

Tạo lập mô hình BIM từ ảnh UAV cho hạ tầng giao thông và trực quan hóa trên nền tảng GIS

Cao Anh Thư^{1,2}, Hoàng Quốc Vương^{1,2} và Phan Thị Anh Thư^{1,2*}

¹ Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa Tp.HCM

² Đại học Quốc Gia Thành phố Hồ Chí Minh

TỪ KHOÁ

UAV
Mô hình BIM
Công trình giao thông
GIS

TÓM TẮT

Trong bối cảnh chuyển đổi số lĩnh vực hạ tầng, việc tích hợp các công nghệ số như UAV, BIM và GIS đang mở ra những hướng tiếp cận mới trong công tác khảo sát, quản lý và bảo trì công trình giao thông. Nghiên cứu này đề xuất một quy trình tích hợp ba bước bao gồm: (i) thu nhận và xử lý dữ liệu ảnh UAV để tạo lập đám mây điểm; (ii) mô hình hóa BIM từ đám mây điểm; và (iii) chuyển đổi, tích hợp mô hình BIM vào môi trường GIS nhằm trực quan hóa và truy vấn thông tin công trình. Thử nghiệm được triển khai tại một đoạn tuyến Quốc lộ 1K, tỉnh Bình Dương, sử dụng thiết bị DJI Mavic 3 Enterprise và phần mềm Agisoft Metashape để xử lý ảnh theo kỹ thuật SfM – MVS. Đám mây điểm thu được gồm hơn 173 triệu điểm, với sai số định vị sau hiệu chỉnh GCP dao động từ 2–11 cm. Mô hình BIM được thiết lập trong môi trường Revit và đồng bộ hệ tọa độ bằng cách sử dụng Civil 3D, sau đó được xuất sang định dạng IFC và tích hợp vào nền tảng GIS ArcGIS Pro. Kết quả cho thấy mô hình có khả năng phản ánh chính xác hình dạng mặt đường và các cấu kiện phụ trợ, hỗ trợ hiệu quả công tác giám sát và phân tích không gian. Nghiên cứu cũng đề xuất hướng phát triển tương lai là kết nối mô hình với cảm biến IoT để xây dựng hệ thống quản lý hạ tầng thông minh thời gian thực.

KEYWORDS

UAV
BIM model
Infrastructure Construction
GIS

ABSTRACT

Integrating digital technologies such as UAV, BIM, and GIS opens new approaches for surveying, managing, and maintaining transportation infrastructure in the context of digital transformation in the infrastructure sector. This study proposes a three-step integrated workflow comprising (i) the acquisition and processing of UAV imagery to generate a point cloud, (ii) BIM modeling based on the point cloud, and (iii) the conversion and integration of the BIM model into a GIS environment for infrastructure visualization and information querying. The experiment was conducted on a segment of 1K Highway in Binh Duong Province, utilizing a DJI Mavic 3 Enterprise drone and Agisoft Metashape software to process images using Structure-from-Motion (SfM) and Multi-View Stereo (MVS) techniques. The resulting point cloud consists of over 173 million points, with georeferencing errors (GCP adjustment) ranging from 2 to 11 cm. The BIM model was developed in the Revit environment, coordinate-synchronized by using Civil 3D, and then exported to IFC format for integration into the ArcGIS Pro platform. The results demonstrate that the model accurately reflects the road geometry and auxiliary components, effectively supporting spatial analysis and infrastructure monitoring tasks. This study also proposes a future development direction: linking the model with IoT sensors to establish a real-time intelligent infrastructure management system.

1. Giới thiệu chung

Hạ tầng giao thông đường bộ đóng vai trò then chốt trong quá trình phát triển kinh tế – xã hội của Việt Nam, góp phần kết nối các vùng kinh tế trọng điểm, thúc đẩy thương mại, du lịch và giao thương quốc tế. Tuy nhiên, hệ thống giao thông hiện nay đang phải đối mặt với nhiều thách thức trong công tác quản lý, bảo trì và giám sát, do tốc độ đô thị hóa nhanh chóng, lưu lượng giao thông ngày càng tăng và tình

trạng xuống cấp của cơ sở hạ tầng. Hiện nay, mạng lưới đường bộ đảm nhiệm khối lượng vận tải lớn nhất trong toàn bộ hệ thống nhờ vai trò là các tuyến huyết mạch quốc gia [1]. Trước nhu cầu ngày càng cao về vận tải và phát triển logistics, nhà nước đã đẩy mạnh đầu tư nâng cấp hệ thống đường bộ cả về quy mô lẫn chất lượng, từ đó tạo áp lực lớn lên công tác khảo sát, bảo trì và giám sát thường xuyên.

Trong bối cảnh chuyển đổi số mạnh mẽ, việc ứng dụng thiết bị bay không người lái (Unmanned aerial vehicle – UAV) kết hợp với kỹ

*Liên hệ tác giả: ptathu@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 07/05/2025, sửa xong ngày 16/06/2025, chấp nhận đăng ngày 17/06/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2025.964>

thuật trắc lượng ảnh (Photogrammetry) đang nổi lên như một giải pháp công nghệ hiệu quả nhằm thu thập dữ liệu hiện trạng mặt đường một cách nhanh chóng và chính xác. Kỹ thuật bay chụp UAV giúp vượt qua hạn chế của các phương pháp đo đạc truyền thống, đặc biệt trong các khu vực địa hình phức tạp hoặc khó tiếp cận. Kết hợp với kỹ thuật Structure from Motion (SfM) và Multiview Stereo (MVS), chuỗi ảnh chồng lấp được xử lý để tạo ra mô hình không gian ba chiều của bề mặt khảo sát. Sản phẩm đầu ra bao gồm đám mây điểm dày đặc (dense point cloud), mô hình số địa hình (DTM), mô hình số bề mặt (DSM), bản đồ trực giao (orthomosaic) và đường đồng mức (contour lines) [2 – 4].

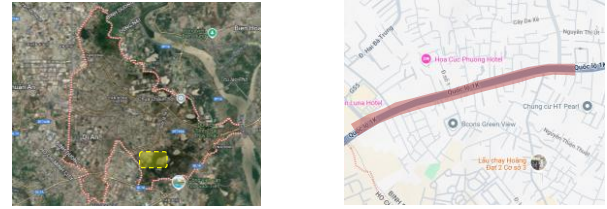
Mô hình thông tin công trình (Building Information Model - BIM) đang ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực xây dựng và hạ tầng nhờ khả năng mô hình hóa trực quan, hỗ trợ kiểm soát xung đột thiết kế, quản lý tiến độ và bảo trì công trình. Đặc biệt trong lĩnh vực hạ tầng giao thông, BIM cho phép mô phỏng chi tiết tuyến đường, công trình phụ trợ và mạng lưới kỹ thuật liên quan. Khi được tích hợp với hệ thống thông tin địa lý (Geographic Information System – GIS), mô hình BIM có thể hiển thị trên bản đồ không gian thực, hỗ trợ truy vấn tình trạng mặt đường, quản lý tài sản cơ sở hạ tầng như biển báo, vạch kẻ đường, đèn tín hiệu và dải phân cách.

Mục tiêu của nghiên cứu này là đề xuất một quy trình tích hợp tạo lập mô hình BIM từ dữ liệu ảnh UAV và trực quan hóa trên nền tảng GIS nhằm phục vụ công tác khảo sát, lưu trữ và quản lý hiện trạng công trình đường bộ. Quy trình bao gồm ba bước chính: (1) xử lý ảnh UAV để tạo đám mây điểm; (2) xây dựng mô hình BIM từ dữ liệu đám mây; và (3) tích hợp mô hình vào môi trường GIS để hỗ trợ quản lý và truy vấn thông tin. Một đoạn đường cụ thể được chọn làm nghiên cứu điển hình nhằm kiểm nghiệm tính khả thi và hiệu quả ứng dụng của quy trình đề xuất trong thực tế.

2. Thu thập dữ liệu

2.1. Khu vực nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện trên một đoạn của Quốc lộ 1K (QL1K) – tuyến đường giao thông huyết mạch kết nối TP. Hồ Chí Minh, tỉnh Bình Dương và tỉnh Đồng Nai (Hình 1). Tuyến đường này có vai trò quan trọng trong phát triển kinh tế vùng Đông Nam Bộ, với lưu lượng giao thông cao và tần suất sử dụng lớn. Tuy nhiên, do chịu tác động liên tục từ tải trọng và điều kiện thời tiết, tuyến đường đang đối mặt với nhiều vấn đề như xuống cấp mặt đường, hư hỏng kết cấu hạ tầng và thách thức trong công tác bảo trì. Khu vực khảo sát trong nghiên cứu thuộc địa bàn thành phố Dĩ An, tỉnh Bình Dương, kéo dài khoảng 1 km từ ngã ba siêu thị GO! Dĩ An đến khu vực gần chợ Đông Hòa. Để đảm bảo độ bao phủ và chất lượng dữ liệu, một kế hoạch bay UAV chi tiết đã được xây dựng nhằm tối ưu chồng ảnh và thu nhận đầy đủ hiện trạng bề mặt đoạn đường phục vụ cho quá trình tái dựng mô hình 3D, mô hình hóa BIM và tích hợp GIS.



(a) Khu vực bay chụp (màu vàng) (b) Đoạn đường được khảo sát
Hình 1. Khu vực nghiên cứu

2.2. Dữ liệu thực nghiệm

Trong nghiên cứu này, thiết bị bay không người lái DJI Mavic 3 Enterprise (M3E) được lựa chọn để thực hiện hoạt động khảo sát hiện trạng mặt đường (Hình 2a). Đây là UAV đa cánh quạt (multi-rotor) tích hợp camera RGB độ phân giải cao, được trang bị màn trập cơ học, khả năng zoom quang học 56X và mô-đun định vị RTK (Real-Time Kinematic), cho phép nâng cao đáng kể độ chính xác hình học của dữ liệu thu thập, đáp ứng yêu cầu khắt khe trong các ứng dụng đo đạc kỹ thuật. Mavic 3E còn hỗ trợ phiên bản cảm biến nhiệt, thích hợp cho các ứng dụng đặc thù như cứu hộ, kiểm tra kết cấu hạ tầng hoặc hoạt động ban đêm [5]. Hệ thống định vị GNSS tích hợp trên thiết bị hỗ trợ các vệ tinh GPS, GLONASS, Galileo và BeiDou; trong đó GLONASS chỉ được kích hoạt khi sử dụng đồng thời mô-đun RTK và cảm biến quán tính (IMU) [6]. Quá trình vận hành UAV có thể được thực hiện bằng hai phương thức: điều khiển thủ công thông qua bộ điều khiển hoặc bay tự động theo lộ trình thiết lập sẵn trong phần mềm DJI Pilot 2 [5].

Thiết bị DJI Mavic 3 Enterprise được triển khai để bay chụp dọc theo đoạn tuyến khảo sát, với kế hoạch bay được thiết lập theo tỷ lệ chồng ảnh dọc 80 % và ngang 75 % nhằm đảm bảo chất lượng dữ liệu đầu vào cho quá trình xử lý bằng kỹ thuật trắc lượng ảnh (Hình 2). Các thông số này tuân thủ theo quy định tại Khoản 1, Điều 8, Thông tư 07/2021/TT-BTNMT về kỹ thuật thu nhận và xử lý dữ liệu ảnh số từ UAV [15]. Cụ thể, dữ liệu phục vụ nghiên cứu được thu thập trong khoảng thời gian từ ngày 10/5/2024 đến ngày 24/5/2024, với sự chấp thuận của Bộ Chỉ huy Quân sự tỉnh Bình Dương theo văn bản phê duyệt ban hành ngày 10 tháng 5 năm 2024. Tổng cộng 261 ảnh chụp đã được thu nhận trong một lần bay duy nhất, dưới điều kiện thời tiết ổn định, ánh sáng đồng đều và tốc độ bay phù hợp. Đồng thời, hệ thống các điểm kiểm soát mặt đất (Ground Control Points – GCP) được bố trí và đo bằng thiết bị bằng công nghệ đo GNSS RTK, đóng vai trò quan trọng trong việc hiệu chỉnh không gian và đánh giá độ chính xác của mô hình trong các giai đoạn xử lý tiếp theo (Hình 2c).



(a) Thiết bị bay (b) Ảnh chụp thu được mm (c) Đo mốc khống chế
Hình 2. Thu thập dữ liệu.

3. Phương pháp thực hiện

3.1. Xử lý dữ liệu ảnh UAV

Dữ liệu ảnh UAV được xử lý bằng phần mềm Agisoft Metashape (phiên bản dành cho giáo dục), ứng dụng kỹ thuật Structure from Motion (SfM) nhằm tái dựng mô hình không gian ba chiều của khu vực khảo sát. Quy trình xử lý ảnh là chuỗi thao tác có hệ thống nhằm chuyển đổi ảnh chụp từ thiết bị UAV thành mô hình không gian ba chiều dưới dạng đám mây điểm (point cloud). Toàn bộ quá trình được thực hiện tuần tự, bắt đầu từ bước nhập ảnh, căn chỉnh vị trí camera, hiệu chỉnh bằng điểm khống chế mặt đất (GCP) cho đến tái dựng mô hình 3D chi tiết, trong đó mỗi bước đều đóng vai trò quan trọng đối với độ chính xác và chất lượng hình học của kết quả đầu ra.

Bước đầu tiên là nhập ảnh vào phần mềm xử lý, yêu cầu các ảnh phải đảm bảo chất lượng cao, có thông tin tọa độ đầy đủ và độ chồng lấp phù hợp để phục vụ cho các thuật toán phát hiện điểm đặc trưng [8]. Sau đó, tiến hành căn chỉnh ảnh (image alignment), tự động so khớp các điểm đặc trưng giữa các ảnh để xác định vị trí và hướng tương đối của các camera trong không gian 3D. Kết quả của bước này là một đám mây điểm thưa (sparse point cloud) và vị trí tâm chụp các ảnh (camera pose), tạo nên bộ khung sơ bộ của mô hình không gian. Nhằm đưa đám mây về đúng vị trí trong hệ tọa độ địa phương các điểm GCP được sử dụng [9]. Cụ thể tọa độ của các GCP được nhập vào phần mềm và vị trí của chúng được xác định trên ảnh tương ứng. Việc tích hợp GCP giúp gắn hệ quy chiếu thực địa cho toàn bộ mô hình, đồng thời hiệu chỉnh sai lệch không gian và giảm sai số tổng thể [10]. Theo TCVN 13576:2022, sai số vị trí được đánh giá bằng chỉ tiêu RMSE, trong đó giá trị RMSE càng thấp thể hiện sự tương khớp cao giữa dữ liệu ảnh và tọa độ thực địa [11].

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum (X_{UAV} - X_{GCP})^2}{n}} \quad (1)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum (Y_{UAV} - Y_{GCP})^2}{n}} \quad (2)$$

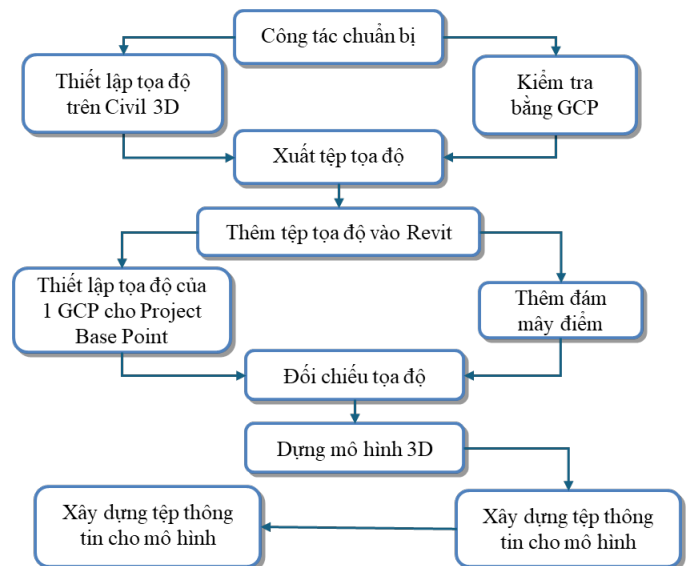
Sau khi hoàn tất căn chỉnh và hiệu chỉnh tọa độ, phần mềm tiếp tục bước tái dựng mô hình 3D chi tiết bằng thuật toán Multiview Stereo (MVS). Thuật toán này hoạt động bằng cách phân tích các ảnh chụp từ nhiều góc nhìn khác nhau, xác định các cặp điểm ảnh tương ứng (matching pixels) và nội suy vị trí không gian thực của các điểm đó [12]. Kết quả thu được là một đám mây điểm dày đặc (dense point cloud) – bao gồm hàng triệu điểm với tọa độ XYZ trong không gian ba chiều. Đám mây điểm này mô tả chi tiết bề mặt đối tượng khảo sát, tạo nền tảng cho các bước xử lý hình học và mô hình hóa BIM tiếp theo.

3.2. Tạo lập mô hình BIM từ đám mây điểm

Mô hình hóa BIM từ đám mây điểm là bước tiếp nối trong chuỗi xử lý dữ liệu nhằm chuyển đổi dữ liệu đám mây điểm thành mô hình thông tin số phục vụ thiết kế, quản lý và khai thác hạ tầng. Quá trình này bao gồm việc chuẩn hóa hệ tọa độ, tích hợp đám mây điểm vào phần mềm Revit, khớp chính xác vị trí không gian và tiến hành dựng hình 3D (Hình 3). Trên cơ sở mô hình hình học, các thông tin kỹ thuật

được gắn thêm để tạo thành mô hình BIM hoàn chỉnh. Đây là nền tảng quan trọng giúp số hóa hạ tầng, hỗ trợ ra quyết định và nâng cao hiệu quả trong suốt vòng đời công trình.

Quy trình bắt đầu bằng việc xác định và thiết lập hệ tọa độ chuẩn trong Civil 3D. Việc này đảm bảo rằng toàn bộ dữ liệu hạ tầng được mô hình hóa sau đó sẽ nằm đúng vị trí địa lý. Song song với bước thiết lập tọa độ, các điểm GCP được đối chiếu để đánh giá độ chính xác và sai lệch giữa mô hình đám mây điểm và dữ liệu đo thực địa. Việc kiểm tra sai số tại các điểm GCP giúp xác định độ xê dịch của mô hình đám mây điểm, làm căn cứ cho các bước hiệu chỉnh tiếp theo. Sau khi hệ tọa độ được xác lập chính xác, Civil 3D cho phép xuất ra một tệp tọa độ chứa thông tin vị trí các điểm mốc hoặc các đối tượng hạ tầng cơ bản. Để đồng bộ hệ tọa độ giữa Civil 3D và Revit, tiện ích Autodesk Shared Reference Point – được tích hợp trong phần Subscription Extension Manager của Autodesk được sử dụng. Đây là công cụ giúp tạo một tệp trung gian (.xml) chứa thông tin gốc tọa độ, hướng Bắc, độ xoay... từ Civil 3D, và có thể nhập vào Revit để đảm bảo mô hình được định vị chính xác. Tại bước này, một trong các điểm GCP được chọn làm mốc gốc cho mô hình trong Revit. Tọa độ của điểm này sẽ được nhập vào điểm tọa độ Project Base Point [13].



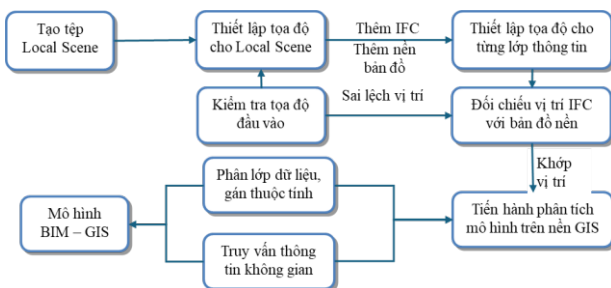
Hình 3. Quy trình mô hình hóa.

Trong quá trình thực hiện, đám mây điểm được nhập vào Revit thông qua chế độ “Shared Coordinate”. Chế độ này cho phép liên kết mô hình đám mây điểm với đúng vị trí địa lý đã xác định trong các bước trước, đảm bảo sự trùng khớp không gian giữa các dữ liệu. Tại đây, sự trùng khớp giữa đám mây điểm và các điểm GCP hay là điểm Project Base Point được kiểm tra. Nếu có sai lệch thì có thể là do tệp tọa độ đang sai, hoặc do tệp đám mây điểm đang bị sai lệch trong quá trình tinh chỉnh và phải quay lại bước thiết lập tọa độ ban đầu, kiểm tra lại vị trí đánh dấu GCP trên ảnh và so sánh với tọa độ thực địa. Khi các dữ liệu định vị đã sẵn sàng và được hiệu chỉnh, quá trình dựng mô hình 3D trong Revit được tiến hành. Đám mây điểm được sử dụng làm tài liệu nền để dựng

lại các cấu kiện hạ tầng như mặt đường, bó vỉa, biển báo, đèn đường, đèn giao thông, vạch sơn, v.v. theo đúng như những gì đám mây điểm hiển thị. Không chỉ dừng ở việc thể hiện thông tin hình học, mô hình BIM còn phải chứa các thông tin phi hình học như: mã số quản lý, tên cấu kiện, hiện trạng, trạng thái tu sửa... Các thông tin này được khai báo trong Revit nhằm đảm bảo mô hình có thể phục vụ cho các công đoạn sau như quản lý tài sản, bảo trì hay khai thác công trình. Cuối cùng, mô hình BIM hoàn chỉnh được xuất ra dưới định dạng IFC (Industry Foundation Classes) – một chuẩn dữ liệu mở cho phép lưu trữ đồng thời cả thông tin hình học và thuộc tính phi hình học của công trình. Việc sử dụng định dạng IFC không chỉ giúp tăng khả năng trao đổi và tương thích giữa các phần mềm BIM khác nhau, mà còn tạo điều kiện thuận lợi cho việc tích hợp mô hình vào các hệ thống GIS như ArcGIS [14]. Điều này hỗ trợ hiệu quả trong quản lý hạ tầng theo không gian địa lý và các ứng dụng phân tích không gian mở rộng.

3.3. Tích hợp mô hình BIM vào nền tảng GIS

Việc chuyển đổi và tích hợp mô hình BIM vào hệ thống GIS là bước quan trọng nhằm kết nối dữ liệu thông tin địa lý. Thông qua định dạng chuẩn như IFC, mô hình có thể được nhập vào các phần mềm GIS để phục vụ công tác phân tích, trực quan hóa và quản lý không gian hiệu quả hơn. Quá trình này giúp mở rộng ứng dụng của BIM từ giai đoạn thiết kế và xây dựng sang lĩnh vực quản lý đô thị, hạ tầng và quy hoạch không gian thông minh. Quá trình tích hợp mô hình BIM vào nền tảng trực quan GIS được thể hiện qua Hình 4.



Hình 4. Quy trình chuyển đổi và tích hợp BIM – GIS.

Quy trình tích hợp mô hình BIM vào hệ thống GIS được triển khai trong môi trường ArcGIS Pro, bắt đầu bằng việc tạo Local Scene – không gian hiển thị 3D cho phép trực quan hóa mô hình trên nền địa lý thực. Hệ tọa độ cho Local Scene cần được thiết lập chuẩn xác để đảm bảo mô hình BIM được định vị đúng trong không gian. Các tệp mô hình định dạng IFC sau đó được nhập vào ArcGIS Pro dưới dạng các lớp dữ liệu (layers), và mỗi lớp cần được cấu hình lại hệ tọa độ không gian theo hệ quy chiếu của dự án. Tiếp theo, tiến hành kiểm tra độ khớp giữa mô hình và các dữ liệu nền như ảnh trực giao, bản đồ địa hình hoặc hệ thống GCP; nếu phát hiện sai lệch về vị trí, hướng hoặc tỷ lệ, cần rà soát lại dữ liệu gốc từ Revit, file tọa độ từ Civil 3D hoặc bước hiệu chỉnh GCP. Khi mô hình đã khớp đúng với vị trí địa lý thực tế, hệ thống GIS cho phép thực hiện các thao tác phân lớp, gán thuộc tính và

truy vấn thông tin không gian, qua đó khai thác toàn diện dữ liệu hình học và phi hình học từ mô hình BIM (Bảng 1 và 2). Việc tích hợp này hỗ trợ hiệu quả cho công tác giám sát hiện trạng công trình, lập kế hoạch bảo trì, phân tích tác động không gian và phát triển các ứng dụng quản lý hạ tầng đô thị thông minh.

Bảng 1. Các phân lớp được thể hiện trong mô hình.

PHÂN LỚP CÁC CẤU KIỆN	
Tên cấu kiện Revit	Tên cấu kiện
Biển phân làn đường: Family2 2	Biển chỉ đường
Floor: Generic 300mm	Lớp áo đường
Last_Divider_Sign: Concrete_Base_Sign	Dải phân cách cứng cuối
Railing: CrossWalk - 3000x400x1000	Vạch nét đứt 3000x400x1000
Railing: CrossWalk - 6000x400x1000	Vạch nét đứt 6000x400x1000
Railing: Curb - 300x120	Bó vỉa và vỉa hè
Railing: DashedLine - 200x1000x5000	Vạch nét đứt 200x1000x5000
Railing: DashedLine - 200x2000x8000	Vạch nét đứt 200x2000x8000
Railing: DashedLine - 200x3000x12000	Vạch nét đứt 200x3000x12000
Railing: Road Divider - 800mm (No Rail)	Dải phân cách cứng không rào
Railing: Road Divider - 1350mm	Dải phân cách cứng có rào
Railing: SolidLine - 400	Vạch nét liền 400mm
RoadName_Sign: RoadName_Sign	Biển tên đường
Street_Light: 2 lights - Type 1	Đèn đường 2 bóng - Loại 1
Street_Light: 2 lights - Type 2	Đèn đường 2 bóng - Loại 2
Traffic_Double_Sign: Type 1	Biển báo đôi: Giao đường không ưu tiên & Đường đi bộ
Traffic_Double_Sign: Type 2	Biển báo đôi: Giao đường không ưu tiên & Tải trọng
Traffic_Light: L	Đèn giao thông
Traffic_Single_Sign: Type 1	Biển đường đi bộ
Traffic_Single_Sign: Type 2	Biển giao đường không ưu tiên
Traffic_Single_Sign: Type 3	Biển cấm & Biển tải trọng

Bảng 2. Thuộc tính của cấu kiện

THỐNG KÊ ĐÈN ĐƯỜNG, ĐÈN GIAO THÔNG					
Loại đèn	ID	X	Y	Hiện Trạng	Tình trạng sửa chữa
Đèn giao thông	786685	611995,7	1204306	Hoạt động bình thường	
Đèn giao thông	791058	612359,9	1204420	Hoạt động bình thường	
Đèn giao thông	791102	612825,3	1204541	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	781416	612046,8	1204321	Hoạt động bình thường	

THỐNG KÊ ĐÈN ĐƯỜNG, ĐÈN GIAO THÔNG					
Loại đèn	ID	X	Y	Hiện Trạng	Tình trạng sửa chữa
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	781451	612081,7	1204338	Cháy 1 bóng	Đã tu sửa
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	781477	612118	1204355	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	781519	612154,5	1204370	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	781575	612191,6	1204383	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	781600	612229,5	1204396	Cháy 1 bóng	Đã tu sửa
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	781636	612267,1	1204407	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	781670	612314,8	1204419	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	781728	612355,8	1204430	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	781768	612395,8	1204441	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	781789	612437,2	1204452	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	781821	612476,7	1204462	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	781867	612517,5	1204473	Cháy 2 bóng	Đã tu sửa
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	781916	612558,4	1204484	Cháy 1 bóng	Đã tu sửa
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	781958	612599,5	1204495	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	781997	612640,4	1204506	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	782018	612681,9	1204517	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	782068	612722,9	1204528	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	782101	612769,3	1204540	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	782144	612807,3	1204549	Cháy 1 bóng	Chưa tu sửa
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	782188	612852,9	1204557	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 1	782226	612876,9	1204559	Cháy 2 bóng	Chưa tu sửa
Đèn đường 2 bóng - Loại 2	782308	611986,9	1204313	Hoạt động bình thường	
Đèn đường 2 bóng - Loại 2	791164	612830,1	1204541	Hoạt động bình thường	

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Tạo lập đám mây điểm từ ảnh UAV

Trong quá trình tái dựng mô hình 3D từ ảnh UAV, phần mềm Agisoft Metashape được sử dụng với các cấu hình tối ưu nhằm đảm bảo hiệu quả xử lý và độ chính xác không gian. Tại bước Align Photos, thuật toán căn chỉnh ảnh được thiết lập ở mức Medium để cân bằng giữa thời gian tính toán và độ chính xác đầu ra. Các tùy chọn Generic Preselection và Reference Preselection (chế độ Source) được kích hoạt để phần mềm ưu tiên so khớp những ảnh có xác suất chồng lấp cao, qua đó giảm thiểu số phép so khớp không cần thiết. Tham số Key Point Limit được thiết lập ở mức 40.000 để tăng khả năng phát hiện đặc trưng ảnh, trong khi Tie Point Limit được giới hạn ở 4.000 nhằm kiểm soát nhiễu và dung lượng tính toán [16].

Sau khi căn chỉnh sơ bộ, các điểm kiểm soát mặt đất (Ground Control Points – GCP) được tích hợp để hiệu chỉnh mô hình về hệ quy chiếu thực địa. Các GCP được đo bằng thiết bị GNSS RTK [9], có tọa độ X, Y, Z theo hệ VN-2000 và được nhập thủ công vào phần mềm. Việc đánh dấu vị trí GCP trên ít nhất 3–6 ảnh là cần thiết để phần mềm xác định chính xác vị trí không gian của từng điểm thông qua phép tính giao hội. Kết quả hiệu chỉnh được đánh giá bằng sai số dư (residual errors) và chỉ số RMSE, trong đó RMSE càng thấp chứng tỏ sai lệch không gian giữa mô hình và thực địa càng nhỏ (Bảng 3 và 4). Kết quả thực nghiệm cho thấy sai số đối với các điểm khống chế và điểm kiểm tra đều nằm trong khoảng 2–11 cm, đạt yêu cầu độ chính xác đối với bài toán mô hình hóa hạ tầng theo TCVN 13576:2022 [11].

Sản phẩm tiếp theo là kết quả tái dựng mô hình hình học chi tiết bằng thuật toán Multiview Stereo (MVS), cho phép nội suy bề mặt 3D dựa trên việc khớp các điểm ảnh tương đồng giữa các ảnh chụp từ nhiều góc nhìn. Kết quả là một đám mây điểm dày đặc, phản ánh chính xác hình học của đối tượng khảo sát. Tùy thuộc vào cài đặt và chất lượng ảnh, người dùng có thể lựa chọn các mức độ chi tiết khác nhau khi tạo đám mây điểm với yêu cầu xử lý và bộ nhớ tăng dần. Ở đây mô hình đám mây điểm được xử lý ở mức độ trung bình (Medium). Kết quả cho thấy đám mây điểm thu được từ xử lý ảnh UAV thông qua phần mềm Agisoft Metashape gồm 173.319.050 điểm (Hình 5). Đám mây điểm cho chất lượng tốt cho thấy độ mịn và tính liên tục cao, đặc biệt tại khu vực mặt đường. Khi quan sát toàn cảnh và cả ở mức phóng to chi tiết, mặt đường được tái dựng khá rõ ràng, phản ánh đúng hình học bề mặt nhờ độ phủ ảnh tốt và cấu hình bay hợp lý. Đối với các đối tượng phụ trợ như lan can, biển báo hay vạch kẻ đường, đám mây điểm vẫn thể hiện được hình khối tổng thể và đặc điểm nhận dạng cơ bản, tuy nhiên mức độ chi tiết còn hạn chế (Hình 5b). Nguyên nhân có thể do chiều cao bay, góc chụp chưa tối ưu hoặc ảnh hưởng từ bóng đổ và vật cản khiến các vùng này thiếu điểm hoặc không rõ nét như mong đợi.

Một vấn đề đáng chú ý là tại các khu vực mặt đường bị hư hỏng như ổ gà, lún, hoặc bong tróc, đám mây điểm thể hiện sự thiếu điểm hoặc xuất hiện điểm phân tán bất thường (điểm nhiễu). Hiện tượng này gây khó khăn trong việc tái dựng chính xác cao độ và biên dạng thực tế của các khiếm khuyết mặt đường. Do đặc thù các vùng biến dạng có

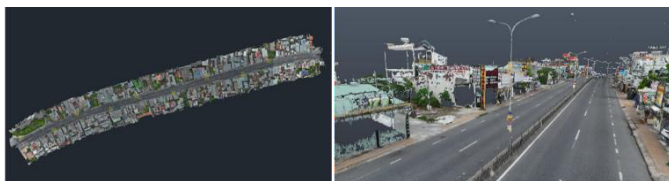
thể gây mất thông tin hoặc điểm ảnh bị "trôi" trong quá trình dựng mô hình 3D, đây là một hạn chế quan trọng cần được khắc phục nếu mục tiêu là phân tích kỹ các hư hỏng mặt đường theo chiều sâu và hình thái 3D. Ngoài ra, trong đám mây điểm vẫn tồn tại một số điểm nhiễu lơ lửng trên không, không bám sát bề mặt thực. Các điểm này thường xuất hiện do nhiễu ảnh hoặc lỗi trong quá trình khớp điểm ảnh khi xử lý SfM – MVS. Việc lọc bỏ các điểm này bằng phần mềm xử lý như CloudCompare là cần thiết để làm sạch dữ liệu và đảm bảo tính chính xác trong các bước dựng mô hình BIM tiếp theo.

Bảng 3. Sai số điểm khống chế ảnh ngoại nghiệp

Điểm	Sai số X (cm)	Sai số Y (cm)	Sai số Z (cm)	RMSE (cm)
801	-1,78949	-1,90178	0,13367	2,61475
201	-2,17686	-1,07182	0,354927	2,45224
401	-2,03397	-0,818633	0,618797	2,27818
601	-0,716459	0,787869	-0,918076	1,40603
RMSE	1,77421	1,23049	0,585153	2,23704

Bảng 4. Sai số các điểm kiểm tra

Điểm	Sai số X (cm)	Sai số Y (cm)	Sai số Z (cm)	RMSE (cm)
901	1,12304	4,83556	4,58697	6,759
701	-3,89905	0,719948	-0,674433	4,02191
501	2,03988	-9,75269	-0,0921093	9,96417
301	-4,70868	-5,77746	5,95331	9,53901
101	0,523546	-7,531	-8,47417	11,3491

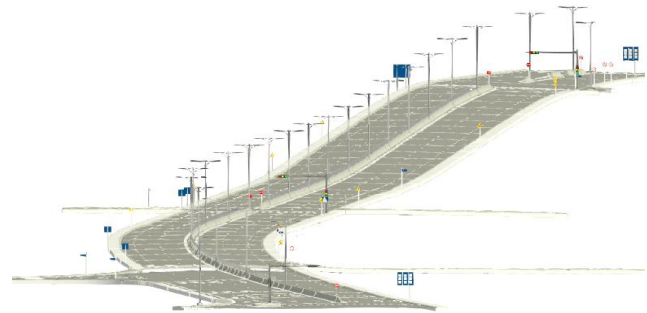


(a) Mô hình đám mây điểm tổng thể (b) Mô hình đám mây điểm khi được phóng to

Hình 5. Mô hình đám mây điểm được tạo lập từ ảnh UAV

4.2. Tạo lập mô hình BIM từ dữ liệu đám mây điểm

Theo quy trình đề xuất quá trình mô hình hóa BIM từ đám mây điểm được triển khai trên nền tảng phần mềm Autodesk, với bước đầu tiên là thiết lập hệ tọa độ VN-2000 trong môi trường Civil 3D nhằm đảm bảo toàn bộ dữ liệu không gian được định vị chính xác theo hệ quy chiếu quốc gia. Hệ tọa độ này đóng vai trò nền tảng cho việc đồng bộ hóa giữa mô hình đám mây điểm, các điểm kiểm soát mặt đất (GCP), và các thành phần mô hình hóa trong các bước tiếp theo. Sau khi thiết lập, dữ liệu đám mây điểm và tập hợp GCP được nhập đồng thời vào Civil 3D để kiểm tra trực quan mức độ khớp không gian. Kết quả cho thấy sự trùng khớp cao giữa tọa độ các điểm GCP và mô hình điểm, khẳng định tính chính xác của quá trình hiệu chỉnh ban đầu.



(a) Tổng quan mô hình



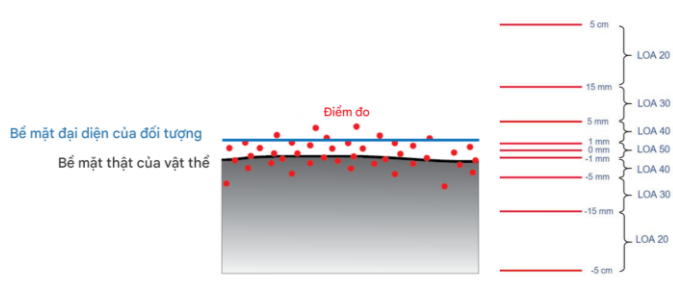
(b) Chi tiết mô hình tại nút giao

Hình 6. Mô hình 3D của tuyến Quốc lộ 1K.

Mô hình BIM được xây dựng từ dữ liệu đám mây điểm sau khảo sát bằng UAV cho thấy khả năng phản ánh tương đối chính xác hình học tổng thể của các thành phần hạ tầng giao thông. Các đối tượng chính như mặt đường, lan can, dải phân cách, cọc tiêu và biển báo được dựng lại theo vị trí và kích thước gần sát với hiện trạng ngoài thực địa. Đặc biệt, mặt đường được mô hình hóa mịn và phẳng nhờ dữ liệu point cloud có mật độ cao và chất lượng ổn định tại khu vực này (**Hình 6**). Tuy nhiên, độ chi tiết của mô hình vẫn còn phụ thuộc vào chất lượng và mật độ của đám mây điểm đầu vào. Tại các vị trí có hình học phức tạp hoặc thiếu dữ liệu (như các ổ gà, mép vỉa, biển báo nhỏ hoặc thiết bị phụ trợ nằm gần cây cối), mô hình hóa chi tiết gặp khó khăn. Các thành phần này đôi khi chỉ được mô phỏng ở mức khối dạng đơn giản thay vì thể hiện đầy đủ chi tiết cấu trúc. Tổng thể, mô hình BIM được tạo lập đạt mức độ chi tiết phù hợp với mục tiêu quản lý hiện trạng tuyến đường, đáp ứng yêu cầu phân tích, tra cứu và tích hợp với các hệ thống khác. Tuy nhiên, để nâng cao hiệu quả mô hình trong các ứng dụng nâng cao như mô phỏng bảo trì, phân tích va chạm hay kiểm tra chính xác các hư hỏng nhỏ, cần cải thiện hơn nữa ở bước thu thập và xử lý dữ liệu gốc – đặc biệt tại các vị trí dễ bị nhiễu hoặc thiếu điểm.

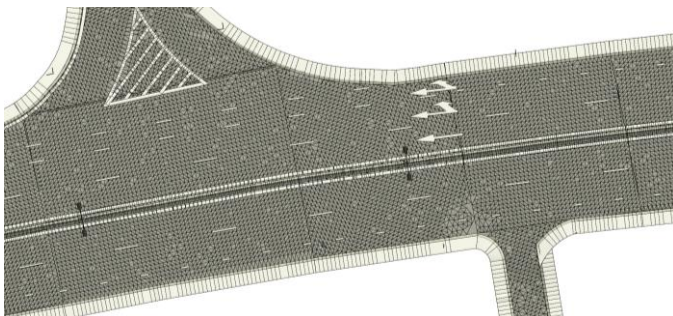
Theo hướng dẫn của Hiệp hội Hoa Kỳ về Tài liệu Xây dựng hiện trạng (United States Institute of Building Documentation – USIBD). Khi làm việc với dữ liệu từ đám mây điểm, cần phân biệt rõ giữa độ chính xác dữ liệu đo thực tế (Measured Accuracy) và độ chính xác của sản phẩm sau xử lý (Represented Accuracy). Độ chính xác dữ liệu đo thực tế là mức độ sai số của dữ liệu đo thực tế, không phụ thuộc vào công nghệ sử dụng, phản ánh độ chính xác tại thời điểm thu thập. Trong khi

đó, Độ chính xác của sản phẩm sau xử lý thể hiện độ chính xác của mô hình 3D, bản vẽ CAD hoặc BIM, và chịu ảnh hưởng bởi quá trình dựng hình, đơn giản hóa hình học, và thao tác kỹ thuật [17]. Tùy mục đích sử dụng, người thực hiện có thể lựa chọn tiêu chí đánh giá phù hợp.

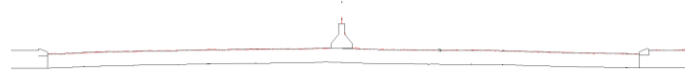


Hình 7. Các mức độ chính xác của LOA.

Trong nghiên cứu này, độ chính xác mô hình được đánh giá theo tiêu chuẩn Level of Accuracy (LOA) do USIBD ban hành. LOA là thang đo dùng để xác định sai số hình học cho phép giữa mô hình số và dữ liệu thực tế từ point cloud. LOA không chỉ phản ánh mức độ chi tiết mà còn xác định giới hạn sai số chấp nhận được, từ đó giúp đánh giá độ tin cậy của mô hình và hỗ trợ các quyết định kỹ thuật ở các giai đoạn như thiết kế, thi công, giám sát và bảo trì công trình [17]. Mô hình mặt đường trong nghiên cứu được dựng từ dữ liệu đám mây điểm với yêu cầu đạt LOA 40, nhằm đảm bảo nhận diện được các đặc điểm bề mặt như vết lồi lõm hay độ dốc địa phương (Hình 7). Dữ liệu được xử lý bằng cách chia lưới không gian với ô vuông kích thước 500 mm; các điểm nằm ngoài khoảng 500–1000 mm so với mặt bằng chung trong mỗi ô sẽ bị loại bỏ nhằm giảm nhiễu từ vật thể ngoài mặt đường (Hình 8a). Mặt phẳng đại diện trong mỗi ô được xác định theo giá trị trung bình của các điểm còn lại, với độ tin cậy phụ thuộc vào mức độ hội tụ – tức mức độ phân bố tập trung và đồng đều của các điểm. Để duy trì tính liên tục, độ nghiêng giữa các ô lưới liền kề được giới hạn trong 20 mm. Tại một mặt cắt đường cắt ngang từ mô hình, phép đo thử cho thấy chênh lệch giữa điểm cao nhất và thấp nhất trong vùng khoảng 13 mm, trong khi mức chênh lệch trung bình của mặt đường chỉ vào khoảng 5–6 mm (Hình 8b-c). Mức sai lệch này vượt nhẹ ngưỡng kỳ vọng của LOA 40 (2–5 mm), cho thấy có thể tồn tại nhiễu cục bộ, bề mặt thật sự gồ ghề, hoặc phân bố point cloud chưa đồng đều. Tuy nhiên, nếu hiện tượng này chỉ mang tính cục bộ và không phổ biến trên toàn bộ mô hình, thì mức độ chính xác tổng thể vẫn được đánh giá là đạt yêu cầu.



(a) Mô hình các ô lưới được chia ra



(b) Mặt cắt ngang của tuyến đường

(c) Chênh lệch giữa điểm cao nhất và thấp nhất tại một mặt cắt được xác định từ các điểm trong đám mây điểm, hiển thị dưới dạng các chấm màu đỏ.

Hình 8. Độ chính xác của mô hình.

Hiệu quả của mô hình BIM được thể hiện rõ qua khả năng tổ chức, truy xuất và cập nhật thông tin. Nhờ tích hợp thuộc tính cho từng đối tượng trong Revit như là tên cấu kiện, ID, tọa độ, hiện trạng cũng như là tình trạng sửa chữa. Mô hình không chỉ đóng vai trò minh họa 3D mà còn trở thành cơ sở dữ liệu phục vụ quản lý tài sản hạ tầng. Quá trình kết xuất sang định dạng IFC và tích hợp vào GIS được thực hiện thuận lợi nhờ hệ tọa độ đã được thiết lập chuẩn hóa từ bước đầu.

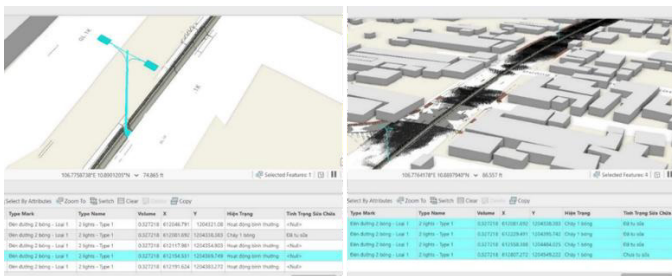
4.3. Tích hợp và trực quan trong GIS

Trong ArcGIS Pro, tiến hành tạo một Local Scene để trực quan hóa mô hình trong không gian ba chiều. Hệ tọa độ của Local Scene được thiết lập đồng bộ theo VN2000 múi chiều 105°45', nhằm đảm bảo tính chính xác khi tích hợp dữ liệu không gian. Tập IFC được tải vào Local Scene trong ArcGIS Pro, ArcGIS Pro sẽ tự động nhận diện các đối tượng trong mô hình IFC và hiển thị chúng dưới dạng 3D với đầy đủ thông tin thuộc tính. Trong một số trường hợp, hệ tọa độ của IFC chưa khớp với scene cần gán hệ tọa độ phù hợp hoặc sử dụng lại các điểm GCP để dịch chuyển và xoay mô hình đúng vị trí địa lý. Sau khi nhập mô hình, cần kiểm tra lại vị trí địa lý bằng cách so sánh với các lớp dữ liệu nền như bản đồ vệ tinh, bản đồ địa hình, hoặc lớp GCP (Hình 9). Nếu mô hình bị lệch, có thể nguyên nhân do sai sót trong bước gán tọa độ trong Revit hoặc thông số sai khi xuất IFC. Trong trường hợp này, mô hình đã khớp đúng với tọa độ thực địa, không cần hiệu chỉnh thêm.

Khi mô hình chắc chắn đã được định vị đúng, có thể thực hiện truy vấn thuộc tính, tích hợp thêm các lớp dữ liệu GIS khác, hoặc triển khai các phân tích không gian phục vụ giám sát, vận hành và quản lý hạ tầng. Mô hình sau khi tích hợp có thể được sử dụng để trực quan hóa 3D, lập kế hoạch nâng cấp hạ tầng hoặc hỗ trợ bảo trì định kỳ. Các đối tượng trong mô hình IFC đều giữ nguyên thông tin thuộc tính được gán từ mô hình Revit. Khi chọn vào một đối tượng cụ thể, cửa sổ thông tin sẽ hiển thị các trường dữ liệu như tên đối tượng, tọa độ, hiện trạng, tiến độ,...(Hình 10a). Điều này cho phép dễ dàng thực hiện truy vấn theo điều kiện, chẳng hạn như lọc ra các cây đèn đường bị hỏng 1 bóng (Hình 10b).



Hình 9. Mô hình BIM hiển thị trong nền GIS.



(a) Chọn đối tượng bất kỳ từ dữ liệu không gian (b) Truy vấn thuộc tính đèn bị cháy 1 bóng

Hình 10. Khả năng hiển thị và truy vấn mô hình BIM trên nền GIS.

Kết quả cho thấy mô hình 3D sau khi chuyển đổi và tích hợp vào môi trường GIS được hiển thị đầy đủ, đúng vị trí địa lý và giữ lại thông tin hình học cơ bản (Hình 10). Việc sử dụng định dạng IFC kết hợp với hệ tọa độ thực tế đã hỗ trợ tốt quá trình định vị và quản lý không gian. Mô hình có thể được truy cập, quan sát ở nhiều góc độ khác nhau trong môi trường bản đồ số, cho phép khai thác thông tin trực quan và thuận tiện. Điều này khẳng định khả năng tích hợp cao của mô hình BIM vào hệ thống GIS, đồng thời mở ra tiềm năng trong ứng dụng quản lý hạ tầng, theo dõi hiện trạng và hỗ trợ ra quyết định trong các dự án quy hoạch.

5. Kết luận và định hướng phát triển

Nghiên cứu đã triển khai thành công quy trình xây dựng mô hình thông tin công trình (BIM) cho một tuyến đường giao thông trên cơ sở dữ liệu ảnh chụp từ thiết bị bay không người lái (UAV). Dữ liệu ảnh thu được được xử lý bằng phần mềm Agisoft Metashape, trong đó áp dụng kỹ thuật Structure from Motion (SfM) kết hợp với Multiview Stereo (MVS) nhằm tái dựng hình học và tạo ra mô hình đám mây điểm dày đặc, phản ánh chính xác bề mặt hiện trạng công trình. Quy trình tích hợp giữa UAV, BIM và GIS được đề xuất trong nghiên cứu không chỉ thể hiện tiềm năng ứng dụng của công nghệ số trong lĩnh vực hạ tầng mà còn cung cấp cơ sở kỹ thuật cho việc xây dựng mô hình hiện trạng chi tiết, hỗ trợ hiệu quả cho các giai đoạn thiết kế, kiểm tra và quản lý công trình. Mô hình đám mây điểm được tạo lập từ ảnh UAV đóng vai trò như một lớp dữ liệu không gian trực quan, giúp tái dựng các hạng mục như mặt đường, bó vỉa, biển báo và các công trình phụ

trợ theo đúng hiện trạng khảo sát. Mặc dù khâu tích hợp mô hình BIM vào hệ thống GIS hiện nay vẫn còn gặp một số hạn chế nhất định về mặt kỹ thuật, đặc biệt là khả năng tương thích định dạng và truy xuất dữ liệu giữa các nền tảng, kết quả thực nghiệm vẫn cho thấy tiềm năng rõ rệt của việc tổ chức, quản lý và truy vấn thông tin công trình theo không gian. Các chức năng như định vị, kiểm tra hiện trạng, phân lớp dữ liệu và phân tích sơ bộ trong môi trường GIS đã mở ra hướng tiếp cận mới cho hoạt động quản lý tài sản hạ tầng một cách hệ thống và trực quan hơn. Trong tương lai, hướng phát triển mở rộng được đề xuất là kết nối mô hình BIM-GIS với hệ thống quản lý hạ tầng thông minh (Smart Infrastructure), thông qua việc tích hợp dữ liệu cảm biến IoT được lắp đặt tại các vị trí trọng yếu như mặt đường, cầu, biển báo hay hệ thống chiếu sáng. Các cảm biến này có thể truyền dữ liệu thời gian thực về các thông số quan trọng như nhiệt độ, độ rung, lưu lượng giao thông, độ ẩm hoặc trạng thái vật liệu [18]. Khi được tích hợp vào môi trường mô hình 3D, các dữ liệu này sẽ giúp nâng cao khả năng theo dõi, phân tích và ra quyết định nhanh chóng trong công tác vận hành, bảo trì và quản lý tài sản hạ tầng một cách thông minh và hiệu quả hơn.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG-HCM) trong khuôn khổ Đề tài mã số: DS2025-20-10. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này

Tài liệu tham khảo

- [1]. Nguyễn Xuân Cường Phó Tổng cục trưởng Tổng cục Đường bộ, “Một số vấn đề về tăng cường công tác quản lý và bảo trì hệ thống quốc lộ ở Việt Nam”, Tạp chí Tổ chức Nhà nước và Lao động, 2025.
- [2]. The MathWorks, “What is Structure from Motion?”, [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/what-is-structure-from-motion.html>.
- [3]. Gun Park, Jae Hyuk Lee, Hyunchul Yoon, “Semantic Structure from Motion for Railroad Bridges Using Deep Learning”, Artificial Intelligence Technologies for Structural Health Monitoring, 2021.
- [4]. Fiveable, “Computer Vision and Image Processing”. [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://library.fiveable.me/computer-vision-and-image-processing/unit-8/structure-motion/study-guide/c9WUU0fy3Nrat4kf>.
- [5]. DJI Enterprise, “DJI Mavic 3 Enterprise Series”, [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://enterprise.dji.com/mavic-3-enterprise>.
- [6]. DJI Enterprise, “Specs | DJI Mavic 3 Enterprise”, 31/12/2024. [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://enterprise.dji.com/mavic-3-enterprise/specs>.
- [7]. Dominion Drones, “DJI Mavic 3E with Care Basic (Mavic 3 Enterprise)”. [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://www.dominiondrones.com/products/dji-mavic-3-enterprise-care-basic>.
- [8]. David Romito, “Using Agisoft Metashape: Workflow”. [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://guides.lib.unc.edu/c.php?g=716413>.
- [9]. Hammer Missions, “What are Ground Control Points? Drone Mapping”, 21/03/2023. [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://www.hammermissions.com/post/ground-control-points>.

- [10]. JOUAV, “A Comprehensive Guide to Using Ground Control Points for Drone Surveying”. [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://www.jouav.com/blog/ground-control-points.html>.
- [11]. TCVN 13576:2022: Hệ thống dữ liệu ảnh hàng không - Tăng dày không chế ảnh.
- [12]. Yasutaka Furukawa, Carlos Hernández, “Multi-View Stereo: A Tutorial”, Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, tập 9, số 1-2, trang số 1–148, 2013.
- [13]. Autodesk Support, “Using GIS Coordinates between Civil 3D and Revit”, 29/01/2023. [Trực tuyến]. Địa chỉ: <https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/tsarticles/ts/1gAgsohids2B7yTgThYjZR.html>.
- [14]. Autodesk Inc, “Revit IFC Manual 2.0”, 23/09/2021.
- [15]. Thông tư số 07/2021/TT-BTNMT ngày 30 tháng 6 năm 2021 của Bộ Tài nguyên và Môi trường.
- [16]. Katherine Shervais, James Dietrich, Ian Lauer, “Structure from Motion (SfM) Photogrammetry Data Exploration and Processing Manual with Agisoft MetaShape Pro”, University NAVSTAR Consortium, 10/11/2019.
- [17]. The U.S. Institute of Building Documentation (USIBD), Level of Accuracy (LOA) Specification Version 3.1, 01/2025.
- [18]. T. Jothi Saravanan, Mayank Mishra, Abhishek Dilip Aherwar & Paulo B. Lourenço, “Internet of things (IoT)-based structural health monitoring of laboratory-scale civil engineering structures”, Innovative Infrastructure Solutions, tập 9, số 110, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01413-9>