

Đánh giá độ chính xác của mô hình đám mây điểm từ ảnh chụp bằng điện thoại di động phục vụ khảo sát hiện trạng công trình xây dựng

Liêu Lý Khả Minh^{1,2}, Hoàng Quốc Vương^{1,2}, 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

Đám mây điểm
Điện thoại thông minh
Trắc lượng ảnh

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá độ chính xác của mô hình đám mây điểm 3D tạo từ ảnh chụp bằng điện thoại thông minh, phục vụ khảo sát hiện trạng công trình xây dựng. Thực nghiệm được thực hiện tại tòa nhà A2, Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG Tp.HCM. Tổng cộng 77 ảnh chụp bằng điện thoại Xiaomi 12 có độ phân giải cao được xử lý bằng phần mềm Agisoft Metashape để tái tạo mô hình đám mây điểm, thu được hơn 81 triệu điểm. Mười điểm kiểm soát mặt đất (GCPs) được bố trí và đo tọa độ bằng máy toàn đạc điện tử. Năm trong số đó được sử dụng để hiệu chỉnh mô hình. Độ chính xác được đánh giá theo: (1) sai số vị trí các điểm GCPs và (2) sai số chiều dài 17 cạnh đo thực tế trên công trình. Sau khi nắn chỉnh mô hình với năm GCPs, mô hình được hiệu chỉnh về vị trí và tỷ lệ thực tế. Kết quả cho thấy sai số trung bình tại các điểm GCPs lần lượt là 0,0126 m theo phương X, 0,0108 m theo phương Y và 0,0151 m theo phương Z với sai số tổng hợp (RMSE) khoảng 2,3 cm. Sai số tuyệt đối chiều dài cạnh dao động từ 0,011 m đến 0,055 m, với giá trị RMSE cạnh là 0,036 m. Sai số tương đối dao động trong khoảng 0,9% đến 4,6 %. Nghiên cứu cho thấy phương pháp chụp ảnh bằng điện thoại kết hợp xử lý bằng phần mềm thương mại có thể đáp ứng yêu cầu độ chính xác trong khảo sát hiện trạng, đặc biệt phù hợp trong điều kiện thiếu thiết bị chuyên dụng, chi phí thấp và cần triển khai nhanh chóng.

KEYWORDS

Point Cloud
Smartphone,
Photogrammetry

ABSTRACT

This study evaluates the accuracy of a 3D point cloud generated from smartphone images for building condition surveys. The experiment was conducted on Building A2 at the main campus of Ho Chi Minh City University of Technology – VNU-HCM. A total of 77 high-resolution images captured with a Xiaomi 12 smartphone were processed using Agisoft Metashape software to reconstruct a dense point cloud, yielding over 81 million points. Ten ground control points (GCPs) were marked on the building surface and their coordinates measured using a total station. Five of these GCPs were used for model georeferencing. Accuracy was assessed based on: (1) the positional errors of the GCPs and (2) the dimensional errors of 17 building edges. After aligning the model using five GCPs, the point cloud was georeferenced and scaled to its real-world dimensions. The mean positional errors of the GCPs were 0.0126 m (X), 0.0108 m (Y), and 0.0151 m (Z), with an overall RMSE of approximately 2.3 cm. The absolute errors in edge length ranged from 0.011 m to 0.055 m, corresponding to relative errors between 0.9% and 4.6%. The findings indicate that smartphone photogrammetry combined with commercial software can achieve sufficient accuracy for as-built surveys, particularly in scenarios with limited access to specialized equipment, tight budgets, and the need for flexible deployment.

1. Giới thiệu chung

Trong bối cảnh công nghệ số phát triển mạnh mẽ như hiện nay, việc số hóa hình dạng và hiện trạng bề mặt của công trình trong không gian ba chiều (3D) đang ngày càng giữ vai trò then chốt trong nhiều lĩnh vực thực tiễn như xây dựng, bảo tồn di sản kiến trúc, quy hoạch đô thị và kiểm định hiện trạng kết cấu [1]. Trong các phương pháp số

hóa, mô hình đám mây điểm (point cloud) nổi bật như một sản phẩm trung gian quan trọng, có khả năng tái hiện chi tiết hình học và cấu trúc bề mặt của các đối tượng, đồng thời dễ dàng tích hợp vào các mô hình thông tin công trình (Building information Model-BIM) hoặc hệ thống thông tin địa lý (Geographic Information System-GIS) nhằm phục vụ công tác quản lý và đánh giá hiện trạng [2].

*Liên hệ tác giả: ptathu@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 24/05/2025, sửa xong ngày 12/06/2025, chấp nhận đăng ngày 13/06/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2025.1006>

Các phương pháp thu nhận dữ liệu trực tiếp như sử dụng máy quét laser mặt đất (Terrestrial Laser Scanning – TLS), máy toàn đạc điện tử (Total Station), hay các thiết bị chuyên dụng khác tuy mang lại độ chính xác cao và khả năng bao quát diện rộng, nhưng đồng thời lại đòi hỏi thiết bị đắt tiền, thời gian thi công dài, cũng như đội ngũ kỹ thuật có chuyên môn sâu [3]. Những rào cản này khiến các phương pháp đo đạc trực tiếp khó được ứng dụng phổ biến trong bối cảnh công trình quy mô vừa và nhỏ, hoặc trong các giai đoạn cần khảo sát nhanh như kiểm tra tiến độ thi công, hay khảo sát hiện trạng trước khi cải tạo.

Trong những năm gần đây, sự tiến bộ nhanh chóng về chất lượng máy ảnh trên điện thoại thông minh (smartphone), kết hợp với sự phát triển của các thuật toán xử lý ảnh như Structure-from-Motion (SfM) và Multi-View Stereo (MVS), đã mở ra một hướng tiếp cận tiềm năng trong việc tái tạo mô hình 3D từ ảnh chụp phổ thông [4-7]. Phương pháp này mang tính cách mạng khi cho phép thu thập dữ liệu hình học phục vụ khảo sát công trình mà không cần đến các thiết bị đo đạc chuyên dụng. Thêm vào đó, các phần mềm xử lý dữ liệu như Agisoft Metashape, PIX4D, 3DF Zephyr hoặc các nền tảng mã nguồn mở như Meshroom hiện đã trở nên thân thiện với người dùng và có thể vận hành hiệu quả trên máy tính cá nhân. Một số nghiên cứu gần đây đã bước đầu kiểm nghiệm tính khả thi của phương pháp này. Chẳng hạn, Sirmacek và Lindenbergh đã so sánh mô hình 3D từ ảnh smartphone với TLS trong khảo sát cấu kiện bê tông và ghi nhận sai số dưới 10 mm [8]. Tương tự, Costantino và cộng sự đã tái tạo thành công các chi tiết di sản kiến trúc với độ chính xác đến từng milimet [9]. Nghiên cứu của Musicco và cộng sự cũng chỉ ra rằng, khi đảm bảo điều kiện chiếu sáng tốt, chồng lắp ảnh hợp lý và quy trình xử lý chuẩn, kết quả từ thiết bị di động hoàn toàn có thể tin cậy – đặc biệt trong các khảo sát thực địa với ngân sách hạn chế [10]. Tuy nhiên, nghiên cứu chủ yếu đánh giá sự khác biệt của các đám mây điểm, và không sử dụng hệ tọa độ mặt đất hoặc điểm kiểm tra độc lập như GCPs để đánh giá độ chính xác vị trí và kích thước hình học của đối tượng.

Trong thực tế ngành xây dựng, đặc biệt đối với các công trình dân dụng, nhà xưởng hoặc công trình cải tạo, việc ứng dụng giải pháp số hóa 3D bằng ảnh chụp từ điện thoại thông minh vẫn còn khá khiêm tốn. Nhiều đơn vị thi công và quản lý vẫn dựa vào các phương pháp đo đạc thủ công như sử dụng toàn đạc, thước dây, thủy bình hoặc quan sát bằng mắt thường, vốn không đáp ứng yêu cầu về độ chi tiết hình học cần thiết để phân tích kỹ thuật, lập kế hoạch bảo trì hay phục vụ công tác nghiệm thu cần độ chi tiết cao. Hiện nay, các nghiên cứu định lượng cụ thể về độ chính xác, tính tin cậy và mức độ khả thi thực tế của phương pháp này khi áp dụng cho khảo sát bề mặt công trình xây dựng vẫn còn thiếu. Điều này tạo nên một khoảng trống nghiên cứu rõ rệt.

Từ đó, nghiên cứu này được thực hiện với mục tiêu đánh giá một cách định lượng và thực nghiệm độ chính xác của mô hình đám mây điểm tạo lập từ ảnh chụp bằng điện thoại thông minh, trong bối cảnh ứng dụng vào khảo sát hiện trạng công trình xây dựng. Cụ thể, nghiên cứu tập trung vào hai mục tiêu chính: (1) xây dựng một quy trình tiêu chuẩn để thu nhận ảnh từ điện thoại và tái tạo mô hình 3D bằng các phần mềm xử lý ảnh dựa trên thuật toán SfM và MVS; và (2)

đánh giá sai số hình học của mô hình đám mây điểm thu được bằng cách so sánh với dữ liệu tham chiếu từ kết quả đo của máy toàn đạc điện tử và thước dây. Kết quả của nghiên cứu được kỳ vọng sẽ cung cấp cơ sở thực nghiệm quan trọng cho việc ứng dụng các giải pháp chi phí thấp, linh hoạt và hiệu quả trong khảo sát công trình – đặc biệt trong những bối cảnh đòi hỏi tiến độ nhanh, ngân sách hạn chế và tính cơ động cao.



Hình 1. Tòa nhà A2 tại khuôn viên trường đại học Bách Khoa- ĐHQG Tp.HCM.

2. Thu thập dữ liệu

2.1. Khu vực thực nghiệm

Trong nghiên cứu này, nhóm tiến hành khảo sát tại tòa nhà A2 – Thư viện Trường Đại học Bách khoa- Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (Hình 1). Đây là công trình có kết cấu kiến trúc tương đối đơn giản, hình khối rõ ràng với nhiều mặt phẳng thẳng đứng, bao gồm hệ thống tường, dầm, cột bê tông và các cụm cửa kính bố trí đều đặn. Các đặc điểm này tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình chụp ảnh phục vụ tái tạo mô hình 3D, giúp nâng cao khả năng thu nhận dữ liệu đầy đủ và chính xác. Hình dạng hình học rõ ràng của tòa nhà góp phần đảm bảo tính liên mạch và độ chính xác cao của mô hình đám mây điểm. Bên cạnh đó, vị trí khảo sát được lựa chọn còn nhờ vào điều kiện thực địa thuận lợi, bao gồm không gian xung quanh thoáng đãng, cho phép tiếp cận đối tượng từ nhiều góc độ; ánh sáng tự nhiên ổn định trong suốt thời gian khảo sát; bề mặt vật liệu đa dạng nhưng không quá phản chiếu gây nhiễu hình ảnh trừ khu vực mặt tiền có nhiều cửa kính; và khu vực khảo sát nằm trong khuôn viên trường nên dễ dàng kiểm soát yếu tố ngoại cảnh như người di chuyển hoặc phương tiện qua lại. Những yếu tố này góp phần đảm bảo chất lượng ảnh đầu vào và tăng độ tin cậy cho kết quả so sánh, đánh giá mô hình.

2.2. Thiết bị

Trong nghiên cứu này, nhóm nghiên cứu sử dụng điện thoại thông minh Xiaomi 12 để thu nhận ảnh phục vụ tái tạo mô hình đám mây điểm 3D (Hình 2a). Thiết bị này có giá thành rẻ, được trang bị hệ thống camera chính có độ phân giải 50 megapixel, sử dụng cảm biến Sony IMX766 với kích thước cảm biến 1/1,56 inch, kích thước điểm

ảnh 1.0 μm , tiêu cự tương đương 26 mm, khẩu độ $f/1,9$, hỗ trợ lấy nét theo pha (PDAF) và chống rung quang học (OIS). Bên cạnh đó, máy còn tích hợp camera siêu rộng 13 MP với khẩu độ $f/2,4$, tiêu cự tương đương 12 mm, góc nhìn 123° , kích thước cảm biến $1/3,06$ inch và kích thước điểm ảnh $1,12 \mu\text{m}$. Ngoài ra, camera macro 5 MP với tiêu cự tương đương 50 mm hỗ trợ lấy nét tự động, cho phép chụp cận cảnh các chi tiết nhỏ. Xiaomi 12 được giới thiệu có khả năng thu nhận ảnh chất lượng cao với độ sắc nét đồng đều, hạn chế hiện tượng nhòe hình và giữ được chi tiết tốt ngay cả trong các điều kiện ánh sáng phức tạp như vùng bóng râm hoặc bề mặt có độ phản xạ cao như kính, tường trắng và mái bê tông. Điều này đặc biệt quan trọng trong việc đảm bảo chất lượng dữ liệu đầu vào cho quá trình tái tạo mô hình đám mây điểm 3D, phục vụ khảo sát hiện trạng bề mặt công trình xây dựng.

Bên cạnh quá trình thu thập ảnh, nhóm nghiên cứu cũng tiến hành đo đạc trực tiếp tại hiện trường bằng máy toàn đạc điện tử GOWIN TKS 202 và thước dây nhằm thu thập dữ liệu tham chiếu phục vụ cho việc đánh giá độ chính xác hình học của mô hình đám mây điểm (Hình 2b). Công tác đo kiểm tra này đóng vai trò như một bước kiểm chứng độc lập, giúp đối chiếu giữa mô hình được xây dựng từ ảnh và các thông số hình học thực tế tại công trình khảo sát.



(a) Điện thoại Xiaomi 12

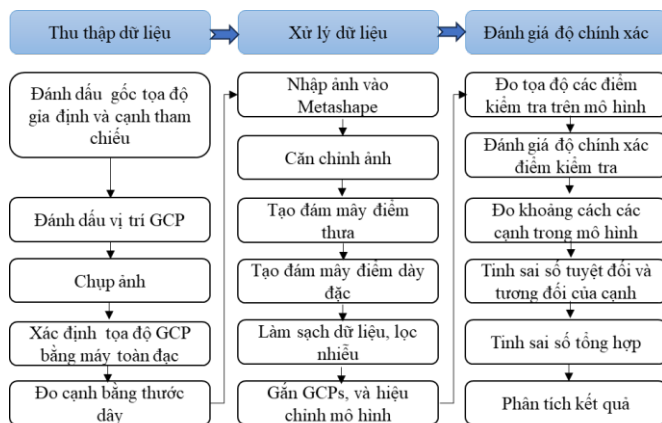


(b) Máy toàn đạc

Hình 2. Thiết bị thu nhận dữ liệu.

3. Phương pháp thực hiện

Quá trình nghiên cứu được triển khai theo quy trình gồm ba bước chính: (1) thu thập dữ liệu, (2) xử lý ảnh để tạo mô hình đám mây điểm bằng phần mềm Agisoft Metashape, (3) và đánh giá độ chính xác của mô hình. Các bước thực hiện cụ thể được thể hiện trong Hình 3.



Hình 3. Sơ đồ thực hiện.

3.1. Thu thập dữ liệu

3.1.1 Dữ liệu ảnh

Quá trình thu nhận ảnh được thực hiện theo phương pháp chụp tuần tự từng mặt đứng của công trình, trong đó người khảo sát di chuyển vòng quanh tòa nhà để ghi nhận đầy đủ bốn mặt chính. Mỗi bức ảnh được chụp tại các vị trí hợp lý, đảm bảo tỷ lệ chồng lấp tối thiểu 75% so với ảnh liền kề nhằm hỗ trợ hiệu quả cho quá trình phát hiện và khớp nối các điểm đặc trưng trong xử lý mô hình 3D. Cụ thể, nhóm nghiên cứu sử dụng chế độ chụp 50MP của camera chính trên điện thoại Xiaomi Mi 12, với góc nhìn (Field of View – FOV) ước tính khoảng 70° . Với khoảng cách chụp duy trì ổn định từ 10 đến 15 mét tính từ mặt tường, chiều rộng vùng phủ (W) tại mỗi vị trí chụp có thể được ước lượng theo công thức:

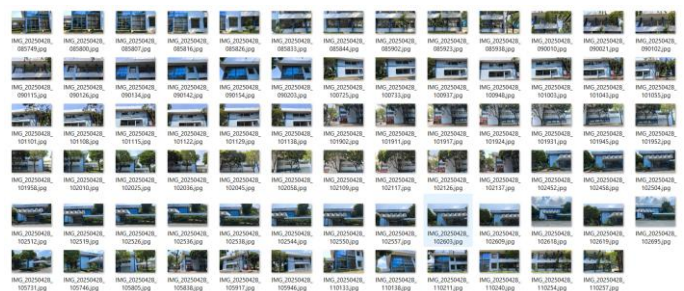
$$W = 2 \times D \times \tan\left(\frac{FOV}{2}\right) \quad (1)$$

Trong đó D là khoảng cách từ máy ảnh đến bề mặt công trình. Để đảm bảo mức chồng lấp tối thiểu 75%, khoảng cách dịch chuyển giữa hai lần chụp kế tiếp cần nhỏ hơn giá trị được tính theo:

$$L = W \times (1 - \text{tỷ lệ chồng lấp}) \quad (2)$$

Thay thế với $D = 10 \text{ m}$ và $FOV = 70^\circ$, ta có $W \approx 13,7 \text{ m}$, kéo theo $L \approx 3,4 \text{ m}$. Trên thực tế, trong quá trình khảo sát, nhóm nghiên cứu di chuyển ngang khoảng hai bước chân giữa mỗi lần chụp, tương đương với khoảng 1,5 m (với chiều dài mỗi bước chân trung bình là 0,75 m). Khoảng cách này nhỏ hơn giá trị giới hạn tính theo công thức (2), do đó tỷ lệ chồng lấp ảnh thực tế luôn được đảm bảo ở mức $\geq 75 \%$. Tổng cộng 77 ảnh đã được thu nhận, phân bố đều theo các hướng xung quanh công trình, đảm bảo bao phủ đầy đủ toàn bộ kiến trúc bề mặt để phục vụ cho việc tái tạo mô hình 3D một cách chính xác (Hình 4).

Ngay sau khi hoàn tất việc chụp ảnh tại hiện trường, nhóm nghiên cứu tiến hành kiểm tra sơ bộ chất lượng tập dữ liệu nhằm xác nhận các điều kiện kỹ thuật cơ bản cho việc xử lý mô hình đám mây điểm. Kết quả đánh giá cho thấy các bức ảnh có độ phân giải cao, giữ được mức độ sắc nét tốt và thể hiện rõ các đặc trưng hình học quan trọng của công trình như viên tường, khung cửa, hệ mái và khối chữ trang trí mặt tiền. Tỷ lệ chồng lấp giữa các ảnh đo được đều đạt hoặc vượt mức 75 %, phù hợp với yêu cầu đầu vào của thuật toán căn chỉnh ảnh. Ngoại trừ một số ảnh có hiện tượng dư sáng nhẹ do ánh nắng trực tiếp, phần lớn các ảnh đều có độ sáng và độ tương phản hợp lý, không ghi nhận hiện tượng mờ nhoè, rung lắc hay mất chi tiết nghiêm trọng.



Hình 4. Một số ảnh chụp được sử dụng làm dữ liệu thực nghiệm.

3.1.2 Dữ liệu kiểm tra

Bên cạnh dữ liệu ảnh chụp, dữ liệu đo đạc trực tiếp đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá độ chính xác và mức độ tin cậy của mô hình đám mây điểm thu được. Các điểm kiểm tra mặt đất (Ground Control Points – GCPs) được bố trí trực tiếp trên các bề mặt của công trình khảo sát (Hình 5). Tại mỗi vị trí GCP, một miếng dán phản quang được gắn cố định lên tường nhằm hỗ trợ cho cả quá trình đo bằng máy toàn đạc điện tử cũng như việc nhận dạng vị trí điểm ảnh trong phần mềm xử lý ảnh. Việc lựa chọn vị trí các GCPs được thực hiện cẩn trọng, đảm bảo không bị che khuất bởi cây xanh, thiết bị xây dựng hoặc các vật thể cản trở khác. Đồng thời, các điểm này cũng được ưu tiên đặt tại các khu vực có thể tiếp cận từ nhiều góc máy ảnh khác nhau để tăng cường khả năng chồng lặp ảnh trong quá trình tái thiết mô hình 3D.



Hình 5. Hình ảnh minh họa vị trí một số GCPs được đánh dấu trên bề mặt công trình (bên trong vòng tròn đỏ).



Hình 6. Vị trí đặt máy toàn đạc tại hiện trường

Để đánh giá độ chính xác của mô hình đám mây điểm, một hệ tọa độ giả định đã được thiết lập tại hiện trường để làm cơ sở cho toàn bộ quy trình đo đạc. Điểm gốc ($X_{gốc} = 0\text{ m}$, $Y_{gốc} = 0\text{ m}$, $Z_{gốc} = 0\text{ m}$) của hệ tọa độ được lựa chọn tại một vị trí thuận lợi, đảm bảo tầm nhìn bao quát và điều kiện lắp đặt thiết bị ổn định. Từ điểm gốc này, máy toàn đạc điện tử GOWIN TKS-202 được bố trí và căn chỉnh theo hướng tham chiếu giả định ($\alpha_{gốc} = 000^{\circ}0'$), làm cơ sở để đo các điểm còn lại (Hình 6). Các phép đo góc và khoảng cách được thực hiện và ghi nhận cho từng GCP, từ đó xác định được tọa độ của tất cả các điểm GCP trong hệ quy chiếu giả định thông qua bài toán trắc địa thuận theo công thức (3).

$$\begin{aligned} X_i &= S * \cos(Hz) * \sin(V) \\ Y_i &= S * \sin(Hz) * \sin(V) \\ Z_i &= S * \cos(V) \end{aligned} \quad (3)$$

Trong đó:

Hz: Góc ngang

V: Góc đứng

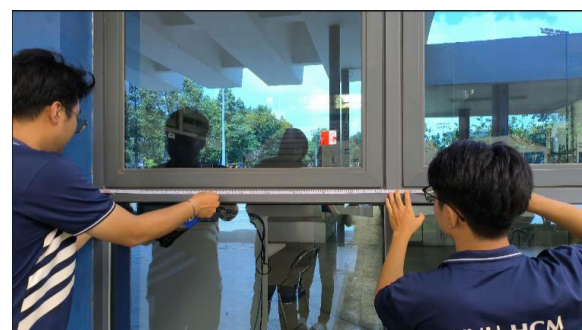
S: Khoảng cách ngang

Trong nghiên cứu này, mười GCPs được bố trí và đo đạc nhằm phục vụ hai mục đích chính trong quy trình xử lý và đánh giá mô hình đám mây điểm 3D. Năm điểm đầu tiên được sử dụng để hiệu chỉnh mô hình, đảm bảo vị trí và tỷ lệ của mô hình tái tạo phù hợp với thực tế không gian. Năm điểm còn lại đóng vai trò là tập dữ liệu kiểm tra độc lập, dùng để đánh giá độ chính xác hình học của mô hình sau khi quá trình tái tạo hoàn tất (Bảng 1). Sự phân chia này giúp phân biệt rõ ràng giữa dữ liệu dùng cho hiệu chỉnh và dữ liệu kiểm tra, qua đó đảm bảo tính khách quan trong việc đánh giá sai số mô hình.

Bảng 1. Tọa độ các GCPs được xác định bằng phương pháp đo toàn đạc.

Tên	X (m)	Y (m)	Z (m)	Ghi chú
T1	1,403	-7,304	1,815	Điểm khống chế
T2	3,120	-7,274	1,263	Điểm kiểm tra
T3	5,319	-7,227	1,969	Điểm kiểm tra
T4	7,411	-6,952	1,834	Điểm khống chế
T5	11,167	-7,021	2,043	Điểm kiểm tra
T6	11,957	-6,932	1,521	Điểm khống chế
T7	12,412	-6,813	1,831	Điểm kiểm tra
T8	18,596	-6,906	2,041	Điểm khống chế
T9	15,236	-6,874	1,713	Điểm khống chế
T10	13,517	-6,968	1,694	Điểm kiểm tra

Bên cạnh việc sử dụng các điểm GCP, các cạnh đặc trưng của công trình cũng được đo chiều dài trực tiếp tại hiện trường bằng thước dây chia vạch đến milimét, nhằm tăng cường cơ sở kiểm chứng hình học cho mô hình 3D (Hình 7). Phương pháp đo này cho phép đạt độ chính xác trong phạm vi sai số cho phép ($\pm 1 \div 2\text{ mm}$), phù hợp với yêu cầu của khảo sát thực địa ở quy mô nhỏ và trung bình. Các kết quả đo được ghi lại thủ công ngay tại hiện trường, sau đó được sử dụng để đối chiếu với chiều dài tương ứng trong mô hình đám mây điểm. Tổng cộng có 17 cạnh được lựa chọn và đo, phân bố tại các khu vực dễ nhận diện và có thể xác định rõ điểm đầu – điểm cuối trong cả thực địa lẫn trên mô hình đám mây điểm.



Hình 7. Thu thập dữ liệu đo chiều dài cạnh tại hiện trường.

3.2. Xử lý ảnh và tái tạo mô hình

Dữ liệu ảnh được nhập vào phần mềm Agisoft Metashape Professional để xử lý. Quy trình xử lý tuân theo chuỗi thao tác tiêu chuẩn, với các thiết lập được cấu hình ở mức chất lượng cao nhất nhằm đảm bảo độ chi tiết và độ chính xác hình học của mô hình đám mây điểm. Bước đầu tiên là căn chỉnh ảnh (Align Photos) bằng thuật toán Structure from Motion (SfM), dựa trên các điểm đặc trưng SIFT nhằm xác định vị trí tương đối giữa các ảnh và hiệu chỉnh nội tại máy ảnh. Kết quả của bước này là đám mây điểm thưa (sparse cloud) thể hiện cấu trúc không gian sơ bộ của đối tượng khảo sát.

Tiếp theo, mô hình đám mây điểm dày đặc (dense cloud) được xây dựng bằng thuật toán Multi-View Stereo (MVS), dựa trên kết quả đầu ra từ bước Structure-from-Motion (SfM) nhằm tái hiện chi tiết hình học bề mặt với mật độ điểm cao. Trong quá trình này, các tham số được thiết lập ở chế độ Ultra Quality, kết hợp với bộ lọc độ sâu ở mức trung bình để đảm bảo sự cân bằng giữa độ chính xác và hiệu suất xử lý. Tuy nhiên, tại một số khu vực có bề mặt kính phản chiếu mạnh, mô hình không thể tái tạo được do đặc tính phản xạ ánh sáng khiến thuật toán không thu nhận được thông tin hình học chính xác. Sau khi đám mây điểm dày đặc được tạo lập, dữ liệu được tinh chỉnh thông qua các bộ lọc tự động dựa trên các tiêu chí như sai số chiếu sáng, độ không chắc chắn trong quá trình tái tạo

Sau khi hoàn thành quá trình tạo đám mây điểm 3D, năm điểm GCPs được nhập vào dưới dạng tọa độ ba chiều trong hệ tọa độ thực địa. Các điểm này được định vị thủ công trên các ảnh tương ứng để thiết lập liên kết không gian giữa mô hình ảnh và thực tế. Sau khi gắn đầy đủ GCPs, mô hình được nắn chỉnh (georeferencing) thông qua các thao tác xoay trục, đặt tỷ lệ và hiệu chỉnh mô hình để khớp với hệ tọa độ thực địa. Đồng thời, thuật toán tối ưu hóa căn chỉnh máy ảnh (Optimize Camera Alignment) được áp dụng để điều chỉnh lại các tham số máy ảnh nhằm cải thiện độ chính xác không gian tổng thể của mô hình. Cuối cùng, mô hình đám mây điểm được xuất ra dưới các định dạng *.LAS để phục vụ cho các bước phân tích hình học. Quá trình đo kiểm để đánh giá sai số được thực hiện trong phần mềm mã nguồn mở CloudCompare.

3.3. Đánh giá độ chính xác hình học

Như đã đề cập, để kiểm tra tính chính xác hình học của mô hình đám mây điểm trong nghiên cứu này hai phương pháp đánh giá được thực hiện: (1) phân tích sai số vị trí tại các điểm GCPs còn lại, và (2) đối chiếu kích thước hình học thực tế với dữ liệu đo đạc trên mô hình. Sai số tuyệt đối của các điểm kiểm tra được tính toán riêng biệt theo từng trục X, Y và Z, cho phép đánh giá mức độ khớp giữa mô hình tái tạo và hệ tọa độ thực địa được giả định. Cụ thể, để đánh giá tổng thể mức độ sai lệch vị trí, có thể tính sai số bình phương trung bình (Root Mean Square Error – RMSE) theo từng phương và tổng hợp không gian 3D. Kết quả RMSE 3D được tính theo công thức (4):

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

Trong đó:

$\hat{y}_i$: là giá trị dự đoán từ mô hình (tọa độ mô hình),

y_i : là giá trị quan sát thực tế tại hiện trường,

n : là số lượng quan sát (số điểm kiểm tra).

Từ đó, RMSE tổng hợp ba chiều (3D) được tính như sau:

$$RMSE_{3D} = \sqrt{(RMSE_x)^2 + (RMSE_y)^2 + (RMSE_z)^2} \quad (5)$$

Đối với việc kiểm tra kích thước hình học, chiều dài mười bảy cạnh đặc trưng trên mô hình được trích xuất và so sánh với số liệu đo đã thu thập trong quá trình khảo sát thực địa. Sai số kích thước được xác định bằng công thức (6):

$$\Delta L = L_{mô\ hình} - L_{thực\ tế} \quad (6)$$

Trong đó $L_{mô\ hình}$ là chiều dài đo được trên mô hình đám mây điểm, còn $L_{thực\ tế}$ là chiều dài thực tế đo được tại hiện trường. Các giá trị sai số thu được từ các phép đo đối chiếu được tổng hợp và phân tích nhằm đánh giá độ tin cậy của mô hình, qua đó xác định mức độ phù hợp của mô hình đám mây điểm trong việc ứng dụng vào khảo sát, đo đạc và hỗ trợ các công tác kỹ thuật khác. Bên cạnh sai số tuyệt đối (hiệu số giữa hai giá trị chiều dài), sai số tương đối cũng được tính theo công thức (7). Kết quả sai số tương đối này cung cấp cơ sở định lượng để đánh giá mức độ chính xác hình học của mô hình, đặc biệt trong bối cảnh ứng dụng các thiết bị thu nhận ảnh đơn giản như điện thoại di động.

$$\frac{1}{T} = \frac{|L_{mô\ hình} - L_{thực\ tế}|}{L_{thực\ tế}} \cdot 100\% \quad (7)$$

4. Kết quả

4.1. Mô hình đám mây điểm

Mô hình đám mây điểm được tái tạo từ ảnh chụp bằng điện thoại thông minh thông qua phần mềm Agisoft Metashape cho thấy khả năng thể hiện hình học tổng thể và chi tiết kiến trúc của công trình một cách rõ ràng và trực quan. Hình khối của tòa nhà A2, bao gồm các mặt đứng chính, mái hiên, mặt bên, cùng các chi tiết như khung cửa kính, ban công và chữ trang trí mặt tiền, đều được mô phỏng tương đối đầy đủ. Đặc biệt, khu vực mặt tiền thể hiện rõ nét các thành phần như dây cửa kính, mái che tầng hai và ban công với mức độ chi tiết cao (Hình 8). Tuy nhiên, một số hạn chế liên quan đến đặc tính phản quang của vật liệu và điều kiện ghi hình thực tế được ghi nhận. Cụ thể, các vùng bề mặt kính – do phản xạ ánh sáng mạnh – không thể tái tạo được điểm 3D, dẫn đến hiện tượng mất dữ liệu cục bộ trong mô hình. Đây là một nhược điểm mang tính bản chất của phương pháp dựng hình từ ảnh, đặc biệt khi áp dụng cho các bề mặt có độ phản xạ cao như kính hoặc kim loại bóng. Ngoài ra, các chi tiết phụ tại vùng râm hoặc bị khuất như viền cửa sổ, mặt kính, thanh lam, hay mép mái có độ sắc nét hạn chế. Những điểm hạn chế này chủ yếu xuất phát từ điều kiện ánh sáng không đồng đều, chói sáng và thiếu đa dạng trong góc chụp tại các khu vực khó tiếp cận như chân công trình hoặc phía dưới mái hiên, dẫn đến mật độ điểm thấp và khả năng tái hiện không rõ ràng

Tổng thể mô hình có cấu trúc liên mạch, không xuất hiện hiện tượng méo hình hay đứt gãy rõ rệt ở các mặt bên. Mô hình được xây

dựng gồm hơn 81 triệu điểm, đảm bảo mức độ chi tiết cần thiết cho việc phục vụ khảo sát hiện trạng. Chất lượng hình học đạt được phần lớn nhờ vào ảnh đầu vào có độ phân giải cao, tỷ lệ chồng lấp trên 75%, Những yếu tố này hỗ trợ hiệu quả cho các thuật toán Structure-from-Motion (SfM) và Multi-View Stereo (MVS) trong việc nhận dạng và khớp nổi đặc trưng hình học. Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp tái tạo từ ảnh chụp phổ thông có tiềm năng lớn trong khảo sát công trình dân dụng quy mô vừa và nhỏ, đặc biệt trong bối cảnh hạn chế về thiết bị chuyên dụng. Để nâng cao độ chân thực và tính ứng dụng trong các hệ thống BIM hoặc phục dựng chi tiết, cần cải thiện thêm ở khâu thu nhận ảnh tại các khu vực khó quan sát như bổ sung thêm ảnh chụp ở

nhiều vị trí khác nhau tại các khu vực phức tạp hoặc tăng giá trị độ phủ của giữa các tờ ảnh liền kề hoặc nâng cao chất lượng ảnh chụp bằng các loại điện thoại di động có khả năng ghi hình tốt hơn.

Nhìn chung, mô hình vẫn thể hiện tốt hình dạng tổng thể. Tuy nhiên, tại thời điểm này, vị trí và kích thước mô hình chưa đạt được độ chính xác tuyệt đối, do chưa được định vị trong hệ tọa độ địa thực địa. Điều này giới hạn khả năng sử dụng mô hình cho các ứng dụng kỹ thuật đòi hỏi tính chính xác cao như thiết kế chi tiết, đo bóc khối lượng hoặc kiểm định công trình. Để khắc phục vấn đề này, bước hiệu chỉnh mô hình với hệ tọa độ thực địa thông qua các điểm GCPs là cần thiết.



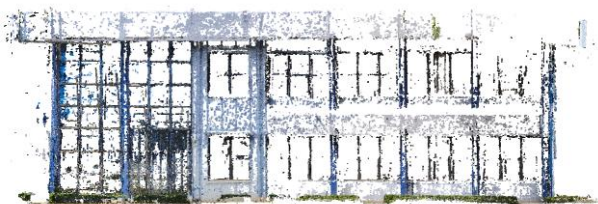
(a) Mô hình tổng thể



(b) Mặt trước



(b) Mặt sau



(d) Mặt phải



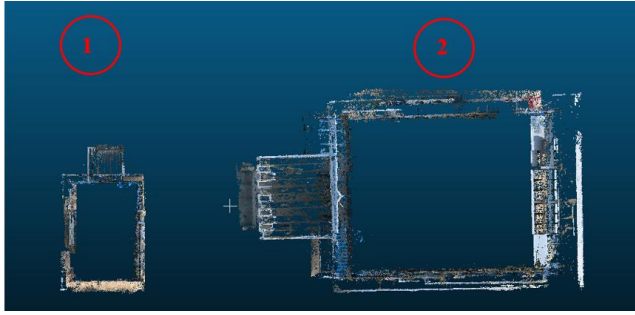
(e) Mặt trái

Hình 8. Mô hình đám mây điểm của tòa nhà sau khi xử lý trên Agisoft Metashape.

4.2. Nắn chỉnh mô hình đám mây điểm

Trong nghiên cứu này, năm điểm GCPs đã được sử dụng để hiệu chỉnh mô hình đám mây điểm, đóng vai trò là các mốc định vị tham chiếu trong toàn bộ quá trình căn chỉnh hình học. Các GCPs cho phép xác lập mối tương quan không gian giữa mô hình đám mây điểm và hiện trường khảo sát, từ đó điều chỉnh lại vị trí, tỷ lệ và hướng của mô

hình sao cho phù hợp với thực tế. Việc tích hợp dữ liệu GCPs không chỉ giúp cải thiện độ chính xác hình học của mô hình, mà còn đảm bảo rằng mô hình được căn chỉnh theo hệ tọa độ giả định đã được thiết lập tại hiện trường khảo sát. Nhờ đó, mô hình sau hiệu chỉnh có thể được sử dụng một cách tin cậy trong các ứng dụng kỹ thuật thực tiễn, đặc biệt là trong các hệ thống tích hợp như mô hình thông tin công trình (BIM) hoặc hệ thống thông tin địa lý (GIS).



Hình 9. Sự khác biệt của mô hình trước (1) và sau khi nắn (2)

Để đánh giá hiệu quả của quá trình hiệu chỉnh, nhóm nghiên cứu đã tiến hành so sánh mô hình trước và sau khi tích hợp các điểm GCPs nhằm kiểm chứng sự thay đổi về hình học. Trong giai đoạn đầu, mặc dù mô hình đã tái hiện được hình khối chung của các mặt đứng, sàn, trần và mái che, song vẫn tồn tại các sai lệch đáng kể về tỷ lệ kích thước và phương vị không gian. Các đường biên kiến trúc quan trọng như cột, sàn và mái chưa thể hiện đúng các trục thẳng đứng và góc vuông theo thực tế thiết kế. Những sai lệch này ảnh hưởng tiêu cực đến độ tin cậy của mô hình, đặc biệt khi được sử dụng trong các bài toán kỹ thuật có yêu cầu cao về độ chính xác. Sau khi hiệu chỉnh hình học – bao gồm loại bỏ các điểm nhiễu và tích hợp các điểm GCPs – mô hình cho thấy sự cải thiện rõ rệt về tỷ lệ, vị trí và cấu trúc không gian. Mô hình đã được kéo về đúng tỷ lệ thực tế và ăn khớp chính xác với hiện trạng công trình, qua đó nâng cao tính ứng dụng cho các mục tiêu khảo sát, thiết kế cải tạo và kiểm định kỹ thuật (Hình 9).

Bảng 2. Kiểm tra sai số vị trí điểm kiểm tra.

Điểm	Hình ảnh thực tế	Hình ảnh trên đám mây điểm	Tọa độ thực tế (m)	Tọa độ mô hình (m)	Sai số (m)
T2			X = 3,120 Y = -7,274 Z = 1,263	X = 3,126 Y = -7,261 Z = 1,280	$\Delta X = 0,006$ $\Delta Y = -0,013$ $\Delta Z = 0,017$
T3			X = 5,319 Y = -7,227 Z = 1,969	X = 5,312 Y = -7,238 Z = 1,951	$\Delta X = -0,007$ $\Delta Y = -0,011$ $\Delta Z = -0,018$
T5			X = 11,167 Y = -7,021 Z = 2,043	X = 11,050 Y = -7,034 Z = 2,060	$\Delta X = -0,017$ $\Delta Y = 0,013$ $\Delta Z = 0,017$
T7			X = 12,412 Y = -6,813 Z = 1,831	X = 12,398 Y = -6,805 Z = 1,842	$\Delta X = -0,014$ $\Delta Y = -0,008$ $\Delta Z = 0,011$
T10			X = 13,517 Y = -6,968 Z = 1,694	X = 13,502 Y = -6,960 Z = 1,705	$\Delta X = -0,015$ $\Delta Y = -0,008$ $\Delta Z = 0,011$
Tổng hợp	$RMSE_X = 0,0126 \text{ m}; RMSE_Y = 0,0108 \text{ m}; RMSE_Z = 0,0151 \text{ m};$ $RMSE_{3D} = 0,0225 \text{ m}$				

4.3. Độ chính xác của mô hình

Mục tiêu chính của bài báo là đánh giá tính khả thi của việc sử dụng ảnh chụp từ điện thoại thông minh để khảo sát hiện trạng công trình xây dựng theo hướng chi phí thấp. Cụ thể, nghiên cứu tập trung vào khả năng xác định vị trí và kích thước hình học của các cấu kiện cơ bản thể hiện trên bề mặt công trình, như tường, cửa, ban công và các chi tiết kiến trúc chính trên mô hình đám mây điểm. Độ chính xác của mô hình đám mây điểm được đánh giá dựa trên hai tiêu chí chính: (1) sai số vị trí tại các điểm kiểm tra (check points), và (2) sai số hình học về chiều dài các cạnh đặc trưng. Với tiêu chí đầu tiên, tọa độ các điểm đặc trưng được trích xuất từ mô hình sau khi xử lý sẽ được đối chiếu với tọa độ thực đo tại hiện trường theo ba phương X, Y và Z. Sai số tại mỗi điểm được tính bằng chênh lệch tọa độ giữa mô hình và thực tế, phản ánh mức độ khớp hình học không gian của mô hình so với hiện trường khảo sát. Kết quả này được tổng hợp trong Bảng 2 cho thấy sự phân bố sai số theo từng trục của hệ tọa độ giả định. Cụ thể, độ lớn sai số tuyệt đối tại các điểm kiểm tra dao động trong khoảng từ 0,006 m đến 0,018 m theo cả ba phương tọa độ. Giá trị RMSE lần lượt là 0,0126 m theo phương X, 0,0108 m theo phương Y và 0,0151 m theo phương Z. Giá trị $\|RMSE\|_{3D}$ thu được gần 2,3 cm, cho thấy mô hình đạt độ chính xác vị trí tương đối tốt trong điều kiện khảo sát bằng thiết bị chụp ảnh phổ thông. Mức sai số này có thể đáp ứng các ứng dụng thực tế như kiểm tra hiện trạng, hoặc phân tích sơ bộ kỹ thuật trong công trình dân dụng hoặc phục vụ các mục tiêu thiết kế kỹ thuật trong xây dựng.

Sau khi kiểm tra độ chính xác vị trí, độ chính xác hình học của mô hình được đánh giá thông qua so sánh chiều dài các cạnh đặc trưng giữa mô hình và dữ liệu đo thực tế (Hình 9). Hai chỉ số được sử dụng gồm: (1) sai số tuyệt đối – là hiệu số chiều dài giữa mô hình và thực tế; và (2) sai số tương đối – là tỷ lệ phần trăm sai số so với chiều dài thực đo. Các giá trị này được trình bày chi tiết trong Bảng 3.

Dựa trên kết quả từ mười bảy cạnh đã được đo và kiểm tra, độ lớn sai số tuyệt đối dao động từ 0,011 m đến 0,055 m, với giá trị $RMSE_{\text{cạnh}}$ là 0,036 m, tức là dưới 4 cm. Sai số tương đối dao động trong khoảng 0,9% đến 4,6 %, phản ánh mức độ sai lệch tương đối nhỏ so với chiều dài thực tế. Kết quả nghiên cứu khẳng định rằng phương pháp tạo mô hình 3D từ ảnh chụp bằng thiết bị phổ thông, khi được kết hợp với quy trình kiểm chứng thực địa hợp lý, hoàn toàn có thể ứng dụng hiệu quả trong lĩnh vực khảo sát hiện trạng công trình xây dựng. Khi đối chiếu với các giới hạn sai số hình học cho phép được quy định trong TCVN 5593:2012 về công tác thi công tòa nhà, mô hình thu được đáp ứng yêu cầu đối với phần lớn các hạng mục quan trọng [11]. Cụ thể, sai số mô hình nằm trong phạm vi cho phép đối với sai lệch trục kết cấu ($\leq 10 \text{ mm}$), cao trình đỉnh khối xây ($\leq 20 \text{ mm}$), cũng như độ lệch theo phương thẳng đứng của tường và cột (20–30 mm). Đặc biệt, các chi tiết mặt đứng như khung cửa kính, ban công và mái che được tái hiện với mức độ rõ ràng và liên tục. Tuy nhiên, đối với các cấu kiện có kích thước nhỏ và yêu cầu độ chính xác cao như chiều rộng ô cửa (giới hạn sai số +20 mm theo tiêu chuẩn), mô hình vẫn còn sai lệch nhẹ và cần được cân nhắc bổ sung thiết bị đo kiểm chuyên dụng nếu

cần phục vụ cho thiết kế hoặc thi công chi tiết. Mặc dù vậy, kết quả cho thấy phương pháp sử dụng ảnh chụp từ điện thoại thông minh là giải pháp khả thi, hiệu quả và có tính ứng dụng cao trong khảo sát hiện trạng tổng thể và thiết kế sơ bộ, đặc biệt trong điều kiện hạn chế về trang thiết bị đo đạc chuyên ngành. Đặc biệt, phương pháp này phù hợp với các công trình quy mô vừa và nhỏ hoặc các dự án có ngân sách và thời gian hạn chế, nơi việc sử dụng thiết bị cao cấp như TLS là không khả thi. Nhờ vào sự linh hoạt, chi phí thấp và độ chính xác đạt ngưỡng chấp nhận được, mô hình từ ảnh điện thoại có thể trở thành giải pháp hỗ trợ đáng tin cậy trong các công tác kỹ thuật thực tiễn.



(a) Cạnh 11 đo bằng thước kẻ có chiều dài 3,35 m.



(b) Cạnh 11 đo trên mô hình có chiều dài 3,361 (m)

Hình 9. So sánh kích thước cạnh số 5 và 11 được đo thực tế bằng thước dây và trên mô hình đám mây điểm

Bảng 3. Sai số đo cạnh.

Cạnh kiểm tra	Chiều dài thực tế (m)	Chiều dài mô hình (m)	Sai số tuyệt đối ΔL (m)	Sai số tương đối 1/T (%)
Cạnh 1	1,73	1,675	-0,055	3,2
Cạnh 2	1,28	1,315	0,035	2,7
Cạnh 3	1,52	1,500	-0,020	1,3
Cạnh 4	1,66	1,684	0,024	1,5
Cạnh 5	1,34	1,296	-0,044	3,3
Cạnh 6	5,74	5,688	-0,052	0,9
Cạnh 7	1,09	1,040	-0,050	4,6
Cạnh 8	1,14	1,112	-0,028	2,4
Cạnh 9	1,08	1,040	-0,040	3,7
Cạnh 10	4,55	4,515	-0,035	0,8

Cạnh kiểm tra	Chiều dài thực tế (m)	Chiều dài mô hình (m)	Sai số tuyệt đối ΔL (m)	Sai số tương đối 1/T (%)
Cạnh 11	3,35	3,361	0,011	0,3
Cạnh 12	1,1	1,079	-0,021	1,9
Cạnh 13	1,08	1,045	-0,035	3,2
Cạnh 14	6,18	6,126	-0,054	0,9
Cạnh 15	3,38	3,369	-0,011	0,3
Cạnh 16	1,13	1,119	-0,011	1,0
Cạnh 17	2,21	2,179	-0,031	1,4

5. Kết luận

Nghiên cứu đã chứng minh rằng mô hình đám mây điểm 3D được tạo lập từ ảnh chụp bằng điện thoại thông minh có khả năng tái hiện hình học công trình với mức độ chính xác đáng tin cậy trong khảo sát hiện trạng xây dựng. Cụ thể, mô hình được xây dựng từ 77 ảnh được chụp bởi điện thoại Xiaomi 12, và xử lý bằng phần mềm Agisoft Metashape, tạo ra hơn 81 triệu điểm đám mây, đảm bảo mật độ điểm cao tại các khu vực mặt đứng chính và vùng có điều kiện ánh sáng thuận lợi. Các chi tiết kiến trúc như hệ thống tường phẳng, khung cửa kính, mái hiên và chữ nổi mặt tiền được thể hiện rõ nét, thể hiện tính ổn định của mô hình về hình khối và kết cấu bề mặt. Kết quả kiểm tra độ chính xác vị trí dựa trên 5 điểm kiểm tra cho thấy độ lớn sai số tuyệt đối dao động 0,006 m đến 0,018 m theo cả ba phương tọa độ. Giá trị RMSE lần lượt là 0,0126 m theo phương X, 0,0108 m theo phương Y và 0,0151 m theo phương Z. Tổng hợp sai số không gian 3D cho kết quả RMSE = 2,3 cm, hoàn toàn nằm trong giới hạn chấp nhận được đối với các ứng dụng khảo sát hiện trạng, đo đạc sơ bộ và hỗ trợ thiết kế kỹ thuật ban đầu. Về độ chính xác hình học, nhóm nghiên cứu so sánh chiều dài 17 đoạn cạnh đặc trưng giữa mô hình và số đo thực tế cho thấy độ lớn sai số tuyệt đối dao động từ 0,011 m đến 0,055 m, với giá trị RMSE cạnh là 0,036 m, tức là dưới 4 cm. Sai số tương đối dao động trong khoảng 0,9% đến 4,6 %, cho thấy mô hình đủ khả năng tái tạo kích thước hình học một cách hợp lý. Những sai số này chủ yếu tập trung ở các khu vực khó tiếp cận hoặc thiếu góc chụp, như góc khuất dưới mái, mặt bên ít ánh sáng và chân công trình, nơi mật độ điểm thấp và chi tiết bị mờ hoặc thiếu. Ngoài ra, một hạn chế đáng chú ý là việc tái tạo hình học tại các bề mặt kính không đạt hiệu quả do đặc tính phản xạ ánh sáng, khiến thuật toán không thể ghi nhận chính xác dữ liệu hình học tại các vị trí này. Đây là một yếu tố cần được xem xét khi lựa chọn vị trí chụp, tỷ lệ chồng phủ và bố trí GCPs trong các khảo sát tương tự. Sau khi tích hợp năm điểm GCPs để nắn chỉnh, mô hình đã thể hiện sự cải thiện rõ rệt về hình học, với các trục chính, tỷ lệ kích thước và phương vị không gian được đồng bộ với hiện trạng đo đạc tại thực địa. Việc gắn GCPs giúp mô hình không chỉ đúng về tỷ lệ mà còn gắn với hệ tọa độ không gian giả định, tạo nền tảng để ứng dụng trong các hệ thống kỹ thuật số như BIM hoặc GIS. Tổng thể, nghiên cứu khẳng định rằng phương pháp tạo lập mô hình đám mây điểm từ ảnh chụp

điện thoại thông minh là khả thi, hiệu quả và đáng tin cậy, đặc biệt phù hợp trong bối cảnh cần khảo sát nhanh, chi phí thấp và không có sẵn thiết bị chuyên dụng. Phương pháp này mở ra hướng tiếp cận mới trong số hóa hiện trạng công trình dân dụng quy mô vừa và nhỏ, đồng thời hỗ trợ tốt cho các mục tiêu thiết kế cải tạo, và kiểm tra kỹ thuật sơ bộ trong thực tiễn xây dựng.

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]. Florent Poux, Romain Neuville, Gilles-Antoine Nys and Roland Billen, 3D Point Cloud Semantic Modelling: IntegratedFramework for Indoor Spaces and Furniture, *Remote Sens*, 10, 9, 1412, 2018, DOI:10.3390/rs10091412.
- [2]. Shengjun Tang, Xiaoming Li, Xianwei Zheng, Bo Wu, Weixi Wang, Yunjie Zhang, BIM generation from 3D point clouds by combining 3D deep learning and improved morphological approach, *Automation in Construction*, Volume 141, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104422>.
- [3]. Chao Wu, Yongbo Yuan, Yang Tang, and Boquan Tian, Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry, *Sensors*, 22, no. 1: 265, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22010265>
- [4]. Thomas Luhman, Stuart Robson, Stephen A Kyle and Jan Boehm, *Close Range Photogrammetry and 3D Imaging*, 2, Berlin, Walter de Gruyter, 2014.
- [5]. Innes Barbero-García, José Luis Lerma, Ángel Marqués-Mateu, Pablo Miranda, Low-Cost Smartphone-Based Photogrammetry for the Analysis of Cranial Deformation in Infants, *World Neurosurgery*, Volume 102, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2017.03.015>.
- [6]. Jasińska, Aleksandra, Krystian Pyka, Elżbieta Pastucha, and Henrik Skov Midtiby A Simple Way to Reduce 3D Model Deformation in Smartphone Photogrammetry, *Sensors*, vol. 23, no. 2: 728, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23020728>
- [7]. Alshibani, Wahib Saif and Adel, Smartphone-Based Photogrammetry Assessment in Comparison with a Compact Camera for Construction Management Applications, *Applied Sciences*, 12, 3, 1053, 2022, DOI: 10.3390/app12031053.
- [8]. Sirmacek, B. and Lindenbergh, R., Accuracy assessment of building point clouds automatically generated from iPhone images, *Accuracy assessment of building point clouds automatically generated from iPhone images*, XL, 547-552, 2014, DOI: 10.5194/isprsarchives.
- [9]. D. Costantino, M. Pepe, and V. S. Alfio, Point cloud accuracy of smartphone images: Applications in cultural heritage environment, *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 9, 4, 6259-6767, 2020, DOI: 10.30534/ijatcse/2020/305942020.
- [10]. Musicco, N. Rossi, and C. Verdoscia, Accuracy evaluation of smartphone-based videogrammetry for cultural heritage documentation process, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII, M, 2, 1119-1126, 2023, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1119-2023.
- [11]. Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 5593:2012 về Công tác thi công tòa nhà - Sai số hình học cho phép (năm 2012).