấp khúc và góc cạnh. Mặc dù đây là đường đi ngắn nhất về mặt lý thuyết, nó không thực tế cho robot di chuyển mượt mà. Đường CHOMP (màu tím), đây là quỹ đạo tối ưu đã được làm trơn. Nó bám theo lộ trình chung của A* nhưng đã biến các góc của nhọn thành những đường cong mềm mại, liên tục. Cửa sổ phóng to làm nổi bật sự khác biệt cốt lõi này, cho thấy CHOMP đã thành công trong việc biến một lộ trình "thô" thành một quỹ đạo khả thi, hiệu quả và sẵn sàng cho robot thực thi.



Hình 6. Quỹ đạo di chuyển của đội hình robot chữ V bám theo quỹ đạo tối ưu

Hình 6 minh họa kết quả mô phỏng của hệ thống DMPC, cho thấy nhóm robot di chuyển bám theo quỹ đạo đã được hoạch định sẵn được tạo bảo A*+CHOMP. Đường nét đứt màu đen (Planned Trajectory) là quỹ đạo tham chiếu mượt mà do A*+CHOMP tạo ra. Các đường màu liền nét (đỏ, lục, lam, vàng, tím) là quỹ đạo di chuyển thực tế của 5 robot (1 Dẫn và 4 Theo). Có thể thấy, tất cả các đường màu này gần như đồng dạng với đường nét đứt. Điều này cho thấy thuật toán điều khiển DMPC+SQP hoạt động cực kỳ hiệu quả, giúp các robot bám sát quỹ đạo mục tiêu với sai số rất nhỏ, ngay cả khi đi qua các đoạn cua phức tạp.

Mặc dù trên hình ảnh chính, các quỹ đạo trông như một, khung hình nhỏ "Zoom hình chữ V" đã cung cấp một cái nhìn cận cảnh, cho thấy vị trí tương đối của các robot tại một thời điểm. Trong cửa sổ zoom, ta thấy rõ robot Dẫn (màu xanh dương) đi đầu, và bốn robot Theo (F1, F2, F3, F4) di chuyển ngay sau, duy trì một cấu trúc hình chữ V một cách chính xác và ổn định trong suốt quá trình di chuyển.

Hình ảnh đã chứng minh một cách thuyết phục sự thành công của toàn bộ hệ thống. Lớp lập kế hoạch (A*+CHOMP) đã tạo ra một quỹ đạo an toàn và mượt mà. Sau đó, lớp điều khiển (DMPC+SQP) đã giúp nhóm robot không chỉ bám sát quỹ đạo đó với độ chính xác cao mà còn duy trì chặt chẽ đội hình chữ V được chỉ định, hoàn thành tốt nhiệm vụ di chuyển phối hợp trong môi trường có vật cản.

Các hình ảnh mô phỏng thuật toán được thể hiện trên đường link: <https://sites.google.com/view/tuan-dp/trang-ch%E1%BB%A7>

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đề xuất một khung phương pháp tích hợp mới, kết hợp giữa lập kế hoạch quỹ đạo với A* cải tiến có ràng buộc tránh chướng ngại, làm trơn quỹ đạo bằng thuật toán CHOMP, và điều khiển đội hình robot di động đa hướng theo cấu trúc Dẫn-Theo bằng phương pháp DMPC giải bằng SQP. Sự kết hợp này tạo thành một hệ thống điều khiển phối chuyển động toàn diện, trong đó quỹ đạo dẫn đầu được tính toán khả thi và mượt mà, đồng thời các robot theo duy trì đội hình ổn định,

đảm bảo tránh va chạm hiệu quả trong môi trường có vật cản tĩnh.

Kết quả mô phỏng trên MATLAB xác nhận tính hiệu quả và ổn định của hệ thống, đặc biệt trong việc duy trì đội hình chữ V và đảm bảo an toàn chuyển động. So với các nghiên cứu trước đây chỉ xử lý từng phần (lập kế hoạch hoặc điều khiển), đóng góp mới của nghiên cứu nằm ở việc tích hợp toàn bộ chuỗi xử lý từ lập kế hoạch đến điều khiển phân tán, với khả năng mở rộng cho các hệ thống nhiều robot.

Hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung vào mở rộng thuật toán trong môi trường có vật cản động hoặc môi trường thay đổi theo thời gian thực. Bên cạnh đó, tích hợp các kỹ thuật học tăng cường (Reinforcement Learning) sẽ giúp robot thích ứng linh hoạt với các kịch bản không định trước và tự động cập nhật chiến lược điều hướng trong môi trường thực.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Jiawei Meng, et al., "RRT-GPMP2: A Motion Planner for Mobile Robots in Complex Maze Environments," *arXiv:2412.07683v1* [cs.RO], 2024.
- [2]. Thanushika Jathunga, et al., "Improved Path Planning for Multi-Robot Systems Using a Hybrid Probabilistic Roadmap and Genetic Algorithm Approach," *Journal of Robotics and Control*, 6, 2, 2025.
- [3]. Xiong Yin, et al., "Route planning of mobile robot based on improved RRT star and TEB algorithm," *Scientific reports*, 14:8942, 2024.
- [4]. Jing Dong, et al., "Motion Planning as Probabilistic Inference using Gaussian Processes and Factor Graphs," in *Conference: Robotics: Science and Systems*, 2016.
- [5]. Jiawei Meng, et al., "Anisotropic GPMP2: a fast continuous-time Gaussian processes based motion planner for unmanned surface vehicles in environments with ocean currents," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 19, 2022.
- [6]. Zhang H., Lin W., Chen A., "Path Planning for the Mobile Robot: A Review," *Symmetry*, 10(10), 450, 2018.
- [7]. Xiang D., Lin H., Ouyang J., "Combined improved A* and greedy algorithm for path planning of multi-objective mobile robot," *Scientific Reports*, 12, 13273, 2022.
- [8]. AbuJabal N., Baziyad M., Farih R., Brahmi B., Rabie T., Bettayeb M., "A Comprehensive Study of Recent Path-Planning Techniques in Dynamic Environments for Autonomous Robots," *Sensors*, 24(24), 8089, 2024.
- [9]. Liu H., Shen Y., Yu S., Gao Z., Wu T., "Deep Reinforcement Learning for Mobile Robot Path Planning," *arXiv preprint arXiv:2404.06974*, 2024.
- [10]. Zhang L., Cai K., Sun Z., Bing Z., Wang C., Figueredo L., Haddadin S., Knoll A., "Motion Planning for Robotics: A Review for Sampling-based Planners," *arXiv preprint arXiv:2410.19414*, 2024.

[11]. Ratliff Nathan, et al., "CHOMP: Gradient optimization techniques for efficient motion planning," in *IEEE international conference on robotics and automation*, 2009.

[12]. M. Kalakrishnan, S. Chitta, E. Theodorou, P. Pastor, S. Schaal, "STOMP: Stochastic trajectory optimization for motion planning," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4569–4574, 2011.

[13]. Matthew Zucker, Nathan Ratliff, et al., "CHOMP: Covariant Hamiltonian Optimization for Motion Planning," *International Journal of Robotics Research*, 32, 9, 1164 - 1193, 2013.

[14]. Stern Roni, et al., "Multi-agent pathfinding: Definitions, variants, and benchmarks," in *Proceedings of the International Symposium on Combinatorial Search*, 10, 1, 2019.

[15]. Choset Howie, et al., *Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementations*. MIT press, 2005.

AUTHORS INFORMATION

**Duong Phu Tuan¹, Nguyen Tuan Minh³, Nguyen Hoang Viet⁴,
Nguyen Quang Vinh²**

¹Military Information Technology Institute, Academy of Military Science and Technology, Vietnam

²Institute of Missiles, Academy of Military Science and Technology, Vietnam

³Thai Nguyen University of Technology, Vietnam

⁴Institute of Automatic, Academy of Military Science and Technology, Vietnam