

Tích hợp dữ liệu đa cảm biến trong khảo sát địa hình và hiện trạng công trình

Lương Bảo Bình^{1*}, Trần Phúc Minh Khôi²

¹ Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG TP HCM

² Công ty cổ phần Tư vấn Thiết kế Cảng - Kỹ thuật Biển (PORTCOAST)

TỪ KHOÁ

Khảo sát địa hình
Dữ liệu đa cảm biến
Đám mây điểm
Mô hình 3D
WebGIS

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày tổng quan về các thiết bị và phương pháp đo đạc hiện trường hiện đại, và các hệ thống đo đạc tích hợp đa cảm biến được ứng dụng trong khảo sát địa hình và hiện trạng công trình. Các thiết bị chủ đạo như máy toàn đạc điện tử, GNSS RTK, không ảnh, LiDAR, máy quét laser mặt đất và máy đo sâu hồi âm, cũng như các hệ thống tích hợp đa cảm biến trên UAV và USV được phân tích theo đặc điểm kỹ thuật và phạm vi ứng dụng. Trên cơ sở đó, bài viết đề xuất một quy trình tích hợp dữ liệu đo đạc đa cảm biến bao gồm bốn bước: thu thập, xử lý, mô hình hóa và hiển thị không gian trên nền tảng webGIS. Quy trình này được áp dụng tại công trình cảng biển Bà Rịa Serece, trong đó các nền tảng UAV, USV và máy quét toàn đạc được triển khai đồng thời để thu thập dữ liệu trên không, trên bờ và dưới nước. Kết quả mô hình hóa và tích hợp dữ liệu trên ArcGIS Online cho thấy tính khả thi của quy trình cũng như độ chính xác cao và khả năng hiển thị đồng bộ thông tin 3D của hiện trạng công trình. Bài báo khẳng định tiềm năng ứng dụng của các hệ thống đo đạc tích hợp trong khảo sát địa hình và số hóa hiện trạng, hỗ trợ thiết kế – giám sát – quản lý công trình trên nền tảng GIS hiện đại.

KEYWORDS

Topographic surveying
Multi-sensor data
Point cloud
3D model
WebGIS

ABSTRACT

This paper presents an overview of modern field surveying instruments and methods, and integrated multi-sensor systems applied in topographic and as-built surveys of civil infrastructure and constructions. Core devices such as total stations, GNSS RTK receivers, aerial imagery from UAVs, LiDAR, terrestrial laser scanners, and echo sounders, as well as multi-sensor integrated systems mounted on UAVs and USVs, are analyzed in terms of technical specifications and application domains. Based on this, the paper proposes a four-step workflow for integrating multi-sensor survey data: data acquisition, data processing, 3D modeling, and spatial visualization on a webGIS platform. This workflow is demonstrated through a case study at the Ba Ria Serece seaport, where UAV, USV, and station-scanner platforms were simultaneously deployed to collect data from the air, land, and underwater environments. The resulting 3D models and data integration on ArcGIS Online confirm the feasibility, high accuracy, and seamless 3D visualization of the surveyed site. The study highlights the potential of multi-sensor integrated systems to support digital transformation in infrastructure surveying, enabling more effective design, monitoring, and asset management on modern GIS platforms.

1. Giới thiệu

Khảo sát địa hình và hiện trạng công trình là bước khởi đầu có vai trò then chốt trong toàn bộ vòng đời của một dự án xây dựng – từ thiết kế, thi công đến quản lý và vận hành. Truyền thống, công tác đo đạc địa hình được thực hiện theo phương pháp đo từng điểm với một loại cảm biến đơn lẻ, thường là máy kinh vĩ. Mật độ đo thấp, diễn hình là khoảng 15 mét cho một điểm khi lập bản đồ địa hình tỷ lệ lớn theo các quy phạm cũ, khiến chất lượng mô tả hình học bị giới hạn, đặc biệt trong các khu vực có địa hình đa dạng hoặc công trình phức tạp.

Sự phát triển của công nghệ đo đạc hiện đại trong những thập

kỷ gần đây đã làm thay đổi đáng kể cách tiếp cận truyền thống. Các thiết bị như máy toàn đạc điện tử, GNSS RTK, hệ thống UAV, cảm biến quét LiDAR hoặc laser mặt đất không chỉ nâng cao độ chính xác đo điểm mà còn cho phép thu thập dữ liệu ở mật độ rất cao (mức milimét) và tốc độ lên đến hàng trăm nghìn điểm mỗi giây. Khi các cảm biến này được tích hợp trên các nền tảng di động như UAV, USV, chúng hình thành nên hệ thống đo đạc đa cảm biến có khả năng bao phủ rộng, tiếp cận linh hoạt, đo đạc chính xác tốc độ cao và hiệu quả vượt trội. Đây là một cuộc cách mạng trong lĩnh vực đo đạc địa hình và hiện trạng công trình.

Tuy nhiên, hiệu quả thực sự của các hệ thống này không chỉ

*Liên hệ tác giả: lb Binh@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 23/05/2025, sửa xong ngày 09/06/2025, chấp nhận đăng ngày 10/06/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2025.1005>

đến từ thiết bị mà còn phụ thuộc vào quy trình xử lý và tích hợp dữ liệu. Việc thu thập lượng lớn dữ liệu từ các cảm biến khác nhau đòi hỏi quy trình xử lý chuyên biệt cho từng loại dữ liệu, đồng thời cần một cơ chế tích hợp hợp lý để đồng bộ thông tin về hình học, tọa độ và thời gian. Đặc biệt, việc hiển thị và khai thác dữ liệu trên một nền tảng trực quan và có khả năng phân tích – như hệ thống GIS – là điều kiện cần thiết để chuyển đổi dữ liệu đo thành thông tin số hữu ích phục vụ cho các nhu cầu trong thiết kế và quản lý, vận hành công trình.

Hiện nay, một số nghiên cứu chuyên sâu đã được thực hiện đối với từng loại thiết bị hoặc công nghệ đơn lẻ, ví dụ như sử dụng camera tích hợp trong toàn đạc để tăng cường khả năng nhận diện mục tiêu [1], áp dụng nhận dạng mục tiêu tự động ATR (Automatic Target Recognition) để quan trắc chuyển vị động trong nghiên cứu kết cấu [2], hay sử dụng hệ thống GNSS để quan trắc và theo dõi sức khỏe công trình [3]. Tại Việt Nam cũng đã có các nghiên cứu như ứng dụng quét Laser 3D trong quản lý trật tự xây dựng đô thị [4], giám sát chất lượng mặt đường bằng UAV [5], ứng dụng GNSS trong quan trắc liên tục cầu dây văng [6]. Tuy vậy, các nghiên cứu hiện có vẫn còn hạn chế khi chỉ tập trung vào từng thiết bị riêng biệt, thiếu đi một cách tiếp cận tổng thể cho các công trình có điều kiện khảo sát phức tạp, yêu cầu dữ liệu đa lớp – từ địa hình đến mặt đứng, từ trên bờ xuống đáy nước – và cần được tích hợp thành mô hình 3D thống nhất trên nền tảng GIS.

Chính khoảng trống này là động lực cho nghiên cứu trong bài báo. Mục tiêu của nghiên cứu là xây dựng và minh họa một quy trình tích hợp dữ liệu đo đạc đa cảm biến phục vụ khảo sát địa hình và hiện trạng công trình, với trường hợp ứng dụng cụ thể tại cảng Bà Rịa Serece (tỉnh Bà Rịa – Vũng Tàu). Nghiên cứu triển khai đồng thời các hệ thống UAV tích hợp máy ảnh và LiDAR, USV tích hợp hồi âm đa tia và iLiDAR, cùng máy quét toàn đạc (station-scanner), để khảo sát các lớp không gian từ đáy nước cho đến mặt đứng công trình. Dữ liệu sau xử lý được tích hợp thành mô hình không gian 3D thống nhất và hiển thị trực tiếp trên nền tảng webGIS.

Kết quả nghiên cứu không chỉ đóng góp về mặt ứng dụng – minh chứng khả năng triển khai thực tiễn của các hệ thống tích hợp – mà còn có thể dùng làm cơ sở cho việc chuẩn hóa quy trình khảo sát hiện trạng hiện đại trong giai đoạn chuyển đổi số mạnh mẽ của ngành xây dựng hiện nay.

2. Các thiết bị và phương pháp đo đạc hiện trường

Sự phát triển nhanh chóng của khoa học và công nghệ trong lĩnh vực đo đạc đã mở ra những hướng tiếp cận mới, hiệu quả và toàn diện hơn trong công tác khảo sát hiện trạng công trình. Thay vì phụ thuộc vào các phương pháp truyền thống vốn tiêu tốn nhiều thời gian, nhân lực và thường chỉ cung cấp dữ liệu ở mức độ điểm đơn lẻ, ngày nay các kỹ sư và chuyên gia có thể triển khai đồng thời nhiều loại thiết bị hiện đại để thu thập dữ liệu không gian với độ chính xác cao, mật độ dày đặc và phạm vi bao phủ rộng. Đặc biệt, dữ liệu thu được có thể tích hợp trực tiếp vào các hệ thống thông tin địa lý (GIS)

hoặc nền tảng mô hình hóa thông tin công trình (BIM), tạo điều kiện thuận lợi cho các quá trình phân tích, thiết kế và quản lý hạ tầng.

Các công nghệ đo đạc chủ đạo hiện nay bao gồm: máy toàn đạc điện tử, hệ thống định vị GNSS sử dụng kỹ thuật RTK, máy quét laser 3D (TLS), thiết bị LiDAR gắn trên UAV hoặc mặt đất, ảnh hàng không số từ UAV, máy đo sâu hồi âm (đơn tia và đa tia), cùng với các cảm biến hỗ trợ và phần mềm xử lý bản đồ số. Phần dưới đây trình bày tổng quan các thiết bị và phương pháp nêu trên, tập trung phân tích đặc điểm kỹ thuật, ưu nhược điểm và phạm vi ứng dụng của chúng.

2.1. Máy toàn đạc điện tử

Trong bối cảnh khảo sát hiện trạng công trình và đo đạc địa hình, máy toàn đạc điện tử là thiết bị đo không thể thiếu, kết hợp giữa máy kinh vĩ điện tử và máy đo dài điện tử EDM (Electronic Distance Measurement). Thiết bị này cho phép đo đồng thời các đại lượng hình học cơ bản như góc bằng, góc đứng và khoảng cách nghiêng, từ đó tính toán chính xác vị trí của điểm khảo sát. Nhờ khả năng cung cấp dữ liệu với độ chính xác cao, tốc độ thu thập nhanh và tính linh hoạt trong triển khai thực địa, máy toàn đạc điện tử đã trở thành công cụ tiêu chuẩn trong các hoạt động đo đạc bản đồ tỷ lệ lớn, kiểm tra vị trí và kích thước công trình hiện hữu, cũng như quan trắc biến dạng và chuyển vị trong xây dựng [7]. Về nguyên lý hoạt động, máy toàn đạc điện tử sử dụng bàn độ điện tử để ghi nhận chính xác góc bằng và góc đứng. Đồng thời, hệ thống EDM phát sóng điện từ đến gương phản xạ (prism) đặt tại điểm đo, sau đó nhận tín hiệu phản hồi để tính khoảng cách dựa trên độ trễ thời gian hoặc độ lệch pha của sóng phản xạ. Từ các dữ liệu đo được, bộ xử lý nội bộ sẽ tính toán khoảng cách ngang, chênh cao và hướng phương vị, từ đó suy ra tọa độ và độ cao của điểm trong hệ quy chiếu đã định.

Việc ứng dụng máy toàn đạc điện tử trong khảo sát hiện trạng công trình mang lại nhiều lợi ích rõ rệt, bao gồm: độ chính xác cao (thường từ 1–3 mm tùy dòng thiết bị), khả năng đo nhanh và liên tục, tính tích hợp cao giữa các chức năng đo góc, đo dài và xử lý số liệu. Dữ liệu thu thập được có thể lưu trữ kỹ thuật số và trích xuất sang phần mềm xử lý chuyên dụng như CAD, hoặc GIS để phục vụ thiết kế, lập bản đồ hoặc quản lý cơ sở dữ liệu không gian. Tuy nhiên, thiết bị này cũng tồn tại một số hạn chế. Việc vận hành đòi hỏi người đo phải có chuyên môn và kỹ năng thực địa vững vàng. Quá trình đo có thể bị ảnh hưởng bởi điều kiện thời tiết bất lợi (mưa, sương mù, ánh sáng yếu) hoặc vật cản gây che khuất đường ngắm. Hơn nữa, đa phần các phép đo vẫn cần người hỗ trợ cầm gương phản xạ tại điểm đo, điều này làm giảm tính tự động hóa và hiệu quả trong những khu vực phức tạp hoặc khó tiếp cận.

2.2. Máy thu GNSS và phương pháp định vị RTK

Trong lĩnh vực trắc địa và khảo sát địa hình, hệ thống định vị vệ tinh toàn cầu (Global Navigation Satellite System – GNSS) đóng vai trò trung tâm trong việc xác định tọa độ không gian với độ chính xác

cao. Máy thu GNSS hiện đại có khả năng tiếp nhận tín hiệu từ nhiều hệ thống vệ tinh khác nhau, bao gồm GPS (Hoa Kỳ), GLONASS (Liên bang Nga), Galileo (Liên minh châu Âu) và BeiDou (Trung Quốc), từ đó cung cấp giải pháp định vị toàn cầu với độ bao phủ và độ tin cậy vượt trội [8]. Về nguyên lý, máy thu xác định vị trí bằng cách tính toán khoảng cách từ thiết bị đến các vệ tinh thông qua độ trễ tín hiệu. Khi nhận được tín hiệu từ ít nhất bốn vệ tinh, thiết bị có thể giải hệ phương trình định vị để xác định tọa độ ba chiều (X, Y, Z) cùng với hiệu chỉnh sai số đồng hồ máy thu.

Trong thực tế, định vị GNSS được triển khai theo hai phương pháp chính: định vị tuyệt đối và định vị tương đối. Định vị tuyệt đối sử dụng một máy thu đơn lẻ, phù hợp với các ứng dụng không yêu cầu độ chính xác cao (sai số mức độ mét), chẳng hạn như du lịch hoặc dẫn đường. Ngược lại, định vị tương đối – sử dụng đồng thời một trạm gốc (base station) tại vị trí đã biết và một hoặc nhiều máy đo (rover) – cho phép khử các sai số hệ thống, nhờ đó, độ chính xác đạt được cao hơn đáng kể, từ vài centimet đến vài milimet, tùy thuộc vào độ dài đường đáy (baseline vector), thời gian đo và điều kiện truyền dẫn tín hiệu. Một trong những phương pháp định vị tương đối phổ biến nhất hiện nay là định vị động thời gian thực RTK (Real-Time Kinematic). Trong cấu hình RTK, dữ liệu hiệu chỉnh từ trạm gốc được truyền tới máy đo theo thời gian thực qua sóng radio UHF hoặc mạng Internet. Rover từ đó có thể xác định vị trí chính xác tức thời với sai số ở mức cm. Phương pháp này đặc biệt hiệu quả trong khảo sát địa hình chi tiết, thành lập bản đồ tỷ lệ lớn, hoặc hướng dẫn máy thi công theo mô hình số.

RTK mang lại nhiều lợi ích đáng kể, bao gồm độ chính xác cao, khả năng đo nhanh và giảm thiểu nhu cầu xây dựng lưới khống chế truyền thống. Dữ liệu đo có thể được tích hợp trực tiếp vào hệ thống thông tin địa lý (GIS) hoặc bản đồ số theo hệ tọa độ toàn cầu, nâng cao hiệu quả công tác quản lý không gian. Tuy nhiên, RTK cũng tồn tại những hạn chế như yêu cầu kết nối dữ liệu ổn định giữa trạm gốc và rover, dễ bị ảnh hưởng bởi điều kiện che khuất tín hiệu như cây cối rậm rạp hay công trình cao tầng. Ngoài ra, người đo vẫn cần tiếp cận trực tiếp tại vị trí điểm đo – điều này có thể khó khăn tại các khu vực hiểm trở hoặc bị giới hạn tiếp cận.

2.3. Không ảnh chụp từ UAV

Khảo sát hiện trạng bằng không ảnh thu nhận từ thiết bị bay không người lái UAV (Unmanned Aerial Vehicle) là một phương pháp tiên tiến trong lĩnh vực đo đạc và lập bản đồ địa hình, cho phép thu thập dữ liệu hiệu quả tại những khu vực có địa hình phức tạp, diện tích lớn hoặc khó tiếp cận bằng các phương pháp đo truyền thống. UAV được trang bị hệ thống camera số độ phân giải cao để chụp chuỗi ảnh từ trên cao, phục vụ cho việc tái tạo mô hình không gian bằng kỹ thuật đo ảnh lập thể (photogrammetry).

Trước khi thực hiện bay, người khảo sát tiến hành lập kế hoạch chi tiết, bao gồm xác định độ cao bay, khu vực phủ, và tỷ lệ chồng ảnh dọc – ngang (thường từ 70–90 %) nhằm đảm bảo đủ chồng ảnh

phục vụ xử lý lập thể. UAV sau đó bay tự động theo hành trình định sẵn, trong khi hệ thống camera chụp ảnh định kỳ theo chu trình cài đặt. Dữ liệu thu nhận được xử lý thông qua các thuật toán như SfM (Structure from Motion) hay MVS (Multi-View Stereo) [9] để tái tạo các sản phẩm số như mô hình số bề mặt (DSM), mô hình số độ cao (DEM), ảnh trực giao (orthophoto), đám mây điểm (point cloud), hoặc mô hình 3D chi tiết của khu vực khảo sát. Để bảo đảm độ chính xác tọa độ, người khảo sát bố trí các điểm khống chế mặt đất GCP (Ground Control Points) và các điểm kiểm tra CP (Check Points) được đo bằng toàn đạc điện tử hoặc hệ thống GNSS độ chính xác cao. Ngoài ra, nhiều UAV hiện nay đã được tích hợp GNSS RTK, cho phép hiệu chỉnh quỹ đạo bay và giảm phụ thuộc vào GCPs. Ở độ cao bay từ 50–120 m, kết hợp camera có độ phân giải 20–45 MP, độ phân giải mặt đất (Ground Sampling Distance – GSD) có thể đạt từ 1–3 cm/pixel.

Phương pháp UAV mang lại nhiều ưu điểm nổi bật: khả năng thu thập dữ liệu nhanh, độ bao phủ rộng, hình ảnh trực quan và dễ tích hợp vào hệ thống thông tin địa lý (GIS). Các ứng dụng phổ biến bao gồm đo đạc địa hình, giám sát tiến độ thi công, quản lý đô thị, đánh giá tai biến địa chất, hoặc nông nghiệp chính xác. UAV cũng giúp giảm thiểu chi phí nhân lực, rút ngắn thời gian khảo sát và tăng tính linh hoạt khi triển khai thực địa. Tuy nhiên, công nghệ này vẫn có một số hạn chế. Việc thu thập ảnh phụ thuộc nhiều vào điều kiện môi trường như thời tiết, ánh sáng và vùng cấm bay. Đồng thời, camera quang học không thể xuyên qua lớp phủ thực vật dày, hạn chế khả năng khảo sát địa hình dưới tán cây – điều mà các công nghệ như LiDAR có thể khắc phục. Ngoài ra, việc vận hành UAV đòi hỏi người điều khiển có chứng chỉ hợp lệ và phải tuân thủ quy định pháp lý hiện hành về an toàn bay và quản lý không phận.

2.4. Thiết bị quét LiDAR

Công nghệ quét LiDAR (Light Detection and Ranging) là một phương pháp đo đạc tiên tiến trong trắc địa, cho phép thu thập dữ liệu địa hình, mặt bằng công trình và thảm phủ bề mặt với mật độ điểm cao và độ chính xác vượt trội. Hệ thống LiDAR hoạt động dựa trên nguyên lý phát xung laser và đo thời gian phản hồi của xung sau khi phản xạ từ bề mặt vật thể, từ đó tính toán khoảng cách và xác định vị trí không gian 3 chiều của từng điểm phản xạ, tạo thành đám mây điểm mô tả chi tiết hiện trạng khảo sát. Thiết bị LiDAR có thể được gắn trên nhiều nền tảng như UAV, xe hoặc USV, tùy theo yêu cầu khảo sát và điều kiện thực địa.

Trong ứng dụng LiDAR di động, hệ thống thường được tích hợp với GNSS và hệ thống dẫn đường quán tính INS (Inertial Navigation System), cho phép định vị và xác định tư thế vật mang chính xác tại thời điểm phát – nhận xung laser. Ưu điểm nổi bật của LiDAR so với đo ảnh truyền thống là khả năng xuyên qua tán cây và lớp thực vật, cho phép thu nhận dữ liệu địa hình gốc ngay cả trong khu vực rừng hoặc địa hình phức tạp – điều mà ảnh chụp thông thường khó đạt được. Công nghệ này đặc biệt hiệu quả trong khảo sát địa hình tự nhiên, lập bản đồ địa hình tỷ lệ lớn, và mô hình hóa các hệ sinh thái,

vùng đồi núi, hoặc hành lang hạ tầng [10].

Các thiết bị LiDAR hiện đại có khả năng quét với tốc độ cao, khả năng chống rung tốt và phù hợp cho khảo sát diện rộng. Nhờ khả năng thu thập dữ liệu nhanh, chính xác và hoạt động ổn định trong nhiều điều kiện ánh sáng (bao gồm cả ban đêm), LiDAR là công cụ lý tưởng trong các ứng dụng như đo đạc địa hình chi tiết, giám sát rừng, theo dõi sụt lún đất, khảo sát hành lang hạ tầng, xây dựng mô hình 3D đô thị hoặc phục vụ mô hình hóa BIM. Tuy nhiên, công nghệ LiDAR cũng tồn tại một số hạn chế đáng lưu ý. Trước tiên là chi phí đầu tư cao, bao gồm thiết bị, bảo trì và phần mềm xử lý chuyên dụng. Khối lượng thiết bị tương đối lớn, yêu cầu UAV có tải trọng và thời gian bay phù hợp. Dữ liệu đầu ra dạng đám mây điểm có dung lượng lớn, đòi hỏi hệ thống máy tính có hiệu năng cao và phần mềm chuyên dụng để xử lý, phân loại và trích xuất thông tin. Việc xử lý dữ liệu cũng đòi hỏi nhân lực có chuyên môn cao, đặc biệt trong việc lọc nhiễu, phân loại lớp phủ và trích xuất mô hình số địa hình chính xác.

2.5. Máy quét laser mặt đất

Công nghệ quét laser mặt đất (TLS – Terrestrial Laser Scanning) là một trong những phương pháp hiện đại và có độ chính xác cao nhất hiện nay trong lĩnh vực trắc địa, khảo sát hiện trạng công trình và mô hình hóa không gian. Không giống như hệ thống LiDAR gắn trên UAV hoặc xe di động, TLS được triển khai cố định trên chân máy tại các vị trí khảo sát, thực hiện quét toàn cảnh khu vực xung quanh bằng cách phát xung laser kết hợp với chuyển động quay cơ học theo phương ngang và phương đứng. Kết quả là một đám mây điểm 3D có mật độ cực cao, mô tả chính xác hình dạng và đặc điểm bề mặt của các đối tượng như địa hình, công trình kiến trúc hoặc kết cấu xây dựng.

Nguyên lý hoạt động của TLS thường dựa trên hai phương pháp đo khoảng cách chính: Time-of-Flight (ToF) – đo thời gian truyền và phản hồi của tia laser, và Phase Shift – đo sự thay đổi pha giữa xung phát và xung nhận. Mỗi điểm phản xạ được định vị bằng tọa độ ba chiều và có thể kèm theo dữ liệu cường độ phản xạ (intensity). Nhờ tích hợp cảm biến quay và nghiêng, thiết bị có thể quét liên tục với phạm vi lên đến 360° theo phương ngang và 300° theo phương đứng, giúp tái tạo mô hình không gian gần như toàn diện của khu vực đo. Để bao phủ toàn bộ hiện trường hoặc công trình lớn, người khảo sát cần thiết lập TLS tại nhiều vị trí khác nhau, sau đó xử lý dữ liệu bằng phần mềm chuyên dụng để căn chỉnh (registration) và hợp nhất các đám mây điểm riêng lẻ thành một mô hình thống nhất. Với khả năng đo ở khoảng cách ngắn đến trung bình (dưới 100 m), TLS có thể đạt mật độ điểm quét lên đến hàng chục nghìn điểm/m² với độ chính xác ở mức mm [11]. Những đặc tính này khiến công nghệ TLS đặc biệt phù hợp cho các ứng dụng đòi hỏi độ chính xác và mức độ chi tiết cao như: khảo sát công trình, mô hình hóa thông tin công trình, theo dõi biến dạng kết cấu, phục dựng di tích lịch sử, và ứng dụng trong khảo cổ học. Một số thiết bị còn tích hợp các tính năng hiện đại như tự động cân bằng, chụp ảnh màu RGB đồng bộ, và hỗ trợ xử lý sơ bộ tại hiện trường. Tuy nhiên, TLS cũng tồn tại một số hạn chế nhất định.

Do đặc điểm cố định tại chỗ, việc khảo sát các khu vực có diện tích rộng đòi hỏi phải bố trí và di chuyển thiết bị nhiều lần, làm tăng thời gian và công sức thực hiện. Ngoài ra, chi phí đầu tư cho thiết bị TLS và phần mềm đi kèm thường khá cao; dữ liệu đám mây điểm có dung lượng lớn, yêu cầu hạ tầng xử lý mạnh mẽ và đội ngũ kỹ thuật có trình độ chuyên môn cao để thực hiện các thao tác như lọc nhiễu, căn chỉnh và xây dựng mô hình 3D.

2.6. Máy đo sâu hồi âm

Máy đo sâu hồi âm là một thiết bị quan trọng trong khảo sát thủy văn, cho phép xác định hình thái đáy sông, hồ, kênh rạch hoặc khu vực ven biển thông qua nguyên lý truyền sóng âm và đo thời gian phản xạ từ đáy nước. Công nghệ này đã và đang đóng vai trò thiết yếu trong các hoạt động như thành lập bản đồ địa hình đáy, thiết kế nạo vét, đánh giá xói lở và phục vụ quy hoạch hạ tầng cảng, thủy lợi. Các thiết bị đo sâu hiện đại thường tích hợp hệ thống định vị GNSS, cảm biến đo tốc độ sóng âm trong nước SVS (Sound Velocity Sensor), cảm biến chuyển động (motion sensor) và đi kèm phần mềm chuyên dụng nhằm tạo ra các sản phẩm số hóa như mô hình số đáy sông) hoặc lưới tam giác TIN (Triangle Irregular Network).

Máy đo sâu hồi âm được phân loại chủ yếu thành hai nhóm: máy đơn tia SBES (Single Beam Echosounder) và máy đa tia MBES (Multibeam Echosounder). Trong đó, SBES phát một chùm sóng âm duy nhất theo phương thẳng đứng, thu tín hiệu phản xạ để xác định độ sâu tại một điểm, trong khi MBES sử dụng dãy chùm sóng quét theo phương ngang, cho phép thu thập dữ liệu đồng thời trên dải rộng đáy nước. Nhờ tích hợp GNSS và cảm biến quán tính, các điểm đo có thể được gán tọa độ không gian ba chiều, phục vụ trực tiếp cho việc xây dựng mặt cắt thủy văn, mô hình 3D đáy sông và phân tích hình thái lòng dẫn. Độ chính xác của phép đo phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm tần số hoạt động của đầu dò, điều kiện thủy văn (nhiều từ bọt khí, bùn lún, dòng chảy), và khả năng hiệu chỉnh tốc độ sóng âm [12]. Theo công bố từ nhà sản xuất thiết bị, sai số điển hình của SBES dao động từ 5–10 cm, trong khi MBES – nhờ khả năng đồng bộ hóa đa cảm biến và mật độ điểm cao – có thể đạt sai số chỉ từ 2–5 cm trong điều kiện lý tưởng.

Một trong những ưu điểm nổi bật của phương pháp này là khả năng đo sâu không tiếp xúc, cho phép khảo sát an toàn và hiệu quả ở các khu vực nước sâu, có dòng chảy mạnh, hoặc địa hình đáy phức tạp. Máy đo sâu đa tia còn cung cấp dữ liệu với mật độ rất cao, cho phép tái hiện địa hình đáy một cách trực quan và chi tiết, hỗ trợ đắc lực cho các ứng dụng kỹ thuật và mô phỏng thủy lực. Tuy nhiên, công nghệ đo sâu hồi âm cũng có những hạn chế cần lưu ý. Trước hết là sự phụ thuộc vào điều kiện môi trường nước – các yếu tố như bọt khí, dòng chảy rối, hoặc tầng bùn dày có thể gây nhiễu tín hiệu. Ngoài ra, tốc độ truyền âm trong nước phụ thuộc vào nhiệt độ, độ mặn và áp suất, do đó cần được đo tại chỗ bằng SVP (Sound Velocity Profiler) hoặc các cảm biến chuyên dụng để hiệu chỉnh dữ liệu chính xác. Hệ thống MBES yêu cầu đầu tư lớn về thiết bị và phần mềm xử lý, đồng

thời đòi hỏi kỹ thuật viên có trình độ chuyên môn cao. Bên cạnh đó, khảo sát đo sâu đòi hỏi phương tiện nổi ổn định (thuyền khảo sát, USV), nên không phù hợp tại khu vực bờ cạn, nhiều chướng ngại – nơi các công nghệ thay thế như UAV hoặc LiDAR sẽ hiệu quả hơn.

3. Các hệ thống đo đạc tích hợp đa cảm biến

Trong bối cảnh các dự án khảo sát hiện trạng và địa hình phục vụ thiết kế, thi công và quản lý công trình ngày càng mở rộng về quy mô, độ phức tạp cũng như yêu cầu độ chính xác cao, việc ứng dụng các hệ thống đo đạc tích hợp đa cảm biến đã trở thành xu hướng tất yếu. Đặc biệt đối với các công trình giao thông, đô thị và hạ tầng kỹ thuật có phạm vi trải dài qua nhiều loại địa hình – từ mặt đất, mặt nước, lòng sông, lòng hồ đến các mặt đứng công trình, công trình ngầm hoặc khu vực có cây che phủ dày đặc – việc sử dụng các nền tảng khảo sát truyền thống riêng lẻ thường gặp nhiều hạn chế về hiệu quả, chi phí, tính thống nhất của dữ liệu và an toàn lao động. Để đáp ứng các yêu cầu này, các hệ thống tích hợp đa cảm biến – kết hợp giữa các công nghệ đo sâu hồi âm, quét laser LiDAR, chụp ảnh quang học, GNSS-IMU và các thiết bị ghi hình – cho phép thu thập đồng thời dữ liệu địa hình, hiện trạng kiến trúc, công trình hạ tầng và môi trường xung quanh một cách nhanh chóng, chính xác và toàn diện. Việc đồng bộ hóa dữ liệu trong cùng hệ quy chiếu giúp nâng cao khả năng xử lý, phân tích và ứng dụng dữ liệu trong các bài toán mô hình hóa 3D, thiết kế song sinh kỹ thuật số (digital twin), quản lý tài sản công trình, cũng như hỗ trợ các phân tích chuyên sâu như đánh giá biến dạng, xói lở, bồi lắng, hoặc an toàn công trình.

Trong mục này, các hệ thống tiêu biểu ứng dụng khảo sát đa nền tảng – bao gồm máy quét toàn đạc, UAV tích hợp quang ảnh và LiDAR, và tàu tự hành khảo sát tích hợp đo sâu và LiDAR – sẽ được trình bày nhằm minh họa cho khả năng thu thập dữ liệu đa chiều, đa lớp, phục vụ hiệu quả cho các nhiệm vụ khảo sát địa hình và hiện trạng công trình phức tạp.

3.1. Máy quét toàn đạc

Máy quét toàn đạc, hay còn gọi là station-scanner hoặc multi station, là một thiết bị trắc địa hiện đại tích hợp giữa hai công nghệ chủ chốt trong khảo sát: toàn đạc điện tử và quét laser ba chiều. Sự kết hợp này cho phép thiết bị vừa thực hiện các phép đo truyền thống như đo góc, đo cạnh và bố trí điểm với độ chính xác cao, vừa quét nhanh và liên tục hàng triệu điểm trong không gian ba chiều nhằm tái tạo chi tiết hình học của hiện trường. Nhờ đó, máy quét toàn đạc trở thành công cụ toàn diện, vừa tối ưu hiệu quả đo đạc, vừa đảm bảo tính thống nhất dữ liệu trong cùng một hệ tọa độ, đồng thời giảm thiểu thời gian và nhân lực khảo sát tại hiện trường. Về mặt chức năng, station-scanner có thể hoạt động như một máy toàn đạc thông thường, thực hiện các phép đo tọa độ điểm với độ chính xác cao, đồng thời chuyển đổi linh hoạt sang chế độ quét laser khi cần ghi nhận chi tiết hình học bề mặt đối tượng hoặc công trình. Đặc điểm

này đặc biệt phù hợp với các ứng dụng đòi hỏi đồng thời dữ liệu tọa độ chính xác và mô hình 3D chi tiết, như khảo sát hiện trạng công trình, lập bản vẽ mặt đứng, kiểm tra biến dạng, xây dựng mô hình BIM, hay phục dựng công trình di sản.

Một ví dụ tiêu biểu cho dòng thiết bị này là Trimble SX12 (Hình 1) do hãng Trimble (Hoa Kỳ) phát triển. Đây là thiết bị đa năng tích hợp toàn đạc điện tử và quét laser 3D trong một cấu hình nhỏ gọn, cho phép đo góc với độ chính xác 1" và đo cạnh với sai số $\pm 1,5 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$. Tốc độ quét lên đến 26.600 điểm/giây, với phạm vi hoạt động tối đa 600 m, cho phép thiết bị tái tạo chi tiết bề mặt hiện trường trong thời gian ngắn. SX12 còn tích hợp hệ thống camera độ phân giải cao hỗ trợ ghi ảnh màu và gắn kết với dữ liệu đám mây điểm, giúp tăng tính trực quan trong xử lý hậu kỳ. Việc điều khiển thiết bị được thực hiện thông qua phần mềm chuyên dụng Trimble Access, hỗ trợ lập kế hoạch đo, điều hướng và đồng bộ dữ liệu hiệu quả [13]. Trong thực tiễn, Trimble SX12 đã chứng minh hiệu quả vượt trội trong các dự án đòi hỏi tốc độ thu thập dữ liệu nhanh và độ chính xác cao, chẳng hạn khảo sát công trình cầu, hầm, nhà xưởng, hay hiện trạng khu vực đô thị phức tạp. Việc tích hợp toàn bộ quy trình đo đạc và quét trong một thiết bị duy nhất giúp đơn giản hóa công tác thực địa, nâng cao hiệu quả làm việc và giảm thiểu sai số do sự chênh lệch giữa các hệ thống đo tách biệt.



(a) mô hình



(b) thực tế tại công trình

Hình 1. Máy quét toàn đạc SX12 [nguồn: PORTCOAST].

3.2. UAV tích hợp cảm biến quang học và LiDAR

Thiết bị bay không người lái (UAV) tích hợp cảm biến quang học và LiDAR hiện là một giải pháp khảo sát tiên tiến, kết hợp hai công nghệ đo đạc chủ lực: quang ảnh (photogrammetry) và quét

LiDAR. Sự tích hợp này cho phép UAV đồng thời chụp ảnh độ phân giải cao và thu thập đám mây điểm 3D dày đặc, bao gồm cả khả năng xuyên tán cây, từ đó tạo ra dữ liệu đầu vào đồng bộ phục vụ xây dựng mô hình số bề mặt (DSM), mô hình số độ cao (DEM) và bản đồ ảnh trực giao (orthophoto). Nhờ khả năng cung cấp dữ liệu có độ chính xác hình học cao cùng thông tin hình ảnh phong phú, hệ thống UAV tích hợp là công cụ hiệu quả trong nhiều lĩnh vực như quy hoạch đô thị, khảo sát địa hình vùng đồi núi, kiểm kê rừng, xây dựng hạ tầng, hay mô hình hóa không gian đô thị 3D và BIM.



(a) mô hình



(b) thực tế tại công trình

Hình 2. UAV Matrice 300 RTK tích hợp máy ảnh Zenmuse P1 và LiDAR Zenmuse L1 [nguồn: PORTCOAST].

Được minh họa ở Hình 2 là một đại diện tiêu biểu cho dòng thiết bị này, hệ thống DJI Matrice 300 RTK kết hợp với hai cảm biến chuyên dụng: Zenmuse L1 (LiDAR) và Zenmuse P1 (máy ảnh quang học full-frame). DJI Matrice 300 RTK (M300) là nền tảng UAV công nghiệp có khả năng bay liên tục tới 55 phút, chịu tải trọng lớn, và hỗ trợ GNSS RTK cho phép định vị chính xác từng ảnh chụp hoặc tia quét. Hệ thống điều khiển ổn định, khả năng chống gió cao cùng các tính năng an toàn tích hợp giúp M300 vận hành hiệu quả trong điều kiện môi trường khắc nghiệt. Zenmuse P1 là cảm biến hình ảnh full-frame 45 MP, hỗ trợ thay đổi ống kính, tích hợp gimbal 3 trục và khả năng đồng bộ hóa với hệ thống định vị RTK, cho phép chụp ảnh với độ phân giải mặt đất (GSD) chỉ vài cm/pixel. Thiết bị này đặc biệt phù hợp cho các ứng dụng lập bản đồ ảnh trực giao, mô hình ảnh 3D, hoặc đo vẽ địa hình chi tiết ở tỷ lệ lớn. Trong khi đó, Zenmuse L1 là hệ thống LiDAR tích hợp cảm biến Livox với tốc độ quét lên đến 240.000 điểm/giây, khả năng thu thập dữ liệu xuyên tán thực vật và tái tạo đám mây điểm. Thiết bị còn tích hợp IMU, GNSS và camera RGB, hỗ trợ gắn màu cho đám mây điểm và xử lý dữ liệu sơ bộ trực tiếp trên chuyến bay. Sự kết hợp giữa M300, P1 và L1 tạo thành một hệ thống UAV đa năng, có thể linh hoạt cấu hình theo yêu cầu khảo sát: từ thu thập ảnh quang học và đám mây điểm đồng thời, đến

chuyển đổi nhanh chóng giữa các chế độ hoạt động. Nhờ đó, người vận hành chỉ cần một nền tảng UAV duy nhất để thực hiện đầy đủ các tác vụ: đo địa hình, lập bản đồ ảnh, mô hình hóa không gian 3D, đánh giá thể tích, cũng như theo dõi biến dạng hoặc thay đổi bề mặt theo thời gian với độ chính xác tại điểm GCP có thể đạt mức dưới cm [14].

3.3. Tàu tự hành tích hợp đo sâu hồi âm và LiDAR

Hệ thống tàu khảo sát tự hành tích hợp đo sâu hồi âm và LiDAR đại diện cho giải pháp khảo sát thủy đặc tiên tiến, cho phép thu thập dữ liệu không gian ba chiều một cách tự động, hiệu quả và an toàn. Nền tảng này thường bao gồm tàu mặt nước không người lái USV (Uncrewed Surface Vehicle), được trang bị các cảm biến đo sâu, hệ thống quét LiDAR, định vị GNSS-IMU và các thiết bị ghi hình, cho phép thực hiện đồng thời khảo sát đáy nước, bờ kè và các cấu trúc nổi liên kề. Việc áp dụng hệ thống USV trong khảo sát đặc biệt hữu ích tại các khu vực khó tiếp cận, vùng nước nông, hoặc môi trường nguy hiểm, nơi các giải pháp tàu có người lái truyền thống gặp nhiều hạn chế về chi phí, nhân lực và an toàn.

Một tổ hợp thiết bị tiêu biểu ứng dụng công nghệ này là hệ thống Otter Pro USV kết hợp với cảm biến đo sâu đa tia Norbit iWBMS máy quét iLiDAR (Hình 3). Otter Pro là dòng USV hai thân nhỏ gọn được thiết kế với khả năng vận hành tự động theo hành trình định sẵn hoặc điều khiển từ xa, bảo đảm độ ổn định cao và thời gian hoạt động kéo dài trên mặt nước. Trên nền tảng này, máy đo sâu đa tia iWBMS vận hành trong dải tần 200–700 kHz, cho phép thu thập dữ liệu đáy sông, đáy hồ hoặc đáy biển với góc quét rộng, mật độ điểm cao. Thiết bị này tích hợp hệ thống IMU và GNSS, giúp hiệu chỉnh chuyển động của tàu và đảm bảo định vị chính xác từng tia sóng âm, qua đó tạo lập mô hình số địa hình đáy nước với độ chi tiết cao. Bên cạnh đó, hệ thống còn được trang bị cảm biến iLiDAR – thiết bị quét laser quay tròn được gắn trực tiếp trên USV, hỗ trợ thu thập dữ liệu địa hình phần bờ, công trình nổi, và thảm thực vật ven sông hoặc ven hồ. Dữ liệu thu thập từ iLiDAR có thể được gắn màu RGB và đồng bộ hóa với dữ liệu định vị GNSS-IMU, góp phần tái hiện toàn diện môi trường khảo sát từ đáy nước lên đến mặt đất liền kề, hình thành một bộ dữ liệu 3D thống nhất phục vụ hiệu quả cho các ứng dụng như: lập bản đồ thủy văn – địa hình chi tiết, thiết kế và kiểm tra công trình thủy lợi, đánh giá an toàn cảng biển, hay theo dõi diễn biến xói lở, bồi lắng lòng sông, lòng hồ [15].



(a) mô hình

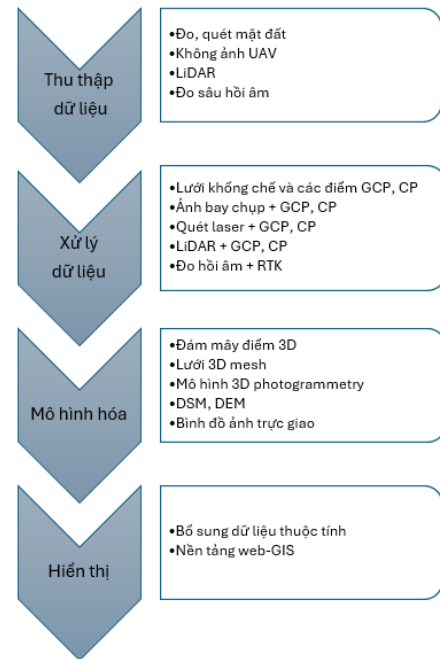


(b) thực tế tại công trình

Hình 3. USV Otter pro tích hợp máy đo sâu đa tia iWBMS và iLiDAR [nguồn: PORTCOAST].

4. Phương pháp xử lý và tích hợp dữ liệu đo đạc đa cảm biến

Có thể thấy rằng, các hệ thống tích hợp đa cảm biến được trình bày trong mục 3 đã thể hiện rõ ưu thế vượt trội trong việc nâng cao hiệu quả khảo sát hiện trạng và địa hình cho các công trình có điều kiện môi trường phức tạp, đa dạng. Sự phối hợp giữa các cảm biến đo sâu hồi âm, quét laser, LiDAR, chụp ảnh quang học độ phân giải cao và hệ thống định vị GNSS-IMU không chỉ giúp thu thập dữ liệu đa lớp đồng thời mà còn đảm bảo tính thống nhất về hệ tọa độ và độ chính xác giữa các nguồn dữ liệu khác nhau. Thông qua các nền tảng linh hoạt như trạm quét mặt đất, UAV, USV, các nhóm khảo sát có thể triển khai đồng bộ trên các mặt cắt không gian – từ lòng sông, đáy hồ, mặt nước, bờ sông, mặt đất, mặt đứng công trình cho đến các khu vực bị che phủ phức tạp. Điều này mở ra khả năng rút ngắn thời gian khảo sát, tối ưu chi phí, đồng thời nâng cao chất lượng và độ tin cậy của dữ liệu phục vụ các mục tiêu từ quy hoạch, thiết kế, thi công, đến kiểm tra, giám sát và quản lý vận hành công trình. Tuy nhiên, để dữ liệu thu thập được phát huy tối đa giá trị và phục vụ hiệu quả cho các mục tiêu ứng dụng chuyên sâu, quá trình xử lý, hiệu chỉnh và tích hợp các tập dữ liệu này đóng vai trò then chốt. Trong thực tiễn khảo sát các công trình có địa hình phức tạp, các tập dữ liệu thu thập từ UAV, USV, hoặc máy quét toàn đạc thường có sự khác biệt đáng kể về mật độ, độ chính xác, hệ tọa độ và định dạng. Do đó, việc áp dụng các phương pháp xử lý chuyên biệt như hiệu chỉnh quỹ đạo, lọc và phân loại đám mây điểm, đồng bộ hóa thời gian và hệ quy chiếu, cũng như tích hợp các lớp dữ liệu không gian – hình ảnh – địa hình là điều kiện tiên quyết để đảm bảo tính đồng bộ, độ chính xác và giá trị ứng dụng của bộ dữ liệu tổng hợp. Để đảm bảo tính toàn vẹn, độ chính xác và khả năng ứng dụng của tập dữ liệu tổng hợp, việc triển khai quy trình tích hợp dữ liệu một cách có hệ thống là điều thiết yếu. Quy trình này bao gồm bốn bước chính: thu thập, xử lý, mô hình hóa và hiển thị dữ liệu, được minh họa ở Hình 4.



Hình 4. Quy trình tổng quát tích hợp dữ liệu đa cảm biến lên nền tảng webGIS.

Giai đoạn đầu tiên của quy trình là thu thập dữ liệu thực địa, trong đó các thiết bị đo đạc đa cảm biến được triển khai theo từng môi trường khảo sát cụ thể. Dữ liệu đo quét mặt đất thường được thu bằng máy quét toàn đạc để đảm bảo độ chính xác các mốc khống chế và chi tiết mặt đứng công trình. Không ảnh UAV ghi nhận hình ảnh độ phân giải cao phục vụ mô hình hóa 3D hoặc ảnh trực giao. Thiết bị LiDAR – gắn trên UAV, USV – cung cấp đám mây điểm mật độ cao với khả năng xuyên tán cây. Đối với môi trường thủy văn, các hệ thống hồi âm đơn tia hoặc đa tia tích hợp GNSS-RTK được sử dụng để thu thập dữ liệu địa hình đáy nước. Việc đảm bảo đồng bộ thời gian và hệ quy chiếu trong quá trình thu thập là điều kiện tiên quyết để hỗ trợ các bước xử lý về sau. Để đảm bảo đồng bộ dữ liệu từ nhiều cảm biến, việc chuẩn hóa hệ tọa độ là yêu cầu bắt buộc. Lý tưởng nhất, các cảm biến cần được cấu hình về cùng một hệ quy chiếu ngay từ đầu (thường là WGS84). Trường hợp sử dụng hệ tọa độ khác nhau, dữ liệu phải được chuyển đổi về hệ tọa độ đích dựa trên các mốc khống chế, sử dụng phần mềm trắc địa chuyên dụng. Trong một số trường hợp phức tạp, việc chuyển đổi có thể đòi hỏi lập trình tùy biến. Về thời gian, đồng bộ dữ liệu được thực hiện dựa trên thời gian GPS để đảm bảo nhất quán giữa các nguồn dữ liệu.

Sau khi thu thập, dữ liệu từ các cảm biến cần được xử lý bằng phần mềm chuyên dụng phù hợp với từng loại định dạng. Đối với toàn đạc và GNSS, việc tính toán lưới khống chế tọa độ và các điểm kiểm tra (GCP – Ground Control Point, CP – Check Point) là bước nền tảng để định vị các loại dữ liệu khác. Dữ liệu ảnh UAV được xử lý thông qua các thuật toán Structure from Motion (SfM) kết hợp với GCP và CP để tạo ra mô hình ảnh có độ chính xác cao. Dữ liệu LiDAR cũng được xử lý song song, bao gồm lọc nhiễu, phân loại địa vật và

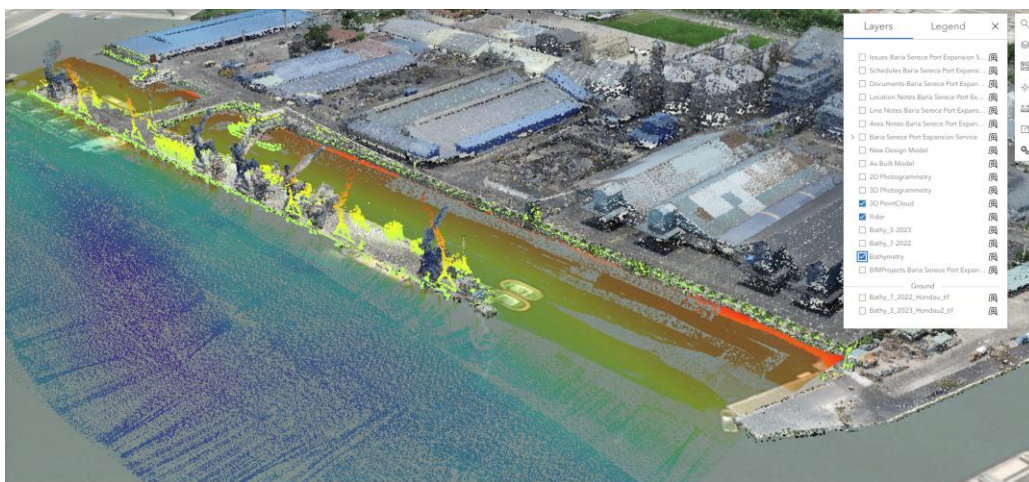
hiệu chỉnh theo hệ tọa độ thông qua các điểm GCP. Trong khi đó, dữ liệu đo sâu hồi âm đa tia cần xử lý hiệu chỉnh quỹ đạo, tốc độ âm trong nước, và tích hợp với hệ thống định vị RTK để xây dựng mô hình địa hình đáy nước liên tục. Giai đoạn này đòi hỏi kỹ thuật viên có chuyên môn cao và phần mềm chuyên sâu để đảm bảo độ chính xác và đồng bộ không gian. Trong xử lý đám mây điểm, việc lọc nhiễu và phân loại được thực hiện bằng các phần mềm chuyên dụng như Terrasolid, Trimble, Leica, vốn tích hợp các thuật toán tối ưu cho dữ liệu không gian 3D.

Sau khi xử lý riêng biệt từng lớp dữ liệu, bước tiếp theo là tổng hợp và mô hình hóa để xây dựng các sản phẩm không gian 3 chiều phục vụ phân tích và ứng dụng. Các mô hình phổ biến bao gồm: đám mây điểm 3D (3D point cloud), lưới tam giác 3D (3D mesh), mô hình ảnh lập thể (3D photogrammetric model), mô hình số độ cao (DEM), mô hình số bề mặt (DSM) và bình đồ ảnh trực giao (orthophoto). Quá trình tổng hợp đòi hỏi chuẩn hóa hệ tọa độ, căn chỉnh không gian và đôi khi cần đồng bộ hóa cường độ phản xạ, ảnh màu hoặc độ cao thủy chuẩn từ độ cao GNSS. Các mô hình này là đầu vào quan trọng cho các ứng dụng thiết kế kỹ thuật số, BIM, hoặc phân tích địa hình chuyên sâu. Quá trình hợp nhất dữ liệu từ nhiều nguồn thường dựa trên thuật toán tìm điểm tương đồng gần nhất (như ICP) hoặc sử dụng các điểm mốc chung đã hiệu chỉnh tọa độ, nhằm đảm bảo tính liên tục và chính xác hình học của mô hình tổng hợp.

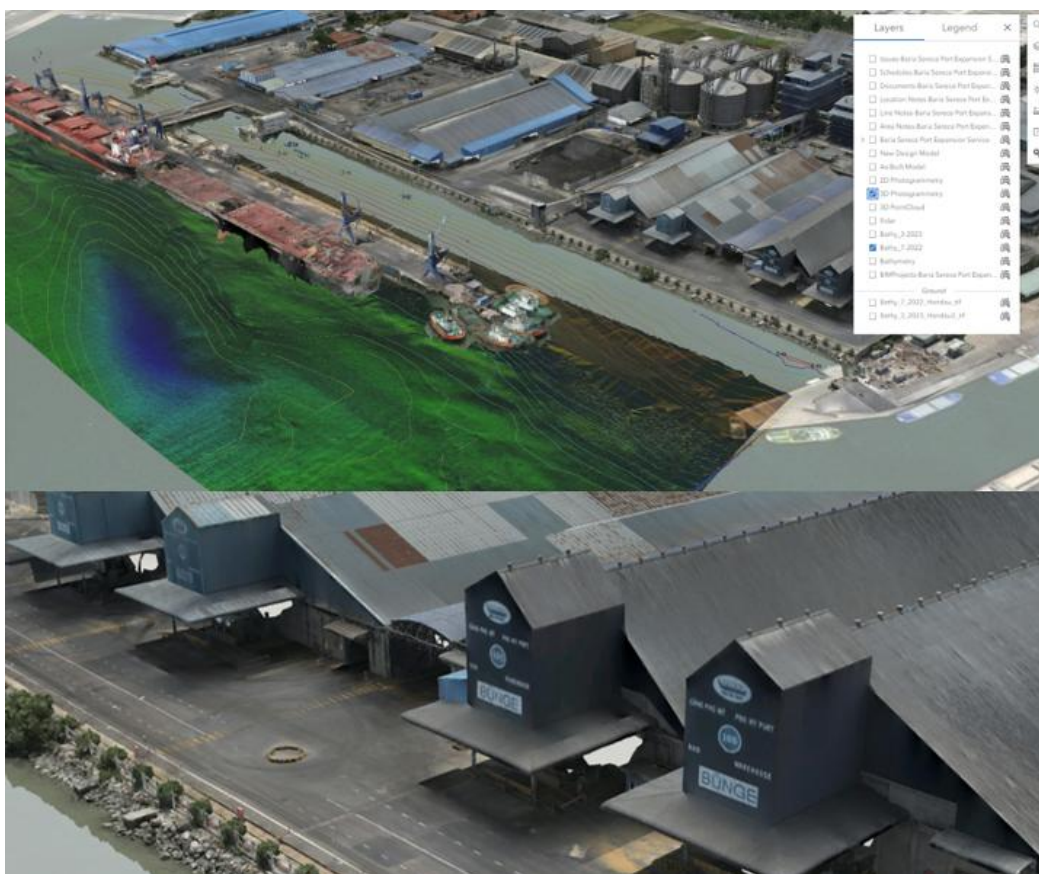
Các mô hình kết quả có thể được hiển thị riêng biệt thông qua các phần mềm kỹ thuật chuyên dụng phục vụ từng mục tiêu cụ thể. Tuy nhiên, để khai thác tối đa giá trị của dữ liệu và cung cấp cái nhìn tổng thể không gian, việc tích hợp các lớp mô hình lên một nền tảng GIS là bước then chốt. Việc tích hợp này không chỉ giúp kết nối các lớp dữ liệu hiện trạng, ảnh, địa hình và công trình mà còn hỗ trợ phân tích không gian, quản lý dữ liệu thời gian thực và phục vụ ra quyết định. Đặc biệt, trong bối cảnh chuyển đổi số hiện nay, việc xây dựng nền tảng web-GIS là hướng tiếp cận hiệu quả, giúp cung cấp dữ liệu theo thời gian thực và truy cập linh hoạt cho nhiều đối tượng người dùng – từ kỹ sư hiện trường đến nhà quản lý dự án.

Quy trình tích hợp dữ liệu đo đạc đa cảm biến đã được áp dụng thực tiễn trong khảo sát hiện trạng cảng Bà Rịa Serece – một công trình có cấu trúc phức hợp gồm cả phần trên cạn và dưới nước, với nhiều lớp không gian khác nhau. Để đảm bảo độ phủ, độ chi tiết và tính đồng bộ của dữ liệu, nhóm khảo sát đã sử dụng đồng thời các hệ thống đo đạc tiên tiến như sau: máy quét toàn đạc Trimble SX12 được triển khai để đo lưới khống chế tọa độ, thiết lập các điểm GCP (Ground Control Points) và CP (Check Points), đồng thời quét laser 3D chi tiết cho các mặt đứng và không gian bên trong các công trình xây dựng hiện hữu. UAV DJI Matrice 300 RTK tích hợp máy ảnh quang học Zenmuse P1 và thiết bị quét LiDAR Zenmuse L1 được sử dụng để thực hiện bay chụp toàn bộ phần trên cạn, thu thập ảnh số độ phân giải cao phục vụ mô hình hóa ảnh lập thể và quét đám mây điểm LiDAR tại khu vực không xây dựng. Tàu khảo sát không người lái Otter Pro USV tích hợp cảm biến đo sâu đa tia Norbit iWBMS và thiết bị quét iLiDAR, cùng hệ thống định vị GNSS-RTK và cảm biến IMU, cho phép khảo sát phần đáy nước phía trước bến cảng và phần gầm cầu bến – các khu vực mà UAV hoặc thiết bị mặt đất không thể tiếp cận.

Sau quá trình xử lý dữ liệu riêng biệt từ từng hệ thống cảm biến, các kết quả đầu ra – bao gồm đám mây điểm quét laser, đám mây điểm LiDAR, mô hình ảnh 3D lập thể (3D photogrammetry), và dữ liệu địa hình đáy nước – được chuẩn hóa, đồng bộ hóa và tích hợp lên nền tảng ArcGIS Online (Esri), tạo thành một hệ thống webGIS hoàn chỉnh. Các lớp dữ liệu không gian được gắn kết với thuộc tính công trình, định vị theo hệ tọa độ quốc gia, đồng thời hỗ trợ hiển thị trực tuyến, đo đạc, phân tích và truy xuất thông tin ngay trên nền tảng web. Hình 5 minh họa đám mây điểm 3D tổng hợp được xây dựng từ toàn bộ các nguồn dữ liệu nêu trên. Trong đó: phần đáy nước và gầm bến cảng được khảo sát bằng hệ thống USV, các công trình xây dựng phía trên mặt đất được mô hình hóa bằng UAV với camera P1, khu vực địa hình không xây dựng được quét LiDAR trên không, các mặt đứng và không gian nội thất công trình được thu thập chi tiết bằng máy quét toàn đạc SX12.



Hình 5. Đám mây điểm 3D tích hợp dữ liệu đa cảm biến, hiển thị trên ArcGIS online [nguồn: PORTCOAST].



Hình 6. Mô hình 3D tích hợp (trên) và hình ảnh phóng to một phần (dưới) [nguồn: PORTCOAST].

Hình 6 (trên) thể hiện mô hình ảnh lập thể 3D được xử lý từ ảnh UAV, trên đó người dùng có thể thực hiện các phép đo trực tiếp (khoảng cách, chiều cao, diện tích...) ngay trong môi trường số. Độ phân giải cao của mô hình cho phép phóng đại chi tiết đến cấp độ milimét, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật trong thiết kế, kiểm tra hiện trạng hoặc tính toán thể tích. Hình 6 (dưới) minh họa khả năng hiển thị động của nền tảng: một phần nhà kho trong hình trên đã được phóng to chi tiết mà vẫn bảo đảm độ nét của mô hình, các đặc trưng cấu kiện sẽ có thể được thấy rõ nếu phóng to đến mức đủ lớn. Để đảm bảo tốc độ hiển thị mượt mà và truy cập từ xa hiệu quả, ArcGIS Online sử dụng chuẩn dữ liệu nén I3S, cho phép truyền phát dữ liệu theo từng phần, gom nhóm đối tượng và lập chỉ mục không gian nhằm tối ưu hóa truy xuất qua web. Đồng thời, dữ liệu 3D được phân vùng không gian giúp chi tải các khu vực đang hiển thị và bỏ qua các vùng không cần thiết. Ngoài ra, hệ thống áp dụng kỹ thuật phân cấp mức chi tiết (LoD), giúp tự động điều chỉnh độ phân giải mô hình theo mức zoom, giảm tải xử lý cho trình duyệt và nâng cao hiệu suất tương tác.

5. Kết luận

Khảo sát địa hình và hiện trạng công trình là bước khởi đầu mang tính quyết định, ảnh hưởng trực tiếp đến toàn bộ vòng đời dự

án từ thiết kế, thi công cho đến quản lý và vận hành mô hình thông tin công trình (BIM). Việc lựa chọn đúng loại thiết bị và áp dụng quy trình xử lý phù hợp trong đó đặc biệt là yếu tố then chốt để đảm bảo độ chính xác, đầy đủ và hiệu quả dữ liệu đầu vào. Các thiết bị hiện trường hiện đại – như máy toàn đạc điện tử, GNSS RTK, UAV, LiDAR, máy quét laser mặt đất và thiết bị đo sâu hồi âm – đều đóng vai trò đặc thù trong từng môi trường khảo sát, từ không gian mở, mặt đứng công trình đến đáy nước. Tuy nhiên, trong bối cảnh khảo sát hiện trạng công trình ngày càng yêu cầu độ phủ rộng, độ chi tiết cao và tính đồng bộ về không gian, việc sử dụng đơn lẻ từng thiết bị không còn đáp ứng đủ. Xu hướng tích hợp đa cảm biến trên cùng một nền tảng – như máy quét toàn đạc (toàn đạc + quét laser), UAV tích hợp camera và LiDAR, hay USV tích hợp đo sâu hồi âm và iLiDAR – là giải pháp hiệu quả, cho phép thu thập dữ liệu đa lớp (trên không, trên bờ, dưới nước) một cách đồng thời, nhanh chóng và chính xác hơn. Sự tích hợp này cũng góp phần rút ngắn thời gian triển khai thực địa, giảm sai số quy đổi giữa các hệ đo và tạo điều kiện thuận lợi cho mô hình hóa không gian 3D thống nhất.

Trên cơ sở đó, bài báo đã đề xuất và triển khai một quy trình tích hợp dữ liệu đo đạc đa cảm biến gồm bốn bước: thu thập, xử lý, mô hình hóa và hiển thị không gian. Ứng dụng tại công trình cảng biển Bà Rịa Serece cho thấy khả năng triển khai đồng bộ các hệ thống

UAV, USV và station-scanner, từ đó tạo ra mô hình số hiện trạng có độ chính xác cao, thể hiện đầy đủ các lớp không gian từ đáy nước đến mặt đứng công trình. Việc hiển thị và truy xuất dữ liệu trên nền tảng webGIS không chỉ tăng tính trực quan mà còn mở rộng khả năng ứng dụng như đo đạc từ xa, đánh giá hiện trạng, hỗ trợ thiết kế, quản lý tài sản và giám sát biến động theo thời gian thực. Tổng thể, nghiên cứu này khẳng định rằng các hệ thống đo đạc tích hợp đa cảm biến, khi được triển khai theo quy trình thống nhất và ứng dụng trên nền tảng webGIS, hoàn toàn có khả năng đáp ứng yêu cầu khảo sát hiện trạng công trình trong thời đại số hóa, góp phần xây dựng cơ sở dữ liệu không gian phục vụ hiệu quả cho quy hoạch, thiết kế, quản lý và vận hành công trình hiện đại. Việc ứng dụng WebGIS làm lớp hiển thị trung gian còn giúp mở rộng khả năng tiếp cận dữ liệu cho nhiều đối tượng người dùng, góp phần thúc đẩy tiến trình số hóa và ra quyết định dựa trên dữ liệu không gian.

Mặc dù các thiết bị và hệ thống đo đạc đa cảm biến hiện nay đã đạt được trình độ phát triển cao về mặt công nghệ, và quy trình tích hợp dữ liệu đo đạc đa cảm biến cũng đã được thử nghiệm thành công, thì trong quá trình triển khai thực tế vẫn tồn tại nhiều thách thức, đặc biệt khi áp dụng trong các dự án quy mô lớn, có địa hình phức tạp hoặc yêu cầu kỹ thuật cao. Những thách thức này xuất phát từ cả yếu tố kỹ thuật, tổ chức hiện trường và khả năng tích hợp dữ liệu. Trước hết, vấn đề đồng bộ hệ tọa độ và thời gian giữa các thiết bị khác nhau là hết sức quan trọng, đòi hỏi người xử lý phải hiểu rõ các cơ chế nội tại của từng cảm biến và có khả năng hiệu chỉnh chính xác thông qua các mốc GCP, CP và hệ quy chiếu thống nhất. Thứ hai, xử lý dữ liệu khối lượng lớn từ nhiều nguồn đòi hỏi hạ tầng máy tính mạnh, phần mềm chuyên dụng và quy trình xử lý có tính hệ thống. Ảnh UAV độ phân giải cao, dữ liệu quét và các mô hình đám mây điểm dày đặc có thể tạo ra hàng trăm GB dữ liệu cho mỗi khu vực khảo sát, khiến việc lưu trữ, xử lý và chia sẻ dữ liệu trở nên khó khăn nếu không có nền tảng công nghệ phù hợp. Thứ ba, tổ chức hiện trường và vận hành thiết bị cần sự phối hợp liên ngành. Mỗi nền tảng đo đạc (UAV, USV) có yêu cầu riêng về giấy phép, vùng an toàn hoạt động, nhân lực điều khiển và điều kiện môi trường thích hợp. Việc bố trí cùng lúc nhiều loại thiết bị trên thực địa đòi hỏi kế hoạch khảo sát hợp lý và khả năng ứng phó linh hoạt với điều kiện thực tế. Các thách thức kỹ thuật trong triển khai khảo sát tích hợp hiện nay tuy đáng kể nhưng hoàn toàn có thể vượt qua nếu được tiếp cận có hệ thống, kết hợp giữa chuyên môn đo đạc, công nghệ xử lý dữ liệu không gian và tư duy tổ chức hiện trường bài bản. Bên cạnh đó, hướng phát triển tiếp theo trong tiến trình có thể bao gồm: đầu tư hạ tầng xử lý dữ liệu: sử dụng các nền tảng xử lý tập trung, phần mềm có khả năng xử lý song song và lưu trữ linh hoạt. Tăng cường liên thông phần mềm, lựa chọn và tích hợp các hệ thống có khả năng xuất-nhập dữ liệu theo chuẩn

chung để phục vụ tích hợp vào các nền tảng GIS hoặc phần mềm thiết kế kỹ thuật. Và tích hợp BIM lên nền tảng webGIS thành một hệ thống hoàn chỉnh.

Tài liệu tham khảo

- [1]. A. Ehrhart, S. Gassner, and F. Holzinger, "Total station based photogrammetry for precise 3D measurements of dynamic processes," *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. III-5, pp. 61–68, 2016.
- [2]. W. Lienhart, D. Lehner, and H. Brunner, "High frequent total station measurements for the monitoring of bridges," in *Proc. Joint Int. Symp. on Deformation Monitoring (JISDM)*, Vienna, Austria, Mar. 2017.
- [3]. N. Shen, L. Chen, J. Liu, L. Wang, T. Tao, D. Wu, and R. Chen, "A review of Global Navigation Satellite System (GNSS)-based dynamic monitoring technologies for structural health monitoring," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 9, p. 1001, 2019.
- [4]. H. Nguyễn, L. Lê, and V. Nguyễn, "Nghiên cứu ứng dụng công nghệ quét Laser 3D trong xây dựng cơ sở dữ liệu quản lý trật tự xây dựng đô thị," *TNU Journal of Science and Technology*, vol. 162, no. 02, pp. 21–25, 2017.
- [5]. T. H. Hà, "Ứng dụng máy bay không người lái (UAV) trong giám sát chất lượng mặt đường bộ, thí điểm tại một số đoạn trên Quốc lộ 6 thuộc tỉnh Hòa Bình," *HCMUE Journal of Science*, vol. 15, no. 9, p. 86, 2020.
- [6]. H. Lê Văn, N. Lê Minh, and C. Trần Đức, "Nghiên cứu phương pháp tiền xử lý dữ liệu quan trắc liên tục GNSS của cầu dây văng nhiều trụ thấp," *Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải*, vol. 75, no. 9, pp. 2345–2355, 2024.
- [7]. B. Kavanagh and D. K. Slaterry, *Surveying with Construction Applications*, 7th ed. Pearson Higher Ed, 2014.
- [8]. K. Yu, *Theory and Practice of GNSS Reflectometry*. Singapore: Springer, 2021.
- [9]. M. Pepe, A. V. Scuderi, and D. Costantino, "UAV platforms and the SfM-MVS approach in the 3D surveys and modelling: A review in the cultural heritage field," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 24, p. 12886, 2022.
- [10]. R. Manish et al., "Image-aided LiDAR mapping platform and data processing strategy for stockpile volume estimation," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 1, p. 231, 2022.
- [11]. G. Vosselman and H.-G. Maas, Eds., *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Caithness, UK: Whittles Publishing, 2010.
- [12]. U.S. Army Corps of Engineers, *Hydrographic Surveying, Engineer Manual 1110-2-1003*. Washington, D.C., USA: Department of the Army, 2013.
- [13]. Trimble, *Trimble SX12 Scanning Total Station – Field Guide*, Trimble, 2023.
- [14]. T. Kersten, J. Wolf, and M. Lindstaedt, "Investigations into the accuracy of the UAV system DJI Matrice 300 RTK with the sensors Zenmuse P1 and L1 in the Hamburg test field," in *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXIV ISPRS Congress, Nice, France, Jun. 6–11, 2022.
- [15]. Maritime Robotics, "The Otter." [Online]. Available: <https://www.maritimrobotics.com/otter>. [Accessed: May 15, 2025].