

HOẠCH ĐỊNH ĐƯỜNG BAY CHO UAV CÓ CÁNH CỐ ĐỊNH, ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP CÂY NGẪU NHIÊN VÀ GIẢI THUẬT DI TRUYỀN CẢI TIẾN

Nguyễn Đăng Minh^{1,*}

¹Viện Hàng không Vũ trụ Viettel

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu phương pháp hoạch định đường bay cho các UAV có cánh cố định hoạt động trong môi trường mô phỏng. Phương pháp hoạch định đường bay dựa trên ứng dụng cây ngẫu nhiên thông minh và giải thuật di truyền cải tiến. Trong đó, phương pháp cây ngẫu nhiên kết hợp với các điều kiện phi tuyến được ứng dụng để khởi tạo những đường bay khả thi, các toán tử giải thuật di truyền cải tiến được áp dụng để tìm kiếm đường bay tối ưu. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả và tính khả thi của phương pháp đề xuất, là cơ sở để phát triển các hệ thống hoạch định đường bay cho các UAV hoạt động trong môi trường thực.

Từ khóa: Hoạch định đường bay; UAV có cánh cố định; cây ngẫu nhiên; giải thuật di truyền cải tiến.

1. Đặt vấn đề

Hoạch định đường đi (*path planning/route planning*) nhằm tìm kiếm một tuyến đường khả thi từ vị trí xuất phát đến đích trong một môi trường nhất định [1]. Vấn đề hoạch định đường đi có ứng dụng đa dạng trong nhiều lĩnh vực cả quân sự và dân sự như: hoạch định đường đi cho rô bốt tự hành UAVs (*unmanned aerial vehicles*), UGVs (*unmanned ground vehicles*), AUVs (*autonomous underwater vehicles*), ASVs (*autonomous surface vehicles*) và rô bốt công nghiệp; ứng dụng trong việc lập kế hoạch và dẫn đường trong ngành hàng không, hàng hải và đường bộ. Khảo sát về các phương pháp hoạch định đường đi cho rô bốt tự hành, các ứng dụng, cũng như những đánh giá về ưu, nhược điểm của chúng có thể tìm thấy trong [2]-[5], tuy nhiên sẽ không được thảo luận ở đây. Trong bài báo này, tác giả tập trung chủ yếu vào vấn đề hoạch định đường bay cho máy bay không người lái (UAV) có cánh cố định ứng dụng trong lĩnh vực quân sự để thực hiện nhiệm vụ tấn công mục tiêu trên biển.

Để giải quyết vấn đề hoạch định đường bay cho UAVs, một loạt các phương pháp tiếp cận đã được nghiên cứu, có thể kể đến như: phương pháp tối ưu hóa đồ thị (*Graph*

* Tác giả liên hệ, email: nguyendangminh2604@gmail.com

DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v20.n01.810

optimization) bao gồm Visibility Graphs [6], Voronoi diagrams [7], [8], Rapidly Exploring Random Trees [9], [10], Probabilistic Roadmap [11]; các phương pháp tìm kiếm (*Heuristic/Metaheuristic*) bao gồm A* [12]-[17], Theta* [18]-[20], Evolutionary Algorithms [21]-[28]; phương pháp Potential Field [1], [29]. Ngoài ra, khảo sát về các phương pháp hoạch định đường bay cho UAVs và các vấn đề còn tồn tại có thể tìm thấy trong [2], [4].

So với bài toán hoạch định đường bay trong các ứng dụng khác, hoạch định đường bay cho UAVs tấn công có những điểm khác biệt [30]: (1) UAVs bay ở độ cao thấp để giảm thiểu khả năng bị radar phát hiện; (2) đường bay không vượt quá giới hạn vật lý của UAVs như bán kính lượn tối thiểu, quãng đường bay lớn nhất, khoảng cách tối thiểu giữa hai điểm điều hướng; (3) đường bay phải tránh vật cản và tránh vùng nguy hiểm (*no-fly zones*); (4) đường bay phải đáp ứng một số yêu cầu như góc lượn tối đa, hướng tiếp cận mục tiêu để đảm bảo xác suất thành công của nhiệm vụ. Kết hợp những điều kiện ràng buộc (2)-(4) kể trên làm cho vấn đề hoạch định đường bay tối ưu trở thành vấn đề tối ưu phi tuyến đa tiêu chuẩn phức tạp về mặt tính toán. Các phương pháp tiếp cận trên cơ sở thuật toán A* và Genetic Algorithm (GA) đã được chứng minh là có khả năng giải quyết vấn đề này [12], [17], [21], [22], [24], [28]. Trong [12], so sánh kết quả thực nghiệm của tác giả cho thấy mặc dù thuật toán A* có khả năng xử lý nhanh hơn, tuy nhiên thuật toán GA lại cho kết quả tốt hơn, bên cạnh đó thuật toán GA còn có nhiều tiềm năng để cải tiến cũng như áp dụng các kỹ thuật khác giúp giảm thời gian tính toán, ví dụ như kỹ thuật tính toán song song.

Từ việc nghiên cứu các công trình đã được công bố trước đây, nhằm áp dụng vào bài toán thực tế là phát triển hệ thống lập kế hoạch cho UAVs chiến đấu trên môi trường biển, tác giả nhận thấy rằng thuật toán GA là một lựa chọn tốt. Tuy nhiên, một số kỹ thuật sử dụng trong các công bố trước đây có thể phù hợp và hiệu quả với bài toán của họ, nhưng còn có thể cải tiến hoặc thay thế để hiệu quả hơn với ứng dụng cụ thể đã nêu trên. Có thể kể đến như:

(1) Hầu hết các cách tiếp cận đều được phát triển với bản đồ có cấu trúc (*grid-based* hoặc *graph-based*). Theo đó, một không gian (*C-space*) được tính toán cấu hình hoàn chỉnh trước khi tìm kiếm đường đi trên đó [31]. Việc xây dựng *C-space* để biểu diễn môi trường hoạt động thực tế của UAVs là vấn đề phức tạp về mặt tính toán, không những thế, kích thước vùng hoạt động, mức độ chi tiết và số chiều của *C-space* ảnh hưởng lớn tới thời gian cũng như hiệu quả tìm kiếm của thuật toán hoạch định đường

bay. Ngoài ra, trong ứng dụng thực tế, thông tin môi trường thường xuyên thay đổi nên không gian C-space cũng phải được cập nhật, quá trình này đòi hỏi không ít thời gian.

(2) Việc khởi tạo đường bay ngẫu nhiên chưa biết có khả thi (*feasible*) hay không (đường bay khả thi là một đường bay an toàn và UAV có thể bay được), sau đó tìm kiếm đường bay khả thi nhờ các toán tử GA tỏ ra khá tốn kém và khó áp dụng những kỹ thuật hỗ trợ để tăng chất lượng các toán tử GA giúp thúc đẩy quá trình tiến hóa.

(3) Việc xây dựng hàm đánh giá đường bay dựa trên tổng khoảng cách giữa các điểm điều hướng là chưa đầy đủ, vì quỹ đạo bay của UAVs bao gồm các đoạn thẳng và các đoạn quỹ đạo cong khi đổi hướng. Điều này có thể dẫn đến những đánh giá sai lầm khi trên thực tế đường bay có tổng khoảng cách giữa các điểm điều hướng lớn hơn nhưng lại có quỹ đạo bay ngắn hơn, hoặc một đường bay khả thi lại trở thành không khả thi vì vi phạm điều kiện quãng đường bay lớn nhất. Ngoài ra, các công bố trước đây cũng không đánh giá số lượng điểm điều hướng và tổng đại số góc lượn trên một đường bay trong khi những tham số này ảnh hưởng đến quá trình điều khiển và khả năng bám quỹ đạo được lập trình sẵn của UAVs, đặc biệt là khi môi trường hoạt động bị chế áp không thể sử dụng các hệ thống định vị vệ tinh có độ chính xác cao, bắt buộc UAV phải sử dụng các hệ thống định vị quán tính kết hợp với đo cao vô tuyến.

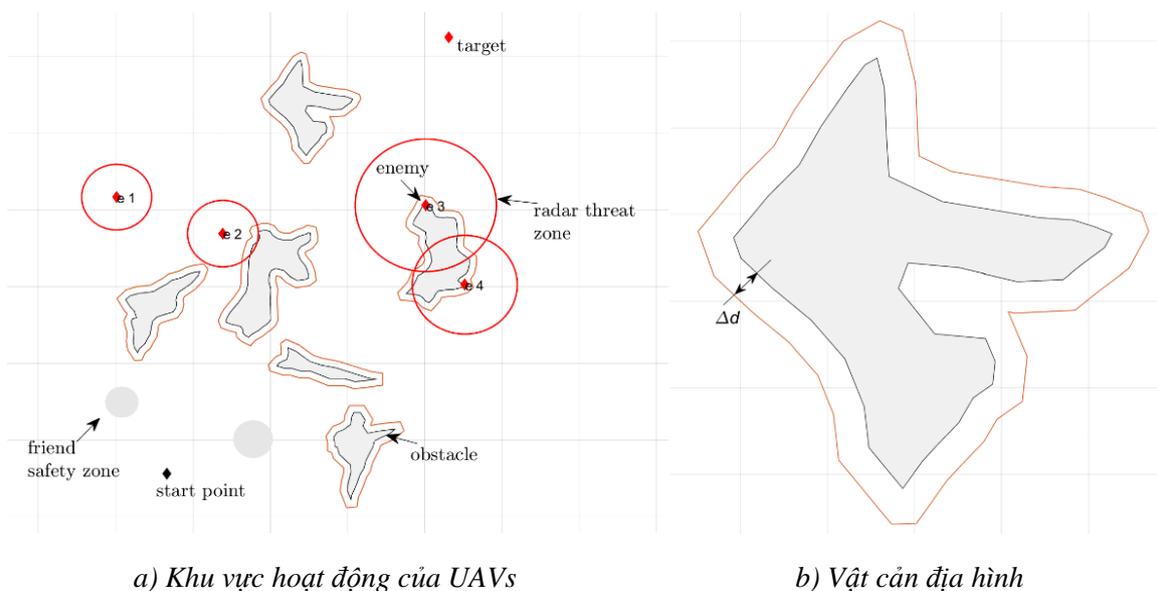
(4) Ngoài ra, việc thiết kế cấu trúc dữ liệu đường bay chưa hợp lý làm tăng khối lượng tính toán không cần thiết, ví dụ điểm điều hướng (*waypoint*) chỉ có thông tin tọa độ, các thông tin khác như khoảng cách với waypoint liền trước, góc lượn... phải tính toán lại mỗi khi cần đánh giá đường bay (Trong bài báo này, thuật ngữ “điểm điều hướng” và thuật ngữ “waypoint” được dùng thay thế cho nhau).

Cải tiến những điểm hạn chế kể trên là những đóng góp chính của bài báo này. Những phần còn lại của bài báo sẽ được trình bày như sau: Phần 2 trình bày phương pháp xây dựng bản đồ khu vực hoạt động của UAV từ thông tin môi trường thực tế, có tính tới các yếu tố nhằm giảm thiểu nguy cơ rủi ro mất an toàn cho UAVs cũng như nguy cơ bị đối phương phát hiện cảnh báo sớm trên hành trình bay. Phần 3 trình bày về các ràng buộc của đường bay cho UAVs hoạt động trên biển. Phần 4 trình bày về phương pháp thiết lập và tối ưu đường bay trong đó đề xuất một số kỹ thuật nhằm cải tiến chất lượng thuật toán; đề xuất hàm đánh giá đường bay với các yếu tố liên quan tới độ dài quỹ đạo bay, tổng đại số góc lượn và số điểm điều hướng trên đường bay; trình bày một phương pháp cho phép đưa các điều kiện ràng buộc phi tuyến tính vào quá trình thiết lập đường bay khả thi; một số kỹ thuật hỗ trợ nâng cao chất lượng của các toán tử GA nhằm thúc đẩy quá trình tiến hóa cũng được trình bày trong phần này. Kết quả thực nghiệm được trình bày ở Phần 5, phần tổng hợp và thảo luận của tác giả được trình bày ở Phần 6.

2. Bản đồ không gian hoạt động của UAVs

Như đã trình bày ở trên, nghiên cứu này tập trung giải quyết vấn đề hoạch định đường bay ứng dụng trong hệ thống lập kế hoạch cho UAVs tấn công mục tiêu trên biển, phân tích yêu cầu cho thấy các UAVs phải được lập trình bay sát mặt biển nhằm hạn chế khả năng bị phát hiện bởi radar đa cảnh giới của đối phương, khi đó để đảm bảo an toàn UAVs phải bay vòng tránh các vật cản, vùng cấm bay có sẵn trong môi trường hoạt động. Từ những đặc điểm trên, để giảm độ phức tạp, bản đồ khu vực hoạt động của UAVs sẽ được xây dựng trong không gian hai chiều (Trong bài báo này, thuật ngữ “bản đồ tìm kiếm” và “bản đồ không gian hoạt động” dùng thay thế cho nhau, trong một số trường hợp gọi tắt là “bản đồ”). Nghiên cứu này không xem xét hoạch định đường bay trực tuyến, để hạn chế rủi ro tiềm ẩn, tác giả cố gắng đưa các yếu tố không chắc chắn và các yếu tố động của môi trường trong suốt thời gian hoạt động của UAVs vào quá trình xây dựng bản đồ.

Hình 1a là một ví dụ về bản đồ khu vực hoạt động của UAVs, trong đó các vật cản địa hình như đảo nổi, các dải đất hoặc các công trình trên biển được biểu diễn bằng các đa giác. Khu vực có radar trình sát của đối phương hoặc vùng hỏa lực phòng không có khả năng gây sát thương bố trí cố định hoặc trên tàu được biểu diễn bằng các vòng tròn đỏ. Khu vực hoạt động của các lực lượng đồng minh hoặc trung lập được biểu diễn bằng các hình tròn màu xám hoặc cũng có thể biểu diễn bằng các hình đa giác tùy tình huống thực tế.



Hình 1. Ví dụ về bản đồ khu vực hoạt động của UAVs.

2.1. Mô hình vật cản địa hình

Vật cản địa hình có thể là các đảo nổi, dải đất ven biển hoặc các công trình xây dựng trên biển, các vật cản loại này cố định trong môi trường hoạt động của UAV. Do sai số của các hệ thống định vị, đường bay cần phải được thiết lập cách các vật cản một khoảng Δd để đảm bảo an toàn.

Sai số trung bình bình phương vị trí của UAV sau khoảng thời gian bay t_f giây tính từ lúc cất cánh được xác định bởi biểu thức:

$$\sigma_t^p = \sqrt{(\sigma_{nav_t}^p)^2 + (\sigma_{ls}^p)^2} \quad (1)$$

trong đó: $\sigma_{nav_t}^p$ - sai số trung bình bình phương vị trí của UAV sau khoảng thời gian t_f giây; σ_{ls}^p - sai số trung bình bình phương vị trí xuất phát.

Trong bài báo này, tác giả xem xét các yếu tố ngẫu nhiên tuân theo luật phân bố chuẩn. Theo quy tắc “ba sigma”, $\Delta d = 3\sigma_t^p$ là khoảng cách an toàn để tránh va chạm với các vật cản, trên lý thuyết, xác suất UAVs va vào đường biên của vật cản là 0,994. Để mở rộng các vật cản dạng đa giác, một thuật toán đã được phát triển dựa trên nguyên tắc các cạnh đa giác mới song song với cạnh đa giác cần mở rộng, thuật toán sẽ duyệt và loại bỏ bớt các đỉnh dư thừa đồng thời cắt bớt các đỉnh có góc nhọn để đảm bảo đa giác mở rộng không chiếm quá nhiều không gian. Hình 1b thể hiện vật cản là đa giác màu xám và đa giác vật cản ảo được mở rộng nhờ thuật toán, đa giác vật cản ảo này sẽ được sử dụng để kiểm tra tránh va chạm trong quá trình hoạch định đường bay.

Tương tự, đối với những vùng nguy hiểm cố định dạng hình tròn, để đảm bảo an toàn cũng cần mở rộng một khoảng tối thiểu bằng $3\sigma_t^p$, điều này chỉ đơn giản là mở rộng bán kính vùng nguy hiểm thêm một lượng tương đương.

2.2. Mô hình vùng cấm bay di động

Vùng nguy hiểm có tính chất di động như vùng ra đa trinh sát hoặc vùng hỏa lực được bố trí trên tàu của đối phương. Sự dịch chuyển của các vùng này cũng chính là sự dịch chuyển của tàu, vận tốc dịch chuyển nằm trong dải $[0, v_{max}]$ phụ thuộc vào loại tàu. Do sự không chắc chắn về hướng và vận tốc dịch chuyển của tàu đối phương trong thời gian hoạt động của UAV nên không thể biết chắc chắn vị trí của nó. Tuy nhiên, có thể chắc chắn rằng đối phương phải di chuyển trong một khu vực hình tròn có tâm trùng với vị trí tại thời điểm lần cuối cùng nhận được thông tin về đối phương và bán kính r_i^e được tính bằng công thức (2):

$$r_t^e = v_{\max} (\Delta t_{\text{delay}} + \Delta t_{\text{oper}}) \quad (2)$$

trong đó: v_{\max} - vận tốc cực đại của tàu đối phương; Δt_{delay} - khoảng thời gian từ lần cuối nhận được thông tin về vị trí của đối phương đến thời điểm UAV bắt đầu nhiệm vụ; Δt_{oper} - khoảng thời gian mong đợi tính từ thời điểm bắt đầu cho tới khi kết thúc nhiệm vụ của UAV.

Ngoài ra, giả định rằng vị trí ngẫu nhiên của đối phương tuân theo luật phân bố chuẩn với sai số trung bình bình phương bằng σ_e^p . Kết hợp với sai số ngẫu nhiên của hệ thống định vị trên UAV, sai số xác định vị trí xuất phát, sai số trung bình bình phương tổng hợp của UAV so với vị trí mong đợi của đối phương xác định theo công thức (3):

$$\sigma_s^p = \sqrt{(\sigma_{\text{nav}_t}^p)^2 + (\sigma_e^p)^2 + (\sigma_{\text{ls}}^p)^2} \quad (3)$$

trong đó: σ_s^p - sai số trung bình bình phương tổng hợp vị trí của UAV; $\sigma_{\text{nav}_t}^p$ - sai số trung bình bình phương vị trí của UAV sau thời gian t .

Như vậy, bán kính của vùng nguy hiểm r_{threat}^p khi đã tổng hợp các yếu tố kể trên có thể xác định theo công thức:

$$r_{\text{threat}}^p = r_{\text{radar}} + r_t^e + 3\sigma_s^p \quad (4)$$

trong đó, r_{radar} - bán kính phát hiện của radar.

Lưu ý rằng tầm phát hiện của radar luôn lớn hơn tầm bắn của hỏa lực, do đó trong nghiên cứu này bỏ qua tầm bắn của hỏa lực.

Đối với các đối tượng vùng cấm bay là khu vực hoạt động của lực lượng đồng minh hoặc trung lập, có thể sử dụng công thức (3) và (4) để xác định bán kính khu vực cấm bay. Tuy nhiên, ở công thức (4) có thể bỏ qua tham số về bán kính phát hiện của radar.

2.3. Hệ tọa độ sử dụng

Như đã trình bày ở trên, trong nghiên cứu này tác giả xem xét hoạch định đường bay trong không gian hai chiều, quá trình thực hiện sẽ sử dụng hệ tọa độ Đề-các OXY có gốc tọa độ tại vị trí xuất phát, trục OX theo hướng Bắc, trục OY theo hướng Đông. Đường bay được lựa chọn sau khi đã hoạch định trong hệ tọa độ Đề-các sẽ được chuyển đổi về hệ tọa độ địa lý WGS-84 để tạo nhiệm vụ cho UAV.

3. Điều kiện hạn chế của đường bay

Hai mục tiêu quan trọng nhất trong việc hoạch định đường bay cho UAV là phải an toàn và có thể thực thi được (có thể bay được). Sự an toàn của thiết bị bay đạt được bằng

cách tránh chướng ngại vật, đường bay có thực thi được khi thỏa mãn các hạn chế động học và khả năng cơ động của thiết bị. Trong công bố [22] trước đây của tác giả đã trình bày chi tiết các điều kiện hạn chế trong quá trình thiết lập và tối ưu đường bay trên cơ sở những đặc tính kỹ thuật của UAVs có cánh cố định. Các điều kiện hạn chế bao gồm:

Hạn chế về góc lượn α_i tại điểm điều hướng thứ i phải thỏa mãn $\alpha_i \leq \alpha_{\max}$, với α_{\max} là góc lượn lớn nhất.

Hạn chế về bán kính lượn, bán kính lượn R phải thỏa mãn điều kiện $R \geq R_{\min}$, với R_{\min} là bán kính lượn tối thiểu (trong nghiên cứu này không xem xét sự thay đổi giá trị của R trong quá trình lập kế hoạch bay).

Hạn chế ở điểm waypoint thứ nhất, góc phương vị của điểm waypoint thứ nhất so với vị trí xuất phát bằng hướng xuất phát ψ_{l_s} và khoảng cách d_1 từ vị trí xuất phát tới điểm waypoint thứ nhất phải thỏa mãn biểu thức:

$$d_1 \geq l_1 + R \cdot \tan(|\alpha_1|/2) \quad (5)$$

với l_1 là quãng bay thẳng tối thiểu để thiết bị bay ổn định sau khi cất cánh.

Điều kiện hạn chế ở các điểm điều hướng thứ i (với $i = \overline{2, \dots, (n-1)}$; n là số điểm điều hướng trên đường bay), ngoài điều kiện góc lượn $\alpha_i \leq \alpha_{\max}$, khoảng cách d_i từ điểm $i-1$ đến i phải thỏa mãn điều kiện:

$$d_i \geq R \cdot \left[\tan(|\alpha_{i-1}|/2) + \tan(|\alpha_i|/2) \right] \quad (6)$$

Biểu thức (6) đảm bảo cho UAV có thể kết thúc quá trình lượn ở điểm điều hướng thứ $i-1$ trước khi bắt đầu quá trình lượn ở điểm điều hướng thứ i .

Điều kiện hạn chế bổ sung ở điểm điều hướng thứ $n-1$, do điểm điều hướng thứ n trùng với điểm mục tiêu là cố định, khoảng cách d_n từ điểm $n-1$ đến n phải thỏa mãn:

$$d_n \geq d_s + R \cdot \tan(|\alpha_{n-1}|/2) \quad (7)$$

với d_s - khoảng cách bật cảm biến trinh sát.

Điều kiện (7) giúp cho cảm biến trinh sát trang bị trên UAV phát hiện và dẫn đường tấn công mục tiêu.

Điều kiện về tổng quãng đường bay Δf phải thỏa mãn $\Delta f \leq \Delta f_m$, trong đó, Δf_m là quãng đường bay lớn nhất mà UAV có thể thực hiện được; tổng quãng đường bay được tính theo công thức:

$$\Delta f = \sum_{i=1}^n d_i + R \cdot \sum_{i=1}^{n-1} [|\alpha_i| - 2 \cdot \tan(|\alpha_i|/2)] \quad (8)$$

với n - số điểm điều hướng trên đường bay; α_i - góc lượn tại điểm điều hướng thứ i ; d_i - khoảng cách từ điểm liền trước tới điểm thứ i (nếu $i=1$ điểm liền trước của nó là điểm xuất phát).

Công thức (8) chỉ đúng nếu điều kiện ràng buộc tại các điểm điều hướng (5)-(7) ở trên được thỏa mãn, khi đó đường bay của UAV đồng thời thỏa mãn đường bay Dubins [32] cho máy bay có cánh cố định.

4. Phương pháp thiết lập và tối ưu hóa đường bay

Ở phần này, tác giả trình bày các phương pháp để thiết lập và tối ưu đường bay cho UAV có cánh cố định hoạt động trên môi trường biển. Quá trình thiết lập và tối ưu đường bay được thực hiện trên cơ sở phương pháp cây ngẫu nhiên (*RT - Random Tree*) kết hợp với các ràng buộc phi tuyến và giải thuật di truyền cải tiến. Phương pháp RT sửa đổi cho phép thiết lập các điểm điều hướng khả dĩ mà không cần kiểm tra các điều kiện về góc lượn và khoảng cách, điều kiện (7) và (8) được dùng để kiểm tra tính khả thi và kết thúc quá trình khởi tạo đường bay. Các cải tiến trên các toán tử GA áp dụng cho đường bay khả thi giúp thúc đẩy quá trình tìm kiếm đường bay tối ưu một cách nhanh chóng, hiệu quả. Quá trình thiết lập đường bay thực hiện như sau:

Bước 1: Khởi tạo tập hợp đường bay khả thi.

Bước 2: Lựa chọn các đường bay tham gia vào quá trình tìm kiếm tối ưu.

Bước 3: Tạo đường bay mới bằng phương pháp lai ghép và đột biến.

Bước 4: Tổng hợp, đánh giá đường bay mới.

Bước 5: Kiểm tra điều kiện dừng tìm kiếm.

Để tìm kiếm đường bay tối ưu, cần lặp lại từ bước 2 đến bước 5 cho tới khi đạt được điều kiện dừng tìm kiếm tối ưu.

Dưới đây, tác giả trình bày các kỹ thuật và phương pháp sử dụng trong nghiên cứu này.

4.1. Cấu trúc dữ liệu đường bay

Lựa chọn phương pháp biểu diễn cấu trúc dữ liệu phù hợp rất quan trọng trong việc xây dựng và thực thi giải thuật di truyền. Trong nghiên cứu này, tác giả đề xuất sử dụng sơ đồ cấu trúc như sau:

$$p_k = \left\{ \left\{ w_1^k, w_2^k, \dots, w_{n-1}^k, w_n^k \right\}, \Delta F_k \right\}; k = \overline{1, \dots, n_{pl}} \quad (9)$$

trong đó: p_k - đường bay thứ k trong tập hợp gồm n_{pl} đường bay; ΔF_k - giá trị hàm mục tiêu, đánh giá mức độ tối ưu của đường bay; w_i^k - điểm waypoint thứ i của đường bay k , với $i = \overline{1, \dots, n}$.

Mỗi điểm w_i^k bao gồm một tập hợp các giá trị sau:

$$w_i^k = \left\{ x_i^k, y_i^k, \alpha_i^k, d_i^k, az_i^k \right\} \quad (10)$$

trong đó: x_i^k, y_i^k - tọa độ của điểm w_i^k trong hệ tọa độ Đề-các OXY; α_i^k - góc lượn tại điểm w_i^k , trong trường hợp $i = n$, giá trị α_n^k mặc định bằng 0; d_i^k - khoảng cách từ waypoint liền trước tới waypoint w_i^k ; az_i^k - góc phương vị tạo bởi waypoint liền trước với điểm w_i^k .

Trong trường hợp $i = 1$, d_1^k là khoảng cách từ điểm xuất phát tới điểm w_1^k , az_1^k là góc phương vị tạo bởi điểm xuất phát và điểm w_1^k .

4.2. Phương pháp kiểm tra giao cắt vật cản

Tính an toàn của đường bay được bảo đảm dựa trên nguyên tắc các đoạn thẳng nối các điểm điều hướng liền kề w_{i-1}^k và w_i^k không cắt các vật cản, vùng cấm bay (sau đây gọi chung là vật cản). Tác giả đã thực hiện thành công thuật toán kiểm tra sự giao cắt của đường bay với các vật cản, như có thể thấy trong các hình từ 2 đến 6. Nhưng vì khuôn khổ của bài báo có hạn và đây là bài toán tương đối độc lập nên tác giả sẽ trình bày chi tiết ở bài báo khác.

4.3. Phương pháp đánh giá đường bay

Thiết kế hàm mục tiêu có vai trò quyết định tới chất lượng kỳ vọng của đường bay. Tiêu chuẩn để lựa chọn đường bay tối ưu dựa trên giá trị hàm mục tiêu ΔF , mục này sẽ trình bày phương pháp xây dựng hàm mục tiêu để đánh giá đường bay.

Các tiêu chí được lựa chọn để xây dựng hàm mục tiêu bao gồm: tổng độ dài quãng đường bay, tổng đại số góc lượn (tổng mức cơ động) và tổng số điểm điều hướng.

Tổng độ dài quãng đường bay là tiêu chí quan trọng nhất khi thực hiện đánh giá mức độ tối ưu của đường bay khả thi, đây là tiêu chí chung của mọi bài toán lập kế hoạch tuyến đường. Tổng mức cơ động trên đường bay là tiêu chí quan trọng thứ hai, tham số này ảnh hưởng tới hiệu quả điều khiển của UAV, nhìn chung khi thực hiện một hành trình dài, mọi loại máy bay đều không mong muốn mức cơ động quá lớn vì nó làm tăng sai số khiến máy bay khó có thể bám theo quỹ đạo được lập trình trước. Tiêu chí thứ ba dựa trên tổng số điểm điều hướng trên đường bay, một đường bay có càng ít điều hướng trung gian càng tốt do UAV có cánh cố định thường bị hạn chế về khả năng cơ động, việc đổi hướng liên tục là không mong muốn vì có thể gây sai lệch lớn khi bám theo đường bay. Trên cơ sở các tiêu chí nêu trên, trong nghiên cứu này đề xuất hàm mục tiêu như sau:

$$\Delta F = 1 - Q_f \left(\frac{\Delta f_m - \Delta f}{\Delta f_m - D_t} \right) - Q_\alpha \left(\frac{n_{\max} \cdot \alpha_{\max} - \sum_{i=1}^n |\alpha_i|}{n_{\max} \cdot \alpha_{\max}} \right) - Q_w \left(\frac{n_{\max} - n + 2}{n_{\max}} \right) \quad (11)$$

trong đó: Q_f - hệ số quy định mức độ quan trọng của tổng quãng đường bay; Q_α - hệ số quy định mức độ quan trọng của tổng mức cơ động; Q_w - hệ số quy định mức độ quan trọng của số điểm điều hướng; D_t - khoảng cách từ điểm xuất phát tới mục tiêu; Δf_m - quãng đường lớn nhất thiết bị bay có thể thực hiện; n_{\max} - số điểm điều hướng tối đa; α_{\max} - góc lượn lớn nhất.

Giá trị các hệ số Q_f , Q_α , Q_w được lựa chọn sao cho thỏa mãn điều kiện:

$$\begin{cases} Q_f + Q_\alpha + Q_w = 1 \\ Q_f \geq Q_\alpha \geq Q_w > 0 \end{cases} \quad (12)$$

Hàm mục tiêu (11) được xây dựng dựa trên nguyên tắc: Thứ nhất, tổng quãng đường bay phải nhỏ hơn hoặc bằng quãng đường bay lớn nhất có thể của UAV; thứ hai, tổng mức cơ động không lớn hơn tổng mức cơ động lớn nhất; thứ ba, đường bay khả thi luôn phải có tối thiểu hai điểm điều hướng đó là điểm thứ nhất và điểm đích. Có thể thấy, ΔF nhận giá trị trong khoảng $[0,1]$, giá trị hàm mục tiêu càng nhỏ, đường bay càng tốt. Đường bay tốt nhất khi $\Delta F = 0$, khi đó tổng quãng đường bay $\Delta f = D_t$, tổng mức cơ động bằng 0, số điểm điều hướng trên đường bay $n = 2$.

4.4. Phương pháp khởi tạo đường bay

Khởi tạo đường bay là bước đầu tiên trong quá trình hoạch định đường bay, chất lượng đường bay được khởi tạo ảnh hưởng lớn tới thời gian xử lý để tìm kiếm đường bay

tối ưu. Trong nghiên cứu này, ở bước khởi tạo sẽ sử dụng phương pháp cây ngẫu nhiên kết hợp với các điều kiện phi tuyến để thiết lập những đường bay khả thi. Theo đó, điểm điều hướng hiện tại là điểm gốc, các điểm ngọn của nhánh cây là các ứng cử viên cho điểm điều hướng tiếp theo. Các nhánh cây ngẫu nhiên sẽ được thiết kế sao cho góc lượn tại điểm gốc nằm trong khoảng $[-\alpha_{\max}, \alpha_{\max}]$, độ dài nhánh cây đảm bảo luôn thỏa mãn điều kiện ở biểu thức (6). Điều kiện tránh giao cắt vật cản sẽ được kiểm tra để loại bỏ những nhánh không thỏa mãn. Điểm điều hướng tiếp theo sẽ được chọn ngẫu nhiên trong số các ứng viên thỏa mãn. Các điều kiện ở biểu thức (7) và (8) sẽ luôn được kiểm tra để kết thúc chu trình khởi tạo một đường bay khả dĩ. Các bước chính của thuật toán khởi tạo đường bay được trình bày trong thuật toán 1 dưới đây:

Thuật toán 1: Khởi tạo đường bay khả thi

- 1: Tạo điểm điều hướng thứ nhất thỏa mãn điều kiện theo biểu thức (5)
- 2: $i = 1$;
- 3: **While** điểm thứ i chưa thỏa mãn điều kiện điểm điều hướng trung gian cuối **do**
- 4: Tạo tập hợp m điểm w_i^j với $j = \overline{1, \dots, m}$; $m = \text{floor}(2 \cdot \alpha_{\max} / \beta) + 1$
- 5: $\alpha_i^j = \frac{\pi}{2} - \alpha_{\max} + \beta(j-1)$ với β - độ phân giải góc
- 6: $az_i^j = az_{i-1} - \alpha_i^j$
- 7: $\alpha_{i-1} = az_i^j - az_{i-1}$
- 8: $d_i^j = R \cdot [\text{rand}(0,1) + \tan(|\alpha_{i-1}|/2) + \tan(\alpha_{\max}/2)]$
- 9: $x_i^j = x_{i-1} + d_i^j \cdot \cos(az_i^j)$
- 10: $y_i^j = y_{i-1} + d_i^j \cdot \sin(az_i^j)$
- 11: Kiểm tra giao cắt vật cản của từng đoạn $w_{i-1}w_i^j$
- 12: Loại bỏ các điểm w_i^j nếu vi phạm điều kiện giao cắt vật cản
- 13: Chọn ngẫu nhiên điểm điều hướng thứ i trong số m' điểm w_i^j thỏa mãn điều kiện không cắt vật cản: $w_i = w_i^j$ với $j = \text{randi}(1, m')$
- 14: Kiểm tra điều kiện điểm điều hướng trung gian cuối cùng đối với w_i
- 15: **If** w_i thỏa mãn điều kiện điểm điều hướng thứ $n-1$ **and** đoạn thẳng từ w_i tới mục tiêu không cắt vật cản **then**

```

16:      If  $\Delta f \leq \Delta f_m$  then
17:          Thiết lập điểm mục tiêu là điểm điều hướng cuối trên tuyến đường bay
18:          Tính giá trị  $\Delta F$  của đường bay khả thi
19:      end if
20:      else  $i = i + 1$ 
21:      end if
22: end while
    
```

4.5. Lựa chọn các đường bay tham gia vào quá trình tìm kiếm tối ưu

Việc lựa chọn các đường bay để tham gia vào quá trình tìm kiếm tối ưu ảnh hưởng trực tiếp tới chất lượng của những đường bay mới được hình thành qua quá trình giao phối (*crossover*) và đột biến, qua đó ảnh hưởng tới tốc độ tìm kiếm đường bay tối ưu. Trong nghiên cứu này sử dụng phương pháp quay bánh xe số [33] dựa trên giá trị hàm mục tiêu ΔF của các đường bay đã khởi tạo ở bước 1, tiến hành chọn một danh sách gồm n_c cặp đường bay chuẩn bị cho quá trình crossover và n_m đường bay chuẩn bị cho quá trình đột biến. Theo đó, những đường bay có giá trị ΔF nhỏ sẽ có xác suất được chọn cao hơn, điều này thúc đẩy tìm kiếm tối ưu dựa trên những đường bay có chất lượng tốt, nhưng cũng không bỏ qua những đường bay có chất lượng thấp đảm bảo tính đa dạng và khả năng gây đột biến đồng thời cho phép kiểm soát tốt tốc độ hội tụ của quá trình tiến hóa.

4.6. Tạo đường bay mới bằng phương pháp giao phối

Quá trình tạo đường bay mới bằng phương pháp crossover được thực hiện tuần tự đối với từng cặp đường bay bố mẹ đã được lựa chọn từ trước. Toán tử crossover hoạt động như sau: Bước 1, chọn ngẫu nhiên hai điểm điều hướng trung gian trên đường bay bố mẹ để tách bố mẹ thành bốn đoạn; Bước 2, tạo đường bay con thứ nhất bằng cách lấy đoạn thứ nhất từ đường bay bố ghép với đoạn thứ hai của đường bay mẹ, đường bay con thứ hai được tạo từ đoạn thứ nhất của đường bay mẹ ghép với đoạn thứ hai của đường bay bố; Bước 3, lần lượt kiểm tra điều kiện cắt vật cản tại đoạn ghép nối, điều kiện góc lượn và điều kiện về khoảng cách tại các điểm ghép nối, nếu không có điều kiện nào bị vi phạm thì tiến hành kiểm tra điều kiện quãng đường bay, nếu không có bất kì điều kiện nào bị vi phạm thì đường bay con mới được chấp nhận và tiến hành tính toán giá trị hàm mục tiêu ΔF của đường bay đó; Bước 4, kiểm tra điều kiện dừng, nếu có ít nhất một

đường bay con mới được chấp nhận hoặc biến đếm số lần giao phối đạt đến giá trị giới hạn thì dừng toán tử crossover với cặp bố mẹ hiện tại, nếu không thỏa mãn điều kiện dừng thì tăng biến đếm và quay lại bước 1.

Ý tưởng sửa đổi thuật toán giao phối ở đây chỉ chấp nhận đường bay khả dĩ để đảm bảo quần thể mới không có đường bay dị dạng, hơn nữa do các đường bay bố mẹ đã là đường bay khả dĩ nên quá trình kiểm tra tính khả dĩ của đường bay con không cần phải kiểm tra toàn bộ mà chỉ cần kiểm tra ở những đoạn ghép nối, điều này giúp giảm khối lượng tính toán so với toán tử crossover truyền thống. Với mỗi cặp bố mẹ, toán tử crossover sẽ cố gắng tìm kiếm ít nhất một đường bay con khả dĩ để tận dụng cơ hội đa dạng hóa đường bay khả dĩ sau một chu kỳ tiến hóa.

Thuật toán 2 thể hiện các bước chính của thuật toán crossover.

Thuật toán 2: Crossover

- 1: $stop = false; counter = 0$
 - 2: Lấy hai đường bay p_{k_1} và p_{k_2} trong danh sách đã chọn để thực hiện lai ghép
 - 3: **while** $stop \neq true$ **or** $counter < const$ **do**
 - 4: Chọn ngẫu nhiên các giá trị: $c_1 = randi(2, n_1 - 1)$ và $c_2 = randi(2, n_2 - 1)$
 - 5: Tạo đường bay mới từ cặp đường bay bố mẹ:
 - 6: $p'_1 = \left\{ \left\{ w_1^{k_1}, \dots, w_{c_1}^{k_1}, w_{c_2}^{k_2}, \dots, w_{n_2}^{k_2} \right\}, \left\{ \Delta F = \inf \right\} \right\}$
 - 7: Cập nhật các tham số $\alpha_{c_1}^{k_1}, d_{c_1}^{k_1}, az_{c_1}^{k_1}$ tại $w_{c_1}^{k_1}$ và $\alpha_{c_2}^{k_2}, d_{c_2}^{k_2}, az_{c_2}^{k_2}$ tại $w_{c_2}^{k_2}$
 - 8: $p'_2 = \left\{ \left\{ w_1^{k_2}, \dots, w_{c_2}^{k_2}, w_{c_1}^{k_1}, \dots, w_{n_1}^{k_1} \right\}, \left\{ \Delta F = \inf \right\} \right\}$
 - 9: Cập nhật các tham số $\alpha_{c_2}^{k_2}, d_{c_2}^{k_2}, az_{c_2}^{k_2}$ tại $w_{c_2}^{k_2}$ và $\alpha_{c_1}^{k_1}, d_{c_1}^{k_1}, az_{c_1}^{k_1}$ tại $w_{c_1}^{k_1}$
 - 10: Kiểm tra điều kiện thỏa mãn đường bay khả thi với đường bay p'_1 và p'_2
 - 11: **if** tồn tại đường bay mới sinh khả thi **then**
 - 12: Tính giá trị ΔF của đường bay khả thi
 - 13: $stop = true$
 - 14: **else** $counter = counter + 1$
 - 15: **end if**
 - 16: **end while**
-

4.7. Tạo đường bay mới bằng phương pháp đột biến mất gen

Đối với bài toán tìm kiếm đường bay tối ưu, đột biến mất gen sẽ giúp loại bỏ bớt các waypoint dư thừa và nếu thành công chắc chắn nó sẽ tạo ra một đường bay mới có quỹ đạo bay ngắn hơn. Các bước chính của quá trình đột biến mất gen đối với đường bay p_k để tạo đường bay mới p'_k thực hiện theo thuật toán 3.

Thuật toán 3: Đột biến mất gen

- 1: $stop = false; counter = 0$
 - 2: **while** $stop \neq false$ **or** $counter < const$ **do**
 - 3: Chọn ngẫu nhiên điểm thứ $m = randi(2, n_k - 1)$
 - 5: Tạo đường bay mới p'_k từ đường bay p_k
 - 6: $p'_k = \left\{ \left\{ w_1^k, \dots, w_{m-1}^k, w_{m+1}^k, \dots, w_{n_k}^k \right\}, \Delta F = \inf \right\}$
 - 7: Kiểm tra các điều kiện khả thi với đường bay p'_k
 - 8: **if** đường bay p'_k khả thi **then**
 - 9: Tính giá trị ΔF của đường bay p'_k
 - 10: $stop = true$
 - 11: **else** $counter = counter + 1$
 - 12: **end if**
 - 13: **end while**
-

Đột biến mất gen được thực hiện như sau: Chọn ngẫu nhiên trên đường bay p_k điểm điều hướng thứ m (khác các điểm thứ nhất và điểm cuối), tạo đường bay p'_k từ các điểm điều hướng thuộc đường bay p_k ngoại trừ điểm w_m^k , kiểm tra lại các điều kiện đường bay khả thi đối với p'_k , quá trình kiểm tra chỉ thực hiện với điểm w_{m-1}^k và w_{m+1}^k , nếu thỏa mãn các điều kiện dừng quá trình đột biến ở đường bay p_k . Nếu đường bay mới p'_k không khả thi, tiếp tục thử chọn và xóa một điểm ngẫu nhiên trên đường bay gốc, sau một số hữu hạn lần thử, nếu tạo được đường bay mới từ đường bay gốc, quá trình đột biến đối với p_k sẽ dừng lại mà không có đường bay khả thi mới nào được tạo thành.

4.8. Tạo đường bay mới bằng phương pháp đột biến đặc tính gen

Khác với crossover và đột biến mất gen, toán tử này tạo biến đổi đặc tính gen làm thay đổi tọa độ một waypoint trên đường bay gốc bằng một vị trí lân cận từ đó làm thay

đôi đặc tính của đường bay, số lượng điểm điều hướng trên đường bay mới không thay đổi so với đường bay cũ.

Ở đây, tác giả đề xuất phương pháp đột biến gen thích ứng dựa trên dữ liệu quá khứ của đường bay gốc, theo đó phương vị và khoảng cách điểm lân cận sẽ thích ứng với dấu và độ lớn góc lượn tại waypoint được chọn để tạo đột biến. Kỹ thuật này sẽ đảm bảo xu hướng làm giảm tổng góc lượn và giảm tổng quãng đường bay của đường bay mới so với đường bay gốc. Lợi thế của phương pháp đề xuất là khả năng thành công cao, có tác dụng từng bước làm mịn đường bay. Các bước cơ bản của quá trình đột biến đặc tính gen trên đường bay p_k theo thuật toán 4.

Thuật toán 4: Đột biến đặc tính gen

- 1: $stop = false; counter = 0$
 - 2: **while** $stop \neq false$ **or** $counter < const$ **do**
 - 3: Chọn ngẫu nhiên trên đường bay p_k điểm w_m^k với $m = randi(2, n_k - 1)$
 - 4: Chọn giá trị ngẫu nhiên góc α_m^k sao cho $|\alpha_m^k| \leq \alpha z^* \leq \pi$
 - 5:
$$r^* = R \cdot \left[\frac{1 - \cos(|\alpha_m^k|/2)}{\cos(|\alpha_m^k|/2)} \right]$$
 - 6: Tính toán tọa độ mới của điểm w_m^k trên đường bay p_k
 - 7: $x_m^k = x_m^k + r^* \cdot \sin(\text{sign}(\alpha_m^k) \cdot \alpha z^*)$
 - 8: $y_m^k = y_m^k + r^* \cdot \cos(\text{sign}(\alpha_m^k) \cdot \alpha z^*)$
 - 9: Cập nhật giá trị α_{m-1}^k của w_{m-1}^k
 - 10: Cập nhật các giá trị $\alpha_m^k, d_m^k, \alpha z_m^k$ của w_m^k
 - 11: Tính toán các giá trị $\alpha_{m+1}^k, d_{m+1}^k, \alpha z_{m+1}^k$ của w_{m+1}^k
 - 12: Kiểm tra các điều kiện khả thi với đường bay mới
 - 13: **if** đường bay mới khả thi **then**
 - 14: Cập nhật giá trị ΔF của đường bay p_k
 - 15: $stop = true$
 - 16: **else** $counter = counter + 1$
 - 17: **end if**
 - 18: **end while**
-

4.9. Tổng hợp, đánh giá tập hợp đường bay mới

Ở bước này, thực hiện tổng hợp các đường bay cũ và mới được hình thành do quá trình lai ghép, đột biến, dựa vào giá trị ΔF của mỗi đường bay, loại bỏ bớt những đường bay chất lượng thấp, duy trì số lượng đường bay trong tập hợp ở mức cố định để đảm bảo hiệu năng và tốc độ hội tụ của thuật toán.

4.10. Kiểm tra điều kiện dừng tìm kiếm

Quá trình tìm kiếm đường bay tối ưu dừng lại khi đạt một số hữu hạn chu trình tìm kiếm từ bước 2 đến bước 5 hoặc giá trị của hàm mục tiêu đối với đường bay tốt nhất không thay đổi sau một số hữu hạn vòng lặp tìm kiếm tùy điều kiện nào đến trước. Sau khi dừng tìm kiếm, đường bay có giá trị ΔF nhỏ nhất sẽ được chọn là đường bay tối ưu.

5. Kết quả mô phỏng

Chương trình phần mềm hoạch định đường bay được thực hiện trên môi trường MATLAB. Để đưa ra đánh giá thời gian thực thi của chương trình, trong bài báo này sử dụng máy tính cá nhân với bộ xử lý trung tâm CPU có tốc độ 3,7 GHz, bộ nhớ RAM có dung lượng 8Gb. Đường bay được thiết lập trong môi trường giả lập, các hình đa giác thể hiện là các vật cản cố định, đường tròn màu đỏ là các vùng tác chiến có hỏa lực mạnh của đối phương. Các tham số điều kiện đầu vào của bài toán được cho trong Bảng 1.

Bảng 1. Tham số điều kiện để thiết lập đường bay

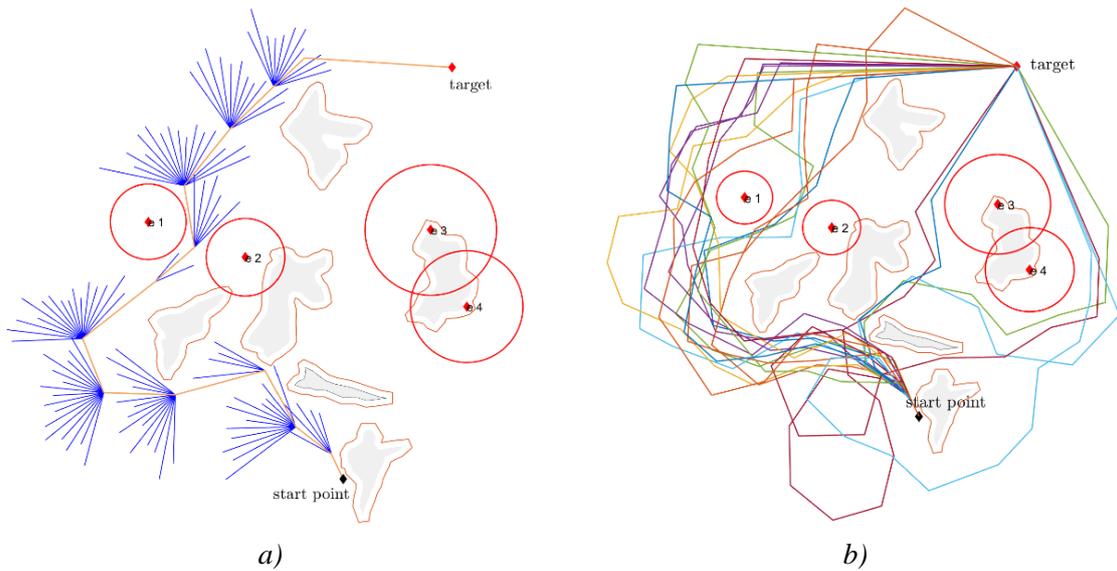
| STT | Tham số | Giá trị |
|-----|--|----------|
| 1 | Vĩ độ điểm xuất phát (độ) | 19,1393 |
| 2 | Kinh độ điểm xuất phát (độ) | 106,1533 |
| 3 | Hướng xuất phát (độ) | -25 |
| 4 | Vĩ độ mục tiêu (độ) | 20,2503 |
| 5 | Kinh độ mục tiêu (độ) | 106,4620 |
| 6 | Quãng đường bay thẳng tối thiểu để ổn định (mét) | 4000 |
| 7 | Cự ly bật cảm biến trinh sát (mét) | 20000 |
| 8 | Bán kính lượn (mét) | 10000 |
| 9 | D_i (mét) | 120236 |

Sau thời gian 2,25 giây tính toán, phần mềm hoàn thành khởi tạo 20 tuyến đường bay khả thi. Hình 2 thể hiện quá trình khởi tạo tuyến đường bay và tập hợp đường bay khả thi được khởi tạo.

Quá trình tìm kiếm đường bay tối ưu được thực thi trên cơ sở các thuật toán 2, thuật toán 3 và thuật toán 4. Các tham số cấu hình thuật toán GA cho trong Bảng 2.

Bảng 2. Tham số cấu hình thuật toán GA

| STT | Tham số | Giá trị |
|-----|--|---------|
| 1 | Q_f | 0,6 |
| 2 | Q_α | 0,1 |
| 3 | Q_w | 0,3 |
| 4 | Số lượng đường bay ổn định sau mỗi chu kỳ | 40 |
| 5 | Tỉ lệ đường bay tham gia crossover | 1 |
| 6 | Tỉ lệ đường bay tham gia đột biến mất gen | 0,5 |
| 7 | Tỉ lệ đường bay tham gia đột biến đặc tính gen | 0,7 |
| 8 | Δf_m (mét) | 300000 |
| 9 | α_{\max} (radian) | $\pi/2$ |
| 10 | n_{\max} | 20 |

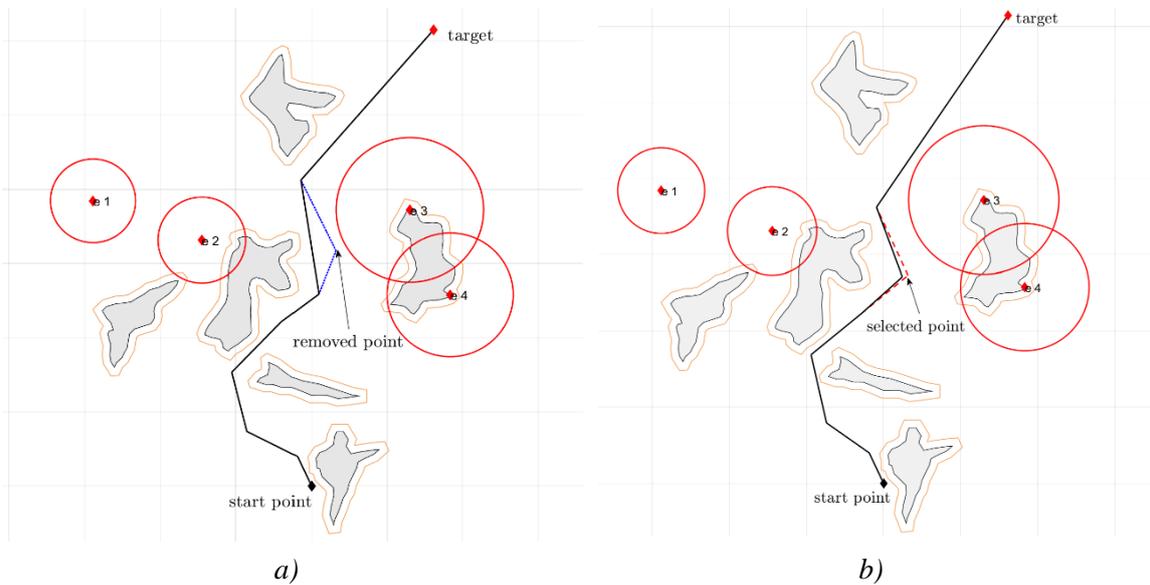


Hình 2. Quá trình khởi tạo đường bay (a) và tập hợp đường bay khả thi (b).

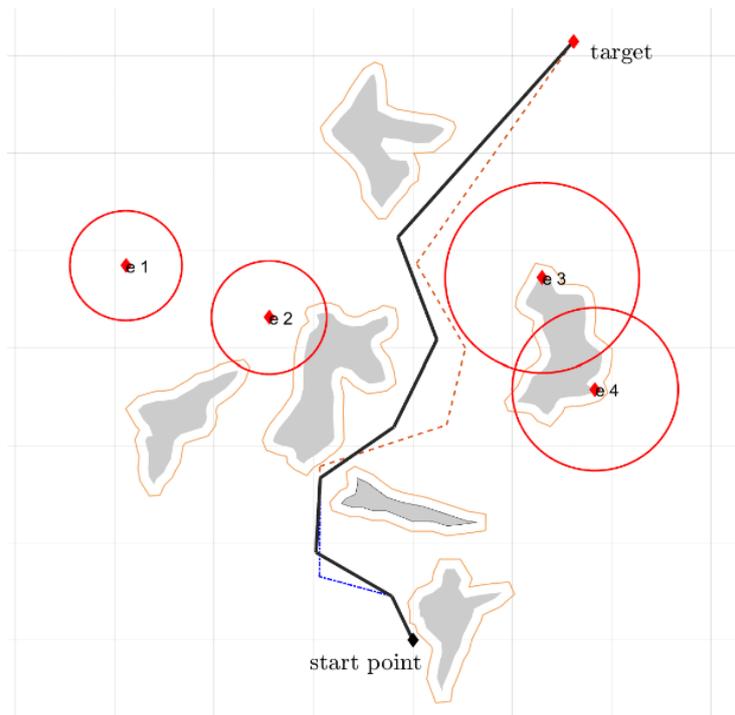
Hình 3, 4 thể hiện đường bay khả thi tạo thành nhờ đột biến mất gen, đột biến đặc tính gen và quá trình crossover.

Quá trình tìm kiếm tối ưu dừng sau 30 chu kỳ tiến hóa, thời gian thực thi trong 1,22 giây với điều kiện môi trường trên bản đồ, các tham số đầu vào như trong Bảng 1 và các tham số cấu hình thuật toán GA cho trong Bảng 2. Hình 5 thể hiện đồ thị thống kê giá trị hàm mục tiêu ΔF qua từng chu kỳ, trong đó $\max \Delta F$, $\min \Delta F$ và $\text{mean } \Delta F$ tương ứng là giá trị lớn nhất, nhỏ nhất và giá trị trung bình sau mỗi chu kỳ tiến hóa.

Hiệu quả của các toán tử GA cải tiến thể hiện qua đồ thị thống kê giá trị hàm mục tiêu (Hình 5), thống kê cho thấy giá trị trung bình của hàm mục tiêu giảm nhanh trong 10 chu kỳ đầu, đạt giá trị gần tối ưu sau 5 chu kỳ tiếp theo và gần hội tụ sau 25 chu kỳ (lưu ý rằng GA là phương pháp chỉ cho ra kết quả gần tối ưu).



Hình 3. Đường bay mới tạo thành nhờ đột biến mất gen (a) và đột biến đặc tính gen (b).



Hình 4. Đường bay mới hình thành nhờ toán tử crossover.

Bảng 3. Thống kê các tham số đánh giá đường bay tốt nhất

| STT | Tham số | Giá trị |
|-----|--------------------------------------|----------|
| 1 | Tổng quãng đường bay (mét) | 142275,0 |
| 2 | Tổng mức cơ động (độ) | 129,9 |
| 3 | Số điểm điều hướng | 6 |
| 4 | ΔF | 0,127 |
| 5 | Thời gian thiết lập đường bay (giây) | 3,47 |

Bảng 4 thống kê tham số các điểm điều hướng trên đường bay tốt nhất bao gồm tọa độ (x, y) , kinh độ, vĩ độ, các góc lượn α_i , góc phương vị az_i tại điểm điều hướng tương ứng và khoảng cách d_i từ điểm liền trước tới nó.

Bảng 4. Tham số các điểm điều hướng trên đường bay tối ưu

| Điểm điều hướng | Tọa độ x | Tọa độ y | Vĩ độ (độ) | Kinh độ (độ) | Góc lượn α_i (độ) | Phương vị az_i (độ) | Khoảng cách d_i (mét) |
|-----------------|----------|----------|------------|--------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Điểm xuất phát | 0 | 0 | 19,1393 | 106,1533 | NA | NA | NA |
| w_1 | 4261,4 | -1987,1 | 19,1778 | 106,1344 | -10,6 | -25,0 | 4701,9 |
| w_2 | 25649,3 | -17318,2 | 19,3709 | 105,9885 | 32,0 | -35,6 | 26315,0 |
| w_3 | 33179,2 | -17794,5 | 19,4390 | 105,9838 | 42,9 | -3,6 | 7544,9 |
| w_4 | 53099,6 | -1488,3 | 19,6190 | 106,1391 | -26,4 | 39,3 | 25743,2 |
| w_5 | 74867,3 | 3497,9 | 19,8156 | 106,1867 | 17,9 | 12,9 | 22331,5 |
| w_6 | 123012,8 | 32261,6 | 20,2503 | 106,4620 | NA | 30,8 | 56083,3 |

6. Kết luận

Trên cơ sở nghiên cứu những yêu cầu của bài toán hoạch định đường bay cho UAVs có cánh cố định hoạt động trên môi trường biến, bài báo đã đề xuất phương pháp hoạch định đường bay tối ưu trong điều kiện môi trường hoạt động phức tạp. Trong đó sử dụng cây ngẫu nhiên thông minh kết hợp với các điều kiện phi tuyến ở bước khởi tạo đường bay khả thi và ở bước tìm kiếm đường bay tối ưu, bài báo đề xuất các cải tiến ở toán tử crossover, đột biến có định hướng giúp đẩy nhanh tốc độ tìm kiếm.

Ngoài ra, trong bài báo cũng đề xuất một phương pháp xây dựng bản đồ không gian hoạt động phục vụ cho quá trình hoạch định đường bay của UAV, các yếu tố động trong

khoảng thời gian tác chiến cũng được xem xét đưa vào quá trình xây dựng bản đồ nhằm hạn chế những rủi ro có thể dự đoán trước. Phương pháp này cho phép cập nhật những thay đổi của môi trường ngay tại thời điểm hoạch định đường bay.

Kết quả mô phỏng với môi trường giả lập và các tham số đầu vào như trong Phần 5 cho thấy thời gian xử lý của phương pháp đề xuất là 3,47 giây cho toàn bộ quá trình bao gồm chuyển đổi bản đồ không gian hoạt động, khởi tạo tập hợp các đường bay khả thi và tìm kiếm đường bay tối ưu.

Một số điểm hạn chế của phương pháp hoạch định đường bay trong nghiên cứu này có thể kể đến: *Thứ nhất*, độ phức tạp tính toán sẽ tăng tỉ lệ với độ phức tạp của môi trường hoạt động, trong một nghiên cứu khác của tác giả cho thấy xấp xỉ 90% khối lượng tính toán dành cho việc kiểm tra giao cắt vật cản, điều này khiến cho quá trình khởi tạo đường bay trở nên tốn kém, tuy nhiên nó có thể được cải tiến bằng một số kỹ thuật như tính toán song song. *Thứ hai*, chiến lược sử dụng các toán tử GA còn có thể hiệu quả hơn, ví dụ như thiết kế một bộ điều phối thích ứng để điều chỉnh tỉ lệ đường bay tham gia crossover và đột biến ở từng giai đoạn, rõ ràng ở những chu kỳ sau toán tử crossover không hiệu quả và tốn kém. *Thứ ba*, phương pháp thực hiện trong không gian hai chiều khó ứng dụng để lập kế hoạch cho thiết bị bay hoạt động trên đất liền với độ cao địa hình thay đổi phức tạp, tuy nhiên việc nghiên cứu bổ sung các điều kiện hạn chế để thuật toán hoạt động trong không gian ba chiều là khả thi. *Thứ tư*, mặc dù lợi ích của việc sử dụng hệ tọa độ OXY rất lớn nhờ các thuật toán xử lý đơn giản, độ phức tạp tính toán thấp, tuy nhiên phương pháp chuyển đổi giữa hệ tọa độ địa lý WGS-84 và hệ tọa độ OXY chỉ phù hợp cho khu vực hoạt động có bán kính không quá 600 km.

Tài liệu tham khảo

- [1] E. Rimon and D. E. Koditschek, "Exact robot navigation using artificial potential functions", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 5, pp. 501-518, Oct. 1992. DOI: 10.1109/70.163777
- [2] S. Aggarwal and N. Kumar, "Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: A review, solutions, and challenges", *Computer Communications*, Vol. 149, pp. 270-299, 2020. DOI: 10.1016/j.comcom.2019.10.014
- [3] V. Sharma and D. J. Wing, "Dynamic path planning automation concept for advanced air mobility", NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, NASA, DC, USA, Technical Report NASA/TM-20220009974, Sep. 2022.
- [4] W. P. Coutinho, M. Battarra, and J. Fliege, "The unmanned aerial vehicle routing and trajectory optimisation problem, a taxonomic review", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 120, pp. 116-128, 2018. DOI: 10.1016/j.cie.2018.04.037

- [5] C. S. Tan, R. Mohd-Mokhtar, and M. R. Arshad, "A comprehensive review of coverage path planning in robotics using classical and heuristic algorithms", in *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 119310-119342, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3108177
- [6] F. Schøler, A. Cour-Harbo, and M. Bisgaard, "Configuration space and visibility graph generation from geometric workspaces for UAVs", in *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Portland, Oregon, 8-11 August 2011. DOI: 10.2514/6.2011-6416
- [7] P. Bhattacharya and M. L. Gavrilova, "Voronoi diagram in optimal path planning", *4th International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering (ISVD 2007)*, Glamorgan, pp. 38-47, 2007. DOI: 10.1109/ISVD.2007.43
- [8] Y. V. Pehlivanoglu, "A new vibrational genetic algorithm enhanced with a Voronoi diagram for path planning of autonomous UAV", *Aerospace Science and Technology*, Vol. 16, Iss. 1, pp. 47-55, 2012. DOI: 10.1016/j.ast.2011.02.006
- [9] L. G. Vêras, F. L. Medeiros, and L. N. Guimarães, "Rapidly exploring Random Tree* with a sampling method based on Sukharev grids and convex vertices of safety hulls of obstacles", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 16, 2019. DOI: 10.1177/1729881419825941
- [10] K. Yang and S. Sukkarieh, "Real-time continuous curvature path planning of UAVs in cluttered environments", in *Proceedings of the 2008 5th International Symposium on Mechatronics and Its Applications*, Amman, Jordan, 7-29 May 2008, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ISMA.2008.4648836
- [11] F. Yan, Y. S. Liu, and J. Z. Xiao, "Path planning in complex 3D environments using a probabilistic roadmap method", *International Journal of Automation and Computing*, Vol. 10, No. 6, pp. 525-533, 2013. DOI: 10.1007/s11633-013-0750-9
- [12] C. Tanil, "Improved heuristic and evolutionary methods for tactical missile mission planning", in *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*, March 3-10, 2012, Big Sky, MT, USA. IEEE, pp. 1-8, 2012. DOI: 10.1109/AERO.2012.6187213
- [13] T. Chen, G. Zhang, X. Hu, and J. Xiao, "Unmanned aerial vehicle route planning method based on a star algorithm", in *2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, IEEE, 2018, pp. 1510-1514. DOI: 10.1109/ICIEA.2018.8397948
- [14] S. Benders and S. Schopferer, "A line-graph path planner for performance constrained fixed-wing UAVs in wind fields", in *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2017 International Conference*, IEEE, 2017, pp. 79-86. DOI: 10.1109/ICUAS.2017.7991317
- [15] Z. Chengjun and M. Xiuyun, "Spare A* search approach for UAV route planning", in *Unmanned Systems (ICUS), 2017 IEEE International Conference*, IEEE, 2017, pp. 413-417. DOI: 10.1109/ICUS.2017.8278380

- [16] S. Dogru and L. Marques, "A*-based solution to the coverage path planning problem", in *Proceedings of the 3rd Iberian Robotics Conference (Advances in Intelligent Systems and Computing)*, Vol. 693, A. Ollero, A. Sanfeliu, L. Montano, N. Lau, and C. Cardeira, Eds. Cham, Switzerland: Springer, pp. 240-248, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-70833-1_20
- [17] R. J. Szczerba, P. Galkowski, I. S. Glickstein, and N. Ternullo, "Robust algorithm for real-time route planning", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 36, No. 7, pp. 869-878, July 2000. DOI: 10.1109/7.869506
- [18] S. R. Bassolillo, G. Raspaolo, L. Blasi, E. D'Amato, and I. Notaro, "Path planning for fixed-wing unmanned aerial vehicles: An integrated approach with theta* and clothoids", *Drones 2024*, Vol. 8, Iss. 2, 62. DOI: 10.3390/drones8020062
- [19] M. Faria, R. Marín, M. Popovic, I. Maza, and A. Viguria, "Efficient lazy theta* path planning over a sparse grid to explore large 3D volumes with a multirotor UAV", *Sensors*, Vol. 19, No. 1, pp. 1-21, Jan. 2019. DOI: 10.3390/s19010174
- [20] L. Blasi, E. D'Amato, I. Notaro, and G. Raspaolo, "Clothoid-based path planning for a formation of fixed-wing UAVs", *Electronics*, No. 10, 2023, 2204. DOI: 10.3390/electronics12102204
- [21] C. Tanil, "Cooperative path planning for multiple missiles - An evolutionary speciation approach", *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2012. DOI: 10.2514/6.2012-4903
- [22] N. D. Minh, N. K. Diep, and P. T. Anh, "Applying artificial intelligence to plan flight paths for aircraft at subsonic speeds", *Future Data and Security Engineering. Big Data, Security and Privacy, Smart City and Industry 4.0 Applications (FDSE 2022)*, November 23-25, 2022, Ho Chi Minh City, Vietnam. Springer, Communications in Computer and Information Science, Vol. 1688, pp. 489-502, 2022. DOI: 10.1007/978-981-19-8069-5_33
- [23] V. R. Ragusa, H. D. Mathias, V. A. Kazakova, and A. S. Wu, "Enhanced genetic path planning for autonomous flight", in *Proceedings of GECCO'17*, Berlin, Germany, July 15-19, 2017. DOI: 10.1145/3071178.3071293
- [24] J. M. de la Cruz, E. Besada-Portas, L. Torre-Cubillo, B. Andres-Toro, and J. A. Lopez-Orozco, "Evolutionary path planner for UAVs in realistic environments", in *Proceedings of the 10th annual conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO '08)*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 1477-1484, July 2008. DOI: 10.1145/1389095.1389383
- [25] H. Jun and Z. Qingbao, "Multi-objective mobile robot path planning based on improved genetic algorithm", in *IEEE International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, pp. 752-756, 2010. DOI: 10.1109/ICICTA.2010.300
- [26] V. Roberge, M. Tarbouchi, and G. Labonté, "Fast genetic algorithm path planner for fixed-wing military UAV using GPU", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 54, pp. 2105-2117, 2018.
- [27] X. Zhao and X. Fan, "A method based on genetic algorithm for anti-ship missile path planning", in *Proceedings of the IEEE Conference on Computational Sciences and Optimization*, IEEE, Vol. 2, pp. 156-159, 2009.

- [28] C. Zheng, L. Li, F. Xu, F. Sun, and M. Ding, “Evolutionary route planner for unmanned air vehicles”, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 21, No. 4, pp. 609-620, Aug. 2005. DOI: 10.1109/TRO.2005.844684
- [29] P. Khosla and R. Volpe, “Superquadric artificial potentials for obstacle avoidance and approach”, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Philadelphia, PA, 1988, pp. 1778-1784. DOI: 10.1109/ROBOT.1988.12323
- [30] S. Bortoff, “Path planning for UAVs”, in *Proceedings of the American Control Conference*, Chicago, IL, 2000, pp. 364-368. DOI: 10.1109/ACC.2000.878915
- [31] C. Hocaoglu and A. C. Sanderson, “Planning multiple paths with evolutionary speciation”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 5, Iss. 3, pp. 169-191, Jun. 2001. DOI: 10.1109/4235.930309
- [32] 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. DOI: 10.2307/2372560
- [33] A. Słowik and M. Białko, “Modified version of roulette selection for evolution algorithms”, *The Fan Selection, Artificial Intelligence and Soft Computing - ICAISC 2004*, June 7-11, 2004, Zakopane, Poland, Springer, Lecture notes in Computer Science, pp. 474-479. DOI: 10.1007/978-3-540-24844-6_70

FLIGHT PATH PLANNING FOR FIXED-WING UNMANNED AERIAL VEHICLES, USING RANDOM TREE AND IMPROVED GENETIC ALGORITHM METHODS

Abstract: *This article presents the results of the research on flight path planning method for fixed-wing UAVs operating at sea in complex environments. A method of mapping the operational space of UAVs and the constraints on a feasible flight path are studied. On the basis of the constraints, the article presents a flight path planning method using intelligent random trees and improved genetic algorithm. In particular, the random tree method combined with nonlinear constraints is applied to initiate feasible flight paths, and improved genetic algorithm operators are applied to find the optimal flight path. The simulation results show the effectiveness and feasibility of the proposed method, which is the basis for application to planning systems, creating tasks for UAVs to operate in complex environments.*

Keywords: Flight path planning; fixed-wing UAVs; random tree; improved genetic algorithm.

Nhận bài: 19/06/2024; *Hoàn thiện sau phản biện:* 29/10/2024; *Duyệt đăng:* 28/02/2025

