

# FSM-MP: khung lập kế hoạch nhiệm vụ cho hệ Swarm- phục vụ thành lập bản đồ địa hình dưới nước tỷ lệ lớn

## FSM-MP: A Mission-Planning Framework for Swarm-USV Systems in Large-Scale Underwater Topographic Mapping

Lưu Hải Âu<sup>1,\*</sup>, Ngô Thị Liên<sup>1</sup>, Trần Trung Anh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Viện Khoa học Đo đạc và Bản đồ, Bộ Nông nghiệp và Môi trường

<sup>2</sup> Trường Đại học Mở - Địa chất

\* Email liên hệ: haiauvnc@gmail.com

### Tóm tắt

Bài báo trình bày FSM-MP (Finite-State Mission Planning), một khung lập kế hoạch nhiệm vụ định hướng triển khai cho hệ xuồng không người lái bầy đàn (Swarm-USV) phục vụ thành lập bản đồ địa hình dưới nước tỷ lệ lớn. Khác với các nghiên cứu tập trung vào điều khiển đội hình hoặc tối ưu đường đi cục bộ, FSM-MP được đặt tại lớp lập kế hoạch nhiệm vụ, nơi yêu cầu bản đồ được chuyển thành tuyến đo, tác vụ tuyến, phân công cho từng USV và gói nhiệm vụ sẵn sàng nạp xuống phương tiện. Đầu vào của khung gồm vùng khảo sát, tỷ lệ bản đồ, khoảng cách tuyến, hướng tuyến, vùng cấm, điểm hạ thủy, năng lực USV và yêu cầu tuyến kiểm tra. Đầu ra là mission package theo USV ID, gồm waypoint, chiều dài tuyến, thời gian dự kiến, metadata và hồ sơ phục vụ kiểm tra sau đo. Thử nghiệm với hệ 03 USV cho thấy phương án Swarm-USV thực hiện 36,82 km tuyến trong 257,9 phút, trong khi phương án 01 USV thực hiện 37,79 km trong 482,3 phút, tương đương giảm 46,5% thời gian hiện trường và tăng năng suất tuyến tổng hợp từ 4,70 lên 8,57 km/giờ. Bộ giao kiểm 159 vị trí cắt ngang/gần giao nhau đạt  $|\Delta h|_{tb} = 0,026$  m,  $RMS_h = 0,028$  m và  $|\Delta h|_{max} = 0,040$  m, cho thấy dữ liệu có nền ổn định để chuyển sang mô hình hóa DEM/đường bình độ. Đóng góp chính của bài báo nằm ở quy trình chuyển đổi yêu cầu bản đồ thành mission có thể thực thi cho nhiều USV, thay vì đề xuất một bộ tối ưu hóa phổ quát mới.

**Từ khóa:** FSM-MP; Swarm-USV; lập kế hoạch nhiệm vụ; bản đồ địa hình dưới nước; đo sâu hồi âm; phân chia tuyến đo.

### Abstract

This paper presents FSM-MP (Finite-State Mission Planning), a deployment-oriented mission-planning framework for swarm-based unmanned surface vehicles (Swarm-USV) in large-scale underwater topographic mapping. The framework is positioned at the mission-planning layer rather than at the low-level formation-control layer. It transforms map-production requirements into survey tracklines, decomposes them into schedulable tasks, allocates tasks according to USV capabilities, and exports deployment-ready mission packages. Field validation using a three-USV system indicates that the proposed mission organization reduces field time by 46.5% compared with a single-USV scenario of comparable trackline length, while maintaining a QA/QC basis for map-ready bathymetric data. The contribution of FSM-MP is therefore the integration of survey specification, trackline-task decomposition, capability-aware workload allocation, and mission packaging for practical Swarm-USV mapping.

**Keywords:** FSM-MP; Swarm-USV; mission planning; underwater topographic mapping; hydrographic survey; trackline allocation.

### 1. Đặt vấn đề

Dữ liệu địa hình dưới nước là lớp thông tin nền cho quy hoạch, quản lý thủy vực, thiết kế công trình và theo dõi biến động lòng dẫn. Đối với bản đồ tỷ lệ lớn, yêu cầu kỹ thuật không chỉ là thu được trị đo độ sâu, mà còn gồm định vị, hệ độ cao, mật độ tuyến đo, tuyến kiểm tra, hồ sơ chất lượng và khả năng truy xuất dữ liệu. Các nền tảng USV đã chứng minh được giá trị trong khảo sát vùng nước nông, sông, hồ, kênh rạch và vùng ven bờ do giảm rủi ro cho nhân lực và tăng tính cơ động so với phương tiện có người lái [1-4].

Tuy nhiên, một USV đơn lẻ vẫn gặp giới hạn về năng suất khi khu đo lớn hoặc cửa sổ thời tiết - thủy triều ngắn. Việc tăng tốc độ của một USV không phải là giải pháp bền vững, vì tốc độ cao có thể làm giảm mật độ sounding, tăng nhiễu đầu dò, làm giảm ổn định thân xuồng và làm tăng sai số do đồng bộ thời gian. Hướng tiếp cận hợp lý hơn là tổ chức nhiều USV hoạt động song song ở dải tốc độ khảo sát ổn định, mỗi USV đảm

[Type here]

nhiệm một phần vùng đo nhưng toàn hệ vẫn được kiểm soát thống nhất về mission, dữ liệu, tham số lắp đặt và QA/QC.

Các nghiên cứu về coverage path planning, multi-robot task allocation và hệ USV khảo sát đã tạo nền tảng quan trọng cho bài toán này [5-8]. Dù vậy, nhiều công trình vẫn thiên về hình học phủ, thuật toán phân công hoặc điều khiển phối hợp, trong khi khoảng trống thực tế của đo đạc bản đồ nằm ở lớp trung gian: làm thế nào chuyển yêu cầu bản đồ thành các mission cụ thể, có thể nạp xuống nhiều USV, có metadata, có workload, có tuyến kiểm tra và có cơ sở truy xuất sau đó. Với nhiệm vụ thủy đạc, đơn vị tác vụ không phải một “job” trừu tượng, mà là tuyến đo có quan hệ trực tiếp với mật độ dữ liệu, vùng phủ và kiểm tra chất lượng.

Bài báo này đề xuất và mô tả FSM-MP cho hệ Swarm-USV. Thuật ngữ finite-state trong bài không chỉ bộ điều khiển cấp thấp, mà chỉ một chuỗi trạng thái lập kế hoạch hữu hạn: đặc tả khảo sát, sinh tuyến đo, phân rã tác vụ tuyến, phân bổ theo năng lực, đóng gói mission và bàn giao sang lớp điều hành/QA. Đóng góp của nghiên cứu không nằm ở một bộ tối ưu hóa phổ quát mới, mà ở việc tích hợp các bước nói trên thành một quy trình có thể triển khai, phù hợp với yêu cầu thành lập bản đồ địa hình dưới nước.

Các đóng góp chính của bài báo gồm: (i) xây dựng biểu diễn tác vụ tuyến đo cho Swarm-USV từ yêu cầu bản đồ; (ii) đề xuất mô hình năng lực và phân bổ workload theo từng USV; (iii) đóng gói kết quả thành mission package phục vụ điều hành thực địa; và (iv) kiểm chứng lợi ích thời gian, năng suất tuyến và chất lượng độ sâu bằng dữ liệu thực nghiệm 03 USV.

## 2. Mô hình bài toán và khung FSM-MP

### 2.1. Đầu vào khảo sát và biểu diễn tác vụ tuyến đo

Xét vùng khảo sát R trong mặt phẳng tọa độ hai chiều. Đối với khảo sát địa hình dưới nước bằng USV, đặc tả nhiệm vụ không còn là GSD và chồng phủ ảnh như bài toán UAV đo ảnh, mà là tỷ lệ bản đồ, khoảng cách tuyến đo, hướng tuyến, tốc độ khảo sát, vùng cấm, vùng quay đầu và yêu cầu tuyến kiểm tra. Tập đầu vào được viết dưới dạng:

$$\Omega = \{R, s, \alpha, v_s, Z, B, Q, U\} \tag{1}$$

Trong đó s là khoảng cách tuyến hoặc mật độ tuyến theo yêu cầu bản đồ;  $\alpha$  là hướng tuyến chính;  $v_s$  là tốc độ khảo sát mục tiêu; Z là tập vùng cấm/vùng nguy hiểm; B là điểm hạ thủy, thu hồi hoặc vùng quay đầu; Q là yêu cầu QA/QC như tuyến kiểm tra, vùng chồng phủ hoặc crossline; và  $U = \{U1, U2, \dots, Un\}$  là tập USV tham gia nhiệm vụ.

Từ đặc tả  $\Omega$ , FSM-MP sinh tập tuyến đo tổng thể dạng song song hoặc lawnmower, sau đó phân rã thành tập tác vụ tuyến đo:

$$T = \{T1, T2, \dots, TK\}, \quad T_j = (pjs, pje, lj, qj) \tag{2}$$

Trong đó pjs và pje là điểm đầu và điểm cuối của tác vụ tuyến j; lj là chiều dài tuyến; qj là thuộc tính nhiệm vụ như tuyến chính, tuyến kiểm tra, vùng chồng phủ hoặc tuyến đo bù. Biểu diễn này giữ được ý nghĩa đo đạc của tuyến, đồng thời biến tuyến đo thành đơn vị có thể lập lịch cho nhiều USV.

### 2.2. Mô hình năng lực USV và bài toán phân bổ

Ở lớp lập lịch, mỗi USV được mô tả bằng vận tốc khảo sát hiệu dụng vi, thời gian hoạt động khả dụng ti và hệ số khai thác ki. Hệ số ki phản ánh phần năng lực thực tế có thể sử dụng sau khi xét pin dự trữ, tải trọng cảm biến, điều kiện dòng chảy, liên lạc và biên an toàn. Năng lực tuyến hữu ích của USV i được xấp xỉ:

$$Ci = vi \cdot ti \cdot ki, \quad 0 < ki \leq 1 \tag{3}$$

Chi phí thời gian khi giao tác vụ tuyến Tj cho USV i được tính gần đúng theo:

$$tij = lj / (vi \cdot ki) \tag{4}$$

Biến quyết định xij nhận giá trị 1 nếu Tj được giao cho USV i, và 0 trong trường hợp ngược lại. Tổng chiều dài và thời gian nhiệm vụ của USV i là:

$$Li = \sum_j xij lj, \quad Ti = \sum_j xij tij \tag{5}$$

Mục tiêu của FSM-MP là giảm thời gian hoàn thành nhiệm vụ ở cấp hệ thống, được biểu diễn bằng bài toán min-max:

$$\min X \max_i Ti \tag{6}$$

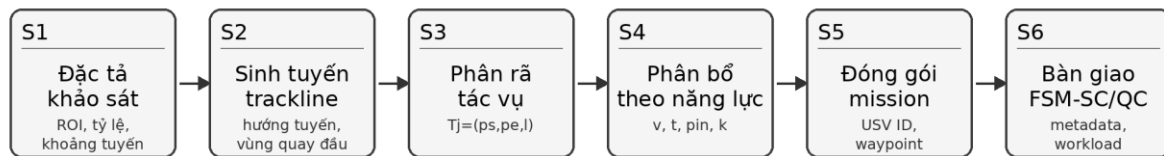
[Type here]

Các ràng buộc chính gồm: mỗi tác vụ tuyến được giao đúng một USV; tổng chiều dài tuyến giao cho từng USV không vượt quá năng lực Ci; tuyến kiểm tra và vùng chồng phủ phải được bảo toàn; mission không được đi qua vùng cấm và phải tương thích với điểm hạ thủy, vùng quay đầu, pin và dung lượng waypoint. Bài toán được giải bằng heuristic xác định theo năng lực: các tác vụ được xét theo thứ tự hình học khảo sát, tập USV khả thi được lọc theo năng lực còn lại, và tác vụ được giao cho USV làm tăng nhỏ nhất tải tối đa hiện tại.

Trạng thái FSM-MP	Đầu vào	Xử lý chính	Đầu ra
S1. Đặc tả khảo sát	ROI, tỷ lệ, hệ tọa độ, vùng cấm	Chuẩn hóa yêu cầu bản đồ	Bộ tham số mission
S2. Sinh tuyến đo	Hướng tuyến, khoảng cách tuyến	Tạo tuyến song song/lawnmower	Tập trackline tổng thể
S3. Phân rã tác vụ	Trackline tổng thể	Chia thành đoạn/tác vụ tuyến	Tập Tj có chiều dài và thuộc tính
S4. Phân bổ năng lực	Tập Tj, hồ sơ USV	Cân bằng workload theo vi, ti, ki	Tuyến theo từng USV ID
S5. Đóng gói mission	Tuyến đã phân công	Sắp thứ tự waypoint, kiểm tra pin	Mission package, metadata
S6. Bàn giao QC	Mission và log kỳ vọng	Xuất hồ sơ cho FSM-SC/QA	Workload, tuyến kiểm tra, file nạp

Bảng 1. Chuỗi trạng thái lập kế hoạch của FSM-MP cho hệ Swarm-USV.

FSM-MP cho Swarm-USV: luồng trạng thái lập kế hoạch nhiệm vụ



Hình 1. Luồng trạng thái FSM-MP từ yêu cầu bản đồ đến mission package cho từng USV.

### 3. Thực nghiệm và dữ liệu kiểm chứng

Khung FSM-MP được kiểm chứng trong chuỗi thử nghiệm của hệ Swarm-USV gồm 03 phương tiện dạng catamaran tích hợp GNSS-RTK, IMU/INS, đo sâu hồi âm/sonar, logger và telemetry. Mỗi USV được quản lý như một node đo đạc có định danh riêng, mission riêng, log riêng và bảng tham số riêng. Trong phạm vi bài báo này, FSM-MP được đánh giá ở ba khía cạnh: khả năng tạo mission chia theo USV, hiệu quả giảm thời gian hiện trường và khả năng duy trì cơ sở QA/QC cho dữ liệu đo sâu.

Kịch bản so sánh chính gồm một phương án 01 USV và một phương án 03 USV. Hai phương án có tổng chiều dài tuyến tương đương, cùng mục tiêu thu nhận dữ liệu phục vụ bản đồ địa hình dưới nước. Để tránh hiểu sai, chỉ tiêu được so sánh không phải vận tốc tức thời của từng USV, mà là thời gian hoàn thành nhiệm vụ và năng suất tuyến tổng hợp của toàn hệ.

Dữ liệu chất lượng độ sâu được đánh giá bằng bộ 159 vị trí cắt ngang hoặc gần giao nhau giữa hai tuyến chạy. Bộ giao kiểm này được dùng để đánh giá thành phần độ sâu tương đối giữa các tuyến gần nhau, không thay thế cho đánh giá sai số mặt bằng độc lập. Các chỉ tiêu sử dụng gồm độ lệch tuyệt đối trung bình  $|\Delta h|_{tb}$ , RMS độ sâu RMS<sub>h</sub> và sai khác độ sâu lớn nhất  $|\Delta h|_{max}$ .

Nội dung	Phương án 01 USV	Phương án 03 USV	Ý nghĩa đánh giá
Số phương tiện	01 USV	03 USV	So sánh đơn phương tiện và Swarm-USV
Tổ chức mission	Một phương tiện chạy tuần tự	Chia tuyến/vùng theo USV ID	Đánh giá hiệu quả FSM-MP
Dữ liệu cảm biến	GNSS/IMU/depth/sonar	GNSS/IMU/depth/sonar trên từng USV	Bảo đảm dữ liệu có thể QA/QC

[Type here]

Nội dung	Phương án 01 USV	Phương án 03 USV	Ý nghĩa đánh giá
Hồ sơ cần lưu	Mission, track, raw data	Mission package, workload, metadata	Truy xuất theo USV/mission
Tuyến kiểm tra	Theo phương án đo	Crossline/vùng giao hoặc gần giao	Cơ sở đánh giá độ sâu

Bảng 2. Thiết lập kiểm chứng FSM-MP trong mô hình Swarm-USV.

#### 4. Kết quả và thảo luận

##### 4.1. Hiệu quả thời gian và năng suất tuyến

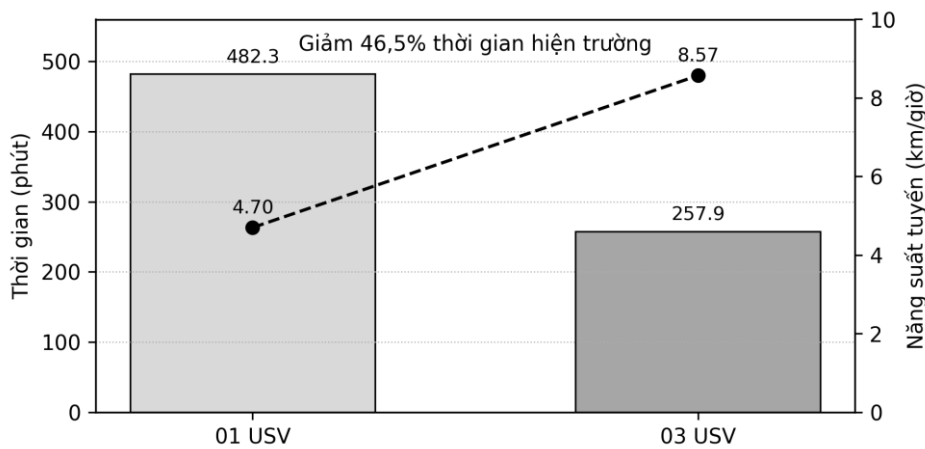
Kết quả so sánh cho thấy FSM-MP tạo lợi ích rõ ở cấp hệ thống. Phương án 01 USV thực hiện 37,79 km tuyến trong 482,3 phút, tương ứng năng suất tuyến tổng hợp 4,70 km/giờ. Phương án 03 USV thực hiện 36,82 km tuyến trong 257,9 phút, tương ứng năng suất tuyến tổng hợp 8,57 km/giờ. Mức giảm thời gian hiện trường đạt:

$$\eta = (482,3 - 257,9) / 482,3 \times 100\% = 46,5\% \quad (7)$$

Kết quả này cần được diễn giải đúng: FSM-MP không làm giảm tổng công việc đo đạc cần thực hiện trong khu đo, mà giảm thời gian hoàn thành nhờ song song hóa workload giữa nhiều USV. Đây là lợi ích phù hợp với khảo sát vùng nước khi cửa sổ thời tiết, thủy triều hoặc điều kiện vận hành bị giới hạn.

Phương án	Chiều dài tuyến (km)	Thời gian (phút)	Năng suất (km/giờ)	Nhận xét
01 USV	37,79	482,3	4,70	Mốc đơn phương tiện
03 USV	36,82	257,9	8,57	Song song hóa mission
Chênh lệch	Tương đương	Giảm 224,4 phút	Tăng 82,3%	Giảm 46,5% thời gian

Bảng 3. So sánh hiệu quả giữa phương án 01 USV và 03 USV.



Hình 2. So sánh thời gian hiện trường và năng suất tuyến tổng hợp.

##### 4.2. Chất lượng dữ liệu và điều kiện map-ready

Đối với một hệ Swarm-USV phục vụ bản đồ, hiệu quả thời gian chỉ có ý nghĩa khi dữ liệu sau đo đủ cơ sở để xử lý DEM, đường bình độ và sản phẩm bản đồ. Vì vậy, FSM-MP không chỉ sinh tuyến chính mà còn giữ lại cấu trúc tuyến kiểm tra, vùng chồng phủ hoặc điểm giao/gần giao để phục vụ QA/QC. Trong bộ dữ liệu kiểm chứng, 159 vị trí giao kiểm độ sâu cho kết quả  $|\Delta h|_{tb} = 0,026$  m,  $RMS_h = 0,028$  m và  $|\Delta h|_{max} = 0,040$  m.

Chỉ tiêu	Ký hiệu	Giá trị	Ý nghĩa
Số vị trí giao kiểm	n	159	Mẫu đánh giá dọc dài khảo sát
Độ lệch tuyệt đối trung bình	$ \Delta h _{tb}$	0,026 m	Độ sâu giữa hai tuyến gần nhau ổn định
RMS độ sâu	$RMS_h$	0,028 m	Chỉ tiêu chính đánh giá độ khép độ sâu

[Type here]

Chỉ tiêu	Ký hiệu	Giá trị	Ý nghĩa
Độ lệch lớn nhất	$ \Delta h _{\max}$	0,040 m	Không ghi nhận lệch sâu lớn bất thường

Bảng 4. Kết quả giao kiểm độ sâu tại 159 vị trí cắt ngang/gần giao nhau.

Các giá trị trên cho thấy dữ liệu sounding có nền ổn định để chuyển sang mô hình hóa bề mặt đáy. Tuy nhiên, đối với tỷ lệ bản đồ chi tiết như 1:2.000, cần bổ sung kiểm tra hình thái DEM, đường bình độ, vùng thiếu dữ liệu và vết ghép giữa các dải trước khi kết luận đạt tuyệt đối. Cách diễn giải thận trọng này giúp bài báo không phóng đại kết quả từ một chỉ tiêu giao kiểm riêng lẻ.

### 4.3. Ý nghĩa của mission package

Đầu ra quan trọng nhất của FSM-MP không phải là sơ đồ tuyến trên màn hình, mà là mission package có thể chuyển sang lớp điều hành thực thi. Mỗi gói nhiệm vụ gồm waypoint, USV ID, mission ID, chiều dài tuyến, thời gian dự kiến, vùng quay đầu, tuyến kiểm tra và metadata. Khi được bàn giao cho FSM-SC, gói này có thể được kiểm tra bằng các bước connect, upload, readback, verify và health gate trước khi USV chạy tự động. Nhờ đó, dữ liệu sau đo có thể truy xuất từ sản phẩm bản đồ về tuyến, mission, USV, thời điểm đo và cấu hình cảm biến.

Vai trò này phân biệt FSM-MP với các thuật toán chia vùng thuần túy. Trong khảo sát thủy đạc, một phương án chia vùng chỉ có giá trị khi nó đi kèm với khả năng nạp mission, kiểm tra trạng thái phương tiện, ghi log và duy trì cơ sở QA/QC. Do đó, FSM-MP nên được xem như lớp lập kế hoạch nhiệm vụ trong chuỗi mission-to-map, còn FSM-SC là lớp đảm bảo thực thi đúng mission ngoài hiện trường.

### 4.4. Hạn chế và hướng hoàn thiện

Nghiên cứu hiện còn một số hạn chế. Thứ nhất, bài báo tập trung vào lớp lập kế hoạch nhiệm vụ và chưa mô hình hóa chi tiết ảnh hưởng động của dòng chảy, sóng, gió hoặc tránh vật cản thời gian thực. Thứ hai, hệ số năng lực ki hiện được dùng như tham số hiệu dụng, cần tiếp tục hiệu chỉnh theo dữ liệu pin, dòng chảy, độ ổn định tuyến và trạng thái cảm biến. Thứ ba, benchmark mới so sánh phương án 01 USV và 03 USV; cần mở rộng với nhiều hình dạng ROI, nhiều kích thước khu đo và nhiều cấu hình cảm biến như SBES, MBES hoặc sonar độ phân giải cao. Thứ tư, chất lượng sản phẩm 1:2.000 cần đánh giá thêm ở cấp DEM/contour, không chỉ bằng giao kiểm độ sâu.

Các hướng hoàn thiện gồm tích hợp mô hình dòng chảy và vùng nguy hiểm vào FSM-MP, tự động hóa lựa chọn tuyến kiểm tra, tối ưu chia mission theo pin và dung lượng waypoint, bổ sung cơ chế đo bù theo vùng nghi vấn, và liên kết trực tiếp với dashboard QA/QC theo USV ID và mission ID. Khi các thành phần này được hoàn thiện, FSM-MP có thể trở thành lớp lập nhiệm vụ chuẩn cho hệ Swarm-USV phục vụ khảo sát địa hình dưới nước trong điều kiện Việt Nam.

## 5. Kết luận

Bài báo đã trình bày FSM-MP như một khung lập kế hoạch nhiệm vụ cho hệ Swarm-USV phục vụ thành lập bản đồ địa hình dưới nước tỷ lệ lớn. Khung này chuyển yêu cầu bản đồ thành tuyến đo, tác vụ tuyến, phân bổ workload và mission package theo từng USV, qua đó tạo cầu nối giữa thiết kế khảo sát và vận hành thực địa.

Kết quả thực nghiệm cho thấy mô hình 03 USV giúp giảm 46,5% thời gian hiện trường so với phương án 01 USV có chiều dài tuyến tương đương, đồng thời tăng năng suất tuyến tổng hợp từ 4,70 lên 8,57 km/giờ. Bộ giao kiểm 159 vị trí cho thấy thành phần độ sâu ổn định với  $RMS_h = 0,028$  m và  $|\Delta h|_{\max} = 0,040$  m. Các kết quả này chứng minh giá trị của FSM-MP ở khả năng song song hóa nhiệm vụ có kiểm soát, không phải ở việc làm giảm tổng khối lượng khảo sát.

Đóng góp chính của FSM-MP là tích hợp đặc tả bản đồ, sinh tuyến, phân rã tác vụ, phân bổ theo năng lực và đóng gói mission thành một workflow có thể triển khai. Trong chuỗi công nghệ Swarm-USV, FSM-MP nên được đặt trước lớp điều hành FSM-SC và trước quy trình QA/QC dữ liệu, tạo thành mạch mission-to-map phục vụ sản phẩm bản đồ có khả năng truy xuất.

### Lời cảm ơn

[Type here]

Nghiên cứu sử dụng dữ liệu và kết quả thực nghiệm trong khuôn khổ đề tài khoa học và công nghệ cấp Bộ mã số TNMT.2024.03.01 về ứng dụng tổ hợp xuồng không người lái theo bầy đàn phục vụ thành lập bản đồ địa hình dưới nước tỷ lệ lớn. Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn các đơn vị và thành viên tham gia thiết kế, tích hợp, thử nghiệm và xử lý dữ liệu hệ Swarm-USV.

### Tài liệu tham khảo

- [1] International Hydrographic Organization (2024). IHO Standards for Hydrographic Surveys, S-44, Edition 6.2.0.
- [2] NOAA Office of Coast Survey (2025). Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables, Version 2025.0.00.
- [3] Wajs, J., et al. (2021). Development of low-cost Unmanned Surface Vehicle system for bathymetric measurements. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 684, 012033.
- [4] Specht, M., et al. (2020). The use of USV to develop navigational and bathymetric models of yacht ports on the example of National Sailing Centre in Gdańsk. Remote Sensing, 12(16), 2585.
- [5] Choset, H. (2000). Coverage of known spaces: The boustrophedon cellular decomposition. Autonomous Robots, 9, 247-253.
- [6] Galceran, E., & Carreras, M. (2013). A survey on coverage path planning for robotics. Robotics and Autonomous Systems, 61(12), 1258-1276.
- [7] Gerkey, B. P., & Mataric, M. J. (2004). A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems. The International Journal of Robotics Research, 23(9), 939-954.
- [8] Korsah, G. A., Stentz, A., & Dias, M. B. (2013). A comprehensive taxonomy for multi-robot task allocation. The International Journal of Robotics Research, 32(12), 1495-1512.
- [9] Baswantara, A., Hakim, M. R., Firdaus, A. N., et al. (2025). Study on design and construction of unmanned surface vehicle (USV) as a marine survey vehicle. BIO Web of Conferences, 168, 05010.
- [10] Hà Thị Hằng, Bùi Duy Quỳnh, Trần Đình Trọng, Lương Ngọc Dũng, Hà Trung Khiên (2019). Khảo sát khả năng thành lập bình đồ đáy hồ bằng tàu không người lái (USV) tại khu vực hồ Đền Lừ, thành phố Hà Nội. Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất, 60(4).
- [11] Van, D. H., et al. (2022). Improved Hydrographic Surveying Accuracy with the Use of Unmanned Surface Vehicles. Journal of Science and Technology.
- [12] Lưu Hải Âu, Ngô Thị Liên và cs. (2026). Hồ sơ thực nghiệm hệ Swarm-USV phục vụ thành lập bản đồ địa hình dưới nước tỷ lệ lớn, đề tài TNMT.2024.03.01.