Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN, 2026, 20 (5V): 205–218

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH THÔNG TIN HOÀN CÔNG CÔNG TRÌNH HẠ TẦNG GIAO THÔNG TỪ DỮ LIỆU HỆ THỐNG MOBILE MAPPING

Lương Ngọc Dũng[a,*], Đinh Văn Ngọc[a], Nguyễn Xuân Tình[a],
Ngân Văn Trung[a], Đặng Duy Nhật Minh[a]

[a]*Khoa Cầu Đường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 05/8/2026, Sửa xong 02/10/2026, Chấp nhận đăng 28/10/2026

Tóm tắt

Trong bối cảnh chuyển đổi số ngành xây dựng và giao thông, việc xây dựng mô hình thông tin hoàn công (As-built BIM) từ dữ liệu khảo sát số đang trở thành xu hướng tất yếu. Nghiên cứu này đề xuất quy trình Scan-to-BIM gồm 4 giai đoạn nhằm xây dựng As-built BIM cho công trình hạ tầng giao thông từ dữ liệu đám mây điểm (point cloud) thu thập bằng hệ thống Mobile Mapping AU20 tích hợp công nghệ LiDAR. Thử nghiệm được thực hiện trên dữ liệu point cloud của một đoạn trên tuyến cao tốc Cao Bồ – Mai Sơn. Sau quá trình tiền xử lý đạt mật độ trung bình trên 2000 điểm/m^2 và độ chính xác kiểm tra thực địa đạt RMSE mặt phẳng 0,058 m, độ cao 0,030 m. Quy trình xử lý dữ liệu được thực hiện tích hợp trong môi trường Autodesk ReCap Pro, Autodesk Civil 3D và phát triển As-built BIM trong Autodesk Revit đạt mức độ chi tiết LOD 300 với dung sai ≤ 15 mm. Bên cạnh kết quả As-built BIM, công cụ Vehicle Tracking trong Civil 3D đã mô phỏng động vệt quét của xe tải thiết kế SU-12 (tốc độ x8), giúp nhận diện trực quan các điểm tiệm cận nguy cơ tại đoạn cong bán kính nhỏ. Nghiên cứu đóng góp một quy trình Scan-to-BIM hoàn chỉnh, khả thi trong điều kiện thực tế tại Việt Nam và mở ra định hướng tích hợp BIM - GIS trong quản lý tài sản hạ tầng giao thông.

Từ khoá: đám mây điểm; hệ thống quét di động; Scan-to-BIM; mô hình thông tin hoàn công; tích hợp BIM–GIS.

BUILDING AS-BUILT BIM FOR TRANSPORT INFRASTRUCTURE USING MOBILE MAPPING DATA

Abstract

In the context of digital transformation in construction and transportation, developing As-built Building Information Models (As-built BIM) from digital survey data has become essential. This study proposes a four-stage Scan-to-BIM workflow to construct As-built BIM for transport infrastructure using point cloud data collected by the Mobile Mapping AU20 system integrated with LiDAR technology. Experimental validation was conducted on a section of the Cao Bo – Mai Son expressway. The preprocessed point cloud achieved an average density exceeding 2000 points/m^2 with field-verified spatial accuracy reaching an RMSE of 0.058 m horizontally and 0.030 m vertically. The data processing workflow was implemented across Autodesk ReCap Pro and Autodesk Civil 3D, culminating in an As-built BIM model in Autodesk Revit at Level of Development LOD 300 with geometric control tolerance ≤ 15 mm. The results demonstrate that the As-built BIM accurately reproduces infrastructure geometry. Furthermore, dynamic simulation using Civil 3D Vehicle Tracking for the SU-12 design truck (x8 speed factor) effectively identified spatial conflict risks at small-radius curve sections. This study contributes a comprehensive Scan-to-BIM workflow suitable for practical conditions in Vietnam and establishes a foundation for 3D BIM–GIS integration in transport asset management.

Keywords: point cloud; Mobile Mapping; Scan-to-BIM; As-built BIM; BIM–GIS integration.

https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(5V)-15 © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, quá trình chuyển đổi số trong lĩnh vực xây dựng và hạ tầng giao thông đang diễn ra mạnh mẽ trên toàn cầu. Việc số hóa dữ liệu công trình không chỉ nâng cao hiệu quả thiết kế và thi công mà còn đóng vai trò then chốt trong quản lý, vận hành và bảo trì công trình trong suốt vòng đời của chúng [1, 2]. Trong bối cảnh đó, mô hình thông tin công trình (Building Information

*Tác giả đại diện. *Địa chỉ e-mail:* dungln@huce.edu.vn (Dũng, L. N.)

Modeling – BIM) đã khẳng định vị thế là công cụ cốt lõi, cho phép tích hợp thông tin hình học và dữ liệu thuộc tính của công trình trong một môi trường số thống nhất, hỗ trợ hiệu quả cho việc ra quyết định ở mọi giai đoạn vòng đời công trình [3].

Đối với các công trình hạ tầng giao thông đang vận hành, việc xây dựng As-built BIM gặp nhiều khó khăn do thiếu dữ liệu hình học chính xác sau khi công trình đưa vào khai thác [4]. Các phương pháp khảo sát truyền thống như đo đạc bằng máy toàn đạc điện tử hoặc đo vẽ thủ công đòi hỏi nhiều thời gian, nhân lực và thường không thu thập được đầy đủ thông tin hình học ba chiều của toàn tuyến [5]. Sự phát triển của công nghệ quét laser 3D và hệ thống Mobile Mapping đã tạo ra bước đột phá trong việc thu thập dữ liệu không gian với mật độ cao dưới dạng đám mây điểm (point cloud), cung cấp thông tin hình học chi tiết và liên tục của toàn bộ tuyến giao thông chỉ trong một lần khảo sát [6, 7]. Dữ liệu point cloud được xem là nguồn thông tin đầu vào lý tưởng cho quy trình Scan-to-BIM nhằm tái tạo mô hình ba chiều của hiện trạng công trình. Thông qua việc xử lý, phân loại và chuyển đổi dữ liệu point cloud thành các đối tượng hình học trong môi trường BIM, các thành phần hạ tầng như bề mặt đường, bó vỉa, lan can, dải phân cách và các công trình phụ trợ có thể được mô hình hóa một cách chính xác và trực quan [8]. Bên cạnh đó, việc tích hợp mô hình BIM với hệ thống thông tin địa lý (Geographic Information System - GIS) mở ra khả năng quản lý và chia sẻ dữ liệu hạ tầng trong môi trường số, nâng cao hiệu quả quản lý tài sản hạ tầng giao thông [9, 10].

Mặc dù tại Việt Nam đã có một số ứng dụng thiết bị quét laser mặt đất tĩnh (Terrestrial Laser Scanning - TLS) để kiểm tra độ võng kết cấu cầu tại một số vị trí cục bộ [11], nhưng ứng dụng công nghệ Mobile Mapping và quy trình Scan-to-BIM cho hạ tầng giao thông trên toàn tuyến còn rất hạn chế. Tuy độ chính xác và khả năng ứng dụng của hệ thống Mobile Mapping AU20 trên tuyến cao tốc cũng đã được khẳng định trong nghiên cứu trước đó của nhóm tác giả [12], nhưng quy trình chi tiết để chuyển đổi dữ liệu này thành As-built BIM (Scan-to-BIM) đáp ứng mức độ chi tiết LOD 300 vẫn chưa được chuẩn hóa. Do đó, nghiên cứu này tập trung đề xuất quy trình Scan-to-BIM tích hợp gồm 4 giai đoạn, được thực nghiệm trên đoạn tuyến dài 1,2 km thuộc dự án cao tốc Cao Bồ – Mai Sơn. Nghiên cứu đã sử dụng dữ liệu đám mây điểm từ hệ thống Mobile Mapping AU20 và triển khai trên các phần mềm của hệ sinh thái Autodesk, bao gồm ReCap Pro (tiền xử lý và phân loại), Autodesk Civil 3D (dựng bề mặt TIN và Corridor), Autodesk Revit (phát triển mô hình As-built BIM LOD 300) và môi trường ArcGIS Pro (tích hợp BIM–GIS). Kết quả nghiên cứu bên cạnh việc tối ưu hóa quy trình xây dựng mô hình As-built BIM, còn tiến hành khai thác ứng dụng phân tích vệt bánh xe (nhờ công cụ Vehicle Tracking) để kiểm tra an toàn hình học tuyến.

2. Phương pháp nghiên cứu và quy trình thực hiện

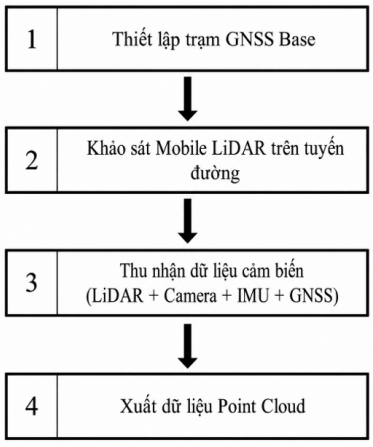
2.1. Khu vực nghiên cứu và quy trình thu thập dữ liệu

Khu vực nghiên cứu được triển khai thực nghiệm trên một đoạn tuyến dài 1,2 km thuộc dự án đường cao tốc Cao Bồ – Mai Sơn (Hình 1(a)). Đây là công trình giao thông cấp I, quy mô 4 làn xe, bề mặt bê tông nhựa có độ bằng phẳng cao, hai bên hành lang thông thoáng và ít bị che khuất tán cây. Đặc điểm hình học và điều kiện khai thác của đoạn tuyến rất đặc trưng cho các dự án đường cao tốc đang vận hành tại Việt Nam, tạo điều kiện thuận lợi cho việc kiểm chứng quy trình Scan-to-BIM.

Nghiên cứu sử dụng hệ thống Mobile Mapping AU20 với các thông số cơ bản là cảm biến quét laser (Light Detection and Ranging-LiDAR) 360° có tốc độ quét 2.000.000 điểm/giây, đầu thu tín hiệu vệ tinh (Global Navigation Satellite System-GNSS) có tần số 5 Hz và bộ đo lường quán tính (Inertial Measurement Unit-IMU) có tần số 600 Hz gắn trên phương tiện chuyên dụng để thu thập dữ liệu. Các thông số kỹ thuật và cấu tạo chi tiết của hệ thống đa cảm biến này đã được mô tả và đánh giá chi tiết ở công bố khác của nhóm tác giả [12]. Quy trình cơ bản của việc thu thập dữ liệu được mô tả trong Hình 1(b). Từ dữ liệu point cloud, trong phạm vi bài báo này, tập trung vào việc mô hình



(a) Đoạn tuyến cao tốc Cao Bồ - Mai Sơn



(b) Quy trình thu thập dữ liệu bằng hệ thống Mobile Mapping AU20

Hình 1. Đối tượng và quy trình thu thập dữ liệu

hóa chính xác các đối tượng hạ tầng như mặt đường, lan can và hệ thống chiếu sáng. Theo đó thiết bị được lắp đặt trên phương tiện ô tô thông qua bộ giá đỡ chuyên dụng (car-kit), cho phép ghi nhận liên tục dữ liệu không gian ba chiều của tuyến đường trong điều kiện lưu thông bình thường. Hình 2(a) thể hiện cận cảnh ví dụ về một đầu thu Mobile Mapping cùng các cảm biến tích hợp, trong khi Hình 2(b) và Hình 2(c) minh họa hệ thống đã lắp đặt hoàn chỉnh trên phương tiện khảo sát khi thu thập dữ liệu thực địa trên tuyến.

Trước khi khảo sát, một trạm GNSS base được thiết lập tại điểm khống chế có tọa độ đã biết trong hệ tọa độ quốc gia VN-2000, múi chiếu 3°, kinh tuyến trục địa phương 105° để phục vụ xử lý dữ liệu theo phương pháp định vị động xử lý sau PPK (Post-Processed Kinematic). Phương pháp PPK cho phép cải thiện đáng kể độ chính xác định vị so với xử lý đơn điểm, đặc biệt trong các khu đô thị có nhiều vật cản tín hiệu GNSS [13].

Quá trình thu thập dữ liệu được thực hiện bằng cách cho phương tiện di chuyển dọc theo tuyến đường với tốc độ ổn định 60 km/h. Hệ thống tiến hành quét toàn bộ tuyến theo cả hai chiều để đảm bảo thu thập đầy đủ dữ liệu hình học của các đối tượng hai bên đường, đồng thời tăng mức độ chồng phủ của đám mây điểm. Để đánh giá độ chính xác, một hệ thống điểm kiểm tra (check points) được bố trí đều dọc tuyến và đo bằng phương pháp định vị vệ tinh đo động thời gian thực (GNSS-RTK) kết hợp thủy chuẩn hình học.

2.2. Tiền xử lý dữ liệu point cloud

Toàn bộ quy trình đề xuất từ khâu thu thập dữ liệu đám mây điểm thô đến khi phát triển mô hình As-built BIM LOD 300 và triển khai các ứng dụng chuyên sâu được tổng hợp trong Sơ đồ Quy trình xử lý dữ liệu (Hình 3).

a. Đánh giá chất lượng dữ liệu point cloud ban đầu

Sau khi hoàn thành thu thập dữ liệu, dữ liệu point cloud (Hình 4) được nhập vào phần mềm Autodesk ReCap để kiểm tra và đánh giá chất lượng theo các tiêu chí: (1) phạm vi bao phủ không gian; (2) mật độ điểm (điểm/m^2); (3) độ liên tục của đám mây điểm; và (4) độ chính xác định vị dựa trên kết quả xử lý quỹ đạo PPK. Kết quả kiểm tra cho thấy dữ liệu point cloud đạt mật độ điểm trung bình trên 2000 điểm/m^2 trên bề mặt đường, phạm vi bao phủ đầy đủ khu vực khảo sát với độ liên tục cao giữa các lần quét.



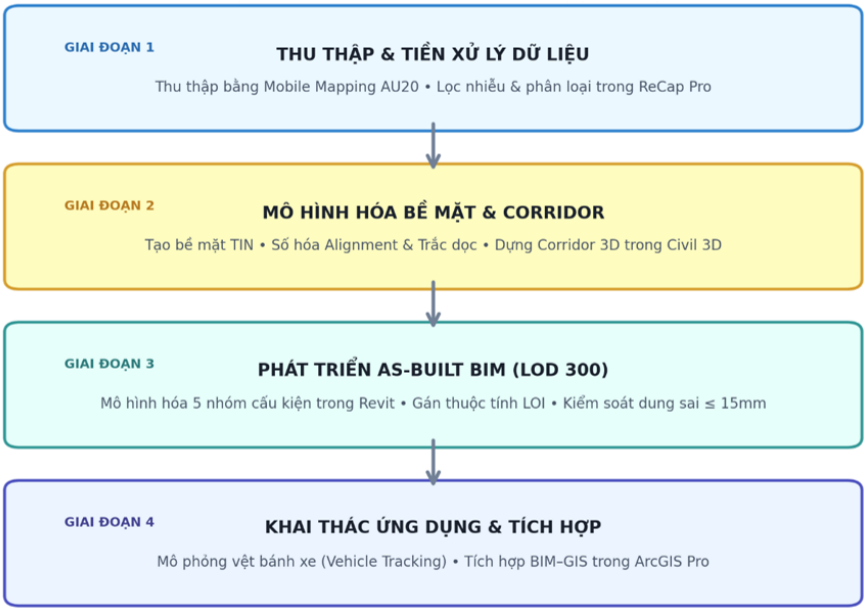
(a) Cận cảnh đầu thu và các cảm biến tích hợp



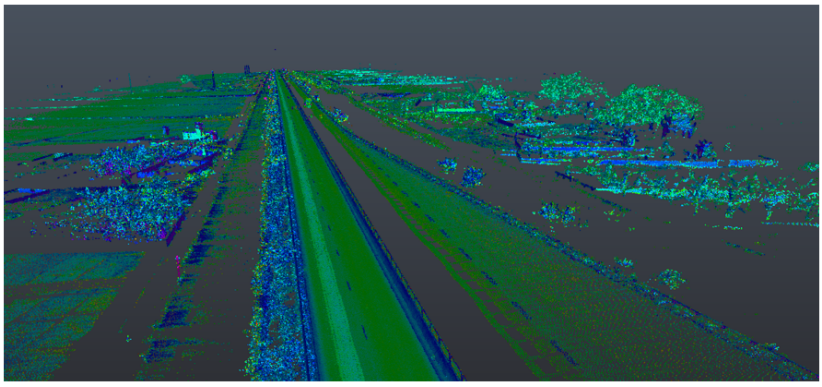


(b), (c) Hệ thống lắp đặt trên phương tiện trong quá trình khảo sát thực địa

Hình 2. Ví dụ về hệ thống Mobile Mapping gắn trên phương tiện khảo sát thu thập dữ liệu hạ tầng giao thông



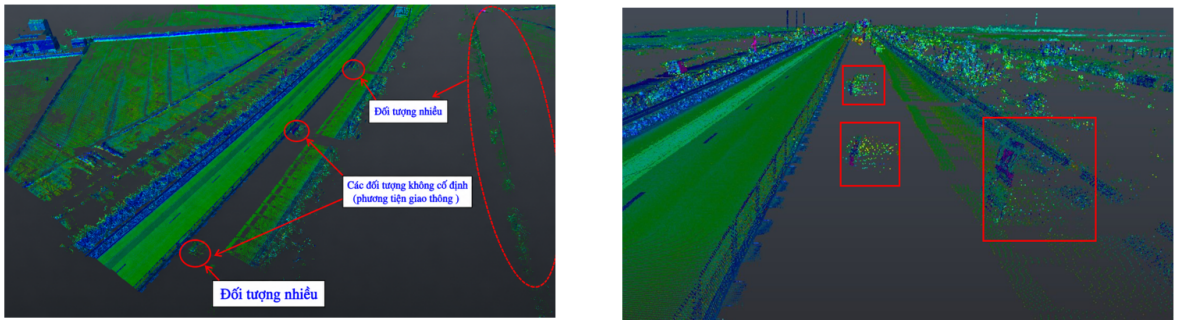
Hình 3. Quy trình tích hợp Scan-to-BIM trong mô hình hóa và khai thác dữ liệu hạ tầng giao thông



Hình 4. Dữ liệu đám mây điểm tổng thể của tuyến đường khảo sát hiển thị trong Autodesk ReCap

b. Lọc nhiễu và làm sạch dữ liệu point cloud

Dữ liệu point cloud thu thập từ hệ thống Mobile Mapping thường chứa các điểm nhiễu phát sinh do phản xạ không ổn định của tia laser từ các bề mặt như tán lá cây, phương tiện giao thông di chuyển hoặc các vật thể tạm thời. Trong nghiên cứu này, công cụ Limit Box trong Autodesk ReCap Pro được sử dụng để xác định phạm vi vùng nghiên cứu, sau đó áp dụng bộ lọc thống kê (bằng phần mềm CloudCompare) để loại bỏ các điểm có sai lệch lớn so với lân cận. Quá trình này giúp loại bỏ khoảng 3,2% tổng số điểm nhiễu, cải thiện đáng kể chất lượng tập dữ liệu. Hình 5(a) thể hiện toàn cảnh dữ liệu point cloud với các loại đối tượng nhiễu trong phạm vi nghiên cứu đã giới hạn, trong khi Hình 5(b) trình bày cận cảnh hình ảnh của các dữ liệu nhiễu xuất hiện do các phương tiện di động trên tuyến gây ra.



(a) Toàn cảnh đối tượng nhiễu trên tuyến

(b) Cận cảnh chi tiết đối tượng nhiễu trên đám mây điểm

Hình 5. Dữ liệu point cloud sau khi lọc nhiễu và giới hạn phạm vi nghiên cứu

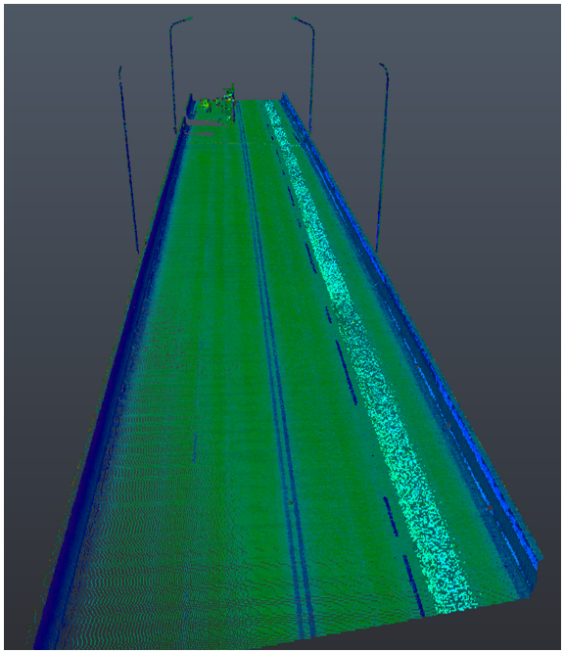
c. Phân loại và trích xuất đối tượng từ dữ liệu point cloud

Dữ liệu point cloud sau khi làm sạch được phân loại thành các lớp đối tượng hạ tầng giao thông phục vụ trực tiếp cho bước dựng As-built BIM. Trong nghiên cứu này, công tác phân loại cũng được thực hiện theo phương pháp phân loại và gán nhãn trực quan trong môi trường Autodesk ReCap Pro.

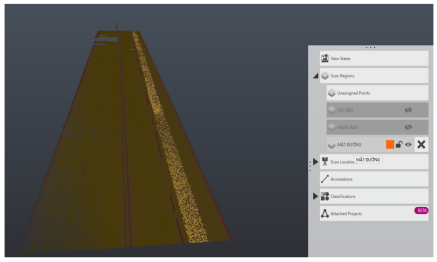
Thông qua việc kết hợp các đặc trưng thuộc tính của đám mây điểm như cao độ tương đối, màu sắc thực, cường độ phản xạ laser và sử dụng linh hoạt các công cụ khoanh vùng, các đối tượng trên tuyến được bóc tách thủ công thành các lớp riêng biệt, bao gồm (1) bề mặt đường và vỉa hè, (2) lan can và rào chắn an toàn và (3) hệ thống đèn chiếu sáng.

Phương pháp phân loại trực quan trên ReCap Pro cho phép kiểm soát chặt chẽ ranh giới hình học của từng đối tượng, loại bỏ hoàn toàn hiện tượng nhiễu hoặc nhầm lẫn giữa các lớp cận kề, qua đó tạo

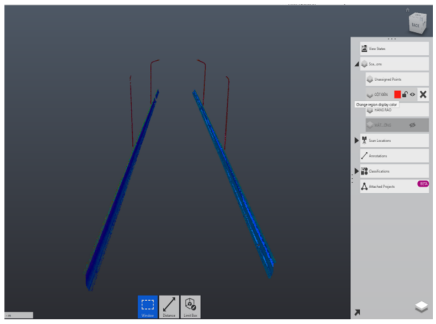
lập tập dữ liệu đầu vào có độ tin cậy cao và cấu trúc chuẩn xác cho bước dựng As-built BIM. Hình 6(a) minh họa tổng thể dữ liệu đám mây điểm trước khi tách lớp, trong khi Hình 6(b) và Hình 6(c) thể hiện chi tiết các lớp đối tượng hạ tầng sau khi phân loại.



(a) Dữ liệu đám mây điểm trước khi tách lớp



(b) Đối tượng mặt đường (màu nâu)



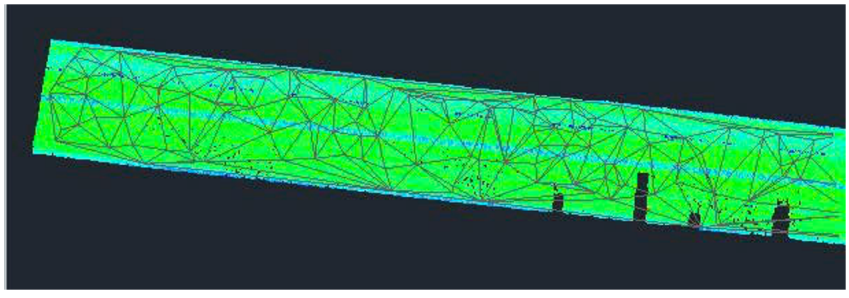
(c) Đối tượng lớp lan can (màu xanh dương) và đối tượng cột đèn (màu đỏ)

Hình 6. Kết quả phân loại các đối tượng hạ tầng giao thông từ dữ liệu point cloud (màu sắc biểu thị các lớp phân loại khác nhau)

2.3. Xây dựng mô hình bề mặt và mô hình Corridor trong Civil 3D

a. Xây dựng mô hình bề mặt TIN

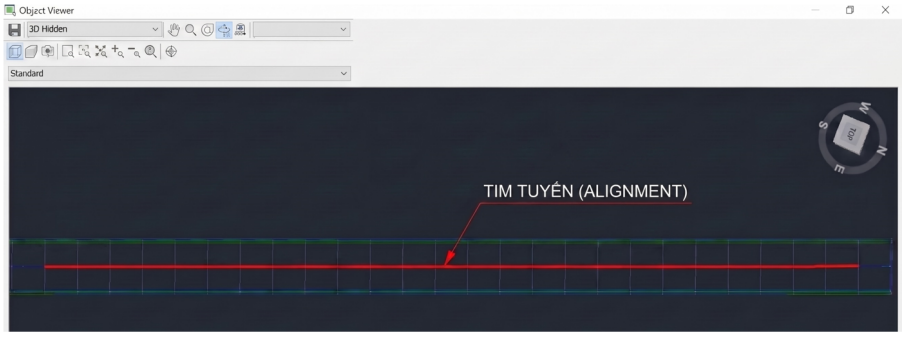
Từ lớp điểm bề mặt đường sau khi phân loại, mô hình bề mặt dạng TIN (Triangulated Irregular Network) được xây dựng trong Autodesk Civil 3D. Mô hình TIN liên kết các điểm point cloud thành lưới tam giác không đều, tạo ra bề mặt liên tục phản ánh chính xác địa hình tuyến đường. Để kiểm soát chất lượng, bộ lọc tam giác bị biến dạng (elongated triangles) được áp dụng với ngưỡng tỷ lệ cạnh tối đa là 1:20, nhằm tránh nội suy sai lệch tại các vùng thưa điểm (Hình 7).



Hình 7. Mô hình bề mặt địa hình (TIN Surface) được xây dựng từ dữ liệu point cloud trong Autodesk Civil 3D

b. Xác định Alignment (tim tuyến) và trắc dọc

Trên nền mô hình bề mặt TIN, tim tuyến đường được xác định theo vạch sơn tim đường nhận diện từ dữ liệu point cloud, sau đó chuyển đổi thành đối tượng Alignment trong Civil 3D. Alignment được xây dựng từ các đoạn thẳng và đường cong phẳng, đảm bảo tính liên tục và phù hợp với hình học thực tế của tuyến. Trên cơ sở Alignment, trắc dọc hiện trạng được xây dựng bằng cách trích xuất cao độ từ mô hình bề mặt TIN dọc theo tim tuyến, thể hiện sự biến thiên cao độ và xác định các điểm đặc trưng trên tuyến như điểm đổi dốc và dốc dọc lớn nhất. Hình 8(a) thể hiện Alignment (tim tuyến) được xác định từ dữ liệu point cloud, trong khi Hình 8(b) trình bày trắc dọc hiện trạng tương ứng của tuyến đường.



(a) Alignment (bình đồ tuyến)

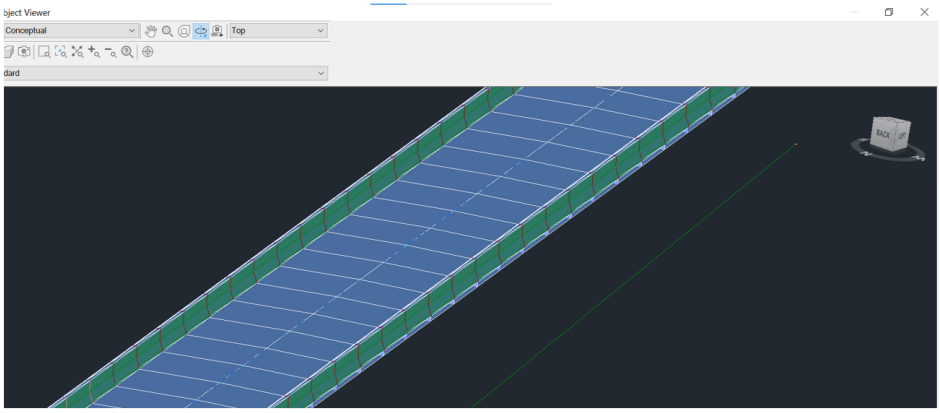


(b) Trắc dọc hiện trạng

Hình 8. Alignment (tim tuyến) và trắc dọc hiện trạng của tuyến đường được xây dựng trong Civil 3D

c. Mặt cắt ngang và mô hình Corridor

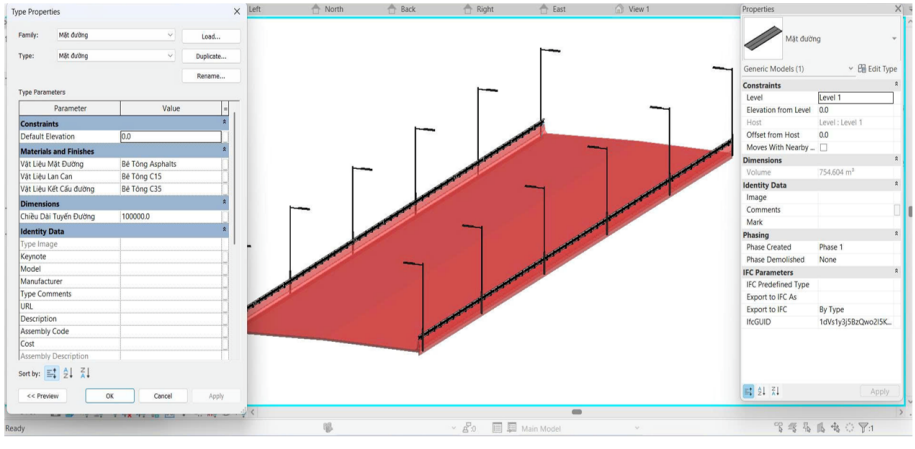
Hệ thống mặt cắt ngang được bố trí tại khoảng cách đều 10 m dọc theo Alignment. Tại mỗi mặt cắt, biên dạng ngang được trích xuất từ mô hình bề mặt TIN, thể hiện bề rộng đường, siêu cao và đặc điểm hình học theo phương ngang làm cơ sở xây dựng mặt cắt ngang điển hình (Assembly). Trên cơ sở tích hợp Alignment, trắc dọc và Assembly, bằng công cụ Corridor trong Civil 3D tạo ra mô hình tuyến đường (Corridor) 3D liên tục và chính xác của toàn bộ tuyến đường hiện trạng (Hình 9).



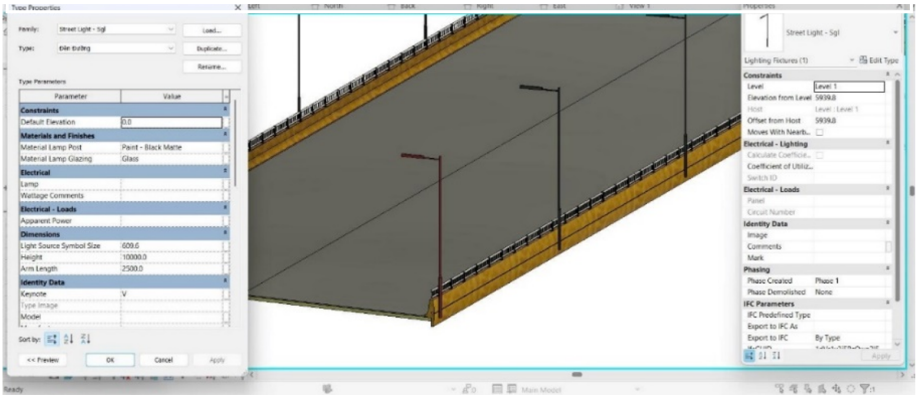
Hình 9. Mô hình Corridor 3D của tuyến đường được xây dựng từ Alignment, trắc dọc và Assembly trong Civil 3D

2.4. Xây dựng As-built BIM trong Autodesk Revit

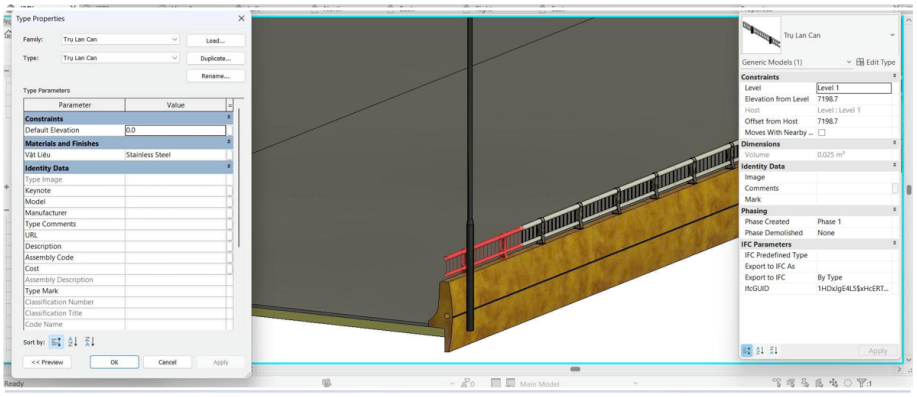
Mô hình Corridor được xây dựng trong Civil 3D tiếp tục được xuất sang định dạng trao đổi dữ liệu IFC (Industry Foundation Classes) và nhập vào môi trường Autodesk Revit nhằm phát triển thành As-built BIM, phục vụ công tác quản lý vòng đời công trình sau này. Trong Revit, các đối tượng hạ tầng được mô hình hóa theo mức độ phát triển LOD 300 (Level of Development 300), bao gồm 5 nhóm cấu kiện chính: (1) bề mặt mặt đường; (2) hệ thống bó vỉa, vỉa hè; (3) dải phân cách; (4) lan can và rào chắn an toàn; và (5) hệ thống thoát nước mặt. Mỗi cấu kiện được gán đầy đủ thông tin thuộc tính theo Bộ thông số BIM (BIM Parameter Set) chuẩn hóa, bao gồm mã định danh, loại vật liệu, kích thước hình học và trạng thái khai thác, tạo lập cơ sở dữ liệu phục vụ công tác quản lý, bảo trì và khai thác công trình. Độ tin cậy hình học của từng nhóm cấu kiện được kiểm soát chặt chẽ thông qua việc đối chiếu trực tiếp mô hình Revit với dữ liệu point cloud gốc, nhằm đảm bảo sai lệch không vượt quá dung sai cho phép của LOD 300 ($\leq$ 15 mm giữa mô hình so với đám mây điểm [14]). Hình 10 minh họa ví dụ về ba nhóm cấu kiện hạ tầng được tái hiện trong As-built BIM. Trong đó, Hình 10(a) thể hiện mô hình bề mặt đường thực tế. Hình 10(b) trình bày hệ thống đèn chiếu sáng được định vị chính xác theo tọa độ và cao độ ngoài hiện trường. Hình 10(c) thể hiện hệ thống lan can và rào chắn an toàn, phản ánh đúng hình dạng và vị trí tương quan với mặt đường. Việc trực quan hóa đồng thời các nhóm cấu kiện giúp kiểm chứng trực tiếp độ chính xác hình học của mô hình BIM so với hiện trạng.



(a) Mô hình mặt đường



(b) Mô hình hệ thống đèn đường



(c) Mô hình lan can

Hình 10. As-built BIM của một số hạng mục hạ tầng điển hình được xây dựng trong Autodesk Revit theo mức độ phát triển LOD 300

3. Kết quả và thảo luận

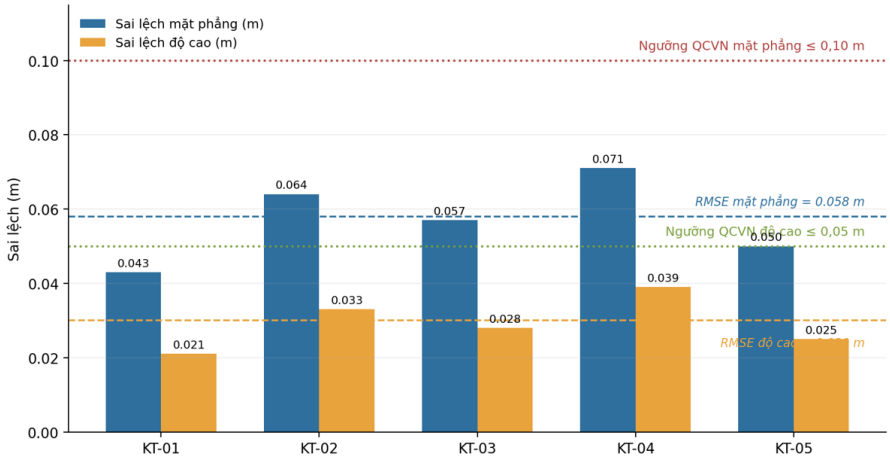
3.1. Đánh giá độ chính xác dữ liệu point cloud

Để kiểm tra độ chính xác của dữ liệu point cloud sau khi xử lý quỹ đạo PPK, nhóm nghiên cứu đã bố trí 5 điểm kiểm tra độc lập (KT-01 đến KT-05) rải đều trên phân đoạn tuyến thử nghiệm đại diện. Các điểm này nằm trên bề mặt đường nhựa thông thoáng, cách nhau trung bình khoảng 60 ÷ 65 m dọc theo tuyến và được đo tọa độ trực tiếp bằng phương pháp GNSS-RTK kết hợp thủy chuẩn hình học. Việc tính toán sai lệch tọa độ và độ cao được thực hiện bằng công cụ Distance computation của phần mềm CloudCompare. Công cụ này tính chênh lệch giữa hai bề mặt ở hai thành phần riêng biệt lần lượt là mặt phẳng (X, Y) và độ cao Z, kết quả so sánh được trình bày trong Bảng 1.

Kết quả cho thấy sai số vị trí mặt phẳng đạt RMSE = 0,058 m và sai số độ cao đạt RMSE = 0,030 m. Các giá trị này đáp ứng yêu cầu kỹ thuật theo Thông tư số 68/2015/TT-BTNMT (Hình 11). Kết quả này tương đương với các nghiên cứu quốc tế đã công bố về ứng dụng Mobile Mapping cho hạ tầng giao thông [12, 16, 17]. Mặc dù đánh giá này chỉ được thực hiện trên 5 điểm kiểm tra (KT-01 – KT-05) là một hạn chế của nghiên cứu về cỡ mẫu cục bộ cho đoạn tuyến 1,2 km. Tuy nhiên sự tương đồng với đánh giá trên tập mẫu diện rộng (1916 điểm kiểm tra) đã được công bố trước đó của nhóm tác giả [13]. Điều này cho thấy dữ liệu đám mây điểm thu được có độ tin cậy cao, tạo tiền đề vững chắc cho việc xây dựng mô hình hoàn công LOD 300 và các phân tích mô phỏng tiếp theo.

Bảng 1. Kết quả đánh giá độ chính xác dữ liệu point cloud so với điểm kiểm tra GNSS-RTK

Điểm kiểm tra	Tọa độ đo GNSS-RTK (m)	Tọa độ từ point cloud (m)	Sai lệch mặt phẳng (m)	Sai lệch độ cao (m)
KT-01	X: 2349821,415 Y: 585714,361	X: 2349821,394 Y: 585714,398	0,043	0,021
KT-02	X: 2349756,181 Y: 585698,153	X: 2349756,219 Y: 585698,101	0,064	0,033
KT-03	X: 2349694,065 Y: 585681,519	X: 2349694,034 Y: 585681,567	0,057	0,028
KT-04	X: 2349632,440 Y: 585665,800	X: 2349632,490 Y: 585665,750	0,071	0,039
KT-05	X: 2349570,911 Y: 585649,232	X: 2349570,882 Y: 585649,273	0,050	0,025
RMSE	—	—	0,058	0,030

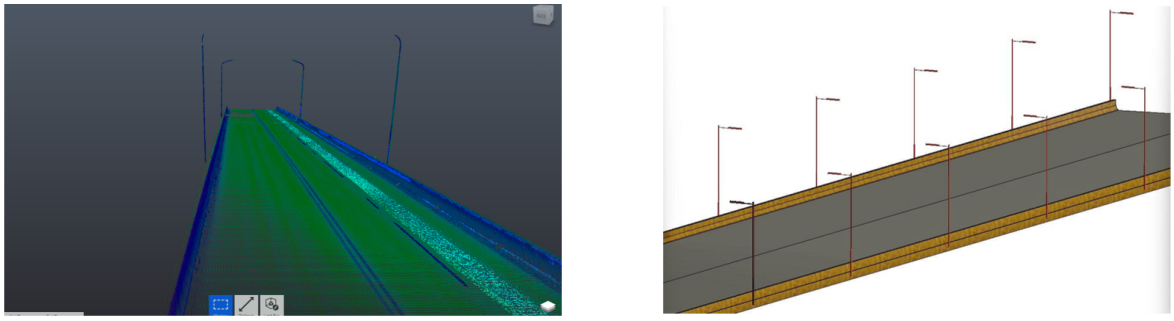


Hình 11. So sánh trực quan sai lệch mặt phẳng và sai lệch độ cao giữa dữ liệu point cloud và điểm kiểm tra GNSS-RTK tại các vị trí KT-01 đến KT-05, đối chiếu với ngưỡng sai số cho phép theo Thông tư số 68/2015/TT-BTNMT [15]

3.2. Kết quả As-built BIM và ứng dụng

Mô hình As-built BIM đã tái hiện được các thành phần hạ tầng của tuyến đường hiện trạng với độ chính xác hình học phù hợp yêu cầu quản lý. Mức độ phù hợp hình học giữa mô hình BIM và dữ liệu point cloud gốc được kiểm chứng trực quan thông qua so sánh phân đoạn mô hình 3D tại một vị trí đặc trưng trên tuyến, trong đó Hình 12(a) thể hiện phân đoạn 3D trích xuất từ dữ liệu point cloud gốc và Hình 12(b) trình bày phân đoạn mô hình 3D tương ứng của As-built BIM.

Một kết quả đáng chú ý là khả năng phát hiện các điểm bất thường hình học trên tuyến thông qua so sánh As-built BIM với tiêu chuẩn thiết kế ban đầu. Cụ thể, phân tích sai lệch (deviation analysis) cho thấy có 3 vị trí trên tuyến thực nghiệm có độ lún bề mặt đường vượt ngưỡng cảnh báo 3 cm, là thông tin có giá trị cao cho kế hoạch bảo trì định kỳ.

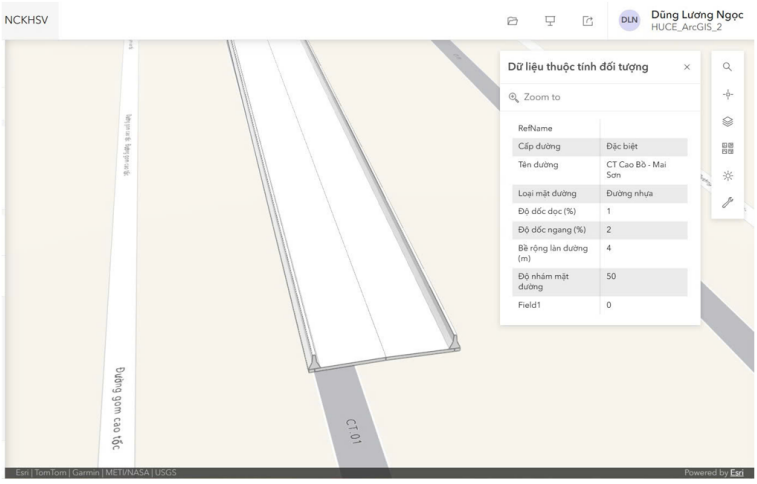


(a) Dữ liệu đám mây điểm point cloud thực đo (b) As-built BIM tương ứng

Hình 12. Đối soát hình học 3D tại một phân đoạn tuyến đặc trưng

3.3. Định hướng tích hợp BIM–GIS

As-built BIM được tích hợp trực tiếp sang nền tảng GIS (ArcGIS Pro) thông qua tiêu chuẩn Multipatch (Hình 13) tạo ra một môi trường quản lý dữ liệu hạ tầng thống nhất. Sự tích hợp BIM–GIS cho phép quản lý thuộc tính công trình ở quy mô mạng lưới, hỗ trợ phân tích không gian như lập kế hoạch bảo trì theo vùng, theo dõi suy giảm chất lượng mặt đường theo thời gian và tích hợp với hệ thống quản lý tài sản hạ tầng. Đây là định hướng quan trọng phù hợp với Đề án phát triển đô thị thông minh bền vững Việt Nam giai đoạn 2018–2025, định hướng 2030 [18].



Hình 13. Giao diện tích hợp dữ liệu BIM trong môi trường ArcGIS Pro hiển thị As-built BIM

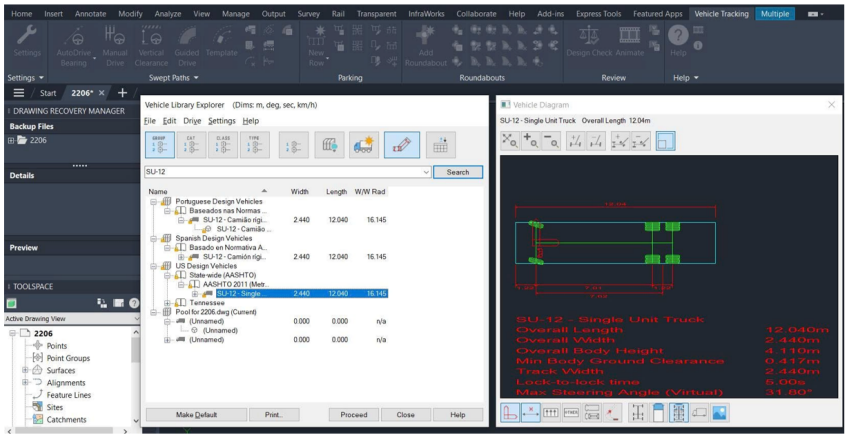
3.4. Ứng dụng mô hình Corridor trong kiểm tra vệt bánh xe

Để minh chứng cho giá trị sử dụng của mô hình As-built BIM trong việc đánh giá an toàn khai thác, mô hình Corridor còn được khai thác để đánh giá khả năng đáp ứng hình học của tuyến đường hiện trạng đối với các phương tiện thiết kế thông qua công cụ Vehicle Tracking tích hợp sẵn trong phần mềm Civil 3D. Đây là hướng khai thác nhằm minh chứng thêm giá trị thực tiễn của mô hình hiện trạng số hóa trong công tác quản lý, đánh giá an toàn hình học và khai thác hạ tầng giao thông.

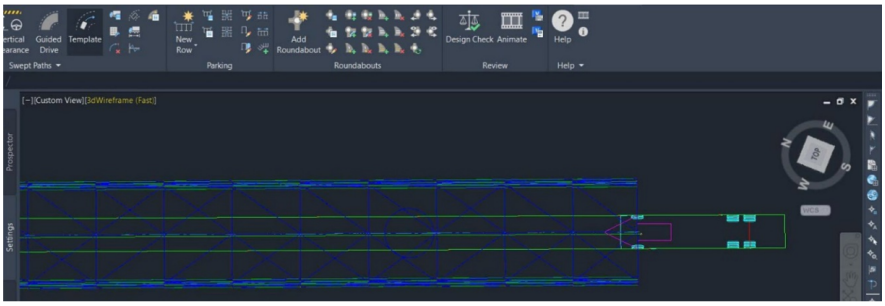
Quy trình phân tích vệt bánh xe được thực hiện qua bốn bước chính: Bước 1: Thiết lập mặt bằng tuyến từ mô hình Corridor hiện trạng; Bước 2: Lựa chọn phương tiện thiết kế (xe tải nặng SU-12) trong thư viện Civil 3D; Bước 3: Dựng đường dẫn và mô phỏng vệt quét (swept path) của xe dọc

tuyến, tập trung vào các đoạn cong bán kính nhỏ; Bước 4: Đối chiếu vệt quét với bề rộng làn xe và các chướng ngại vật cố định (bó vỉa, dải phân cách).

Nghiên cứu lựa chọn xe tải đơn (Single Unit Truck – SU-12) theo tiêu chuẩn AASHTO 2011 làm phương tiện thiết kế đại diện. Theo thông số truy xuất từ Vehicle Library Explorer (Hình 14), xe SU-12 có chiều dài tổng thể 12,04 m, chiều rộng 2,44 m, chiều cao thân xe 4,11 m, khoảng sáng gầm xe tối thiểu 0,417 m, thời gian đánh lái hết cỡ (lock-to-lock) 5,00 giây và góc đánh lái tối đa (ảo) 31,80°.



Hình 14. Thông số kỹ thuật xe thiết kế SU-12 – Single Unit Truck được truy xuất từ Vehicle Library Explorer trong Civil 3D

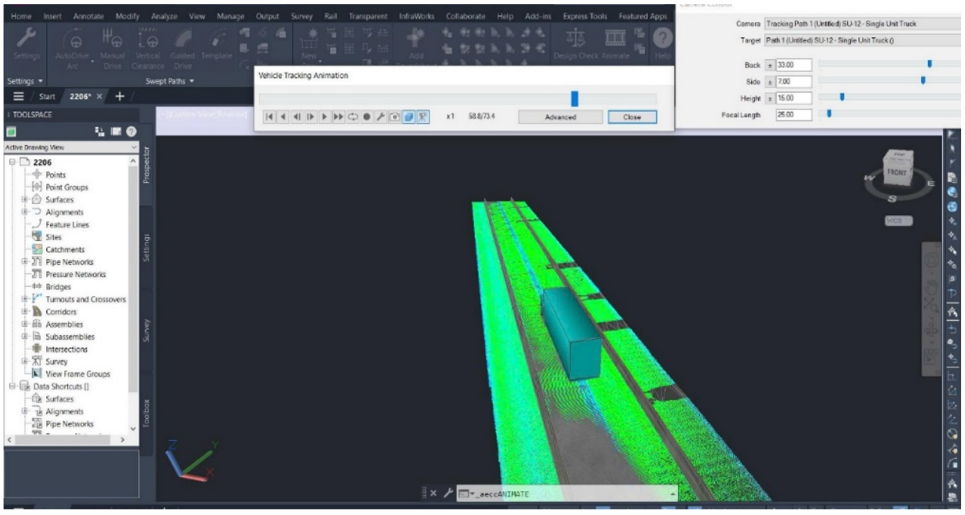


Hình 15. Vệt quét (swept path) của xe SU-12 được xây dựng trên mặt bằng tuyến đường hiện trạng bằng công cụ Vehicle Tracking

Trên nền mặt bằng tuyến đường được thiết lập từ các cấu kiện Subassembly (GenericPavementStructure, BasicLane, BasicShoulder, BasicCurb…) tương ứng với bề mặt, làn xe và lề đường của mô hình Corridor hiện trạng, công cụ Vehicle Tracking được sử dụng để dựng đường dẫn mô phỏng hành trình của xe SU-12 dọc theo tuyến (Hình 15). Vệt quét thể hiện phạm vi không gian mà toàn bộ thân xe và bánh xe chiếm dụng trong quá trình di chuyển, cho phép nhận diện trực quan các vị trí có nguy cơ xung đột với mép lề đường hoặc bó vỉa.

Kết quả mô phỏng động (Hình 16) cho phép quan sát trực quan quá trình di chuyển của xe SU-12 dọc theo toàn tuyến với hệ số tốc độ mô phỏng x8, qua đó xác định các vị trí cụ thể có nguy cơ xung đột giữa vệt bánh xe với bó vỉa hoặc lề đường. Kết quả mô phỏng cho thấy vệt quét của xe SU-12 nằm trong phạm vi làn xe và lề đường trên phần lớn chiều dài tuyến. Tuy nhiên, tại một số đoạn cong bán kính nhỏ, vệt bánh xe có xu hướng tiệm cận hoặc tràn nhẹ ra ngoài mép lề. Điều này chỉ ra nguy cơ tiềm ẩn về an toàn giao thông khi các phương tiện xe tải nặng lưu thông. Kết quả này đã minh họa khả

năng khai thác mô hình hiện trạng không chỉ phục vụ công tác quản lý tài sản mà còn hỗ trợ hiệu quả cho công tác đánh giá an toàn hình học và định hướng cải tạo hạ tầng giao thông.



Hình 16. Mô phỏng động quá trình di chuyển của xe SU-12 dọc theo mô hình Corridor hiện trạng

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã đề xuất và kiểm chứng thành công quy trình Scan-to-BIM tích hợp nhằm xây dựng As-built BIM cho công trình hạ tầng giao thông từ dữ liệu đám mây điểm thu thập bằng hệ thống Mobile Mapping AU20. Các kết quả chính đạt được bao gồm:

- Đề xuất và đóng góp một quy trình Scan-to-BIM 4 giai đoạn hoàn chỉnh, phù hợp với điều kiện thực tế tại Việt Nam, bao gồm: (i) Thu thập và tiền xử lý dữ liệu point cloud; (ii) Mô hình hóa bề mặt địa hình TIN và Corridor 3D; (iii) Phát triển mô hình As-built BIM LOD 300; và (iv) Khai thác ứng dụng chuyên sâu (Vehicle Tracking và tích hợp BIM–GIS).

- Dữ liệu point cloud thu thập trên phân đoạn 1,2 km tuyến cao tốc Cao Bồ – Mai Sơn sau tiền xử lý đạt mật độ trên 2000 điểm/m^2, đạt độ chính xác kiểm tra tại chỗ với RMSE mặt phẳng 0,058 m và độ cao 0,030 m, đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật đo đạc hiện hành và đảm bảo độ tin cậy làm dữ liệu đầu vào cho mô hình hóa BIM.

- Dựng thành công mô hình As-built BIM LOD 300 cho 5 nhóm đối tượng hạ tầng trong môi trường Autodesk Revit, kiểm soát dung sai sai lệch hình học so với đám mây điểm gốc trong ngưỡng ≤ 15 mm, đồng thời hỗ trợ phát hiện 3 vị trí lún bề mặt đường vượt ngưỡng 3 cm.

- Thực hiện thành công việc tích hợp As-built BIM sang môi trường GIS thông qua chuẩn trao đổi IFC và định dạng Multipatch, giữ lại trọn vẹn thông tin thuộc tính phục vụ quản lý tài sản ở quy mô mạng lưới.

- Mô hình hiện trạng số hóa thể hiện khả năng ứng dụng đa mục tiêu khi khai thác thành công công cụ Vehicle Tracking để mô phỏng động vệt quét của xe tải thiết kế SU-12 (tốc độ x8), giúp nhận diện trực quan các vị trí có nguy cơ xung đột không gian tại các đoạn cong bán kính nhỏ.

Hướng phát triển tiếp theo của nghiên cứu sẽ tập trung vào quá trình tự động hóa công tác phân loại đám mây điểm bằng các thuật toán học sâu (Deep Learning) và phát triển nền tảng quản lý BIM–GIS tích hợp phục vụ vận hành đường giao thông đô thị.

Tuyên bố về việc sử dụng trí tuệ nhân tạo tạo sinh và các công nghệ hỗ trợ bởi AI

Trong quá trình chuẩn bị bản thảo, các tác giả đã sử dụng công cụ Gemini để cải thiện ngôn ngữ hoặc khả năng diễn đạt của bản thảo. Tác giả đã kiểm tra và chỉnh sửa nội dung và chịu hoàn toàn

trách nhiệm về tính chính xác, tính nguyên bản và tính toàn vẹn của bài báo.

Tài liệu tham khảo

[1] Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., Teicholz, P. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers engineers, contractors and facility managers*. Third edition, Wiley.

[2] Thủ tướng Chính phủ (2023). *Quyết định 258/QĐ-TTg: Phê duyệt Lộ trình áp dụng Mô hình thông tin công trình (BIM) trong hoạt động xây dựng*.

[3] Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., Lytle, A. (2010). Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques. *Automation in Construction*, 19(7):829–843.

[4] Thư, N. A., Luân, H. T. (2025). Đánh giá thực trạng ứng dụng mô hình thông tin kỹ thuật hạ tầng (BIM) vào công tác quản lý vận hành công trình hạ tầng kỹ thuật giao thông. *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng - Bộ Xây dựng*, 15(03):169–175.

[5] Barber, D., Mills, J., Smith-Voysey, S. (2008). Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(1):128–141.

[6] Liang, X., Hyyppä, J., Kaartinen, H., Lehtomäki, M., Pyörälä, J., Pfeifer, N., Holopainen, M., Brolly, G., Pirotti, F., Hackenberg, J., Huang, H., Jo, H.-W., Katoh, M., Liu, L., Mokroš, M., Morel, J., Olofsson, K., Poveda-Lopez, J., Trochta, J., Wang, D., Wang, J., Xi, Z., Yang, B., Zheng, G., Kankare, V., Luoma, V., Yu, X., Chen, L., Vastaranta, M., Saarinen, N., Wang, Y. (2018). International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 144:137–179.

[7] Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J., Arias, P. (2013). Review of mobile mapping and surveying technologies. *Measurement*, 46(7):2127–2145.

[8] Bosché, F., Ahmed, M., Turkan, Y., Haas, C. T., Haas, R. (2015). The value of integrating Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM techniques for construction monitoring using laser scanning and BIM: The case of cylindrical MEP components. *Automation in Construction*, 49:201–213.

[9] El-Mekawy, M., Östman, A., Hijazi, I. (2012). A unified building model for 3D urban GIS. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 1(2):120–145.

[10] Tài, N. V., Thư, N. A. (2025). Ứng dụng mô hình thông tin BIM-GIS kết hợp công nghệ cao trong việc xây dựng quy trình hoàn công dự án cảng biển tại Việt Nam. *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng - Bộ Xây dựng*, 15(03):143–149.

[11] Chieu, V. D., Dung, L. N., Hung, C. V., Quang, V. N., Son, B. N. (2023). Study on the application of TLS for bridge deflection inspection in Vietnam. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) - HUCE*, 17(4):14–25.

[12] Dung, L. N. (2025). Evaluation of the applicability of geospatial data collected by mobile Lidar in transport infrastructure projects. *Inżynieria Mineralna*, 1(2):447–458.

[13] Vu, N. Q., Luong, N. D., Pham, T. T. H. (2026). Performance of mobile terrestrial LiDAR systems for data collection at high speeds on highways. *Spatial Information Research*, 34(5):48.

[14] Accessed: Sep. 17, 2026. *USIBD level of accuracy (LOA)*.

[15] Bộ Tài nguyên và Môi trường (2015). *Thông tư số 68/2015/TT-BTNMT: Quy định kỹ thuật đo đạc trực tiếp địa hình phục vụ lập bản đồ địa hình và cơ sở dữ liệu nền địa lý tỷ lệ 1:500, 1:1000, 1:2000, 1:5000*.

[16] Petrie, G., Toth, C. K. (2018). Terrestrial laser scanners. *Topographic Laser Ranging and Scanning*, CRC Press, 29–88.

[17] Glennie, C., Lichti, D. D. (2010). Static calibration and analysis of the Velodyne HDL-64E S2 for high accuracy mobile scanning. *Remote Sensing*, 2(6):1610–1624.

[18] Thủ tướng Chính phủ (2018). *Quyết định số 950/QĐ-TTg: Đề án phát triển đô thị thông minh bền vững Việt Nam giai đoạn 2018 - 2025 và định hướng đến năm 2030*.