

THUẬT TOÁN TỐI ƯU PHÂN VÙNG HOẠT ĐỘNG CHO TỔ HỢP THIẾT BỊ BAY KHÔNG NGƯỜI LÁI PHỤC VỤ TÌM KIẾM CỨU HỘ CỨU NẠN

● PHẠM MẠNH THẮNG^{1,*} - VŨ ĐÌNH NAM¹

¹Khoa Cơ học kỹ thuật và Tự động hóa,

Trường Đại học Công nghệ (UET), Đại học Quốc gia Hà Nội

Email: thangpm@vnu.edu.vn, namvd1208@vnu.edu.vn

TÓM TẮT:

Bài nghiên cứu quy trình lập kế hoạch hoạt động cho hệ nhiều máy bay không người lái trên nền bản đồ số phục vụ nhiệm vụ tìm kiếm cứu hộ. Từ vùng nhiệm vụ biểu diễn dưới dạng đa giác, hệ thống thực hiện phân chia khu vực theo số lượng phương tiện, sinh tập điểm khảo sát và xây dựng các quỹ đạo ứng viên trong từng vùng con. Trong 3 thuật toán được so sánh gồm thuật toán zíc zắc, thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt và thuật toán tối ưu đàn kiến. Tiêu chí đánh giá là tổng chiều dài quỹ đạo. Kết quả thử nghiệm trên vùng khảo sát 2,54 ha với 2 cấu hình gồm 3 và 4 máy bay không người lái cho thấy, thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt luôn cho quỹ đạo ngắn nhất. Kết quả cho thấy, quy trình đề xuất phù hợp để tích hợp vào phân hệ lập kế hoạch nhiệm vụ cho hệ nhiều máy bay không người lái.

Từ khóa: máy bay không người lái, lập kế hoạch quỹ đạo, tìm kiếm cứu hộ, bản đồ số.

1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, máy bay không người lái (UAV) được ứng dụng rộng rãi trong các nhiệm vụ giám sát, thám sát, tìm kiếm cứu nạn và khảo sát diện rộng. Đối với các nhiệm vụ có phạm vi lớn hoặc cần triển khai nhanh trên địa hình phức tạp, việc sử dụng nhiều UAV phối hợp đồng thời cho thấy ưu thế rõ rệt nhờ khả năng mở rộng độ bao phủ, rút ngắn thời gian thực hiện và tăng tính linh hoạt trong tổ chức nhiệm vụ. Tuy nhiên, khi chuyển từ một UAV đơn lẻ sang hệ nhiều UAV, bài toán không còn chỉ là điều khiển từng phương tiện mà trở thành bài toán phân chia khu vực hoạt động, lập kế hoạch bao phủ và phối hợp quỹ đạo giữa các UAV trong cùng một không gian tác nghiệp. Nếu không có cơ chế lập kế hoạch phù hợp, các UAV có thể chồng lấn quỹ đạo, làm

giảm hiệu quả bao phủ và gia tăng chi phí vận hành.

Trong nghiên cứu về bao phủ khu vực cho nhiều UAV, nhiều hướng tiếp cận đã được đề xuất. Nhóm phương pháp hình học thường phân chia vùng nhiệm vụ thành các vùng con rồi xây dựng quỹ đạo khảo sát trên từng vùng bằng các mẫu quét qua-lại hoặc quét song song [1,2,3,7,12,15]. Bên cạnh đó, các phương pháp tối ưu hóa phối hợp nhiều UAV xem xét thêm các ràng buộc như tránh va chạm, cân bằng tải, tái lập kế hoạch hoặc giảm tiêu thụ năng lượng [3,6,7,9,10,16]. Gần đây, các mô hình học máy và học tăng cường cũng được áp dụng để cải thiện chất lượng quỹ đạo trong các môi trường có hình dạng phức tạp [4,13,15]. Nhìn chung, các công trình trước đây chủ yếu tập trung vào việc đề xuất một thuật toán cụ thể, trong khi bài toán so sánh và lựa chọn chiến

lược sinh đường đi trong cùng một quy trình triển khai thực tế vẫn chưa được trình bày nhiều như một hướng nghiên cứu riêng.

Xuất phát từ yêu cầu đó, bài viết này tập trung nghiên cứu bài toán lập kế hoạch cho nhiều UAV trên cơ sở kết hợp phân vùng khu vực nhiệm vụ và so sánh các phương án sinh đường đi. Vùng khảo sát được biểu diễn dưới dạng đa giác trên bản đồ số, sau đó được chia thành các vùng con tương ứng với số lượng UAV tham gia. Trên mỗi vùng con, hệ thống sinh tập điểm khảo sát và áp dụng nhiều chiến lược lập đường đi để tạo các quỹ đạo ứng viên. Các quỹ đạo này được đánh giá theo cùng một bộ tiêu chí, trong đó trọng tâm là tổng chiều dài đường bay và mức độ đổi hướng, từ đó lựa chọn phương án phù hợp hơn cho từng vùng nhiệm vụ. Cách tiếp cận của bài viết không nhằm thay thế các mô hình tối ưu hóa phức tạp, mà hướng đến một quy trình trực quan, có khả năng triển khai trực tiếp trên phân hệ bản đồ số và cho phép lượng hóa hiệu quả tương đối của các chiến lược lập đường đi trong cùng một môi trường thử nghiệm.

2. Kiến trúc hệ thống

Phần này trình bày quy trình xử lý từ vùng nhiệm vụ trên bản đồ số đến quỹ đạo khảo sát cuối cùng cho từng UAV. Trọng tâm của nghiên cứu không chỉ nằm ở bước phân chia khu vực hoạt động mà còn ở cơ chế so sánh các phương án lập đường đi trên cùng một tập dữ liệu đầu vào. Trên cơ sở đó, 3 thuật toán tiêu biểu được lựa chọn để đánh giá gồm zic zắc, Thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt và thuật toán tối ưu đàn kiến. Việc lựa chọn 3 phương án này nhằm bảo đảm tính đại diện cho các nhóm tiếp cận khác nhau trong bài toán lập kế hoạch bao phủ, bao gồm một phương pháp hình học cơ sở, một heuristic cải tiến cục bộ và một phương pháp tối ưu bầy đàn.

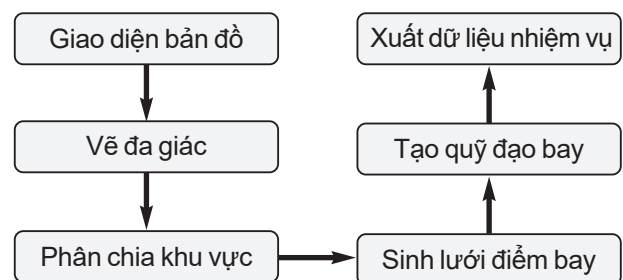
2.1. Quy trình xử lý tổng thể

Quy trình xử lý của hệ thống bắt đầu từ việc người vận hành xác định vùng nhiệm vụ dưới dạng đa giác trên bản đồ số. Sau khi kiểm tra tính hợp lệ và chuẩn hóa hình học, vùng khảo sát được chia thành các vùng con theo số lượng máy bay không người lái tham gia nhiệm vụ. Trên mỗi vùng con, hệ thống sinh tập điểm khảo sát theo cấu trúc lưới, sau đó áp dụng 3 thuật toán lập đường đi gồm zic zắc, thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt và thuật toán tối ưu đàn kiến để tạo các quỹ đạo. Các quỹ đạo

này được đánh giá theo cùng một tiêu chí là tổng chiều dài quỹ đạo, từ đó chọn ra tuyến khảo sát phù hợp cho từng vùng nhiệm vụ. Tuyến được chọn có thể tiếp tục được rút gọn số điểm trung gian trước khi xuất thành dữ liệu kế hoạch bay. Với cách tổ chức như vậy, bài toán tổng thể được chia thành 2 bước chính. Bước thứ nhất là phân vùng khu vực hoạt động nhằm chia vùng nhiệm vụ lớn thành các vùng con nhỏ hơn. Bước thứ hai là tối ưu thứ tự đi qua các điểm khảo sát trong từng vùng con thông qua so sánh các thuật toán lập đường đi. Cách tiếp cận này cho phép đánh giá trực tiếp ảnh hưởng của từng thuật toán đối với chất lượng quỹ đạo, đồng thời tạo sự liên kết chặt chẽ giữa vùng nhiệm vụ trên bản đồ và dữ liệu kế hoạch khảo sát.

Xét theo cấu trúc xử lý, phân hệ gồm 3 lớp chính. Lớp giao diện bản đồ dùng để hiển thị nền bản đồ, tiếp nhận thao tác vẽ đa giác và trực quan hóa vùng con, điểm khảo sát và tuyến bay. Lớp xử lý hình học và lập kế hoạch đảm nhiệm việc phân chia khu vực, sinh lưới điểm và tổ chức quỹ đạo khảo sát. Lớp dữ liệu đầu ra có chức năng lưu trữ kết quả phân vùng, các điểm bay và tuyến khảo sát, đồng thời xuất dữ liệu phục vụ nhiệm vụ bay. Cách tổ chức này giúp hệ thống rõ ràng, dễ mở rộng và thuận lợi cho việc thay thế hoặc bổ sung thuật toán trong các nghiên cứu tiếp theo. (Hình 1)

Hình 1: Sơ đồ kiến trúc phân hệ bản đồ và lập kế hoạch nhiệm vụ



2.2. Biểu diễn vùng nhiệm vụ và sinh điểm bay

Vùng nhiệm vụ được biểu diễn dưới dạng một đa giác do người vận hành xác lập trực tiếp trên bản đồ số. Sau khi được nhập vào hệ thống, dữ liệu hình học của đa giác được kiểm tra để loại bỏ các trường hợp không hợp lệ hoặc không phù hợp cho các bước xử lý tiếp theo. Việc chuẩn hóa này có ý nghĩa quan trọng vì chất lượng của phân vùng và quỹ đạo khảo sát phụ thuộc trực tiếp vào tính hợp lệ của hình học đầu vào.

Trên cơ sở đa giác đã được chuẩn hóa, hệ thống tiến hành phân chia khu vực thành nhiều vùng con tương ứng với số lượng UAV tham gia nhiệm vụ. Mục tiêu của bước phân vùng là tạo ra các miền làm việc tương đối độc lập, qua đó giảm mức chồng lấn khi khảo sát và tạo điều kiện để các UAV hoạt động song song. Kết quả của bước này là một tập các đa giác con, trong đó mỗi đa giác đại diện cho vùng hoạt động của một UAV.

Sau khi phân vùng, hệ thống sinh tập điểm khảo sát trong từng vùng con theo cấu trúc lưới. Khoảng cách lưới được xác định dựa trên tham số lập kế hoạch và khả năng bao phủ của cảm biến, nhằm bảo đảm các điểm khảo sát có thể đại diện cho phần lớn diện tích của vùng con. Tập điểm sinh ra ở bước này chưa phải là quỹ đạo bay hoàn chỉnh, mà chỉ là tập điểm bay rời rạc cần được sắp xếp thành một trình tự di chuyển phù hợp.

Một chi tiết quan trọng trong cài đặt hiện tại là việc lựa chọn điểm bắt đầu thống nhất cho các thuật toán. Hệ thống trước hết sử dụng quỹ đạo zíc zắc để xác định đầu dài quét nào gần hơn với vị trí ban đầu của UAV. Điểm đầu được chọn từ bước này sau đó được dùng làm điểm xuất phát chung cho các thuật toán còn lại. Nhờ đó, việc so sánh giữa các phương pháp lập đường đi trở nên công bằng hơn, vì tất cả cùng khởi đầu từ một điều kiện đầu vào giống nhau.

Trên cùng tập điểm bay được sinh ra cho từng vùng con, hệ thống tiếp tục áp dụng các thuật toán lập đường đi khác nhau để tạo các quỹ đạo ứng viên và đánh giá hiệu quả tương đối của từng phương án.

2.3. Cấu trúc các thuật toán lập đường đi

2.3.1. Thuật toán zíc zắc

Thuật toán zíc zắc được sử dụng như phương án cơ sở để tổ chức thứ tự đi qua các điểm khảo sát trong từng vùng con. Trong cài đặt hiện tại, đầu vào của thuật toán là danh sách các điểm khảo sát đã được sắp theo cấu trúc hàng quét và vị trí ban đầu của UAV. Từ đó, thuật toán xây dựng quỹ đạo bằng cách nối các hàng điểm theo kiểu qua lại xen kẽ để tạo thành đường đi liên tục trên toàn bộ vùng khảo sát.

Trước hết, thuật toán duyệt tuần tự danh sách điểm và gom chúng thành từng hàng. Việc gom hàng được thực hiện bằng cách kiểm tra 3 điểm liên tiếp: nếu điểm ở giữa vẫn nằm trên cùng một hàng với 2 điểm kề trước và kề sau thì điểm đó được giữ trong

hàng hiện tại, ngược lại thuật toán kết thúc hàng đang xét và bắt đầu một hàng mới. Theo cách này, tập điểm rời rạc được tổ chức lại thành một dãy các hàng quét liên tiếp.

Sau khi xác định các hàng quét, thuật toán xét 2 đầu của hàng đầu tiên và so sánh khoảng cách từ vị trí ban đầu của UAV đến từng đầu hàng. Đầu gần hơn sẽ được chọn làm điểm bắt đầu quỹ đạo. Cách chọn này giúp giảm quãng đường tiếp cận ban đầu trước khi UAV đi vào vùng khảo sát chính.

Từ chiều duyệt của hàng đầu tiên, các hàng tiếp theo được đảo chiều xen kẽ để tạo thành quỹ đạo dạng zíc zắc. Nhờ đó, UAV có thể chuyển trực tiếp từ cuối một hàng sang đầu gần nhất của hàng kế tiếp, thay vì phải quay lại điểm đầu của mỗi hàng. Cuối cùng, toàn bộ các hàng sau khi đã xác định chiều duyệt được ghép nối tuần tự để tạo thành quỹ đạo khảo sát hoàn chỉnh. Thuật toán đồng thời trả về điểm đầu của quỹ đạo này để dùng làm điểm xuất phát chung khi so sánh với các thuật toán còn lại.

Với cách tổ chức như vậy, thuật toán zíc zắc có ưu điểm là đơn giản, trực quan và phù hợp với các vùng con có cấu trúc điểm khảo sát tương đối đều. Trong nghiên cứu này, thuật toán được sử dụng như một phương án cơ sở để đối chiếu với thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt và thuật toán tối ưu đàn kiến trong cùng một điều kiện đầu vào.

2.3.2. Thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt

Thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt được sử dụng để xây dựng quỹ đạo khảo sát theo 2 bước. Trước hết, từ điểm xuất phát đã xác định, tại mỗi bước hệ thống chọn điểm bay chưa được thăm có khoảng cách gần nhất so với vị trí hiện tại. Cách làm này cho phép nhanh chóng tạo ra một quỹ đạo ban đầu với chi phí tính toán thấp. Giả sử tại bước thứ k , UAV đang ở điểm p_k và tập các điểm bay chưa được thăm là U_k , khi đó điểm tiếp theo được xác định bởi:

$$p_{\{k+1\}} = \arg \min_{q \in U_k} d(p_k, q), \text{ với } q \text{ thuộc } U_k$$

Sau khi thu được quỹ đạo ban đầu, thuật toán tiếp tục áp dụng phép cải tiến 2-opt để rút ngắn tổng chiều dài đường đi. Ý tưởng của bước này là xét 2 cạnh trên quỹ đạo hiện tại, sau đó kiểm tra xem việc thay thế chúng bằng một cặp cạnh mới có làm giảm chiều dài quỹ đạo hay không. Với hai cạnh $(p_i, p_{\{i+1\}})$ và $(p_j, p_{\{j+1\}})$, điều kiện cải thiện được viết như sau:

$$d(p_i, p_{\{k+1\}}) + d(p_j, p_{\{j+1\}}) > d(p_i, p_j) + d(p_{\{i+1\}}, p_{\{j+1\}})$$

Nếu điều kiện trên được thỏa mãn, đoạn con từ $p_{\{i+1\}}$ đến p_j sẽ được đảo ngược thứ tự. Quá trình này được lặp lại cho đến khi không còn phép hoán đổi nào làm giảm chiều dài quỹ đạo.

2.3.3. Thuật toán tối ưu đàn kiến (Ant Colony Optimization - ACO)

Thuật toán tối ưu đàn kiến được sử dụng để xây dựng quỹ đạo khảo sát trên tập điểm khảo sát đã cho. Mỗi điểm khảo sát được xem như một đỉnh của đồ thị, còn đường nối giữa 2 điểm được xem như một cạnh. Trên mỗi cạnh, hệ thống lưu 2 đại lượng chính là cường độ vết mùi và thông tin dẫn đường. Trong đó, thông tin dẫn đường thường được xác định theo nghịch đảo khoảng cách giữa 2 điểm khảo sát:

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$$

trong đó d_{ij} là khoảng cách giữa 2 điểm khảo sát i và j .

Tại mỗi bước, khi cá thể kiến đang ở điểm khảo sát i , điểm tiếp theo j được chọn theo xác suất phụ thuộc đồng thời vào cường độ vết mùi và thông tin dẫn đường. Nếu ký hiệu J_i^k là tập các điểm chưa được thăm của cá thể kiến thứ k , thì xác suất lựa chọn được xác định như sau:

$$p_{ij}^k = \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta}{\sum_{l \in J_i^k} \tau_{il}^\alpha \eta_{il}^\beta}$$

trong đó τ_{ij} là cường độ vết mùi trên cạnh nối giữa 2 điểm i và j , α là hệ số điều chỉnh mức ảnh hưởng của vết mùi, còn β là hệ số điều chỉnh mức ảnh hưởng của thông tin dẫn đường.

Sau khi tất cả các cá thể hoàn thành quỹ đạo trong một vòng lặp, hệ thống cập nhật lại lượng vết mùi trên các cạnh. Quy tắc cập nhật tổng quát được viết như sau:

$$\tau_{ij} \leftarrow (1-\rho) \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}$$

trong đó ρ là hệ số bay hơi vết mùi.

Lượng vết mùi mới được bổ sung trên mỗi cạnh do cá thể kiến thứ k tạo ra được xác định bởi:

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{nếu cạnh } (i,j) \text{ thuộc quỹ đạo của cá thể } k \\ 0 & \text{ngược lại} \end{cases}$$

trong đó Q là hằng số dương, còn L_k là tổng chiều dài quỹ đạo của cá thể kiến thứ k .

Từ các quỹ đạo ứng viên thu được, hệ thống chọn

quỹ đạo có giá trị hàm mục tiêu nhỏ nhất để đưa vào bước lập kế hoạch tiếp theo. Trong phạm vi bài viết này, thuật toán tối ưu đàn kiến được sử dụng như một phương pháp tối ưu hóa đại diện để so sánh với phương pháp quét zíc zắc và Thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt.

2.4. Hàm đánh giá và cơ chế lựa chọn quỹ đạo

Trên mỗi vùng con, 3 thuật toán được so sánh nhận cùng một tập điểm bay đầu vào và cùng một điểm xuất phát. Kết quả của mỗi thuật toán là một quỹ đạo ứng viên đi qua toàn bộ các điểm bay của vùng nhiệm vụ. Để bảo đảm tính nhất quán trong so sánh, bài viết sử dụng một tiêu chí đánh giá duy nhất là tổng chiều dài quỹ đạo.

Giả sử quỹ đạo ứng viên được biểu diễn bởi dãy điểm bay có thứ tự:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$$

trong đó p_1 là điểm xuất phát, còn $p_2, \dots, p_n$ là các điểm bay cần đi qua. Khi đó, tổng chiều dài quỹ đạo được xác định bởi:

$$L(P) = \sum_{i=1}^{n-1} d(p_i, p_{i+1})$$

Trong đó:

$d(p_i, p_{i+1})$ là khoảng cách giữa 2 điểm bay liên tiếp trên quỹ đạo. Đại lượng $L(P)$ phản ánh trực tiếp tổng quãng đường mà UAV phải di chuyển để hoàn thành nhiệm vụ trên vùng đang xét. Vì vậy, quỹ đạo có giá trị $L(P)$ nhỏ hơn được xem là tốt hơn, do giúp giảm quãng đường bay, qua đó góp phần rút ngắn thời gian thực hiện nhiệm vụ và giảm mức tiêu hao năng lượng.

Trên cơ sở đó, với mỗi vùng con, bài toán lựa chọn quỹ đạo được phát biểu dưới dạng:

$$P^* = \arg \min L(P)$$

trong đó P^* là quỹ đạo được lựa chọn trong tập các quỹ đạo ứng viên do 3 thuật toán sinh ra. Nói cách khác, hệ thống sẽ tính tổng chiều dài đường đi của từng phương án, sau đó chọn quỹ đạo có giá trị hàm mục tiêu nhỏ nhất làm tuyến khảo sát chính thức cho vùng nhiệm vụ tương ứng.

Sau khi quỹ đạo tối ưu được xác định, hệ thống có thể tiếp tục thực hiện bước rút gọn điểm bay trung gian nếu cần, trước khi xuất dữ liệu kế hoạch bay. Với cách xây dựng như vậy, quá trình so sánh giữa các thuật toán được quy về một tiêu chí rõ ràng, có thể định lượng và dễ đối chiếu, phù hợp với mục tiêu nghiên cứu là tối ưu lựa chọn quãng đường đi cho hệ nhiều UAV.

3. Thử nghiệm và kết quả

Để đánh giá hiệu quả của quy trình đề xuất, hệ thống được thử nghiệm trên một vùng nhiệm vụ có diện tích 2,54 ha, được biểu diễn dưới dạng đa giác trên bản đồ số với 2 cấu hình phân vùng khác nhau. Ở cấu hình thứ nhất, vùng nhiệm vụ được chia thành 3 vùng con tương ứng với 3 UAV hoạt động song song. Ở cấu hình thứ hai, cùng vùng nhiệm vụ được chia thành 4 vùng con tương ứng với 4 UAV. Trên mỗi vùng con, hệ thống sinh tập điểm khảo sát và lần lượt áp dụng 3 thuật toán lập đường đi gồm zíc zắc, thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt và thuật toán tối ưu đàn kiến. Giá trị dùng để so sánh là tổng chiều dài quỹ đạo thu được trên từng vùng con; quỹ đạo có tổng chiều dài nhỏ nhất được lựa chọn cho vùng nhiệm vụ tương ứng.

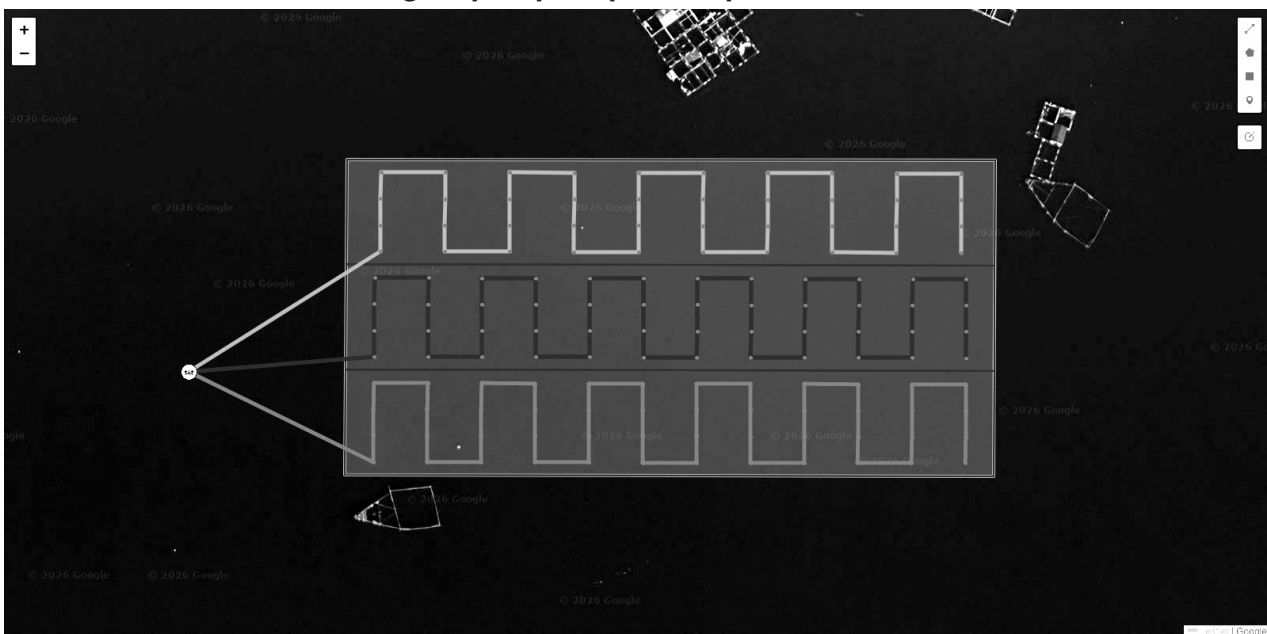
Với cấu hình 3 UAV, vùng nhiệm vụ được chia thành 3 vùng con. Trên cả 3 vùng con, thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt đều cho

tổng chiều dài quỹ đạo nhỏ nhất. Thuật toán zíc zắc tạo được quỹ đạo trực quan và bám theo cấu trúc quét, nhưng chiều dài quỹ đạo lớn hơn nhiều so với 2 thuật toán còn lại. Trong khi đó, thuật toán tối ưu đàn kiến cho kết quả tốt hơn zíc zắc, song vẫn lớn hơn nhẹ so với thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt trên cả 3 vùng con.

Từ Bảng 1 có thể thấy, chênh lệch giữa thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt và thuật toán tối ưu đàn kiến là không lớn, nhưng thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt vẫn luôn cho kết quả tốt hơn. So với zíc zắc, cả 2 thuật toán tối ưu còn lại đều làm giảm mạnh chiều dài quỹ đạo, cho thấy việc tối ưu thứ tự đi qua các điểm khảo sát có ảnh hưởng rõ rệt tới hiệu quả lập kế hoạch.

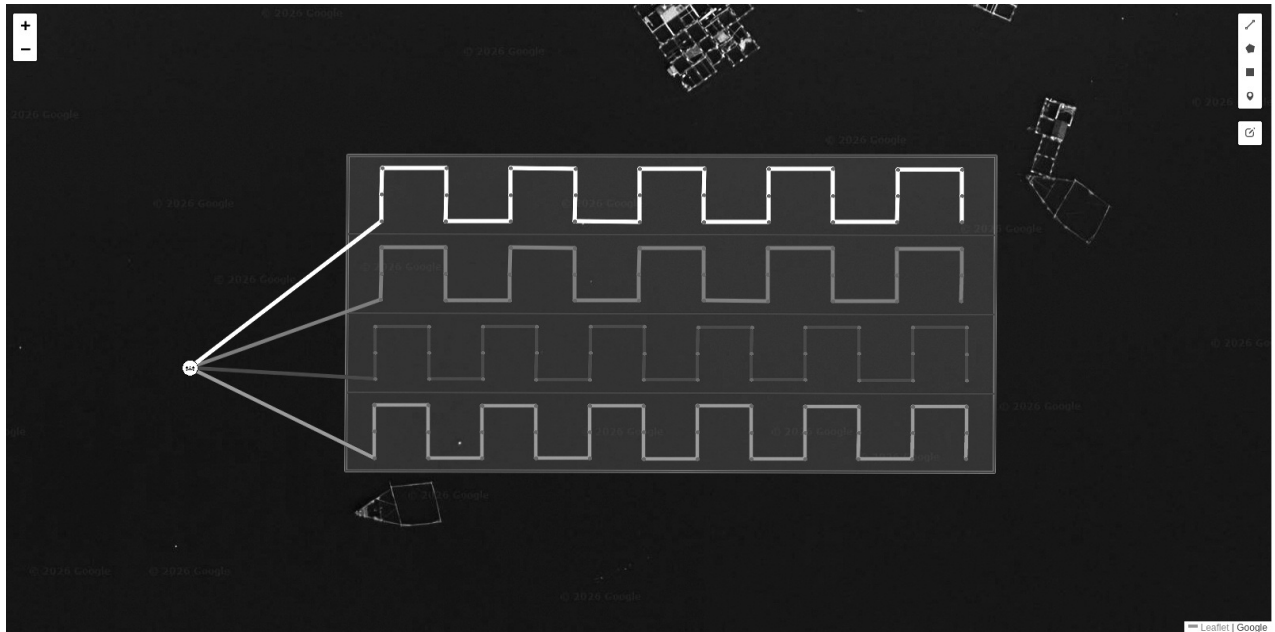
Ở cấu hình 4 UAV, vùng nhiệm vụ được chia thành 4 vùng con và xu hướng kết quả tiếp tục được giữ nguyên. Trên cả 4 vùng con, thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt đều cho tổng chiều dài quỹ đạo nhỏ nhất; thuật toán tối ưu đàn kiến

Hình 2: Kết quả phân chia vùng nhiệm vụ và tạo quỹ đạo khảo sát với cấu hình 3 UAV



Bảng 1. Kết quả so sánh 3 thuật toán trong cấu hình 3 UAV

Vùng con	Zíc zắc (m)	Lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt (m)	Tối ưu đàn kiến (m)
Vùng 1	899,827	310,768	313,202
Vùng 2	899,382	310,656	313,091
Vùng 3	882,542	292,053	294,495
Trung bình	893,917	304,492	306,929

Hình 3: Kết quả phân chia vùng nhiệm vụ và tạo quỹ đạo khảo sát với cấu hình 4 UAV**Bảng 2. Kết quả so sánh 3 thuật toán trong cấu hình 4 UAV**

Vùng con	Zíc zắc (m)	Lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt (m)	Tối ưu đàn kiến (m)
Vùng 1	674,303	281,569	284,004
Vùng 2	674,053	281,486	283,921
Vùng 3	661,491	267,560	269,995
Vùng 4	661,260	267,672	270,116
Trung bình	667,777	274,572	277,009

đứng thứ hai; còn zíc zắc tiếp tục cho giá trị lớn nhất. Điều này cho thấy, khi tăng số lượng vùng con và giảm kích thước từng vùng hoạt động, quan hệ tương đối giữa 3 thuật toán vẫn không thay đổi trong bộ dữ liệu thử nghiệm này.

Kết quả trong Bảng 2 cho thấy, thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt tiếp tục là phương án phù hợp nhất trong cấu hình 4 UAV. So với zíc zắc, mức giảm chiều dài quỹ đạo là rất rõ rệt; đồng thời so với thuật toán tối ưu đàn kiến, phương pháp này vẫn duy trì ưu thế nhỏ nhưng ổn định trên toàn bộ các vùng con. Điều đó cho thấy trong bối cảnh thử nghiệm của bài viết, thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt là lựa chọn phù hợp hơn để tích hợp vào quy trình lập kế hoạch nhiệm vụ trên bản đồ số.

4. Kết luận

Bài viết đã trình bày một quy trình lập kế hoạch hoạt động cho hệ nhiều UAV trên nền bản đồ số, kết hợp phân vùng khu vực nhiệm vụ và so sánh các thuật toán lập đường đi. Từ vùng khảo sát biểu diễn dưới dạng đa giác, hệ thống thực hiện các bước chuẩn hóa hình học, chia vùng theo số lượng UAV, sinh tập điểm khảo sát và tạo các quỹ đạo ứng viên bằng 3 thuật toán gồm Zíc zắc, thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt và thuật toán tối ưu đàn kiến. Quỹ đạo có tổng chiều dài nhỏ nhất được lựa chọn cho từng vùng nhiệm vụ.

Kết quả thử nghiệm với 2 cấu hình phân vùng gồm 3 UAV và 4 UAV cho thấy cả 3 thuật toán đều có thể tạo quỹ đạo bao phủ, nhưng chất lượng quỹ đạo có sự khác biệt rõ rệt. Thuật toán zíc zắc có ưu

điểm trực quan và dễ triển khai, song tổng chiều dài quỹ đạo lớn hơn đáng kể. Thuật toán tối ưu đàn kiến cho kết quả tốt hơn zíc zắc, nhưng trong các trường hợp thử nghiệm vẫn chưa vượt qua thuật toán lân cận gần nhất kết hợp tìm kiếm cục bộ 2-opt. Trên toàn bộ 7 vùng con của hai cấu hình thử nghiệm, thuật toán này đều cho tổng chiều dài quỹ đạo nhỏ nhất và là phương án phù hợp hơn cho phân hệ lập kế hoạch nhiệm vụ. Các nội dung nghiên cứu đã

xây dựng được một quy trình xử lý có tính thực tiễn, cho phép liên kết giữa dữ liệu bản đồ, phân vùng khu vực và lựa chọn quỹ đạo trong cùng một khung làm việc thống nhất. Trong thời gian tới, cần tiếp tục mở rộng đánh giá theo các tiêu chí như thời gian bay, số lần đổi hướng, tiêu thụ năng lượng và thử nghiệm trên nhiều dạng vùng khảo sát khác nhau để hoàn thiện hơn khả năng ứng dụng của hệ thống trong bài toán tìm kiếm cứu hộ thực tế. ■

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Khoa học và Công nghệ trong chương trình hỗ trợ nghiên cứu, phát triển và ứng dụng công nghệ của công nghiệp 4.0. Mã số đề tài: KC.4.0.49/19-25.

TÀI LIỆU TRÍCH DẪN VÀ THAM KHẢO:

- [1] B. Kang, C. Wang, and J. Zeng (2025). Multi-UAV forest area inspection path planning based on concave polygon region decomposition. *Scientific Reports*, 15(1), 1-15.
- [2] K. Vinh, S. Gebreyohannes, and A. Karimodini (2019). An area-decomposition based approach for cooperative tasking and coordination of UAVs in a search and coverage mission. *IEEE Aerospace Conference (AERO)*, Big Sky, MT, USA, 1-8, doi: 10.1109/AERO.2019.8741565.
- [3] W. Gray II, A. A. R. Newaz, M. Khaleghi, H. T. Nguyen, L. Hashemi Beni, A. Shahbazi, and A. Karimodini (2025). Multi-UAV Tasking and Coordination for Monitoring and Coverage of Agricultural Farmland,” *ACM Journal of Autonomous Transportation Systems*, 3(1), Art. no. 6, pp. 6:1-6:22, doi: 10.1145/3749194.
- [4] J. Ni, Y. Ge, Y. Zhao, and Y. Gu (2025). An Improved Multi-UAV Area Coverage Path Planning Approach Based on Deep Q-Networks. *Applied Sciences*, 15(20), Art. no. 11211, doi: 10.3390/app152011211.
- [5] T. M. Cabreira, L. B. Brisolara, and P. R. Ferreira, Jr. (2019). Survey on coverage path planning with unmanned aerial vehicles. *Drones*, 3(1), Art. no. 4, doi: 10.3390/drones3010004.
- [6] M. A. Luna, M. Molina, R. Da-Silva-Gomez, J. Melero-Deza, P. Arias-Perez, and P. Campoy (2024). A multi-UAV system for coverage path planning applications with in-flight re-planning capabilities. *Journal of Field Robotics*, 41(5), pp. 1480-1497, doi: 10.1002/rob.22342.
- [7] J. Muñoz, B. López, F. Quevedo, C. A. Monje, S. Garrido, and L. E. Moreno (2021). Multi-UAV coverage path planning in urban environments. *Sensors*, 21(21), Art. no. 7365, doi: 10.3390/s21217365.
- [8] R. Almadhoun, T. Taha, L. Seneviratne, J. Dias, and G. Cai (2019). A survey on multi-robot coverage path planning for model reconstruction and mapping. *SN Applied Sciences*, 1, Art. no. 847, doi: 10.1007/s42452-019-0872-y.
- [9] İ. Güven and E. Yanmaz (2024) Multi-objective path planning for multi-UAV connectivity and area coverage. *Ad Hoc Networks*, 160, Art. no. 103520, doi: 10.1016/j.adhoc.2024.103520.
- [10] Y. Xiong, Y. Zhou, J. She, and A. Yu (2025). Collaborative coverage path planning for UAV swarm for multi-region post-disaster assessment. *Vehicular Communications*, 53, Art. no. 100915, doi: 10.1016/j.vehcom.2025.100915.
- [11] J. Cao, Y. Wang, K. Li, Y. Zhu, and Q. Sun (2025). Multi-UAV adaptive cooperative coverage search method based on area dynamic sensing. *Journal of Computational Design and Engineering*, 12(4), 77-93, doi: 10.1093/jcde/qwaf031.
- [12] A. Skorobogatov, C. Barrado, E. Salamí, and E. Pastor (2021). Flight planning in multi-unmanned aerial vehicle systems: Nonconvex polygon area decomposition and trajectory assignment. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 18(1), 1-16, doi: 10.1177/1729881421989551.

- [13] J. Ni, Y. Ge, Y. Zhao, and Y. Gu (2025). An Improved Multi-UAV Area Coverage Path Planning Approach Based on Deep Q-Networks. *Applied Sciences*, 15(20), Art. no. 11211, doi: 10.3390/app152011211.
- [14] C. Guo, L. Huang, and K. Tian (2025). Combinatorial optimization for UAV swarm path planning and task assignment in multi-obstacle battlefield environment. *Applied Soft Computing*, 171, Art. no. 112773, doi: 10.1016/j.asoc.2025.112773.
- [15] J. Wang and R. Wang (2024). Multi-UAV Area Coverage Track Planning Based on the Voronoi Graph and Attention Mechanism. *Applied Sciences*, 14(17), Art. no. 7844, doi: 10.3390/app14177844.
- [16] L. Porcelli, M. Ficco, G. D'Angelo, and F. Palmieri (2025). Context-aware coverage path planning for a swarm of UAVs using mobile ground stations for battery-swapping. *Soft Computing*, 29(3), 1605-1625, doi: 10.1007/s00500-025-10537-8.

Ngày nhận bài: 24/03/2026

Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 30/03/2026

Ngày chấp nhận đăng bài: 05/04/2026

AN OPTIMIZATION ALGORITHM FOR OPERATIONAL AREA ALLOCATION IN UNMANNED AERIAL VEHICLE SYSTEMS FOR SEARCH-AND-RESCUE MISSIONS

● **PHAM MANH THANG¹**

● **VU DINH NAM¹**

¹Faculty of Engineering Mechanics and Automation,
University of Engineering and Technology, Vietnam National University - Hanoi

ABSTRACT:

This study investigates the operational planning process for a multi-drone system operating on a digital map in search-and-rescue missions. Based on a mission area represented in polygonal form, the proposed system performs area partitioning according to the number of deployed drones, generates survey waypoints, and constructs candidate flight trajectories within each subregion. To optimize mission efficiency, three trajectory-planning approaches were comparatively evaluated, including the zigzag algorithm, the nearest neighbor algorithm combined with 2-opt local search, and the ant colony optimization algorithm. The primary evaluation criterion was the total trajectory length generated by each method. Experimental results conducted on a 2.54-hectare survey area under two deployment configurations involving three and four drones demonstrated that the nearest neighbor algorithm integrated with 2-opt local search consistently produced the shortest and most efficient trajectories. The findings confirm the effectiveness of the proposed operational planning framework and highlight its potential for integration into mission-planning subsystems for coordinated multi-drone search-and-rescue operations.

Keywords: drones, flight path planning, search and rescue, digital mapping.