

Xây dựng phần mềm điều phối thực thi nhiệm vụ cho tổ hợp USV trong lập bản đồ địa hình dưới nước

Ngô Thị Liên¹, Lưu Hải Âu¹, Trần Trung Anh², Trần Hồng Hạnh²

¹ Viện Khoa học Đo đạc và Bản đồ, Hà Nội, Việt Nam; ² Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

Tóm tắt

Bài báo trình bày FSM-SC, một lớp điều hành thực thi nhiệm vụ cho hệ xuồng không người lái bầy đàn trong thành lập bản đồ địa hình dưới nước vùng nội địa. Trong hệ Swarm-USV, sau khi nhiệm vụ đo đạc được lập kế hoạch, mỗi xuồng cần được nạp đúng tuyến đo, kiểm tra đúng trạng thái và được giám sát trong suốt quá trình làm việc. Nếu các bước này thực hiện thủ công, người vận hành dễ gặp các lỗi như nạp nhầm nhiệm vụ, cho xuồng chạy khi chưa đủ điều kiện, mất kiểm soát trạng thái thiết bị hoặc thiếu dữ liệu kiểm chứng sau đo. FSM-SC được đề xuất như một lớp trung gian giữa phần lập kế hoạch nhiệm vụ và các xuồng USV ngoài hiện trường. Lớp này thực hiện các chức năng chính gồm kết nối phương tiện, nạp nhiệm vụ, đọc lại và kiểm tra nhiệm vụ, đánh giá điều kiện sẵn sàng, cho phép hoặc chặn thực thi, giám sát trạng thái hoạt động và ghi nhật ký quá trình đo. Kết quả thực nghiệm với hệ 03 xuồng không người lái cho thấy FSM-SC hỗ trợ tổ chức đo đạc đồng thời, giảm thời gian hiện trường khoảng 46,5% so với phương án 01 xuồng, trong khi dữ liệu đầu ra vẫn đáp ứng yêu cầu thành lập bản đồ. Sai số độ cao trung phương tại các vị trí kiểm tra đạt khoảng 0,028 m.

Từ khóa: FSM-SC; xuồng không người lái bầy đàn; Swarm-USV; điều hành thực thi nhiệm vụ; bản đồ địa hình dưới nước; tự động hóa đo đạc.

Abstract

This paper presents FSM-SC, a mission execution layer for a swarm of unmanned surface vehicles in inland underwater topographic mapping. In a Swarm-USV system, after missions are planned, each vehicle must receive the correct mission, be checked for readiness, and be monitored during field execution. Manual operation may lead to wrong mission upload, premature start, poor status awareness, or a lack of traceable records. FSM-SC is proposed as an intermediate layer between mission planning and USV platforms. Its main functions include vehicle connection, mission uploading, mission readback and verification, readiness checking, execution permission or blocking, runtime monitoring, and event logging. Experimental results with three USVs show that FSM-SC supports parallel survey execution and reduces field operation time by approximately 46.5% compared with a single-USV configuration, while maintaining map-ready data quality. The root mean square height error at validation points was about 0.028 m.

Keywords: FSM-SC; Swarm-USV; unmanned surface vehicle; mission execution; underwater topographic mapping; survey automation.

1. Mở đầu

Thành lập bản đồ địa hình dưới nước ở sông, hồ, hồ chứa, kênh rạch và khu vực ven bờ nội địa đang có nhu cầu tự động hóa ngày càng cao. Xuồng không người lái (USV) giúp giảm phụ thuộc vào tàu đo truyền thống, hỗ trợ đo ở vùng nông, vùng khó tiếp cận và có thể tích hợp GNSS-RTK, IMU, thiết bị đo sâu hồi âm, sonar và bộ ghi dữ liệu.

Khi chỉ có một USV, quy trình vận hành tương đối đơn giản: nạp tuyến, kiểm tra thiết bị, cho chạy và thu dữ liệu. Tuy nhiên, khi chuyển sang hệ nhiều xuồng không người lái bầy đàn (Swarm-USV), số lượng thao tác tăng nhanh. Người vận hành phải biết xuồng nào đang kết nối, xuồng nào đã nhận nhiệm vụ, nhiệm vụ có đúng không, trạng thái định vị và cảm biến đã sẵn sàng chưa, đồng thời phải theo dõi nhiều phương tiện trong cùng một phiên đo.

Trong điều kiện thực địa, các lỗi nhỏ có thể gây hậu quả lớn: nạp nhầm mission cho xuồng, thiếu waypoint, chạy khi RTK chưa ổn định, quên bật logger, cảm biến đo sâu chưa sẵn sàng hoặc không có nhật ký để đối chiếu sau đo. Vì vậy, tự động hóa Swarm-USV không chỉ là bài toán chia tuyến hoặc điều khiển xuồng, mà còn là bài toán điều hành thực thi nhiệm vụ một cách có kiểm soát.

Bài báo này trình bày FSM-SC như một lớp điều hành thực thi nhiệm vụ cho hệ Swarm-USV. Có thể hiểu đơn giản: nếu FSM-MP lập và chia nhiệm vụ đo đạc, thì FSM-SC kiểm tra và điều hành để các xuồng thực hiện đúng nhiệm vụ đó ngoài hiện trường. FSM-SC không thay thế bộ lái tự động của xuồng, cũng không thay thế thuật toán tránh va chạm. Vai trò của FSM-SC là kiểm tra điều kiện, cho phép hoặc chặn thực thi, giám sát trạng thái và ghi lại quá trình vận hành.

Mục tiêu của bài báo là xây dựng một khung nghiên cứu dễ hiểu và có khả năng áp dụng trực tiếp cho đề tài thiết kế, chế tạo Swarm-USV phục vụ thành lập bản đồ địa hình dưới nước. Nội dung tập trung vào câu hỏi thực

[Type here]

tế: làm thế nào để nhiều xuồng cùng hoạt động, nhưng vẫn bảo đảm đúng nhiệm vụ, đúng trạng thái và có dữ liệu kiểm chứng sau đo.

2. Bài toán thực tế và khoảng trống cần giải quyết

Các nghiên cứu liên quan đến USV và robot nhiều phương tiện thường tập trung vào thiết kế nền tảng, tích hợp cảm biến, lập đường đi, phân chia tác vụ hoặc điều khiển phối hợp. Những hướng này rất quan trọng, nhưng chưa trả lời đầy đủ một vấn đề vận hành thường gặp ở hiện trường: sau khi đã có nhiệm vụ đo, làm thế nào để bảo đảm từng xuồng nhận đúng mission, đủ điều kiện chạy và quá trình đo được ghi nhận rõ ràng.

Với khảo sát địa hình dưới nước, yêu cầu cuối cùng không chỉ là xuồng đi được trên mặt nước, mà là tạo ra dữ liệu đo sâu có thể đưa vào xử lý, kiểm tra chất lượng và biên tập bản đồ. Vì vậy, lớp điều hành cần quan tâm cả ba yếu tố: nhiệm vụ, trạng thái hệ thống và dữ liệu đầu ra.

Bảng 1. Khoảng trống thực tế dẫn tới nhu cầu xây dựng FSM-SC cho Swarm-USV.

Vấn đề thực tế	Nếu vận hành thủ công	FSM-SC cần làm gì?	Kết quả mong muốn
Nhiều xuồng cùng đo	Khó nhớ xuồng nào nhận tuyến nào	Gắn mission với đúng USV/SYSID	Không nạp nhầm nhiệm vụ
Mission sau khi nạp	Chỉ biết đã bấm upload, chưa chắc đúng	Đọc lại waypoint và kiểm tra số lượng/tuyến	Mission được xác nhận trước khi chạy
Trạng thái thiết bị	Dễ bỏ sót RTK, IMU, pin, sensor, logger	Kiểm tra điều kiện sẵn sàng theo gate	Chỉ chạy khi đủ điều kiện
Theo dõi hiện trường	Khó quan sát đồng thời nhiều xuồng	Hiển thị trạng thái và vị trí tập trung	Vận hành rõ ràng, giảm nhầm lẫn
Kiểm chứng sau đo	Thiếu nhật ký đối chiếu	Ghi log sự kiện và phiên vận hành	Có cơ sở kiểm tra và truy vết

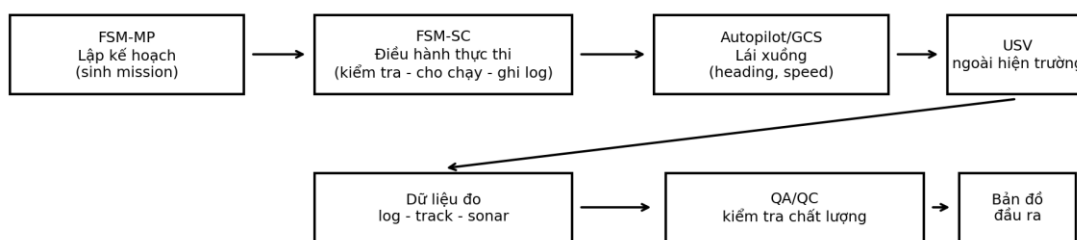
Từ khoảng trống trên, bài báo đặt ra hai câu hỏi nghiên cứu đơn giản. Thứ nhất, làm thế nào để bảo đảm mỗi xuồng chạy đúng nhiệm vụ đã lập? Thứ hai, làm thế nào để chỉ cho phép xuồng chạy khi các điều kiện tối thiểu về kết nối, định vị, nguồn, cảm biến và ghi dữ liệu đã đạt yêu cầu?

3. FSM-SC là lớp gì trong hệ Swarm-USV?

FSM-SC được hiểu là lớp điều hành thực thi nhiệm vụ. Lớp này nằm giữa phần lập kế hoạch nhiệm vụ và các xuồng USV ngoài hiện trường. FSM-SC nhận mission đã được lập, nạp mission cho từng xuồng, kiểm tra lại mission, đánh giá trạng thái sẵn sàng, sau đó mới cho phép xuồng chạy.

Cách diễn giải dễ hiểu nhất là coi FSM-SC như một “người điều phối điện tử”. Người điều phối này không tự lái xuồng thay autopilot, nhưng quyết định khi nào xuồng được phép bắt đầu, khi nào phải giữ trạng thái chờ, và thông tin nào cần được ghi lại để phục vụ kiểm tra sau đo.

Vị trí của FSM-SC: không thay autopilot, mà kiểm soát quy trình thực thi mission



Hình 1. Vị trí của FSM-SC trong chuỗi từ lập nhiệm vụ đến bản đồ đầu ra.

Trong hệ này có ba lớp dễ nhớ: FSM-MP lập nhiệm vụ, FSM-SC kiểm tra và cho chạy nhiệm vụ, còn autopilot/GCS lái xuồng theo waypoint. Nhờ cách tách lớp như vậy, bài báo không bị hiểu nhầm là thay thế bộ lái hoặc thuật toán điều khiển bầy; bài báo tập trung vào phần điều hành thực thi mission ngoài hiện trường.

4. Nguyên lý hoạt động của FSM-SC

Nguyên lý của FSM-SC được xây dựng theo hướng dễ kiểm tra: một xuồng chỉ được phép chạy khi các điều kiện cần thiết đã đạt. Nếu thiếu một điều kiện, hệ thống chặn lệnh chạy và yêu cầu người vận hành kiểm tra lại.

Trong bài báo này, điều kiện cho phép chạy được viết theo dạng đơn giản:

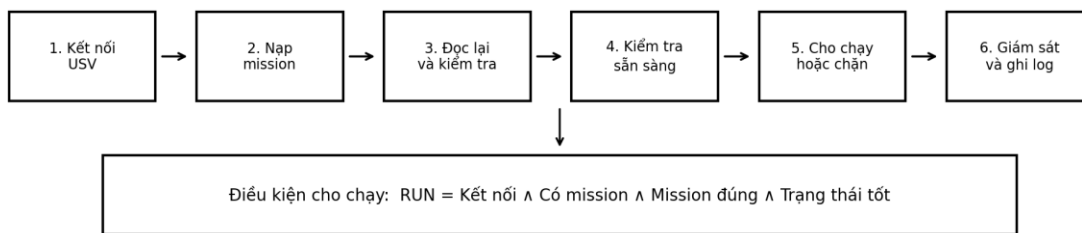
$$\text{RUN} = \text{Kết nối} \wedge \text{Có mission} \wedge \text{Mission đúng} \wedge \text{Trạng thái tốt}$$

Biểu thức trên không nhằm làm phức tạp hóa vấn đề. Nó chỉ diễn đạt một nguyên tắc vận hành rất rõ: đủ điều kiện thì chạy, thiếu điều kiện thì không chạy. Đây chính là điểm khác biệt giữa thao tác thủ công và điều hành có kiểm soát.

Bảng 2. Ý nghĩa các điều kiện trong FSM-SC.

Điều kiện	Ý nghĩa thực tế	Ví dụ kiểm tra	Quyết định
Kết nối	USV đang online và trao đổi telemetry được	Có COM/link, nhận vị trí, nhận mode	Không kết nối thì không chạy
Có mission	Mission đã được nạp cho đúng xuồng	Đúng SYSID, đúng phiên, có waypoint	Không có mission thì chặn
Mission đúng	Mission đọc lại khớp với mission dự kiến	Số waypoint, tuyến và session khớp	Không khớp thì nạp lại
Trạng thái tốt	Xuồng và cảm biến đủ điều kiện đo	RTK, IMU, pin, sensor, logger, mode	Chưa tốt thì giữ HOLD

Quy trình FSM-SC được mô tả bằng các bước thao tác để kiểm tra tại hiện trường



Hình 2. Quy trình sáu bước của FSM-SC khi điều hành một phiên đo Swarm-USV.

Quy trình FSM-SC gồm sáu bước: kết nối xuồng, nạp nhiệm vụ, đọc lại và kiểm tra mission, đánh giá trạng thái sẵn sàng, cho chạy hoặc chặn, sau đó giám sát và ghi log. Cách chia này giúp người vận hành dễ hiểu, dễ kiểm tra và dễ giải thích khi nghiệm thu.

Điểm quan trọng là FSM-SC không chỉ có nút “Start”. Trước khi Start, hệ thống phải trả lời được các câu hỏi: xuồng nào, mission nào, đã nạp chưa, đã đọc lại chưa, có khớp không, RTK/IMU/pin/cảm biến/logger có ổn không. Nếu không có lớp này, các câu hỏi trên thường phải phụ thuộc vào kinh nghiệm và sự cẩn thận của người vận hành.

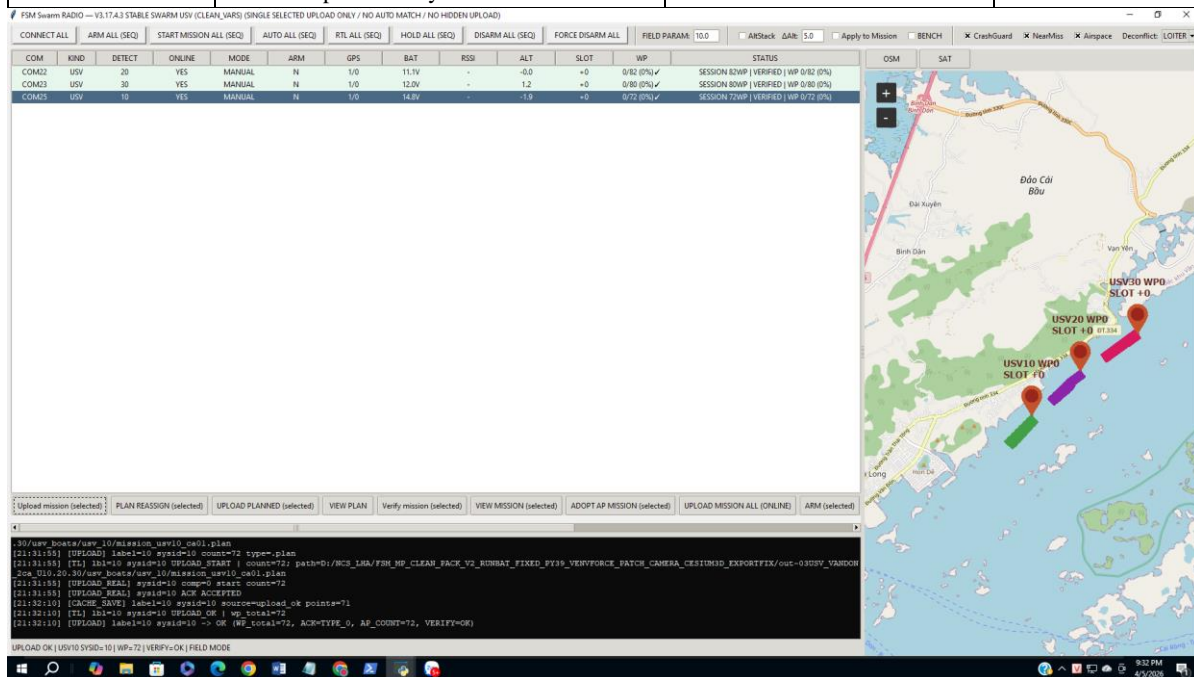
5. Xây dựng phần mềm FSM-SC

Phần mềm FSM-SC được xây dựng để phục vụ thao tác hiện trường với nhiều USV. Giao diện cần hiển thị rõ danh sách các xuồng, trạng thái kết nối, chế độ vận hành, pin, số waypoint, trạng thái mission, trạng thái verify và vị trí trên bản đồ. Mục tiêu không phải tạo một giao diện phức tạp, mà là giúp người vận hành nhìn nhanh và biết ngay hệ nào đã sẵn sàng.

Phần mềm được tổ chức theo mô hình một bộ điều khiển trung tâm và nhiều agent tương ứng với từng USV. Mỗi agent lưu trạng thái riêng của xuồng, gồm công kết nối, SYSID, mission đã nạp, kết quả đọc lại, trạng thái sẵn sàng và nhật ký sự kiện. Bộ điều khiển trung tâm tổng hợp các trạng thái này để đưa ra quyết định vận hành.

Bảng 3. Các chức năng chính cần có trong phần mềm FSM-SC.

Nhóm chức năng	Nội dung thực hiện	Người vận hành thấy gì?	Lợi ích
Quản lý USV	Kết nối, nhận telemetry, nhận mode và pin	Danh sách USV online/offline	Biết nhanh đội hình hiện có
Nạp mission	Gửi mission cho từng USV hoặc theo nhóm	Số waypoint đã nạp	Giảm thao tác lặp lại
Verify mission	Đọc lại mission và so sánh với dữ liệu dự kiến	Trạng thái VERIFIED/FAIL	Tránh nạp nhầm, thiếu tuyến
Gate sẵn sàng	Kiểm tra RTK, IMU, pin, sensor, logger, mode	READY hoặc HOLD	Chỉ cho chạy khi đủ điều kiện
Giám sát chạy	Theo dõi vị trí, mode, track và trạng thái	Bản đồ và bảng trạng thái	Dễ điều hành nhiều xuồng
Ghi log	Lưu thời điểm connect/upload/verify/run/hold	File log phiên đo	Có dữ liệu truy vết



Hình 3. Giao diện phần mềm FSM-SC: quản lý kết nối, upload, verify mission và theo dõi vị trí 03 USV.

Trong giao diện minh họa, mỗi dòng tương ứng với một USV. Người vận hành có thể quan sát công kết nối, loại phương tiện, trạng thái online, mode, GPS/RTK, pin, số waypoint và kết quả verify. Bản đồ bên phải hiển thị vị trí các USV và khu vực mission. Vùng log phía dưới ghi lại từng sự kiện trong phiên đo, ví dụ kết nối, upload, readback, verify và trạng thái hoàn thành.

Cách trình bày này phù hợp với mục tiêu nghiên cứu ứng dụng: phần mềm không cần yêu cầu người dùng hiểu sâu thuật toán, nhưng phải cho họ biết rõ xuồng nào đang ở trạng thái nào và vì sao xuồng được hoặc chưa được phép chạy.

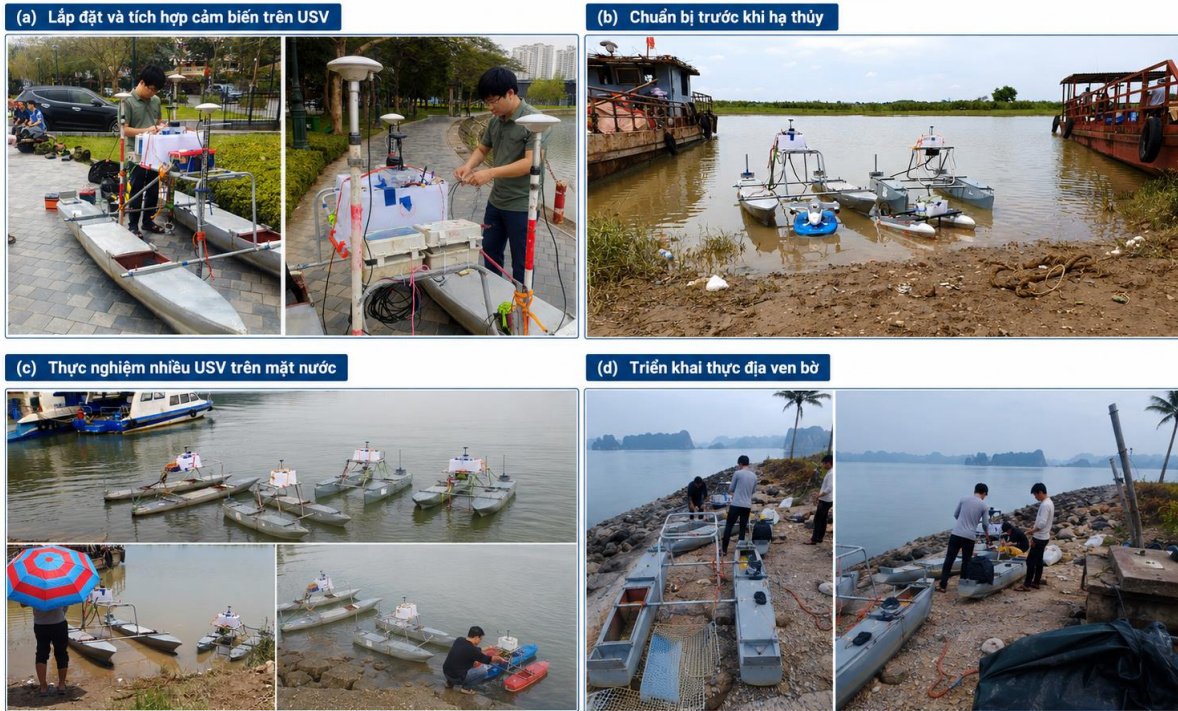
6. Thực nghiệm và đánh giá hiệu quả

6.1. Thiết lập thực nghiệm

Thực nghiệm được thực hiện với tổ hợp 03 xuồng không người lái dạng catamaran phục vụ khảo sát địa hình dưới nước. Mỗi xuồng được tích hợp các thành phần chính gồm GNSS-RTK, IMU/INS, thiết bị đo sâu hoặc sonar, bộ ghi dữ liệu, nguồn pin, telemetry và bộ điều khiển tự động. Phần mềm FSM-SC được sử dụng để kết nối, nạp mission, kiểm tra mission, cho phép thực thi và theo dõi quá trình đo.

Kịch bản đánh giá gồm hai nhóm nội dung. Nhóm thứ nhất kiểm tra phần mềm có điều hành đúng các bước FSM-SC hay không, đặc biệt là upload, readback và verify mission. Nhóm thứ hai đánh giá hiệu quả khảo sát thông qua so sánh thời gian hiện trường giữa phương án 01 USV và phương án 03 USV, đồng thời kiểm tra chất lượng dữ liệu bằng các điểm giao kiểm.

HÌNH ẢNH THỰC NGHIỆM SWARM-USV TỪ ẢNH THẬT



Nguồn: Ảnh thực nghiệm của nhóm nghiên cứu

Hình 4. Hình ảnh thực nghiệm Swarm-USV: tích hợp cảm biến, chuẩn bị hạ thủy và triển khai nhiều USV trên mặt nước.

6.2. Kiểm chứng mission trước khi chạy

Để nhiều USV chạy song song, việc xác nhận mission trước khi chạy là bắt buộc. FSM-SC thực hiện việc này bằng cách nạp mission cho từng USV, đọc lại số waypoint và kiểm tra trạng thái verify. Nếu số waypoint đọc lại không khớp hoặc mission không thuộc đúng USV, hệ thống không cho phép chuyển sang trạng thái chạy.

Bảng 4. Ví dụ kiểm chứng upload/readback/verify mission trong một phiên vận hành.

USV	Số waypoint dự kiến	Số waypoint đọc lại	Trạng thái verify	Kết luận
USV-10	72	72	VERIFIED	Được phép xét gate chạy
USV-20	80	80	VERIFIED	Được phép xét gate chạy
USV-30	82	82	VERIFIED	Được phép xét gate chạy

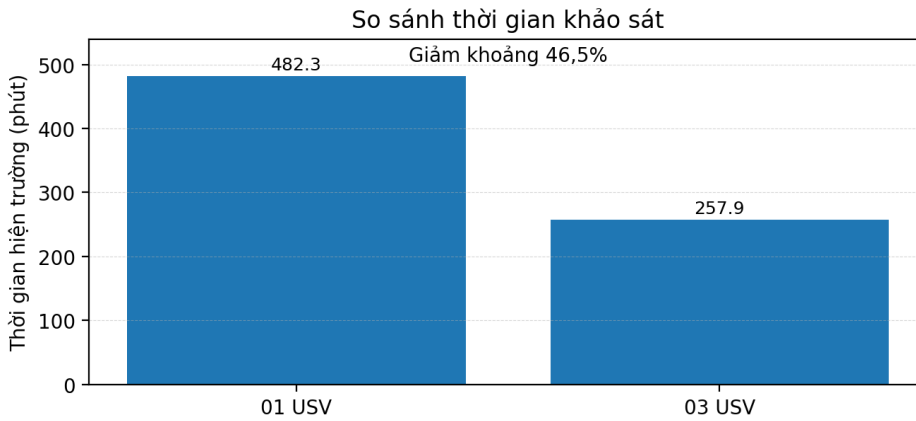
Bảng 4 cho thấy FSM-SC không dừng ở thao tác “đã gửi mission”. Hệ thống cần đọc lại dữ liệu từ phương tiện và xác nhận khớp với mission dự kiến. Đây là bước đơn giản nhưng rất quan trọng, vì với nhiều xuồng cùng hoạt động, chỉ một mission sai cũng có thể làm hỏng vùng đo, trùng tuyến hoặc làm sai dữ liệu nhật ký.

6.3. Đánh giá hiệu quả thời gian hiện trường

Hiệu quả vận hành được đánh giá bằng cách so sánh phương án khảo sát bằng 01 USV và phương án khảo sát bằng 03 USV. Hai phương án được so sánh trên cùng cách hiểu: tổng chiều dài tuyến gần tương đương, nhưng phương án 03 USV cho phép các tuyến được thực hiện song song.

Bảng 5. So sánh thời gian khảo sát giữa phương án 01 USV và 03 USV.

Phương án	Số USV	Tổng chiều dài tuyến (km)	Thời gian hiện trường (phút)	Nhận xét
Đo tuần tự	01	37,79	482,3	Thời gian dài
Đo song song	03	36,82	257,9	Giảm khoảng 46,5%



Hình 5. Biểu đồ so sánh thời gian hiện trường giữa phương án 01 USV và 03 USV.

Kết quả cho thấy phương án 03 USV giảm thời gian hiện trường khoảng 46,5%. Cần hiểu đúng kết quả này: FSM-SC không làm xuồng chạy nhanh hơn, mà giúp tổ chức nhiều xuồng chạy đúng mission, đúng thứ tự kiểm tra và đúng điều kiện, nhờ đó tận dụng được lợi thế đo song song của Swarm-USV.

6.4. Đánh giá chất lượng dữ liệu đầu ra

Với bài toán bản đồ địa hình dưới nước, hiệu quả vận hành chỉ có ý nghĩa khi dữ liệu đầu ra vẫn đủ điều kiện sử dụng. Vì vậy, sau thực nghiệm, dữ liệu được kiểm tra bằng các vị trí giao kiểm và đánh giá sai khác độ cao/độ sâu. Đây là bước giúp chứng minh rằng việc dùng nhiều USV không chỉ rút ngắn thời gian, mà vẫn bảo đảm dữ liệu phục vụ biên tập bản đồ.

Bảng 6. Chỉ báo kiểm tra chất lượng dữ liệu sau đo.

Chỉ báo	Giá trị	Ý nghĩa
Số vị trí giao kiểm	159	Dùng để kiểm tra sai khác giữa các tuyến/phiên đo
Sai số độ cao trung phương RMS _h	≈ 0,028 m	Đánh giá mức độ ổn định của dữ liệu độ sâu/độ cao đáy
Sai khác lớn nhất Δh _{max}	≈ 0,040 m	Giá trị lớn nhất trong tập kiểm tra
Trạng thái dữ liệu	Map-ready	Có thể chuyển sang xử lý DEM, đường bình độ và biên tập bản đồ

CHƯƠNG 4 ĐIỀU HÀNH SWARM-USV, QA/QC VÀ MAP-READY điều phối đội hình, kiểm soát chất lượng

Điều phối nhiều USV trên khu vực khảo sát

Phân chia tuyến và vận hành song song trên mặt nước

- ⋯ Phân tuyến – song song
- 👤 Điều phối – tập trung
- 📄 Tải vận hành – chia theo mission
- 🕒 Thời gian – rút ngắn

QA/QC và giám sát hiện trường

Giám sát hiện trường kết hợp kiểm soát chất lượng dữ liệu

- 🔍 QA/QC – kiểm tra chéo
- 🛡️ An toàn – giám phụ thuộc
- 📶 Trạng thái – theo dõi liên tục
- 📁 Đầu ra – dữ liệu sẵn sàng biên tập

Hệ Swarm-USV

điều phối • QA/QC • giám sát hiện trường • map-ready

Hình 6. Điều hành Swarm-USV kết hợp giám sát hiện trường, QA/QC và tạo dữ liệu map-ready.

Kết quả QA/QC cần được diễn giải đúng phạm vi. FSM-SC không trực tiếp tạo ra độ chính xác đo sâu; độ chính xác phụ thuộc vào cảm biến, hiệu chỉnh, định vị, mực nước và xử lý hậu kỳ. Tuy nhiên, FSM-SC tạo ra [Type here]

điều kiện vận hành ổn định: đúng mission, đúng phiên, có giám sát và có log. Nhờ đó, quá trình kiểm tra chất lượng sau đo có dữ liệu đối chiếu rõ ràng hơn.

7. Thảo luận

Điểm mạnh của FSM-SC là làm rõ phần thường bị xem nhẹ trong các hệ robot khảo sát: điều hành thực thi ngoài hiện trường. Với Swarm-USV, việc có mission tốt là chưa đủ. Nếu mission không được nạp đúng, không được kiểm tra lại, hoặc xuống chạy khi cảm biến chưa sẵn sàng, dữ liệu thu được có thể không dùng được cho bản đồ.

Bài báo không đặt FSM-SC như một thuật toán điều khiển bầy phức tạp. Ngược lại, FSM-SC được trình bày như một lớp quy trình rõ ràng, có điều kiện kiểm soát và dễ triển khai. Cách tiếp cận này phù hợp với nghiên cứu ứng dụng, nơi người dùng cần một phần mềm vận hành được, có thể giải thích được và có thể lặp lại ở nhiều khu đo nội địa.

Một điểm cần nhấn mạnh là FSM-SC giúp giảm lỗi thao tác của con người. Khi có 03 USV, người vận hành không chỉ bấm ba lần cùng một lệnh, mà phải bảo đảm ba bộ mission, ba trạng thái thiết bị và ba luồng dữ liệu cùng đúng. FSM-SC biến các bước đó thành quy trình có kiểm tra, thay vì phụ thuộc hoàn toàn vào ghi nhớ thủ công.

Nghiên cứu hiện tại còn một số giới hạn. Thứ nhất, phần đánh giá mới tập trung vào một cấu hình 03 USV và một số phiên thực nghiệm, chưa phải thống kê dài hạn trên nhiều mùa đo. Thứ hai, FSM-SC chưa xử lý bài toán tránh va chạm thời gian thực ở mức điều khiển thấp. Thứ ba, các ngưỡng Health như RTK, pin, sensor hoặc đồng chạy cần được hiệu chỉnh theo từng loại USV, cảm biến và điều kiện khu đo.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, FSM-SC có thể được mở rộng theo hướng thêm cảnh báo tự động, đánh giá rủi ro theo thời gian thực, đồng bộ dữ liệu giữa nhiều USV và liên kết chặt hơn với phần xử lý hậu kỳ. Tuy nhiên, ngay ở mức hiện tại, FSM-SC đã cung cấp một khung vận hành rõ ràng cho hệ xuống không người lái bầy đàn phục vụ thành lập bản đồ địa hình dưới nước.

8. Kết luận

Bài báo đã trình bày FSM-SC như một lớp điều hành thực thi nhiệm vụ cho hệ xuống không người lái bầy đàn (Swarm-USV) trong thành lập bản đồ địa hình dưới nước vùng nội địa. FSM-SC được xây dựng để trả lời câu hỏi thực tế: làm thế nào để nhiều xuống cùng thực hiện nhiệm vụ đo đạc nhưng vẫn bảo đảm đúng mission, đúng trạng thái và có dữ liệu truy vết.

Khung FSM-SC gồm các chức năng chính: kết nối USV, nạp mission, đọc lại và kiểm tra mission, đánh giá điều kiện sẵn sàng, cho phép hoặc chặn thực thi, giám sát quá trình đo và ghi nhật ký vận hành. Nguyên lý cốt lõi được thể hiện bằng điều kiện $RUN = \text{Kết nối} \wedge \text{Có mission} \wedge \text{Mission đúng} \wedge \text{Trạng thái tốt}$.

Thực nghiệm với tổ hợp 03 USV cho thấy phương án vận hành song song giúp giảm khoảng 46,5% thời gian hiện trường so với phương án 01 USV, trong khi dữ liệu kiểm tra đạt RMSH khoảng 0,028 m tại 159 vị trí giao kiểm. Kết quả này cho thấy FSM-SC là một thành phần cần thiết trong hệ Swarm-USV, góp phần chuẩn hóa và tự động hóa công tác thành lập bản đồ địa hình dưới nước.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được xây dựng trong khuôn khổ đề tài thiết kế, chế tạo hệ xuống không người lái bầy đàn phục vụ thành lập bản đồ địa hình dưới nước. Nhóm tác giả cảm ơn các thành viên tham gia chế tạo, tích hợp, thử nghiệm hiện trường và xử lý dữ liệu.

Tài liệu tham khảo

- [1] International Hydrographic Organization, IHO Standards for Hydrographic Surveys, S-44, Edition 6.2.0, October 2024.
- [2] NOAA Office of Coast Survey, Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables, Version 2025.0.00, 2025.
- [3] H. Choset, "Coverage for robotics - A survey of recent results," *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 2001.
- [4] E. Galceran and M. Carreras, "A survey on coverage path planning for robotics," *Robotics and Autonomous Systems*, 2013.
- [5] B. P. Gerkey and M. J. Mataric, "A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems," *International Journal of Robotics Research*, 2004.
- [6] Nhóm nghiên cứu, Báo cáo kỹ thuật hệ Swarm-USV phục vụ thành lập bản đồ địa hình dưới nước, 2026.

[Type here]