

A COMPREHENSIVE STUDY OF PATH PLANNING TECHNIQUES FOR MULTIROTOR AERIAL VEHICLES (MAVs) BASED ON MODEL PREDICTIVE CONTROL

Tran Le Thang Dong¹, Tran Thuan Hoang¹, Nguyen Huu Cong², Nguyen Thanh Ha², Nguyen Tuan Minh^{2*}
¹Duy Tan University, Danang, ²Thai Nguyen University

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 27/8/2024	Multirotor unmanned aerial vehicles (MAVs) are increasingly used in civil and military applications as potential solutions for many applications. A primary feature of MAVs is the ability to perform automatic real-time path planning to generate feasible and optimal paths to a predetermined target point, satisfy the constraints of the control system and/or the environment. In particular, predictive control models have emerged as an optimal method to solve the path planning problem for MAVs. This paper uses the synthesis, analysis, and comparison methods to provide an overview of the path planning problem for MAVs from studies in the past ten years. Accordingly, in addition to classifying and listing specific methods, we also fully survey studies applying predictive control models, thereby recognize the contributions and limitations of each approach to make useful assessments. The results of the paper can help scientists identify the challenges and future directions for this field to choose appropriate research directions.
Revised: 08/10/2024	
Published: 08/10/2024	
KEYWORDS	
Path planning	
Model predictive control	
Trajectory tracking	
Disturbance rejection	
Fault tolerance control	

NGHIÊN CỨU VỀ QUY HOẠCH ĐƯỜNG ĐI CHO PHƯƠNG TIỆN BAY KHÔNG NGƯỜI LÁI ĐA CẢNH QUẠT (MAV) DỰA TRÊN MÔ HÌNH ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO

Trần Lê Thăng Đồng¹, Trần Thuận Hoàng¹, Nguyễn Hữu Công², Nguyễn Thanh Hà², Nguyễn Tuấn Minh^{2*}
¹Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, ²Đại học Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 27/8/2024	Phương tiện bay không người lái nhiều cánh quạt (MAV) được ứng dụng ngày càng phổ biến trong dân sự và quân sự như là giải pháp tiềm năng cho nhiều ứng dụng. Một tính năng chính của MAV là khả năng thực hiện việc quy hoạch đường đi theo thời gian thực một cách tự động nhằm tạo ra các đường đi khả thi và tối ưu đến điểm mục tiêu được xác định trước, đáp ứng các ràng buộc của hệ thống điều khiển và/hoặc môi trường. Trong đó, mô hình điều khiển dự báo nổi lên như một phương pháp tối ưu để giải quyết bài toán quy hoạch đường đi cho MAV. Bài báo này sử dụng phương pháp tổng hợp, phân tích và so sánh để đưa ra một cái nhìn tổng quan về bài toán quy hoạch đường đi cho các MAV từ các nghiên cứu trong vòng mười năm trở lại đây. Theo đó, ngoài việc phân loại, thống kê các phương pháp cụ thể, chúng tôi cũng khảo sát đầy đủ các nghiên cứu áp dụng mô hình điều khiển dự báo, từ đó xác định những đóng góp và hạn chế của từng cách tiếp cận để đưa ra các đánh giá hữu ích. Kết quả bài báo có thể giúp cho các nhà khoa học định vị được những thách thức và hướng đi trong tương lai đối với lĩnh vực này để lựa chọn hướng nghiên cứu phù hợp.
Ngày hoàn thiện: 08/10/2024	
Ngày đăng: 08/10/2024	
TỪ KHÓA	
Quy hoạch đường đi	
Mô hình điều khiển dự báo	
Theo dõi quỹ đạo	
Loại bỏ nhiễu loạn	
Kiểm soát khả năng chịu lỗi	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11017>

* Corresponding author. Email: nguyentuanminh@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu

Những thay đổi về công nghệ nhanh chóng đang khiến robot trên không trở thành một công cụ hỗ trợ thiết yếu cho con người trong thời đại hiện nay. Trong số này, phương tiện bay không người lái (UAV) là robot bay được ứng dụng rộng rãi do những ưu điểm nổi bật của chúng so với các loại khác, cụ thể như: chi phí thấp, kích thước nhỏ, trọng lượng nhẹ và tính linh hoạt trong chuyển động. Hơn nữa, các đặc điểm tiên tiến của UAV là khả năng kiểm soát vị trí, tích hợp nhiều cảm biến tiên tiến, khả năng hoạt động tự trị, thực hiện nhiệm vụ với cơ chế bầy đàn... [1], [2]. Đây là yếu tố khiến cho UAV có hiệu suất làm việc cao hơn các loại phương tiện khác trong các nhiệm vụ phức tạp hoặc môi trường không chắc chắn. Những tiến bộ gần đây về năng lực tính toán của bộ điều khiển kết hợp với khả năng tích hợp dữ liệu đa cảm biến trên UAV đã thúc đẩy quá trình phát triển các hoạt động bay tự hành [3]. Tiến trình này đã mở ra nhiều cơ hội mới trong các lĩnh vực đa dạng: giám sát giao thông, giám sát môi trường, vận chuyển và giao hàng, chụp ảnh trên không, cứu hộ và dịch vụ y tế... Trong hầu hết các ứng dụng này, môi trường chưa được xác định toàn bộ hoặc một phần và các sự kiện không thể đoán trước có thể xảy ra bất cứ lúc nào do nhiều yếu tố khác nhau đã đặt ra yêu cầu cần phải có các kỹ thuật quy hoạch chuyển động (quy hoạch đường đi) tối ưu nhanh chóng và chính xác để xử lý những vấn đề không mong muốn này trong thời gian thực. Theo đó, quy hoạch đường đi được định nghĩa là quá trình tự động tạo ra các đường đi khả thi và tối ưu đến một điểm mục tiêu đã được xác định trước trong môi trường tĩnh hoặc động, đáp ứng các ràng buộc như năng lượng điện và năng lượng động và không xác định (không thể dự đoán được) [4] - [6]. Lý do môi trường không thể dự đoán được vì điều kiện môi trường thay đổi nhanh chóng, có thể do yếu tố thời tiết hoặc vật cản di động là các loại động vật bay hoặc vật thể bay khác xuất hiện ngẫu nhiên trên đường đi của UAV. Do đó, có nhiều thách thức khác nhau cần được giải quyết để có được kế hoạch chuyển động tối ưu và hiệu quả cao.

Quy hoạch đường đi tập trung vào việc xác định cách thức mà UAV di chuyển trong không gian làm việc để đạt được mục tiêu mong muốn. Quá trình này liên quan đến việc tính toán một lộ trình không có va chạm từ điểm khởi đầu đến đích. Môi trường xung quanh UAV có thể được biết rõ hoàn toàn, chỉ được biết một phần, hoặc hoàn toàn chưa biết. Trong hầu hết các tình huống thực tế, UAV thường chỉ có thông tin một phần về môi trường trước khi quy hoạch và chuyển động. Phương pháp quy hoạch đường đi có thể được phân loại thành ba nhóm như sau:

- **Phương pháp cục bộ:** phương pháp này được sử dụng trong trường hợp môi trường được xem xét là hoàn toàn/một phần không xác định. Do đó, UAV cần được trang bị các cảm biến trên bo mạch và các phương pháp điều khiển tiên tiến để nhận biết môi trường, tránh va chạm và quy hoạch đường đi theo thời gian thực. Trong tình huống này, UAV có thể điều chỉnh và tạo ra lộ trình mới để phản ứng với những thay đổi trong môi trường. Ví dụ về các kỹ thuật dựa trên mạng nơ-ron/học máy để quy hoạch đường đi trong môi trường động và không xác định có thể được tìm thấy trong [7], [8].

- **Phương pháp toàn cục:** phương pháp này chỉ có thể thực hiện khi môi trường là tĩnh và đã được UAV hiểu rõ dựa trên kiến thức có sẵn về môi trường mà người dùng hoặc cảm biến có thể cung cấp. Trong trường hợp này, thuật toán quy hoạch sẽ tạo ra một lộ trình hoàn chỉnh từ điểm xuất phát đến đích ngay từ đầu quá trình chuyển động [9], [10].

- **Phương pháp kết hợp:** phương pháp này kết hợp các lợi ích của hai phương pháp được đề cập ở trên. Trong phương pháp này, UAV sẽ đi theo đường dẫn tham chiếu và nếu cần, nó sẽ thực hiện một số sửa đổi trên đường dẫn dựa trên dữ liệu nhận được từ môi trường và tình hình hiện tại cũng như vị trí của nó [11] - [13].

Dựa vào những phương pháp đã nêu ở trên, nhiều chiến lược quy hoạch đường đi đã được đề xuất trong thập kỷ qua với những kết quả đầy hứa hẹn. Các hướng nghiên cứu chính trong quy hoạch đường đi của UAV có thể được khái quát như sau:

- **Quy hoạch đường đi tự động và tối ưu hóa:** là một trong những lĩnh vực nghiên cứu quan trọng nhất. Mục tiêu là thiết kế các thuật toán có khả năng tự động tìm ra đường đi tối ưu cho UAV từ điểm xuất phát đến đích, trong khi tránh được các chướng ngại vật và tuân thủ các hạn chế như giới hạn năng lượng, thời gian, và khoảng cách. Các phương pháp tối ưu hóa như Thuật toán Di truyền (Genetic Algorithm) [14], Thuật toán Bầy đàn (Swarm Intelligence) [1], và Tối ưu hóa đàn kiến (Ant Colony Optimization) [15] hoặc mô hình điều khiển dự báo (Mode Predictive Control) [16] - [18] đã được áp dụng để tìm ra giải pháp tốt nhất cho vấn đề này.

- **Quy hoạch đường đi trong môi trường động:** là nơi các chướng ngại vật có thể di chuyển hoặc thay đổi theo thời gian. Điều này đòi hỏi UAV phải có khả năng quy hoạch đường đi trong thời gian thực, cập nhật đường đi khi phát hiện ra những thay đổi trong môi trường. Các thuật toán như A*, D*, và RRT* (Rapidly-exploring Random Tree) [18] đã được mở rộng để xử lý các tình huống động, giúp UAV tránh được các va chạm và hoàn thành nhiệm vụ một cách an toàn.

- **Quy hoạch đường đi với nhiều UAV:** sử dụng nhiều UAV hoạt động cùng nhau đang trở thành một xu hướng quan trọng trong nghiên cứu, do tiềm năng cải thiện hiệu quả nhiệm vụ và khả năng bao phủ không gian lớn hơn. Tuy nhiên, việc quy hoạch đường đi cho một nhóm UAV đòi hỏi phải giải quyết vấn đề điều phối giữa các UAV để tránh va chạm và tối ưu hóa nhiệm vụ chung [19], [20]. Các phương pháp dựa trên lý thuyết trò chơi, lập trình song song và điều khiển phân tán đã được phát triển để giải quyết vấn đề này.

- **Quy hoạch đường đi trong môi trường không chắc chắn:** trong nhiều tình huống, UAV phải hoạt động trong môi trường không xác định, nơi mà thông tin về địa hình hoặc các chướng ngại vật không đầy đủ hoặc không chính xác [21]. Các phương pháp quy hoạch đường đi trong môi trường không xác định thường sử dụng các kỹ thuật học máy (machine learning) [22] và quy hoạch dự phòng (contingency planning) [23], cho phép UAV học hỏi và thích nghi với môi trường trong quá trình di chuyển.

- **Quy hoạch đường đi với hạn chế năng lượng:** là một yếu tố quan trọng cần xem xét trong quy hoạch đường đi cho UAV, đặc biệt là với các UAV hoạt động trong khoảng thời gian dài hoặc khoảng cách xa. Nghiên cứu trong lĩnh vực này tập trung vào tối ưu hóa đường đi để giảm thiểu tiêu thụ năng lượng, đồng thời vẫn đảm bảo UAV hoàn thành nhiệm vụ [24], [25]. Các thuật toán quy hoạch dựa trên mô hình tiêu thụ năng lượng và các chiến lược quản lý năng lượng tiên tiến đang được phát triển để giải quyết vấn đề này.

- **Quy hoạch đường đi trong điều kiện thời tiết phức tạp:** là một yếu tố không thể đoán trước và có thể ảnh hưởng đáng kể đến khả năng hoạt động của UAV. Do đó, quy hoạch đường đi trong điều kiện thời tiết phức tạp là một hướng nghiên cứu quan trọng. Các nghiên cứu tập trung vào việc tích hợp thông tin thời tiết vào quá trình quy hoạch đường đi, từ đó giúp UAV đưa ra các quyết định tối ưu hơn về đường đi và thời gian thực hiện nhiệm vụ.

- **Quy hoạch đường đi với khả năng tự phục hồi:** fault-tolerant - là một hướng nghiên cứu mới nhằm đảm bảo rằng UAV có thể tiếp tục thực hiện nhiệm vụ ngay cả khi gặp phải các sự cố như hỏng hóc phần cứng hoặc mất kết nối [26] - [28]. Các phương pháp quy hoạch đường đi với khả năng tự phục hồi tập trung vào việc phát hiện và ứng phó với các sự cố, từ đó điều chỉnh đường đi hoặc chiến lược hoạt động để đảm bảo UAV hoàn thành nhiệm vụ một cách an toàn.

- **Quy hoạch đường đi trong môi trường đô thị:** với sự phát triển của các ứng dụng UAV trong giao thông và vận tải, quy hoạch đường đi trong môi trường đô thị đang thu hút sự quan tâm lớn. Môi trường đô thị với mật độ các tòa nhà cao tầng, giao thông dày đặc, và các khu vực cấm bay đặt ra nhiều thách thức cho việc quy hoạch đường đi. Các nghiên cứu hiện nay tập trung vào phát triển các thuật toán có khả năng điều hướng hiệu quả trong môi trường phức tạp này, đồng thời tuân thủ các quy định an toàn và pháp lý [1], [29].

- **Quy hoạch đường đi dựa trên mô hình toán học và mô phỏng:** các mô hình này giúp dự đoán chính xác hơn các yếu tố ảnh hưởng đến đường đi của UAV, như lực cản không khí, tương tác từ trường, và các hiệu ứng động lực học khác. Mô phỏng cung cấp một môi trường an toàn để

thử nghiệm các chiến lược quy hoạch trước khi áp dụng chúng trong thực tế, giúp giảm thiểu rủi ro và cải thiện hiệu suất của UAV [30] - [32].

Qua các phân tích ở trên, mặc dù có nhiều thuật toán đã được đề xuất và chứng minh tính hiệu quả trong việc điều khiển UAV di động theo đường dẫn đã quy hoạch, tuy nhiên vẫn tồn tại nhiều thách thức do tính chất phi tuyến của hệ thống. Những thách thức này càng tăng thêm do nhu cầu theo kịp các mục tiêu chung, chẳng hạn như theo dõi quỹ đạo hoặc duy trì đội hình. Các nghiên cứu sâu rộng đã được tiến hành để phát triển các chiến lược điều khiển thông minh có khả năng giải quyết những thách thức này [33], [34]. Gần đây, bài toán điều khiển phương tiện không người lái được xây dựng như một bài toán điều khiển tối ưu, trong đó có thể áp dụng các kỹ thuật dựa trên tối ưu hóa. Một trong những cách tiếp cận này là mô hình điều khiển dự báo (MPC). MPC là một công cụ mạnh cho điều khiển quá trình trong các hệ thống điều khiển nói chung, đặc biệt là các quá trình phi tuyến. Thập kỷ qua đã chứng kiến sự phát triển của MPC để áp dụng cho các hệ thống không người lái nói chung và UAV nói riêng. Khả năng xử lý các hạn chế của nó hứa hẹn khả năng điều khiển hiệu quả cho UAV đơn lẻ và điều khiển hợp tác của một nhóm UAV [5], [35]. Tóm lại, các phương pháp quy hoạch đường đi và các hướng nghiên cứu phổ biến được tổng hợp và phân tích ở trên cho thấy lĩnh vực quy hoạch đường đi vẫn còn nhiều thách thức, tuy nhiên đó cũng là cơ hội cho các nhà nghiên cứu mở rộng và tìm kiếm các giải pháp tối ưu hơn cho bài toán này nhằm đáp ứng các yêu cầu và ứng dụng ngày một phức tạp và đa dạng hơn đối với UAV.

2. Phương pháp nghiên cứu

Trong bài báo này, mục tiêu của chúng tôi là nghiên cứu về quy hoạch đường đi cho các MAV tập trung vào việc tiếp cận phân tích hơn là phát triển các thuật toán. Các nội dung nghiên cứu chủ yếu nhằm mục đích xem xét các nghiên cứu áp dụng MPC để điều khiển chuyển động của MAV và cách các nhà nghiên cứu giải quyết những thách thức trong việc quy hoạch đường đi tối ưu nhằm đạt được khả năng điều hướng mạnh mẽ trong nhiều lĩnh vực khác nhau cho MAV. Theo đó, chúng tôi áp dụng một số phương pháp nghiên cứu như sau:

Phương pháp thu thập: chúng tôi thực hiện tìm kiếm và sàng lọc ra hơn 50 công trình là các bài báo có liên quan đến quy hoạch đường đi trong vòng 10 năm trở lại đây để sử dụng làm cơ sở dữ liệu cho việc phân tích sâu hơn các phương pháp quy hoạch đường đi cho MAV áp dụng mô hình điều khiển dự báo;

Phương pháp phân tích: dựa trên các bài báo đã thu thập, chúng tôi phân tích và đánh giá các vấn đề và kỹ thuật mà các tác giả sử dụng để quy hoạch đường đi kết hợp với phân tích phương pháp điều khiển dự báo dựa trên mô hình để có cái nhìn rõ hơn về cách thức hoạt động của MPC;

Phương pháp tổng hợp: Tổng hợp các phân tích thành bảng biểu từ đó đánh giá công việc hiện tại về việc áp dụng MPC vào điều khiển chuyển động của MAV.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Mô hình điều khiển dự báo - MPC

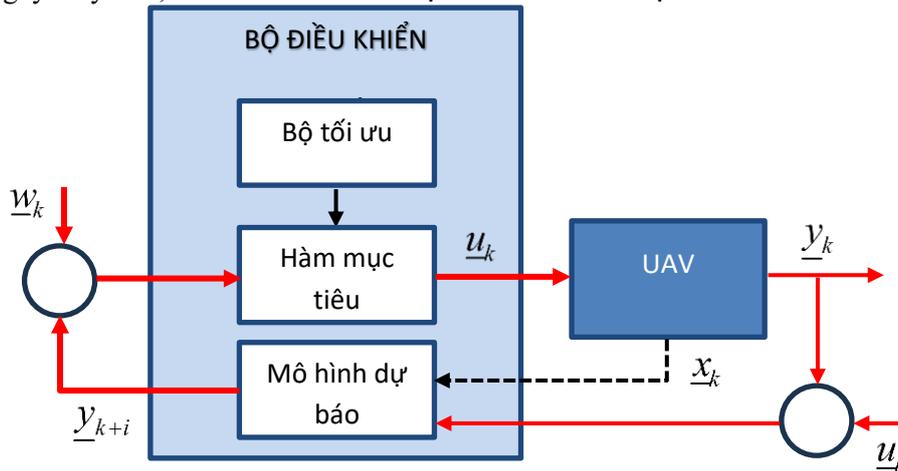
Các phương pháp điều khiển dựa trên tối ưu hóa đặc biệt là mô hình điều khiển dự báo (MPC) và những biến thể của nó đã nhận được rất nhiều sự chú ý trong cộng đồng điều khiển, do khả năng giải quyết các vấn đề ràng buộc đa biến. Mặc dù nó đã được sử dụng từ lâu trong một số quy trình công nghiệp như nhà máy lọc dầu, công nghiệp y sinh và nhà máy hóa chất [36], nhưng gần đây MPC mới bắt đầu được áp dụng cho MAV [36] - [38].

Nguyên lý của điều khiển dự báo dựa trên mô hình hoạt động bằng cách sử dụng các thông số trạng thái của cùng với trạng thái thực tế của chúng tại một số thời điểm liên tiếp để xác định tín hiệu điều khiển tối ưu trong một khoảng thời gian giới hạn. Tín hiệu điều khiển này sẽ được duy trì cho đến khi trạng thái của MAV được cập nhật, sau đó một tín hiệu điều khiển mới sẽ được

tính toán và áp dụng cho khoảng thời gian hữu hạn tiếp theo. Tóm lại, nguyên lý cơ bản của MPC có thể được liệt kê như sau:

- Dự báo trạng thái tương lai của hệ thống dựa trên mô hình toán học;
- Tối ưu hóa hàm mục tiêu với các ràng buộc;
- Áp dụng tín hiệu điều khiển tối ưu đầu tiên;
- Cập nhật và lặp lại quy trình trong thời gian thực.

Theo nguyên lý trên, cấu trúc của MPC được mô tả như thể hiện ở hình 1.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc của mô hình điều khiển dự báo

Theo hình trên, bộ điều khiển dự báo gồm có các thành phần: Mô hình dự báo có nhiệm vụ xác định tín hiệu ra tương lai \underline{y}_{k+1} dựa vào tín hiệu ở thời điểm k hiện tại; Hàm mục tiêu xây dựng từ chất lượng mong muốn hệ thống phải đạt đến $\underline{y}_k \rightarrow \underline{w}_k$; Bộ tối ưu hóa cho phép tìm nghiệm \underline{u}_k để hàm mục tiêu đạt giá trị nhỏ nhất.

3.1.1. Mô hình điều khiển dự báo tuyến tính – LMPC

* Xây dựng mô hình dự báo

MPC được sử dụng để điều khiển MAV liên quan đến việc sử dụng các phương pháp tuyến tính. Cách tiếp cận phổ biến nhất là sử dụng mô hình điều khiển dự báo tuyến tính (LMPC) để quản lý vị trí động học của MAV, với giả định rằng bộ điều khiển trạng thái đã được triển khai và mô hình trạng thái đã được xác định như ở trong công thức (1).

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &= \frac{1}{\tau_{\phi}}(k_{\phi}\phi_{ref} - \phi) \\ \dot{\theta} &= \frac{1}{\tau_{\theta}}(k_{\theta}\theta_{ref} - \theta) \\ \dot{\psi} &= \dot{\psi}_{ref}\end{aligned}\quad (1)$$

Trong đó: k_{ϕ}, k_{θ} và $\tau_{\phi}, \tau_{\theta}$ lần lượt là độ lợi DC và các hằng số thời gian của động lực học vòng kín đối với góc lặn và góc nghiêng tương quay quanh trục x (roll) và trục y (pitch); trong khi đó ϕ_{ref}, θ_{ref} là các góc lặn và góc nghiêng tham chiếu và ψ_{ref} là tốc độ quay quanh trục z (yaw).

Với mô hình này, chúng ta có thể tuyến tính hóa phần còn lại của động học hệ thống xung quanh trạng thái lơ lửng của MAV. Chúng tôi xác định vector trạng thái x và vector đầu vào điều khiển u như sau:

$$\begin{aligned} \underline{x} &= \begin{bmatrix} p^T & v^T & I\phi I\theta \end{bmatrix}^T \\ \underline{u} &= \begin{bmatrix} I\phi_{ref} & I\theta_{ref} & T_{ref} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó: T_{ref} là lực đẩy tham chiếu, $I\phi I\theta$ là góc nghiêng và góc lật được thể hiện trong hệ quy chiếu quán tính. Phương trình (3) thể hiện mối quan hệ giữa góc nghiêng và góc lật:

$$\begin{bmatrix} \phi \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi \\ -\sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I\phi \\ I\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

Sau khi tuyến tính hóa và rời rạc hóa, mô hình điều khiển được thiết lập như sau:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A\underline{x}_k + B\underline{u}_k \\ \underline{y}_k = C\underline{x}_k + \underline{v}_k \end{cases} \text{ với nhiễu } \underline{v}_k \quad (4)$$

Theo đó, ta xây dựng bộ điều khiển dự báo để có tín hiệu ra \underline{y}_k bám theo tín hiệu mẫu \underline{w}_k . Giả thuyết rằng nhiễu là hàm biến đổi chậm và xem như là hằng số trong cửa sổ dự báo hiện tại. Từ phương trình (4) ta có các đầu ra dự báo \underline{y}_{k+i} với $i=1,2,\dots,N$ tại thời điểm $k+1$ với thông tin tại thời điểm hiện tại k như sau:

$$\underline{y}_{k+i} = CA^i \underline{x}_k + CA^{i-1} B \underline{u}_k + \dots + CAB \underline{u}_{k+i-2} + CB_k \underline{u}_{k+i-1} + \underline{v}'_k \quad (5)$$

Trong đó \underline{v}'_k là ước lượng nhiễu. Từ phương trình trên ta có vector đầu ra dự báo trong cửa sổ dự báo hiện tại như phương trình (6) dưới đây:

$$\begin{bmatrix} \underline{y}_{k+1} \\ \vdots \\ \underline{y}_{k+N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{v}'_k \\ \vdots \\ \underline{v}'_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} CA \\ \vdots \\ CA^N \end{bmatrix} \underline{x}_k + \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N-1}B & CA^{N-2}B & \dots & CB \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{u}_k \\ \vdots \\ \underline{u}_{k+N-1} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \underline{y} = \underline{d} + F\underline{u} \quad (6)$$

Trong đó:

$$\begin{aligned} \underline{y} &= \begin{bmatrix} \underline{y}_{k+1} \\ \vdots \\ \underline{y}_{k+N} \end{bmatrix} & F &= \begin{bmatrix} CB & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N-1}B & CA^{N-2}B & \dots & CB \end{bmatrix} \\ \underline{d} &= \begin{bmatrix} \underline{v}'_k \\ \vdots \\ \underline{v}'_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} CA \\ \vdots \\ CA^N \end{bmatrix} \underline{x}_k & \underline{u} &= \begin{bmatrix} \underline{u}_k \\ \vdots \\ \underline{u}_{k+N-1} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

Xét: \underline{x}_k có thể đo được, \underline{v}'_k là giá trị ước lượng của hằng số nhiễu \underline{v}_k đã biết. Do đó, \underline{d} là vector đã có ở thời điểm k hiện tại. Như vậy, các vector \underline{y} là đầu ra dự báo chỉ phụ thuộc vào các vector đầu vào tương lai \underline{u} .

* *Ước lượng nhiễu*

Xét thời điểm k hiện tại, từ các giá trị là \underline{x}_k , \underline{y}_k có thể đo được và nhiễu \underline{v}_k , ta hoàn toàn ước lượng được từ các giá trị này do $\underline{v}'_k = \underline{y}_k - C\underline{x}_k$ và giá trị ước lượng sẽ được xem là hằng trong toàn bộ cửa sổ dự báo hiện tại.

* *Hàm mục tiêu và tối ưu hóa*

Tiếp tục sử dụng hàm mục tiêu cho mọi thời điểm k ở dạng toàn phương, ta có phương trình sau:

$$J_k = (\underline{y} - \underline{w})^T Q_k (\underline{y} - \underline{w}) + \underline{u}^T R_k \underline{u} \text{ với } \underline{w} = \text{col}(\underline{w}_k + 1, \underline{w}_k + 2, \dots, \underline{w}_{k+N}) \quad (8)$$

và Q_k, R_k là hai ma trận đối xứng xác định dương tương ứng với chi phí sai lệch trạng thái và chi phí sai lệch điều khiển, sẽ có:

$$\underline{u} = (F^T Q_k F + R_k)^{-1} F^T Q_k (\underline{w} - \underline{d}) \quad \text{và} \quad \underline{u}_k = (I, 0, \dots, 0) \underline{u} \quad (9)$$

Từ lý luận như trên, ta tổng quát hóa thành thuật toán điều khiển dự báo cho hệ tuyến tính như sau:

* *Giải thuật điều khiển 1*

- **Bước 1:** Chọn cửa sổ dự báo $N \geq 2$. Xây dựng ma trận F. Gán $k = 0$;
- **Bước 2:** Chọn hai ma trận đối xứng xác định dương Q_k, R_k . Đo $\underline{x}_k, \underline{y}_k$;
Xác định \underline{v}'_k và tính vectơ \underline{d} .
- **Bước 3:** Tính \underline{u} và \underline{u}_k .
Áp dụng \underline{u}_k để điều khiển đối tượng trong khoảng thời gian trích mẫu;
- **Bước 4:** Gán $k := k + 1$ và quay về bước 2.

3.1.2. Mô hình điều khiển dự báo phi tuyến – NMPC

* *Xây dựng mô hình dự báo*

Xem xét đối tượng điều khiển có mô hình như sau:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = f(\underline{x}_k, \underline{u}_k) \\ \underline{y}_k = g(\underline{x}_k) \end{cases} \quad \text{với } f(\underline{x}, \underline{u}), g(\underline{x}) \text{ là hai vectơ hàm tron.} \quad (10)$$

Theo đó, ta triển khai bộ điều khiển phản hồi trạng thái sao cho $\underline{y}_k \rightarrow \underline{w}_k$.

Trong đó $\{\underline{w}_k\}$ là dãy tín hiệu mẫu đã biết trước. Từ mô hình ở phương trình (10), ở thời điểm k hiện tại và trong toàn bộ cửa sổ dự báo $[k, k + N]$ tương ứng, khi đo được \underline{x}_k và chu kỳ trích mẫu đủ nhỏ, hai vectơ hàm $f(\underline{x}, \underline{u}), g(\underline{x})$ trong lân cận $\underline{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}$ sẽ được xấp xỉ bởi:

$$\begin{aligned} f(\underline{x}, \underline{u}) &\approx f(\underline{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}) + A_k (\underline{x} - \underline{x}_{k-1}) + B_k (\underline{u} - \underline{u}_{k-1}) = A_k \underline{x} + B_k \underline{u} + \underline{v}_k \\ g(\underline{x}) &\approx g(\underline{x}_{k-1}) + C_k (\underline{x} - \underline{x}_{k-1}) = C_k \underline{x} + \underline{\zeta}_k \end{aligned} \quad (11)$$

Trong đó:

$$A_k = \left. \frac{\partial f(\underline{x}, \underline{u})}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}}, \quad B_k = \left. \frac{\partial f(\underline{x}, \underline{u})}{\partial \underline{u}} \right|_{\underline{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}}, \quad C_k = \left. \frac{\partial g(\underline{x})}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x}_{k-1}}$$

$$\underline{v}_k \approx f(\underline{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}) - A_k \underline{x}_{k-1} - B_k \underline{u}_{k-1} \quad \text{và} \quad \underline{\zeta}_k = g(\underline{x}_{k-1}) - C_k \underline{x}_{k-1}$$

Tương tự hệ tuyến tính đã xét, trong lân cận $\underline{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1}$ và tại $\underline{x}_k, \underline{u}_k$ hệ được xấp xỉ bởi:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A_k \underline{x}_k + B_k \underline{u}_k + \underline{v}_k \\ \underline{y}_k = C_k \underline{x}_k + \underline{\zeta}_k \end{cases} \quad (12)$$

Từ đó, khi xem $\underline{v}_k, \underline{\zeta}_k$ là hằng trong toàn bộ cửa sổ dự báo hiện tại $[k, k + N]$ hệ sẽ có mô hình dự báo như sau:

$$\underline{y} = F \underline{u} + \underline{d} \quad (13)$$

Trong đó:

$$\underline{y} = \begin{bmatrix} \underline{y}_{k+1} \\ \vdots \\ \underline{y}_{k+N} \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} CB & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N-1}B & CA^{N-2}B & \cdots & CB \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_k \\ I \end{bmatrix}, \quad C = (C_k, 0) \quad (14)$$

$$\underline{u} = \begin{bmatrix} \Delta \underline{u}_k \\ \vdots \\ \Delta \underline{u}_{k+N-1} \end{bmatrix}, \quad \underline{d} = \begin{bmatrix} CA \\ \vdots \\ CA^N \end{bmatrix} \underline{z}_k + \begin{bmatrix} C_k \underline{v}_k + \underline{\zeta}_k \\ \vdots \\ C_k (A_k^{N-1} + \dots + A_k + I) \underline{v}_k + \underline{\zeta}_k \end{bmatrix} \quad \text{và} \quad \underline{z}_k = \begin{bmatrix} \underline{x}_k \\ \underline{u}_{k-1} \end{bmatrix}$$

* Hàm mục tiêu và tối ưu hóa

Hàm mục tiêu dạng toàn phương cho mọi thời điểm k :

$$J_k = (\underline{y} - \underline{w})^T Q_k (\underline{y} - \underline{w}) + \underline{u}^T R_k \underline{u} \quad (15)$$

Với Q_k, R_k là hai ma trận đối xứng xác định dương tùy chọn, ta có:

$$\underline{u} = (F^T Q_k F + R_x)^{-1} F^T Q_k (\underline{w} - \underline{d}) \quad \text{và} \quad \underline{u}_k = \underline{u}_{k-1} + (I, 0, \dots, 0) \underline{u} \quad (16)$$

Trong đó: $\underline{w} = \text{col}(w_{k+1}, w_{k+2}, \dots, w_{k+N})$

Từ lý luận như trên, ta tổng quát hóa thành thuật toán điều khiển dự báo cho hệ phi tuyến như sau:

* *Giải thuật điều khiển 2*

- **Bước 1:** Chọn cửa sổ dự báo $N \geq 2$. Gán $k=0, \underline{u}_{k-1} = \underline{0}$;
- **Bước 2:** Chọn hai ma trận đối xứng xác định dương Q_k, R_k . Đo \underline{x}_k ;
Xây dựng các ma trận tham số A_k, B_k, C_k và tính A, B, C, F;
Xác định $\underline{v}_k, \underline{c}_k$ và tính \underline{d} .
- **Bước 3:** Tính \underline{u} và \underline{u}_k .
Áp dụng \underline{u}_k để điều khiển đối tượng trong khoảng thời gian trích mẫu;
- **Bước 4:** Gán $k := k + 1$ và quay về bước 2.

3.2. Quy hoạch đường đi cho MAV dựa trên điều khiển dự báo

Trong phần này chúng tôi tiến hành khảo sát việc ứng dụng MPC trong việc giải quyết bài toán quy hoạch đường đi của MAV với các phương pháp khác nhau. Trong đó MPC đóng vai trò trung tâm trong việc giải quyết bài toán điều khiển MAV đảm bảo sự ổn định và hiệu quả. Hầu hết các nghiên cứu được tổng hợp trong Bảng 1.

Đáp ứng sự nhiễu loạn của môi trường có tầm quan trọng lớn trong việc điều khiển UAV. Do đó việc thiết kế bộ điều khiển có thể đảm bảo quỹ đạo tối ưu trong môi trường như vậy là một vấn đề đầy thách thức. Trong [39], một bộ điều khiển phi tuyến NMPC được phát triển để giải quyết vấn đề nhiễu loạn môi trường và nhiễu đo lường gây ảnh hưởng đến cánh quạt của quadrotor. Nghiên cứu [40] mô hình hóa động lực học MAV bằng cách tiếp cận hệ thống lai, cụ thể là một tập hợp các hệ thống phi tuyến từng phần (PWA) xung quanh các chuyển động tịnh tiến và quay. Sơ đồ điều khiển được đề xuất là dạng kép, bao gồm một MPC tích hợp cho các chuyển động tịnh tiến, sau đó là một sơ đồ MPC để theo dõi các chuyển động thay đổi trạng thái của quadrotor. Phương pháp này cung cấp nhiều quyền kiểm soát hơn cho các thao tác bay đòi hỏi sự nhanh chóng và chính xác. Trong [41] tác giả sử dụng LMPC để dẫn đường an toàn cho MAV trong các khu vực chưa được biết đến bằng cách sử dụng thông tin từ hệ thống cảm biến. Hệ thống sử dụng camera stereo kết hợp với một phương tiện đo quán tính để ước tính vị trí của phương tiện và xây dựng mô hình 3D của môi trường xung quanh ngay trên phương tiện. Thuật toán này kết hợp giữa giải pháp tuyến tính cho việc quy hoạch đường đi, theo dõi quỹ đạo và chiến lược phân đoạn hiệu quả để tránh va chạm. Trường hợp có nhiều MAV cùng hoạt động, nghiên cứu [42] mô tả một hệ thống chia sẻ thông tin nhiễu loạn với nhau giữa các MAV trên cùng một đường bay để chúng có thể biết trước các nhiễu loạn và thực hiện các hành động ứng phó sớm. Hơn nữa các MAV có thể sử dụng thông tin nhiễu loạn này trong các bước dự đoán của mô hình MPC. Tương tự, nghiên cứu [43] gần đây cũng xét đến tính an toàn của việc quy hoạch đường đi của MAV trong môi trường đô thị với sự hiện diện của nhiều tòa nhà áp dụng kết hợp MPC và các hàm cản trở CBF giúp cho MAV có thể giữ khoảng cách an toàn với chướng ngại vật và cũng có thể tìm ra đường đi ngắn nhất trong khi thực hiện chuyến bay. Việc lập kế hoạch cho các nhiệm vụ hợp tác giữa nhiều MAV cũng được triển khai trong nghiên cứu [18], [44]. Theo đó các nhiệm vụ cụ thể được phân chia bằng cách sử dụng thuật toán Hungary, sau đó

RRT* cải tiến được áp dụng để lập quỹ đạo hệ thống của nhiều MAV. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu về quy hoạch đường đi ở trên đều giới hạn ở mục tiêu cố định hoặc môi trường tĩnh. Do đó, một phương pháp quy hoạch đường đi trong môi trường ba chiều phức tạp được đề xuất trong [29], [32]. Theo đó thuật toán A* được kết hợp với MPC để tăng độ chính xác trong các ước tính chuyển động của MAV. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp này có khả năng dự đoán mạnh đối với sự thay đổi của môi trường trong thời gian thực. Bên cạnh đó để tăng tốc độ dự đoán của mô hình, bài báo [45] áp dụng kết hợp phương pháp trường thế năng APF trong hàm mục tiêu của MPC như một hàm con để tối ưu hóa bộ điều khiển. Gần đây, một kỹ thuật tích hợp MPC và thuật toán Standoff được đề xuất để giải quyết vấn đề quy lập kế hoạch đường đi mà UAV có thể gặp phải khi theo dõi mục tiêu di chuyển một cách hợp tác trong môi trường ba chiều phức tạp. Mô hình hợp nhất được xây dựng để đảm bảo lập kế hoạch quỹ đạo và duy trì đội hình, tối đa hóa phạm vi phát hiện của cảm biến UAV trong khi giảm thiểu khả năng mất mục tiêu với chi phí tối thiểu.

Bảng 1. Tóm tắt các nghiên cứu áp dụng MPC liên quan đến quy hoạch đường đi cho MAV

Năm	Nghiên cứu	Mô hình MPC			Kết quả			
		LMPC	NMPC	Khác	Lập kế hoạch	Theo dõi quỹ đạo	Loại bỏ nhiễu loạn	Kiểm soát lỗi
2024	[17], [43]	X			X			
	[16]			MPC-Gauss		X		
2023	[18]			MPC-RRT*	X	X		
	[56]			MPC-Standoff		X		
2022	[51]		X			X		
2021	[29]			MPC-RRT	X			
	[45]			MPC-APF	X	X		
	[44]			MPC-RRT*	X		X	
2020	[49]		X		X	X		
	[26]			FTMPC		X		X
	[27]			MPC-NPLT		X		X
2019	[57]		X		X			
	[32]		X		X			
2018	[55]			Bispinner		X		X
	[31]		X		X			X
2017	[41]	X			X	X		X
	[53]		X		X			
2016	[50]			MPC-RRT	X			
	[52]		X			X	X	
2015	[30]		X		X			
	[42]		X			X	X	
2014	[39]		X		X			
	[40]	X				X		
	[58]	X			X			

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu được thực hiện để đạt được khả năng vận hành tự động của MAV, tuy nhiên vẫn còn một số vấn đề cần được giải quyết thêm để nâng cao mức độ tự động của chúng. Hầu hết các nghiên cứu tổng hợp trong bài báo này đều xử lý riêng biệt các vấn đề về quy hoạch đường đi và điều khiển theo dõi quỹ đạo [18], [27], [44] - [46], điều này còn xa so với yêu cầu về hoạt động tự động hoàn toàn của UAV. Bên cạnh đó, phần lớn các thuật toán quy hoạch đường đi vòng kín có xu hướng tạo ra những lượt rẽ không cần thiết và không có đảm bảo rằng UAV có thể theo đúng đường đã lập kế hoạch. Thêm vào đó, các thuật toán này chỉ được kiểm tra thông qua mô phỏng và không đưa ra giải pháp khi UAV lệch khỏi đường đã tạo. Do đó,

để bù đắp sự không chắc chắn của mô hình bằng cách sử dụng kỹ thuật điều khiển trượt, biến trượt thường được sử dụng để xây dựng các sơ đồ thích ứng [47], [48].

Ngoài ra, công trình [49], [50] đề cập cụ thể đến vai trò của các ràng buộc đầu vào trong thiết kế điều khiển mô hình dự báo phi tuyến (NMPC) trong quy hoạch đường đi cho các MAV. Để đạt được hiệu suất cao với yêu cầu tính toán nhẹ nhàng, nghiên cứu trong tài liệu [51] đã giới thiệu một phương pháp NMPC thời gian thực, không có ràng buộc, kết hợp tối ưu hóa quỹ đạo và điều khiển theo dõi trong một cách tiếp cận thống nhất trên nền tảng di động thông minh. Phương pháp này sử dụng thuật toán điều khiển tối ưu lặp lại - cụ thể là tuyến tính tuần tự - dựa trên MPC để giải quyết vấn đề điều khiển phi tuyến cơ bản và đồng thời tính toán các thành phần điều khiển tối ưu cả trong phần điều khiển dự đoán trước và điều khiển phản hồi. Các tác giả đã chứng minh rằng phương pháp này có thể tạo ra các quỹ đạo kéo dài vài giây chỉ trong vài mili giây. Tập trung vào vấn đề bay tránh va chạm trong quy hoạch đường đi, nghiên cứu trong tài liệu [31], [52] - [54] áp dụng NMPC cho vấn đề tránh chướng ngại vật đối với phương tiện bay quadrotor. Ở mức độ phức tạp, việc tránh chướng ngại vật động là chức năng thiết yếu trong môi trường thực tế. Tránh chướng ngại vật động giúp cải thiện tỷ lệ thành công của nhiệm vụ. Theo đó nghiên cứu [16] đề xuất một bộ điều khiển tích hợp MPC và với bộ biến đổi Gaussian để dự báo chuyển động của chướng ngại vật đang di chuyển dựa trên các quan sát có nhiễu. Các thử nghiệm cho thấy kết quả đầy hứa hẹn khi áp dụng trên các loại MAV.

Khả năng kiểm soát lỗi là một thuộc tính thiết yếu của mọi cơ chế điều khiển. Vì MAV có thể đảm nhận những vai trò quan trọng, trong khí tính chất không xác định của không khí trong môi trường hoạt động của MAV khiến chúng trở thành yếu tố rủi ro tiềm ẩn đối với hoạt động bay của MAV. Do đó, việc đánh giá khả năng chịu lỗi trong quá trình điều khiển chuyến bay là đặc biệt quan trọng. Nghiên cứu [55] đã chứng minh tiềm năng duy trì khả năng điều khiển toàn bộ hoặc một phần của MAV bốn cánh quạt khi bị hỏng mất đi một hoặc thậm chí là hai cánh. Đóng góp của MPC áp dụng vào trong thiết kế của các bộ điều khiển cũng đã được chứng minh ở các nghiên cứu [26], [27] theo đó, các phương pháp đề xuất có thể đạt được hiệu suất kiểm soát lỗi mong đợi và hiệu suất điều khiển theo dõi đường đi tốt hơn nhiều trong trường hợp cảm biến bị lỗi.

Các phân tích ở trên cho thấy MPC là một trong những phương pháp đầy hứa hẹn để điều khiển chuyển động của các hệ thống không người lái nói chung và phương tiện bay không người lái nói riêng. MPC sử dụng mô hình toán học của MAV để dự đoán trạng thái tương lai và tối ưu hóa quỹ đạo bay dựa trên các ràng buộc về an toàn, tiêu hao năng lượng và hiệu suất. Điều này giúp MAV hoạt động hiệu quả hơn trong các môi trường phức tạp và thay đổi, đảm bảo sự ổn định và chính xác trong quá trình điều khiển. Những ưu điểm của MPC có thể được liệt kê như sau:

- Dự đoán và tối ưu hóa: MPC sử dụng mô hình toán học để dự đoán hành vi hệ thống trong tương lai, từ đó tối ưu hóa quyết định điều khiển để đạt hiệu suất cao nhất;

- Xử lý các ràng buộc: MPC có khả năng xử lý các ràng buộc phức tạp về đầu vào và trạng thái, đảm bảo hệ thống hoạt động an toàn và hiệu quả;

- Độ ổn định cao: Nhờ vào việc liên tục cập nhật mô hình và phản hồi, MPC giúp hệ thống duy trì ổn định ngay cả trong môi trường biến đổi;

- Linh hoạt và có khả năng ứng phó với nhiễu và các thay đổi: MPC có thể áp dụng cho nhiều loại hệ thống khác nhau, từ đơn giản đến phức tạp, như UAV, ô tô tự lái, hoặc các quy trình công nghiệp và có thể điều chỉnh điều khiển theo thời gian thực, giúp hệ thống đối phó với các nhiễu và biến đổi không lường trước được trong môi trường;

- Khả năng ứng phó với nhiễu và thay đổi mô hình: MPC có khả năng điều chỉnh dựa trên thông tin thực tế, giúp hệ thống xử lý tốt các tình huống bất ngờ và nhiễu. Cụ thể là khả năng dự báo trước, khả năng xử lý các ràng buộc, động lực phi tuyến và hệ thống nhiều đầu vào, nhiều đầu ra và tính chất tối ưu của nó, đã khiến MPC trở thành một trong những sơ đồ điều khiển được triển khai phổ biến nhất trong nhiều loại ứng dụng. Ảnh hưởng của nó không chỉ mở rộng đến việc điều khiển MAV đơn lẻ mà còn đến việc kiểm soát bầy MAV.

3.3. Các thách thức và định hướng nghiên cứu về quy hoạch đường đi

Như đã trình bày ở trên, quy hoạch đường đi cho phương tiện bay không người lái là một lĩnh vực nghiên cứu đầy thách thức do môi trường hoạt động của UAV thường rất phức tạp và thay đổi liên tục. Một trong những thách thức lớn nhất là làm thế nào để UAV có thể tự động lập kế hoạch và điều chỉnh đường bay một cách tối ưu trong khi đảm bảo an toàn, tránh chướng ngại vật, và tiết kiệm năng lượng [56], [57]. Các yếu tố như địa hình phức tạp, sự tồn tại của nhiều UAV hoạt động cùng lúc (hệ thống bầy đàn), và yêu cầu về thời gian thực là những khó khăn đáng kể trong việc thiết kế các thuật toán quy hoạch đường đi.

Ngoài ra, khả năng dự đoán và xử lý những tình huống bất ngờ trong thời gian thực cũng là một vấn đề nan giải [58]. Các hướng nghiên cứu hiện tại tập trung vào việc phát triển các thuật toán thông minh như tối ưu hóa lai (hybrid optimization), các thuật toán truyền cảm hứng từ sinh học (bio-inspired algorithms), và cải thiện khả năng tự tổ chức của các UAV bầy đàn. Việc tích hợp trí tuệ nhân tạo và học sâu vào quy hoạch đường đi cũng đang được nghiên cứu nhằm nâng cao hiệu quả và độ tin cậy trong các nhiệm vụ phức tạp và đòi hỏi cao.

Mặc dù nỗ lực to lớn đã được dành riêng để triển khai MPC trong các hệ thống không người lái nhưng vẫn tồn tại những thách thức đáng kể. Như đã đề cập trong bài đánh giá này, việc áp dụng MPC vẫn còn hạn chế trong các ứng dụng thời gian thực, đặc biệt đối với các hệ thống phi tuyến như UGV và UAV. MPC được coi là một phương pháp dự đoán, trong khi vấn đề tối ưu hóa phải được giải quyết trực tuyến. Vấn đề chính liên quan đến MPC là thời gian tính toán. Vì vậy, hướng nghiên cứu chính trong lĩnh vực này là giảm gánh nặng tính toán.

Nhiều hướng đi trong tương lai có thể được tiến hành để vượt qua những thách thức đã đề cập trước đó. Các định hướng trong tương lai có thể được liệt kê như sau:

- Cải tiến các thuật toán MPC: tối ưu hóa thời gian tính toán, xử lý nhiều ràng buộc phức tạp hơn;
- Áp dụng học máy kết hợp với MPC: tự động cải thiện mô hình dự báo;
- Khả năng tích hợp với các công nghệ mới: AI, IoT, 5G.

4. Kết luận

Trong bài báo này chúng tôi đã xem xét nhiều nghiên cứu liên quan đến quy hoạch đường đi, trong đó đặc biệt chú ý đến hướng tiếp cận sử dụng mô hình điều khiển dự báo (MPC) dựa trên nguyên lý của bài toán điều khiển tối ưu – một phương pháp phù hợp để điều khiển cho UAV đơn lẻ hoặc bầy đàn. Bằng việc mô tả lại phương pháp MPC kết hợp làm rõ sự khác nhau giữa bộ điều khiển tuyến tính và bộ điều khiển phi tuyến từ đó khẳng định sự phù hợp và mạnh mẽ của MPC trong giải quyết bài toán quy hoạch. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng, mặc dù MPC có một số thách thức nhưng những lợi thế và lợi ích của nó trong việc kiểm soát các hệ thống đã mang lại nhiều hướng nghiên cứu hiệu quả cho bài toán quy hoạch đường đi cho UAV nói chung và MAV nói riêng. Những thách thức và hướng đi trong tương lai cũng đã được đề cập nhằm tạo điều kiện thuận lợi cho các nghiên cứu mới hơn trong lĩnh vực nghiên cứu này.

Lời cảm ơn

Các tác giả xin cảm ơn Đại học Thái Nguyên đã tạo điều kiện để tác giả hoàn thành nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] R. Cooley, S. Wolf, and M. Borowczak, "Secure and Decentralized Swarm Behavior with Autonomous Agents for Smart Cities," in *2018 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, Kansas City, MO, USA: IEEE, Sep. 2018, pp. 1-8, doi: 10.1109/ISC2.2018.8656939.
- [2] H. T. Do, H. T. Hua, H. T. T. Nguyen, M. T. Nguyen, and H. T. Tran, "Cooperative Tracking Framework for Multiple Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)," in *Advances in Engineering Research and Application - Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 366, Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 276-285, doi: 10.1007/978-3-030-92574-1_29.

- [3] H. T. Do, H. T. Hua, M. T. Nguyen, C. V. Nguyen, H. T. T. Nguyen, H. T. Nguyen, and N. T. T. Nguyen, "Formation control algorithms for multiple-uavs: a comprehensive survey," *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, vol. 8, no. 27, 2021, doi: 10.4108/eai.10-6-2021.170230.
- [4] C. Zammit, "3D Path Planning for UAVs in Dynamic Environments in the Presence of Uncertainties," PhD thesis, Delft University of Technology, 2021, doi: 10.4233/UUID:9A3302F6-6B8F-4AAD-B877-B270BEE7AA78.
- [5] A. A. Saadi, A. Soukane, Y. Meraihi, A. B. Gabis, S. Mirjalili, and A. Ramdane-Cherif, "UAV Path Planning Using Optimization Approaches: A Survey," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 29, no. 6, pp. 4233–4284, Oct. 2022, doi: 10.1007/s11831-022-09742-7.
- [6] M. T. Nguyen, C. V. Nguyen, H. T. Do, H. T. Hua, T. A. Tran, A. D. Nguyen, G. Ala, and F. Viola, "UAV-assisted data collection in wireless sensor networks: A comprehensive survey," *Electronics*, vol. 10, no. 21, 2021, doi: 10.3390/electronics10212603.
- [7] M. T. Nguyen, H. M. La, and K. A. Teague, "Collaborative and Compressed Mobile Sensing for Data Collection in Distributed Robotic Networks," in *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, vol. 5, no. 4, pp. 1729–1740, Dec. 2018, doi: 10.1109/TCNS.2017.2754364.
- [8] F. Wang, X. Zhu, Z. Zhou, and Y. Tang, "Deep-reinforcement-learning-based UAV autonomous navigation and collision avoidance in unknown environments," *Chin. J. Aeronaut.*, vol. 37, no. 3, pp. 237–257, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.cja.2023.09.033.
- [9] A. Majeed and S. Lee, "A Fast Global Flight Path Planning Algorithm Based on Space Circumscription and Sparse Visibility Graph for Unmanned Aerial Vehicle," *Electronics*, vol. 7, no. 12, p. 375, Dec. 2018, doi: 10.3390/electronics7120375.
- [10] L. Rocha, M. Aniceto, I. Araujo, and K. Vivaldini, "A UAV Global Planner to Improve Path Planning in Unstructured Environments," in *2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Athens, Greece: IEEE, Jun. 2021, pp. 688–697, doi: 10.1109/ICUAS51884.2021.9476692.
- [11] D. Ortiz-Arroyo, "A hybrid 3D path planning method for UAVs," in *2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS)*, Cancun, Mexico: IEEE, Nov. 2015, pp. 123–132, doi: 10.1109/RED-UAS.2015.7440999.
- [12] E. Zehavi and N. Agmon, "Hybrid Path Planning for UAV Traffic Management," in *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Prague, Czech Republic: IEEE, Sep. 2021, pp. 6427–6433, doi: 10.1109/IROS51168.2021.9636390.
- [13] T. Zhang, X. Huo, S. Chen, B. Yang, and G. Zhang, "Hybrid Path Planning of A Quadrotor UAV Based on Q-Learning Algorithm," in *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, Wuhan: IEEE, Jul. 2018, pp. 5415–5419, doi: 10.23919/ChiCC.2018.8482604.
- [14] D. Debnath, F. Vanegas, S. Boiteau, and F. Gonzalez, "An Integrated Geometric Obstacle Avoidance and Genetic Algorithm TSP Model for UAV Path Planning," *Drones*, vol. 8, no. 7, p. 302, Jul. 2024, doi: 10.3390/drones8070302.
- [15] X. Mai, N. Dong, S. Liu, and H. Chen, "UAV path planning based on a dual-strategy ant colony optimization algorithm," *Intell. Robot.*, vol. 3, no. 4, pp. 666–683, Dec. 2023, doi: 10.20517/ir.2023.37.
- [16] E. Olcay, H. Meeß, and G. Elger, "Dynamic Obstacle Avoidance for UAVs using MPC and GP-Based Motion Forecast," in *2024 European Control Conference (ECC)*, Stockholm, Sweden: IEEE, Jun. 2024, pp. 1024–1031, doi: 10.23919/ECC64448.2024.10591083.
- [17] C. Kallies, S. Gasche, and R. Karásek, "Multi-Agent Cooperative Path Planning via Model Predictive Control," in *2024 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, Herndon, VA, USA: IEEE, Apr. 2024, pp. 1–7, doi: 10.1109/ICNS60906.2024.10550797.
- [18] H. Jiang, Z. Huang, Z. Ma, Z. Zhang, J. Wu, and X. Ping, "Multi-UAV Trajectory Planning and Tracking Via Improved Informed-RRT* and MPC Algorithms," in *2023 5th International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence (RICAI)*, Hangzhou, China: IEEE, Dec. 2023, pp. 583–588, doi: 10.1109/RICAI60863.2023.10489390.
- [19] Q. L. Dinh, H. C. Nguyen, P. T. Duong, Q. V. Nguyen, and T. M. Nguyen, "A comprehensive study of mobile robot navigation and obstacle avoidance schemes," *TNU J. Sci. Technol.*, vol. 228, no. 14, pp. 302–312, Nov. 2023, doi: 10.34238/tnu-jst.8978.
- [20] J. Luo, J. Liu, and Q. Liang, "UAV Swarm Trajectory Planning Based on a Novel Particle Swarm Optimization," in *Proceedings of 2021 International Conference on Autonomous Unmanned Systems (ICAUS 2021)*, in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 861, Singapore: Springer Singapore, 2022, pp. 509–520, doi: 10.1007/978-981-16-9492-9_51.
- [21] D. T. Tran, V. Q. Nguyen, C. V. Nguyen, D. L. T. Tran, H. T. Tran, and N. D. Anh, "Improved Accuracy of Path System on Creating Intelligence Base," in *Advances in Information and Communication Technology*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 194–205, doi: 10.1007/978-3-031-49529-8_21.

- [22] R. E. Roque -Claros, D. P. Flores-Llanos, A. R. Maquera-Humpiri, V. K. Sonthi, S. Sengan, and R. Rangasamy, "UAV Path Planning Model Leveraging Machine Learning and Swarm Intelligence for Smart Agriculture," *Scalable Comput. Pract. Exp.*, vol. 25, no. 5, pp. 3752–3765, Aug. 2024, doi: 10.12694/scpe.v25i5.3131.
- [23] G. Radzki, M. Relich, G. Bocewicz, and Z. Banaszak, "Declarative Approach to UAVs Mission Contingency Planning in Dynamic Environments," in *Distributed Computing and Artificial Intelligence, Volume 2: Special Sessions 18th International Conference*, in *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 332, Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 3–18, doi: 10.1007/978-3-030-86887-1_1.
- [24] F. Miao *et al.*, "Optimizing UAV Path Planning in Maritime Emergency Transportation: A Novel Multi-Strategy White Shark Optimizer," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 7, p. 1207, Jul. 2024, doi: 10.3390/jmse12071207.
- [25] C. V. Nguyen, H. T. Tran, H. T. Do, T. Hoang, D. L. T. Tran, and M. T. Nguyen, "A Novel Framework of Visual Detection, Tracking and Landing for UAVs Utilizing AR Markers," in *2023 International Conference on Control, Robotics and Informatics (ICCRI)*, Danang, Vietnam: IEEE, May 2023, pp. 81–85, doi: 10.1109/ICCRI58865.2023.00023.
- [26] K. Geng, N. A. Chulin, and Z. Wang, "Fault-Tolerant Model Predictive Control Algorithm for Path Tracking of Autonomous Vehicle," *Sensors*, vol. 20, no. 15, p. 4245, Jul. 2020, doi: 10.3390/s20154245.
- [27] S. A. Emami and A. Banazadeh, "Fault-tolerant predictive trajectory tracking of an air vehicle based on acceleration control," *IET Control Theory Appl.*, vol. 14, no. 5, pp. 750–762, Mar. 2020, doi: 10.1049/iet-cta.2019.0596.
- [28] T. A. Vuong, D. L. T. Tran, T. C. Vo, M. T. Nguyen, and H. T. Tran, "A novel framework of building operation algorithm for the block of technical diagnostics of aircraft's automatic control system," *Bull. Electr. Eng. Inform.*, vol. 13, no. 4, pp. 2340–2347, Aug. 2024, doi: 10.11591/eei.v13i4.5799.
- [29] Y. Chen, W. Li, and J. Yue, "Dynamic path planning of UAV for three-dimensional moving target search in complex environment," in *2021 IEEE International Conference on Emergency Science and Information Technology (ICESIT)*, Chongqing, China: IEEE, Nov. 2021, pp. 770–775. doi: 10.1109/ICESIT53460.2021.9696633.
- [30] Y. Liu, J. V. Schijndel, S. Longo, and E. C. Kerrigan, "UAV energy extraction with incomplete atmospheric data using MPC," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 51, no. 2, pp. 1203–1215, Apr. 2015, doi: 10.1109/TAES.2014.130657.
- [31] M. Castillo-Lopez, S. A. Sajadi-Alamdari, J. L. Sanchez-Lopez, M. A. Olivares-Mendez, and H. Voos, "Model Predictive Control for Aerial Collision Avoidance in Dynamic Environments," in *2018 26th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Zadar, Croatia: IEEE, Jun. 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/MED.2018.8442967.
- [32] I. B. P. Nascimento, A. Ferramosca, L. C. A. Pimenta, and G. V. Raffo, "NMPC Strategy for a Quadrotor UAV in a 3D Unknown Environment," in *2019 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*, Belo Horizonte, Brazil: IEEE, Dec. 2019, pp. 179–184, doi: 10.1109/ICAR46387.2019.8981556.
- [33] S. Javed *et al.*, "State-of-the-Art and Future Research Challenges in UAV Swarms," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 11, pp. 19023–19045, Jun. 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3364230.
- [34] Y. Zhou, B. Rao, and W. Wang, "UAV Swarm Intelligence: Recent Advances and Future Trends," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 183856–183878, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3028865.
- [35] H. Nguyen, T. Quyen, C. Nguyen, A. Le, H. Tran, and M. Nguyen, "Control Algorithms for UAVs: A Comprehensive Survey," *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, vol. 7, no. 23, p. 164586, May 2020, doi: 10.4108/eai.18-5-2020.164586.
- [36] M. T. Nguyen and K. A. Teague, "Compressive and cooperative sensing in distributed mobile sensor networks," *MILCOM 2015 - 2015 IEEE Military Communications Conference*, Tampa, FL, USA, 2015, pp. 1033-1038, doi: 10.1109/MILCOM.2015.7357581.
- [37] N. Mohammadi, M. Tayefi, and M. Zhu, "Vertical take-off and hover to cruise transition for a hybrid UAV using model predictive controller and MPC allocation," *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, vol. 95, no. 10, pp. 1642–1650, Nov. 2023, doi: 10.1108/AEAT-04-2023-0090.
- [38] T. Xu, J. Liu, Z. Zhang, G. Chen, D. Cui, and H. Li, "Distributed MPC for Trajectory Tracking and Formation Control of Multi-UAVs With Leader-Follower Structure," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 128762–128773, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3329232.
- [39] K. Shimada and T. Nishida, "Particle filter-model predictive control of quadcopters," *Proceedings of the 2014 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, Kumamoto, Japan, 2014, pp. 421-424, doi: 10.1109/ICAMEchS.2014.6911582.

- [40] K. Alexis, G. Nikolakopoulos, and A. Tzes, "On Trajectory Tracking Model Predictive Control of an Unmanned Quadrotor Helicopter Subject to Aerodynamic Disturbances," *Asian J. Control*, vol. 16, no. 1, pp. 209–224, Jan. 2014, doi: 10.1002/asjc.587.
- [41] J. Marzat, S. Bertrand, A. Eudes, M. Sanfourche, and J. Moras, "Reactive MPC for Autonomous MAV Navigation in Indoor Cluttered Environments: Flight Experiments," *IFAC-Pap.*, vol. 50, no. 1, pp. 15996–16002, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1910.
- [42] Z. Wang, K. Akiyama, K. Nonaka, and K. Sekiguchi, "Experimental verification of the model predictive control with disturbance rejection for quadrotors," in *2015 54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, Hangzhou, China: IEEE, Jul. 2015, pp. 778–783, doi: 10.1109/SICE.2015.7285529.
- [43] S. Li, Y. Chen, and Y. Yang, "Multi-rotor UAV path planning based on Model Predictive Control and Control Barrier Function," in *2024 36th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Xi'an, China: IEEE, May 2024, pp. 1141–1146, doi: 10.1109/CCDC62350.2024.10587478.
- [44] J. Guo, W. Xia, X. Hu, and H. Ma, "Feedback RRT* algorithm for UAV path planning in a hostile environment," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 174, p. 108771, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cie.2022.108771.
- [45] W. Miao, W. Yefu, and H. Fengyu, "Trajectory tracking of unmanned vehicle based on improved model predictive control," in *2021 20th International Symposium on Distributed Computing and Applications for Business Engineering and Science (DCABES)*, Nanning, China: IEEE, Dec. 2021, pp. 57–60, doi: 10.1109/DCABES52998.2021.00021.
- [46] G. Darivianakis, K. Alexis, M. Burri, and R. Siegwart, "Hybrid predictive control for aerial robotic physical interaction towards inspection operations," in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Hong Kong, China: IEEE, May 2014, pp. 53–58, doi: 10.1109/ICRA.2014.6906589.
- [47] S. Khoudiri, A. Khoudiri, B. Toual, and M. Khaleel, "Trajectory control for a Hexacopter UAV using Nonsingular Terminal Sliding Mode Control," *Stud. Eng. EXACT Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 988–1010, Apr. 2024, doi: 10.54021/seesv5n1-052.
- [48] H. Sang, "Quadrotor UAV Trajectory Tracking Control Based on Adaptive Non-singular Terminal Sliding Mode," *J. Electr. Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 929–939, Apr. 2024, doi: 10.52783/jes.3022.
- [49] D. Bicego, J. Mazzetto, R. Carli, M. Farina, and A. Franchi, "Nonlinear Model Predictive Control with Enhanced Actuator Model for Multi-Rotor Aerial Vehicles with Generic Designs," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 100, no. 3–4, pp. 1213–1247, Dec. 2020, doi: 10.1007/s10846-020-01250-9.
- [50] P. Lin, S. Chen, and C. Liu, "Model predictive control-based trajectory planning for quadrotors with state and input constraints," in *2016 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Gyeongju, South Korea: IEEE, Oct. 2016, pp. 1618–1623, doi: 10.1109/ICCAS.2016.7832517.
- [51] L. E. G. Linares and E. R. García, "Non-linear Model-based Predictive Control for Trajectory Tracking and Control Effort Minimization in a Smartphone-based Quadrotor," *J. Autom. Mob. Robot. Intell. Syst.*, vol. 16, no. 4, pp. 13–18, Oct. 2023, doi: 10.14313/JAMRIS/4-2022/28.
- [52] R. Allen and M. Pavone, "A Real-Time Framework for Kinodynamic Planning with Application to Quadrotor Obstacle Avoidance," in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, San Diego, California, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Jan. 2016, doi: 10.2514/6.2016-1374.
- [53] G. Garimella, M. Sheckells, and M. Kobilarov, "Robust obstacle avoidance for aerial platforms using adaptive model predictive control," in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Singapore, Singapore: IEEE, May 2017, pp. 5876–5882, doi: 10.1109/ICRA.2017.7989692.
- [54] H. T. Do, C. V. Nguyen, H. T. Tran, V. Q. Nguyen, H. T. T. Nguyen, N. H. Nguyen, H. T. Vo, M. L. Trinh, H. D. Nguyen, and M. T. Nguyen, "AR Marker Detection Based Autonomous Attitude Control for an Indoor Non-GPS Aided Quadcopter," In *International Conference on Engineering Research and Applications*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 228–238, doi: 10.1007/978-3-031-62238-0_26.
- [55] Y. V. Morozov, "Emergency Control of a Quadcopter in Case of Failure of Two Symmetric Propellers," *Autom. Remote Control*, vol. 79, no. 3, pp. 463–478, Mar. 2018, doi: 10.1134/S0005117918030062.
- [56] B. Li, C. Song, S. Bai, J. Huang, R. Ma, K. Wan, and E. Nertin, "Multi-UAV Trajectory Planning during Cooperative Tracking Based on a Fusion Algorithm Integrating MPC and Standoff," *Drones*, vol. 7, no. 3, p. 196, 2023, doi: 10.3390/drones7030196.
- [57] D. L. T. Tran, T. C. Vo, H. T. Do, V. Q. Nguyen, A. D. Nguyen, T. Hoang, Q. N. A. Nguyen, H. T. Tran, and M. T. Nguyen, "A Novel Method for Straight Take-Off of Quadrotors in GPS-Denied Environments Utilizing Optical Flow," In *International Conference on Engineering Research and Applications*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, pp. 20–30, doi: 10.1007/978-3-031-62238-0_3.
- [58] M. T. Nguyen, L. H. Truong, and T. T. H. Le, "Video surveillance processing algorithms utilizing artificial intelligent (AI) for unmanned autonomous vehicles (UAVs)," *MethodsX*, vol. 8, 2021, doi: 10.1016/j.mex.2021.101472.