

ĐÁNH GIÁ TOÀN VỆN HÌNH HỌC KẾT CẤU THÉP CỦA CÔNG TRÌNH SỰ CỐ TỪ DỮ LIỆU Đám Mây Điểm BẰNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO VÀ ỨNG DỤNG THEO TIÊU CHUẨN VIỆT NAM

INTEGRITY ASSESSMENT OF FAILED STEEL STRUCTURE GEOMETRY USING POINT CLOUD DATA AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ACCORDANCE WITH VIETNAMESE STANDARDS

Nguyễn Xuân Long¹, Vũ Cao Anh², Nguyễn Văn Hùng³

^{1,2}*Viện Khoa học công nghệ xây dựng*

³*Topcon Corporation*

Email: ¹xuanlong@ibst-csce.com, 0913 370 780; ²caoanh@ibst-csce.vn, 0366 888 858

DOI: <https://doi.org/10.59382/hnkh17-ibst.2025.ses3-8>

TÓM TẮT: Bài báo này trình bày một khung toàn diện ứng dụng công nghệ đám mây điểm và trí tuệ nhân tạo (AI), đặc biệt là kiến trúc mạng PointNet, để đánh giá sự toàn vẹn về mặt hình học của các cấu kiện kết cấu thép trong các công trình đã gặp sự cố (bao gồm sụp đổ một phần/toàn bộ, lún nghiêng, võng quá mức) hoặc đang trong giai đoạn thi công gặp vấn đề, cũng như các công trình bị ảnh hưởng bởi hỏa hoạn hoặc quá tải sử dụng (do tăng tải trọng MEP hoặc đọng nước mưa), các cấu kiện bị han rỉ, phơi nhiễm hóa chất, môi trường nhiệt độ cao,... Dữ liệu quét 3D laser được sử dụng để số hóa hiện trạng thực tế của công trình sau sự cố/vấn đề. Tiếp đó, dữ liệu được xử lý qua các giai đoạn phân loại và phân đoạn tự động bằng AI. Nghiên cứu tập trung vào việc phát triển các phương pháp trích xuất và phân tích định lượng các thông số hình học quan trọng như độ võng, độ nghiêng, độ phẳng, vặn xoắn, mất ổn định cục bộ và móp. Các kết quả đo đạc được sẽ được so sánh và đánh giá theo các Tiêu chuẩn Việt Nam hiện hành (ví dụ: TCXDVN 9381:2012, TCVN 2337:2023, TCVN 5575:2012, TCVN 9378:2012, TCVN 9262-1:2012, TCVN 9264:2012, TCVN 9400:2012, TCVN 9398:2012) để xác định mức độ hư hại, nguyên nhân sự cố và khả năng phục hồi. Hướng phát triển tiếp theo của nghiên cứu được đề xuất là khả năng đánh giá độ nhám bề mặt từ đám mây điểm, mở rộng phạm vi ứng dụng của công nghệ này trong việc phân tích thiệt hại vật liệu và xác định các giải pháp sửa chữa.

TỪ KHÓA: Đám mây điểm, Quét 3D Laser, Kết cấu thép, Công trình sự cố, Hỏa hoạn, Quá tải, Lún nghiêng, Võng, PointNet, Trí tuệ nhân tạo, Đánh giá hình học, Độ nhám bề mặt, Tiêu chuẩn Việt Nam.

ABSTRACT: This paper presents a comprehensive framework for applying point cloud technology and artificial intelligence (AI), specifically the PointNet architecture, to assess the geometric integrity of steel structural members in failed or problematic constructions. The scope includes structures that have experienced partial/total collapse, settlement-induced tilting, excessive deflection, or issues during the construction phase, as well as those affected by fire or operational overloading (e.g., increased MEP loads or rainwater ponding), structural members affected by corrosion, chemical exposure, or high-temperature environments. 3D laser scanning data is utilized to digitize the as-is condition of the structure post-incident. Subsequently, the point cloud data undergoes automated processing, including classification and semantic segmentation, powered by AI. The research focuses on developing methods for the quantitative extraction and analysis of critical geometric parameters such as deflection, tilt, flatness, torsion, local buckling, and denting. The measured results are then compared and evaluated against current Vietnamese Standards (e.g., TCVN 9381:2012, TCVN 2337:2023, TCVN 5575:2012, TCVN 9378:2012, TCVN 9262-1:2012, TCVN 9264:2012, TCVN 9400:2012, TCVN 9398:2012) to determine the extent of damage, investigate the cause of failure, and assess the potential for retrofitting. Future work is proposed to extend the methodology to include the assessment of surface roughness from point cloud data, thereby broadening the application of this technology in material damage analysis and the formulation of repair solutions.

KEYWORDS: *Point Cloud, 3D Laser Scanning, Steel Structure, Structural Failure, Fire Damage, Overloading, Differential Settlement, Tilting, Deflection, PointNet, Artificial Intelligence, Geometric Assessment, Surface Roughness, Vietnamese Standards (TCVN).*

1. GIỚI THIỆU

Trong vòng đời của một công trình xây dựng, đặc biệt là các công trình kết cấu thép, việc đối mặt với các sự cố hoặc vấn đề về hiệu suất là điều không mong muốn nhưng có thể xảy ra. Các sự cố này có thể bao gồm sụp đổ một phần hoặc toàn bộ trong giai đoạn thi công hay sau khi đưa vào sử dụng, lún nghiêng cục bộ, biến dạng võng quá mức, hư hại do hỏa hoạn, hay tình trạng quá tải sử dụng phát sinh từ việc tăng tải trọng ngoài dự kiến (ví dụ: lắp đặt hệ thống MEP nặng trên mái hoặc tích tụ nước mưa do độ dốc mái không đủ). Việc đánh giá chính xác mức độ và bản chất của các hư hại này là cực kỳ quan trọng để xác định nguyên nhân, đề xuất giải pháp khắc phục hiệu quả và đảm bảo an toàn cho công trình. Để thực hiện việc này, cần tuân thủ các hướng dẫn và tiêu chuẩn hiện hành về khảo sát, đánh giá kết cấu, chẳng hạn như TCXDVN 9381:2012 Hướng dẫn đánh giá mức độ nguy hiểm của kết cấu nhà [3].

Các phương pháp đánh giá truyền thống tại hiện trường thường gặp khó khăn trong việc thu thập dữ liệu hình học chính xác và toàn diện về các biến dạng phức tạp của kết cấu sau sự cố. Sự xuất hiện của công nghệ quét 3D laser đã mang lại một công cụ mạnh mẽ, cho phép thu thập dữ liệu không gian ba chiều (dưới dạng đám mây điểm) một cách nhanh chóng và chính xác, số hóa hiện trạng biến dạng thực tế của công trình.

Tuy nhiên, việc xử lý và khai thác hiệu quả khối lượng dữ liệu khổng lồ từ đám mây điểm vẫn là một thách thức, đặc biệt trong bối cảnh các dạng hư hại đa dạng và phức tạp của công trình sự cố. Trí tuệ nhân tạo (AI), đặc biệt là các mô hình học sâu như PointNet [2], đã nổi lên như một giải pháp đầy hứa hẹn, có khả năng xử lý trực tiếp dữ liệu đám mây điểm mà không cần chuyển đổi sang các định dạng khác như lưới đa giác hay hình ảnh. Khả năng học các đặc trưng cục bộ và toàn cục từ từng điểm riêng lẻ giúp PointNet vượt trội trong các nhiệm vụ phân loại và phân đoạn đối tượng trong không gian 3D.

Hiện nay, trên thế giới đã có một số phần mềm thương mại hỗ trợ phân tích và đánh giá dữ liệu đám mây điểm nổi bật như ClearEdge3D (EdgeWise, Verity) và BuildIT Construction,... Tuy nhiên, các giải pháp này vẫn bộc lộ một số hạn

chế đáng kể khi ứng dụng trong phân tích và đánh giá kết cấu theo tiêu chuẩn kỹ thuật, bao gồm: Chi phí bản quyền cao, Mức độ tự động hóa hạn chế đối với đánh giá kết cấu, Khả năng tùy biến và mở rộng hạn chế,...

Bài báo gốc của Daif & Marzouk (2025) [1] đã chứng minh tiềm năng của PointNet trong việc phân loại và phân đoạn các cấu kiện kết cấu thép với độ chính xác cao. Dựa trên nền tảng này, nghiên cứu của chúng tôi nhằm mục tiêu phát triển và mở rộng ứng dụng của công nghệ đám mây điểm để không chỉ nhận diện cấu kiện mà còn định lượng các thông số hình học quan trọng, từ đó đánh giá mức độ hư hại và sự toàn vẹn hình học của kết cấu thép trong các công trình gặp sự cố theo các tiêu chuẩn hiện hành của Việt Nam.

- Mục tiêu chính của bài báo:

(1) Phát triển một khung AI dựa trên đám mây điểm để tự động phân loại và phân đoạn các cấu kiện kết cấu thép từ dữ liệu quét của công trình đã/đang gặp sự cố.

(2) Xây dựng các phương pháp định lượng và đánh giá các biến dạng hình học và khuyết tật phổ biến như độ võng, độ nghiêng, độ phẳng, vặn xoắn, mất ổn định cục bộ và móp, sử dụng dữ liệu đám mây điểm thu được từ hiện trạng sau sự cố.

(3) Liên kết các kết quả phân tích hình học với các giới hạn và dung sai cho phép quy định trong các Tiêu chuẩn Việt Nam liên quan (ví dụ: TCXDVN 9381:2012 [3], TCVN 2337:2023 [4], TCVN 5575:2012 [5], TCVN 9378:2012 [6], TCVN 9262-1:2012 [7], TCVN 9264:2012 [8], TCVN 9400:2012 [9], TCVN 9398:2012 [10]) để xác định mức độ phù hợp và mức độ hư hại.

(4) Đề xuất hướng phát triển tiếp theo của nghiên cứu về khả năng đánh giá độ nhám bề mặt từ đám mây điểm, phục vụ cho việc đánh giá thiệt hại vật liệu và xác định giải pháp sửa chữa.

- Đóng góp chính của bài báo:

Nghiên cứu này không chỉ tái khẳng định hiệu quả của PointNet trong xử lý đám mây điểm mà còn mở rộng ứng dụng của nó vào một bài toán thực tiễn quan trọng trong ngành xây dựng tại Việt Nam: tự động hóa việc kiểm tra và đánh giá hư hại hình học kết cấu thép trong bối cảnh các công trình sự cố.

- Ưu điểm nổi bật của giải pháp đề xuất:

+ Đánh giá sơ bộ nhanh chóng: Phương pháp có khả năng phân loại cấu kiện và định lượng biến dạng hình học một cách nhanh chóng, giúp kỹ sư sớm có cái nhìn tổng quan và đánh giá sơ bộ về tình trạng kết cấu. Điều này cực kỳ hữu ích trước khi có những yêu cầu thí nghiệm phá hoại (DT), không phá hoại (NDT) hoặc những khảo sát chi tiết hơn, từ đó định hướng hiệu quả cho các bước khảo sát chuyên sâu tiếp theo.

+ Hỗ trợ phân loại cấu kiện để tái sử dụng: Khả năng đánh giá chi tiết về hình học giúp kỹ sư dễ dàng phân loại các cấu kiện sẽ bị loại bỏ hoàn toàn do hư hại nghiêm trọng, những cấu kiện có thể được giữ lại để tái sử dụng (chẳng hạn trong các dự án phục hồi hoặc tái chế vật liệu) và những cấu kiện “lai” ở giữa cần được nghiên cứu cụ thể hơn để đưa ra quyết định cuối cùng về việc bỏ đi hay tái sử dụng.

+ Nâng cao độ chính xác và hiệu quả: Bằng cách tích hợp các tiêu chí đánh giá chi tiết và liên kết với TCVN, bài báo cung cấp một lộ trình rõ ràng để chuyển đổi quy trình đánh giá sự cố thủ công sang một phương pháp số hóa, chính xác và hiệu quả hơn, hỗ trợ đắc lực cho các công tác điều tra sự cố và lập phương án khắc phục.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Để đạt được mục tiêu đánh giá toàn vẹn hình học kết cấu thép của công trình sự cố, nghiên cứu này kế thừa và mở rộng khung làm việc dựa trên đám mây điểm đã được đề xuất, bao gồm các giai đoạn chính: tạo bộ dữ liệu, phân loại mô hình và phân đoạn bộ phận, đồng thời nâng cao hiệu suất thông qua các kỹ thuật học sâu.

2.1. Tổng quan về PointNet

PointNet là một kiến trúc mạng nơ-ron tiên phong cho phép xử lý trực tiếp dữ liệu đám mây điểm không có cấu trúc [2]. Nó vượt qua thách thức về tính bất biến đối với phép biến đổi thứ tự của các điểm (point order permutation invariance) bằng cách học các đặc trưng cục bộ và toàn cục thông qua các lớp tối đa hóa (max-pooling layers). Kiến trúc cơ bản của PointNet bao gồm:

- Chuyển đổi từng điểm độc lập: Mỗi điểm x_i trong đám mây điểm $P = \{x_1, \dots, x_n\}$ được đưa qua các hàm biến đổi độc lập (thường là các mạng đa tầng - MLP) để học các đặc trưng riêng của từng điểm.

- Hàm đối xứng: Để đảm bảo tính bất biến đối với thứ tự điểm, một hàm đối xứng như phép tối đa hóa (max-pooling) được áp dụng trên các đặc trưng đã học của tất cả các điểm, tạo ra một đặc trưng toàn cục của đám mây điểm.

- Tích hợp đặc trưng: Đặc trưng toàn cục này sau đó có thể được sử dụng cho nhiệm vụ phân loại hoặc được kết hợp ngược lại với các đặc trưng cục bộ để thực hiện phân đoạn từng điểm (point-wise segmentation).

2.2. Khung nghiên cứu đề xuất

Khung nghiên cứu được đề xuất trong bài báo này bao gồm ba giai đoạn chính, được tùy chỉnh để phù hợp với việc đánh giá các công trình thép bị sự cố:

2.2.1. Giai đoạn 1: Tạo Bộ Dữ liệu (Dataset Creation)

Để huấn luyện và kiểm định mô hình AI cho việc đánh giá công trình sự cố, một bộ dữ liệu đám mây điểm đa dạng và chính xác là cần thiết, bao gồm cả dữ liệu từ các cấu kiện bị biến dạng.

- Tạo mô hình CAD/BIM và mô phỏng biến dạng: Các mô hình 3D chính xác của các cấu kiện kết cấu thép tiêu chuẩn (ví dụ: cột chữ H, dầm chữ I, giằng, dầm hộp, v.v.) được tạo ra bằng phần mềm CAD/BIM chuyên dụng (ví dụ: Autodesk Revit [11], Tekla Structures). Để mô phỏng các trường hợp sự cố, các biến dạng thực tế (ví dụ: võng, nghiêng, vặn xoắn, móp, mất ổn định cục bộ) sẽ được đưa vào các mô hình này hoặc thu thập từ dữ liệu quét các công trình đã bị hư hại.

- Chuyển đổi sang đám mây điểm: Từ các mô hình 3D (lý tưởng và biến dạng), đám mây điểm được trích xuất bằng cách lấy mẫu các điểm trên bề mặt của cấu kiện. Mật độ điểm được kiểm soát để mô phỏng dữ liệu từ máy quét laser 3D thực tế.

+ Bộ dữ liệu phân loại: Gồm các đám mây điểm của các loại cấu kiện khác nhau (ví dụ: cột, dầm). Các mẫu biến dạng cũng có thể được phân loại riêng nếu cần nhận diện loại hư hại.

+ Bộ dữ liệu phân đoạn bộ phận: Gồm các đám mây điểm của từng cấu kiện phức tạp được gán nhãn cho từng bộ phận cấu thành (ví dụ: cánh trên, cánh dưới, bụng dầm; các mặt của cột hộp), kể cả khi chúng bị biến dạng.

- Tăng cường dữ liệu (Data Augmentation): Để tăng cường tính vững chắc của mô hình và tránh hiện tượng quá khớp (overfitting), các kỹ thuật tăng cường dữ liệu được áp dụng như: phép quay

ngẫu nhiên (random rotation), phép dịch chuyển ngẫu nhiên (random translation), phép co giãn ngẫu nhiên (random scaling) và thêm nhiễu ngẫu nhiên (random noise) vào tọa độ điểm [2].

2.2.2. Giai đoạn 2: Phân loại Mô hình (Model Classification)

Giai đoạn này tập trung vào việc huấn luyện PointNet để phân loại đám mây điểm của các cấu kiện thép. Trong ngữ cảnh công trình sự cố, việc phân loại có thể bao gồm cả việc nhận diện loại cấu kiện và/hoặc phân loại mức độ hư hại sơ bộ.

- Kiến trúc PointNet: Sử dụng kiến trúc PointNet tiêu chuẩn với các cải tiến để học các đặc trưng hiệu quả [2].

- Hàm mất mát tùy chỉnh (Custom Loss Function): Để cải thiện độ chính xác phân loại, một hàm mất mát tùy chỉnh được đề xuất, kết hợp ưu điểm của các hàm mất mát khác nhau. Hàm mất mát tổng thể (L_{total}) có thể được định nghĩa như sau [1]:

$$L_{total} = \alpha \cdot L_{cross-entropy} + \beta \cdot L_{Euclidean} + \gamma \cdot L_{weighted-distance} \quad (1)$$

Trong đó:

$L_{cross-entropy}$: Hàm mất mát entropy chéo tiêu chuẩn [12]. Nó đo lường sự khác biệt giữa phân phối xác suất dự đoán và phân phối xác suất thực tế.

$$L_{cross-entropy} = -\sum_{i=1}^N (y_i \log(\hat{y}_i)) \quad (2)$$

(Với N là số lớp, y_i là nhãn thực tế, $\hat{y}_i$ là xác suất dự đoán).

$L_{Euclidean}$: Hàm mất mát Euclidean, có thể được áp dụng để giảm khoảng cách giữa đặc trưng toàn cục của một lớp và một trung tâm đặc trưng lý tưởng của lớp đó trong không gian đặc trưng [13].

$$L_{Euclidean} = -\sum_{j=1}^K \|F_{global,j} - C_j\|_2^2 \quad (3)$$

(Với K là số mẫu, $F_{global,j}$ là đặc trưng toàn cục của mẫu j , C_j là trung tâm đặc trưng của lớp của mẫu j).

$L_{weighted-distance}$: Hàm mất mát khoảng cách trọng số, có thể được thiết kế để tăng cường mức phạt đối với các dự đoán sai của những lớp quan trọng (ví dụ: các loại hư hại nghiêm trọng) hoặc các lớp khó phân biệt [1].

$$L_{weighted-distance} = \sum_{i=1}^M w_i \cdot d(p_i, g_i) \quad (4)$$

(Với M là số điểm, w_i là trọng số cho điểm i , p_i là dự đoán của mô hình, g_i là nhãn thực tế).

α , β , γ : Là các hệ số trọng số điều chỉnh mức độ ảnh hưởng của từng thành phần mất mát.

2.2.3. Giai đoạn 3: Phân đoạn Bộ phận (Part Segmentation)

Sau khi phân loại, giai đoạn này tập trung vào việc chia nhỏ từng cấu kiện thành các bộ phận cấu thành của nó (ví dụ: mặt cánh trên, mặt cánh dưới, bụng dầm của dầm chữ I), ngay cả khi chúng đã bị biến dạng. Điều này là then chốt để phân tích chi tiết các biến dạng cục bộ.

- Kiến trúc PointNet: Phiên bản PointNet cho phân đoạn được sử dụng, nơi đặc trưng toàn cục được kết hợp với các đặc trưng cục bộ của từng điểm để dự đoán nhãn bộ phận cho mỗi điểm [2].

- Đánh giá: Chỉ số IoU (Intersection over Union) trung bình được sử dụng để đánh giá độ chính xác của quá trình phân đoạn, đo lường mức độ trùng khớp giữa vùng dự đoán và vùng thực tế [14].

$$IoU = \frac{A_{intersection}}{A_{union}} \quad (5)$$

Với $A_{intersection}$: diện tích vùng giao nhau, A_{union} : diện tích vùng hợp nhất. $IoU = 1$ dự đoán chính xác hoàn toàn, $IoU = 0$ không trùng khớp chút nào.

- Ảnh hưởng của mật độ điểm: Nghiên cứu sẽ xem xét ảnh hưởng của mật độ điểm trong đám mây điểm đến độ chính xác của quá trình phân đoạn, vì mật độ điểm cao hơn thường cung cấp nhiều thông tin chi tiết hơn cho việc phân tách các bộ phận và phát hiện biến dạng.

3. PHÁT TRIỂN ỨNG DỤNG: ĐÁNH GIÁ TOÀN VỆN HÌNH HỌC KẾT CẤU THÉP SAU SỰ CỐ

Sau khi các cấu kiện và bộ phận được phân loại và phân đoạn tự động từ đám mây điểm của hiện trạng sau sự cố, chúng ta có thể tiến hành trích xuất và định lượng các thông số hình học để đánh giá mức độ hư hại và sự phù hợp với các Tiêu chuẩn Việt Nam. Việc này đòi hỏi các thuật toán xử lý hình học 3D cụ thể cho từng tiêu chí, thường là so sánh với mô hình lý tưởng (CAD/BIM) của công trình.

3.1. Các tiêu chuẩn được áp dụng cho khảo sát và đánh giá

Để đảm bảo tính khách quan và khoa học trong quá trình khảo sát và đánh giá, các tiêu chuẩn sau đây sẽ được áp dụng:

- TCXDVN 9381:2012 Hướng dẫn đánh giá mức độ nguy hiểm của kết cấu nhà [3].

- TCVN 2337:2023 Tải trọng và tác động - Tiêu chuẩn thiết kế (thay thế cho TCVN 2737:1995) [4].

- TCVN 9262-1:2012 (ISO 7976-1:1989) Dung sai trong xây dựng công trình - Phương pháp đo kiểm công trình và cấu kiện chế sẵn của công trình - Phần 1: Phương pháp và dụng cụ đo² [7].

- TCVN 9264:2012 (ISO 7976-2:1989) Dung sai trong xây dựng công trình - Phương pháp đo kiểm công trình và cấu kiện chế sẵn của công trình - Phần 2: Vị trí các điểm đo³ [8].

- TCVN 9400:2012 Quy trình kỹ thuật xác định độ lún công trình dân dụng và công nghiệp bằng phương pháp đo cao hình học [9].

- TCVN 9398:2012 Công tác trắc địa trong xây dựng công trình - Yêu cầu chung [10].

Các tiêu chuẩn này sẽ là cơ sở pháp lý và kỹ thuật để so sánh các kết quả đo đạc từ đám mây điểm, đặc biệt là trong việc đánh giá kích thước hình học của hệ kết cấu và ổn định công trình.

3.2. Đánh giá về kích thước hình học của hệ kết cấu và ổn định công trình

Việc đánh giá kích thước hình học và ổn định của công trình sau sự cố là một bước thiết yếu. Dữ liệu đám mây điểm cung cấp khả năng đo đạc toàn diện và chính xác, tuân thủ các phương pháp và quy trình đo kiểm trong TCVN 9262-1:2012 và TCVN 9264:2012. Cụ thể, các điểm đo trên kết cấu thực tế (sau biến dạng) được thu thập và so sánh với vị trí lý tưởng từ mô hình thiết kế. Đối với các vấn đề về lún nghiêng, dữ liệu độ cao từ đám mây điểm có thể được xử lý theo các nguyên tắc của TCVN 9400:2012 để xác định độ lún. Các yêu cầu chung về công tác trắc địa trong xây dựng được quy định trong TCVN 9398-2012 cũng sẽ được áp dụng để đảm bảo độ tin cậy của dữ liệu đầu vào.

3.3. Độ võng (Deflection)

- Mô tả: Là biến dạng thẳng đứng của dầm hoặc độ lệch ngang của cột so với vị trí lý tưởng ban đầu hoặc so với mặt phẳng chuẩn. Đặc biệt quan trọng trong các trường hợp võng quá mức do tải trọng vượt quá thiết kế hoặc lỗi thi công.

- Phương pháp:

(1) Trích xuất đường trục/mặt phẳng tham chiếu: Từ đám mây điểm của dầm/cột đã phân đoạn (ví dụ: bụng dầm hoặc đường tâm lý thuyết từ mô hình CAD/BIM), tìm mặt phẳng/đường thẳng tham chiếu phù hợp nhất (best-fit plane/line), thường sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất (Least Squares Fitting) [15].

(2) Đo độ lệch: Tính toán khoảng cách vuông góc của từng điểm trên đám mây điểm thực tế so với đường trục/mặt phẳng tham chiếu lý tưởng. Độ võng lớn nhất là giá trị lệch tối đa.

+ Ví dụ công thức: Giả sử dầm được định hướng theo trục X, độ võng Z tại điểm (x, y, z) trên bụng dầm được tính bằng khoảng cách từ điểm đó đến một đường thẳng/đường cong lý tưởng (đường cong đàn hồi).

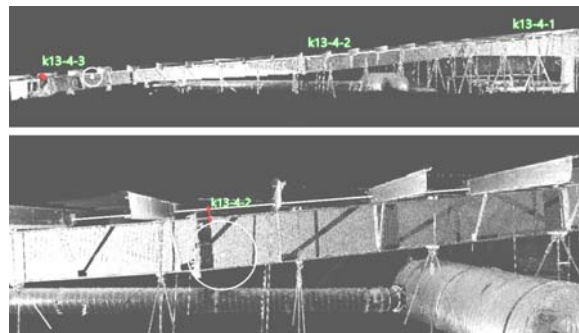
$$\delta_{\max} = \max(|Z_{\text{actual}} - Z_{\text{ideal}}|) \quad (6)$$

Trong đó: Z_{actual} là tọa độ Z thực tế, Z_{ideal} là tọa độ Z lý tưởng từ mô hình hoặc đường fitting [16].

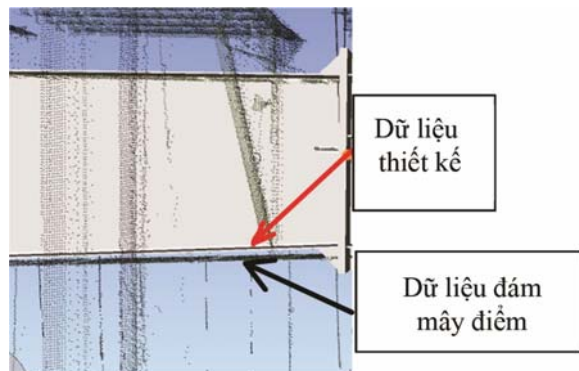
+ Minh họa:



Hình ảnh hiện trường với máy 3D scan GLS-2200



Hình ảnh độ lệch của dầm (point cloud) so với phương chuẩn



Độ nghiêng thực tế (point cloud) so với phương chuẩn (dữ liệu 3D thiết kế)

Hình 1: Sơ đồ biểu diễn độ võng của dầm từ đám mây điểm và so sánh với mô hình lý tưởng

- Tiêu chuẩn Việt Nam: So sánh độ võng đo được với giới hạn độ võng cho phép trong TCVN 2337:2023 (Tải trọng và tác động - Quy định các giá trị giới hạn chuyển vị và biến dạng) [4] hoặc các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép liên quan (TCVN 5575:2012 - mục về điều kiện bền và điều kiện sử dụng) [5]. Việc xác định độ võng cũng cần tuân thủ các yêu cầu về đo đạc trong TCVN 9262-1:2012 và TCVN 9264:2012 [7, 8].

3.4. Độ nghiêng (Tilt/Plumbness)

- Mô tả: Mức độ lệch khỏi phương thẳng đứng của cột hoặc phương ngang của dầm. Thường xuất hiện trong các sự cố lún nghiêng của móng hoặc lỗi lắp dựng.

- Phương pháp:

(1) Xác định trục cấu kiện: Từ đám mây điểm của cột/dầm đã phân đoạn, xác định vector phương của cấu kiện (ví dụ: bằng Phân tích thành phần chính - PCA) [17].

(2) Tính góc lệch: Tính góc giữa vector phương này và vector phương thẳng đứng/ngang lý tưởng (ví dụ: trục Z của hệ tọa độ công trình).

+ Ví dụ công thức tính Góc nghiêng θ của cột được xác định dựa trên góc giữa Vector trục cột/cấu kiện V_{column} và Vector phương thẳng đứng lý lượng Z, được tính bằng:

$$\theta = \arccos\left(\frac{|V_{\text{column}} \cdot Z|}{\|V_{\text{column}}\| \cdot \|Z\|}\right) \quad (7)$$

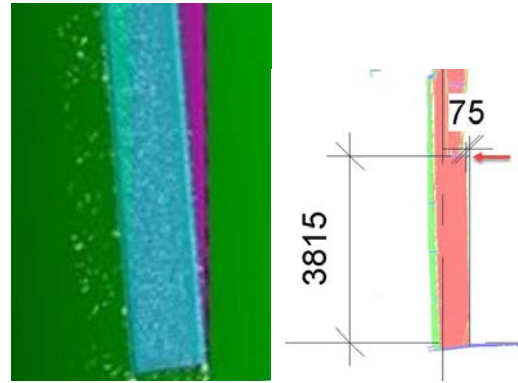
Trong đó:

$Z = (0,0,1)$: vector phương thẳng đứng lý tưởng, $\|\cdot\|$ là chuẩn Euclidean của vector [13].

+ Minh họa:



Hình ảnh scan hiện trường



Hình 2: Minh họa góc nghiêng của cột thép so với phương thẳng đứng lý tưởng

- Tiêu chuẩn Việt Nam: So sánh với dung sai độ nghiêng cho phép trong TCVN 9378:2012 (Kết cấu thép - Gia công, lắp ráp và nghiệm thu - mục về dung sai lắp đặt) [6] và các quy định khác về lắp đặt. Việc xác định độ nghiêng cột/công trình cũng liên quan đến các yêu cầu trắc địa trong TCVN 9398-2012 [10] và phương pháp đo lún trong TCVN 9400-2012 [9].

3.5. Độ phẳng (Flatness)

- Mô tả: Mức độ sai lệch của một bề mặt so với một mặt phẳng lý tưởng. Quan trọng cho các tấm bụng dầm, cánh dầm hoặc bản mã, đặc biệt khi có các biến dạng do hỏa hoạn (cong vênh cục bộ) hoặc va đập trong thi công.

- Phương pháp:

(1) Trích xuất bề mặt: Từ đám mây điểm đã được phân đoạn, chọn các điểm thuộc một bề mặt cụ thể (ví dụ: mặt cánh dầm).

(2) Fitting mặt phẳng: Tìm mặt phẳng phù hợp nhất (best-fit plane) đi qua các điểm đó (ví dụ: bằng phương pháp bình phương nhỏ nhất) [15].

(3) Đo độ lệch: Tính khoảng cách vuông góc lớn nhất của bất kỳ điểm nào trên bề mặt thực tế so với mặt phẳng phù hợp nhất này.

+ Ví dụ công thức: khoảng cách từ một điểm $P_i = (x_i, y_i, z_i)$ đến mặt phẳng $Ax + By + Cz + D = 0$, khoảng cách là:

$$d_i = \frac{|Ax_i + By_i + Cz_i + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (8)$$

Độ phẳng (Flatness) của bề mặt được xác định là độ lệch hình học lớn nhất giữa các điểm trên bề mặt thực tế và mặt phẳng tham chiếu, được biểu diễn bằng công thức:

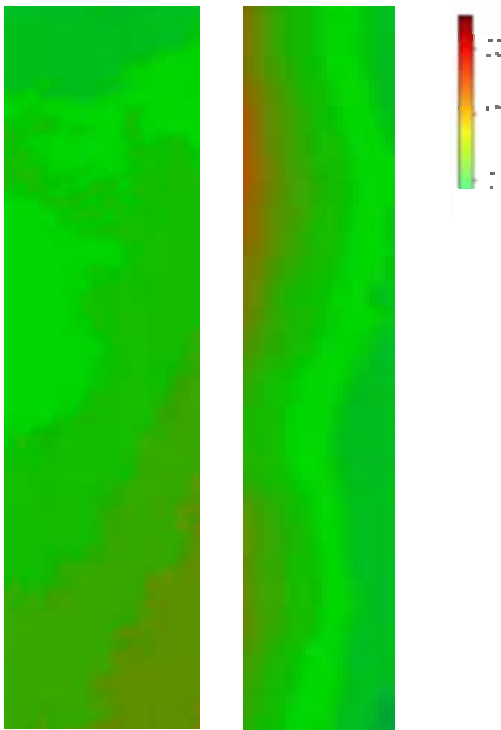
$$\text{Flatness} = \max(|d_i|) \quad [18].$$

Flatness = 0 thì bề mặt hoàn toàn phẳng, giá trị càng lớn bề mặt càng gồ ghề.

+ Minh họa:



Hình ảnh scan hiện trường



Hình 3: Minh họa độ phẳng của mặt tấm từ đám mây điểm và các vùng sai lệch

- Tiêu chuẩn Việt Nam: So sánh với dung sai độ phẳng trong TCVN 9378:2012 [6] hoặc các tiêu chuẩn sản xuất thép về dung sai kích thước. Các nguyên tắc đo kiểm trong TCVN 9262-1:2012 và TCVN 9264:2012 cũng có thể được áp dụng [7, 8].

3.6. Vặn xoắn (Twist)

- Mô tả: Sự xoay của các mặt cắt ngang của cấu kiện dọc theo chiều dài của nó. Có thể xảy ra do lỗi gia công, lắp đặt, hoặc do biến dạng nhiệt từ hỏa hoạn.

- Phương pháp:

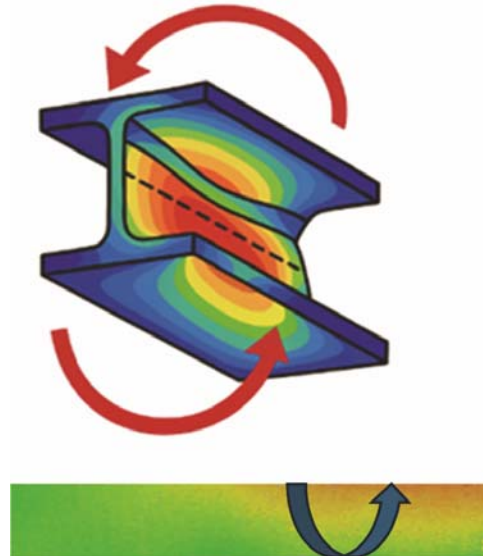
(1) Chia cấu kiện thành các mặt cắt: Chia đám mây điểm của cấu kiện thành nhiều mặt cắt ngang dọc theo chiều dài.

(2) Xác định định hướng mặt cắt: Đối với mỗi mặt cắt, xác định hướng của nó (ví dụ: vector biểu diễn phương cánh dầm) bằng cách fitting các đường thẳng hoặc mặt phẳng cục bộ [19].

(3) Tính góc xoay tương đối: Tính góc xoay giữa các mặt cắt liên tiếp hoặc so với mặt cắt đầu tiên. Vặn xoắn là sự tích lũy của các góc xoay này.

+ Ví dụ minh họa: Đối với dầm chữ I, có thể theo dõi sự quay của vector biểu diễn phương cánh dầm tại các mặt cắt khác nhau [19].

+ Minh họa:



Hình 4: Sơ đồ minh họa hiện tượng vặn xoắn trên dầm chữ I

- Tiêu chuẩn Việt Nam: So sánh với dung sai vặn xoắn cho phép theo TCVN 9378:2012 [6].

3.7. Mất ổn định cục bộ (Local Buckling)

- Mô tả: Biến dạng cục bộ (phồng/lõm) của các tấm thành phần (cánh, bụng) của cấu kiện dưới tác dụng của ứng suất nén hoặc cắt, làm giảm khả năng chịu lực. Thường là dấu hiệu của quá tải sử dụng (do tăng tải trọng hoặc đọng nước mưa) hoặc hư hại do hỏa hoạn.

- Phương pháp:

(1) Phân đoạn tấm: Tách riêng đám mây điểm của từng tấm (ví dụ: mặt bụng của dầm chữ H).

(2) Fitting mặt phẳng/đường cong lý tưởng: Tìm mặt phẳng hoặc bề mặt cong phù hợp nhất với tấm đó bằng phương pháp bình phương nhỏ nhất [15].

(3) Bản đồ sai lệch: Tạo bản đồ màu (heatmap) hiển thị khoảng cách từ từng điểm đám mây điểm thực tế đến mặt phẳng/bề mặt lý tưởng. Các vùng có độ lệch lớn và cục bộ cho thấy dấu hiệu mất ổn định [20].

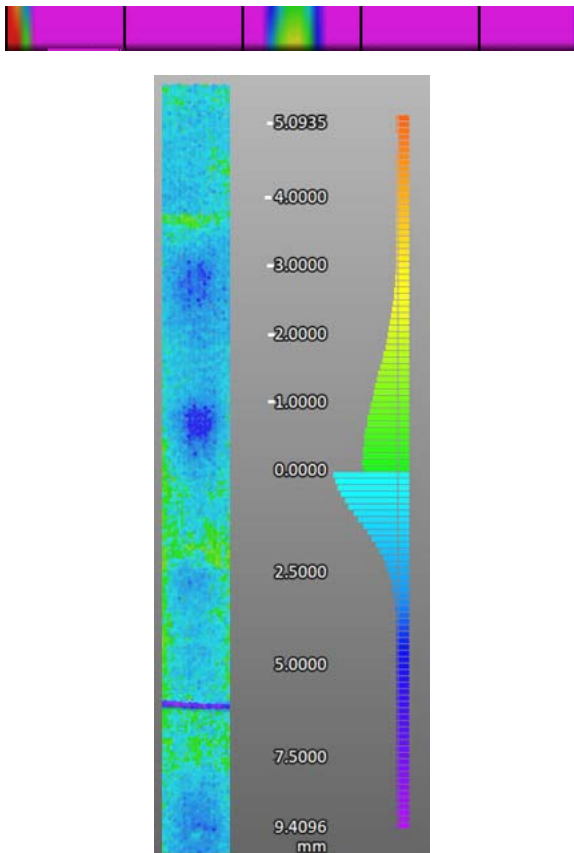
(4) Định lượng mức độ mất ổn định: Đo chiều sâu và diện tích của vùng bị biến dạng.

+ Ví dụ công thức: Một hàm $D(x,y)$ biểu diễn độ lệch vuông góc của bề mặt so với mặt phẳng lý tưởng.

$$D(x,y) = z_{\text{actual}}(x,y) - z_{\text{ideal}}(x,y) \quad (9)$$

Mức độ mất ổn định cục bộ có thể được đánh giá dựa trên giá trị lớn nhất của $|D(x,y)|$ trong một vùng xác định [20].

+ Minh họa:



Hình 5: Bản đồ nhiệt thể hiện sự mất ổn định cục bộ trên tấm bụng dầm

- Tiêu chuẩn Việt Nam: Mặc dù TCVN 9378:2012 [6] có đề cập đến một số dung sai cho biến dạng cục bộ, việc đánh giá trực tiếp nguy cơ mất ổn định cần dựa trên các nguyên lý thiết kế của TCVN 5575:2012 liên quan đến kiểm tra ổn định của các cấu kiện chịu nén/uốn và các quy định về tỷ lệ chiều rộng/độ dày của các cấu kiện loại I, II, III, IV [5].

3.8. Móp (Dents)

- Mô tả: Các vết lõm cục bộ trên bề mặt do va đập hoặc tác động cơ học. Thường xuất hiện do sự cố trong quá trình thi công (ví dụ: va chạm với thiết bị) hoặc trong quá trình sử dụng.

- Phương pháp:

(1) Phân đoạn bề mặt: Chọn vùng đám mây điểm chứa vết móp.

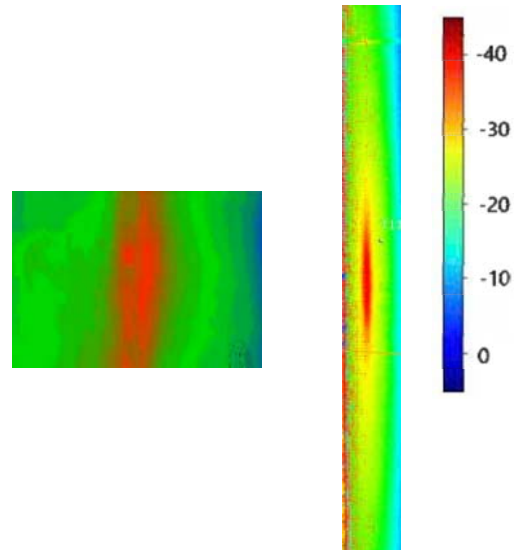
(2) Fitting bề mặt xung quanh: Xác định bề mặt lý tưởng (plane or simple curve) dựa trên các điểm xung quanh vết móp để làm mặt phẳng tham chiếu [21].

(3) Tính chiều sâu và kích thước: Đo khoảng cách vuông góc từ các điểm trong vết móp đến bề mặt tham chiếu. Chiều sâu vết móp là độ lệch lớn nhất. Các thuật toán clustering có thể giúp xác định ranh giới và kích thước của vết móp [21].

+ Ví dụ minh họa: Tìm điểm $P_{\min}$ có khoảng cách âm lớn nhất (lõm vào) so với mặt phẳng/bề mặt tham chiếu.

$$\text{Chiều sâu móp Depth} = \max|d(P_{\min})| \quad (10)$$

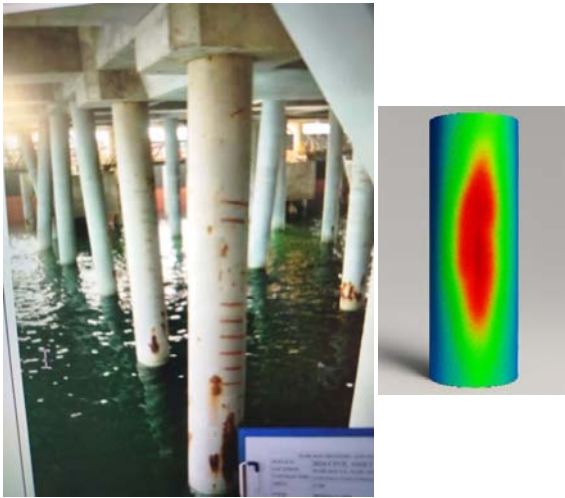
+ Minh họa:



Hình 6: Xác định và đo vết móp trên bề mặt thép từ dữ liệu đám mây điểm

- Tiêu chuẩn Việt Nam: Hiện không có TCVN cụ thể nào quy định chi tiết về dung sai vết móp cho tất cả các loại cấu kiện. Việc chấp nhận hoặc từ chối dựa trên mức độ nghiêm trọng (chiều sâu và kích thước) và ảnh hưởng đến khả năng chịu lực, thường theo quy định riêng của dự án hoặc kinh nghiệm kỹ thuật. Tuy nhiên, việc đo lường và định lượng cần tuân thủ các nguyên tắc chung của TCVN 9262-1:2012 và TCVN 9264:2012 [7, 8].

3.9. Các biến dạng bề mặt kết cấu do han rỉ, phơi nhiễm hóa chất hay tiếp xúc môi trường nhiệt độ cao,... cũng làm giảm yếu tiết diện, suy giảm chất lượng và khả năng chịu lực của cấu kiện



Hình 7: Hình ảnh chụp các cột thép bị rỉ sét do ăn mòn và phân tích bề mặt trên dữ liệu đám mây điểm

4. HƯỚNG PHÁT TRIỂN NÂNG CAO: ĐÁNH GIÁ ĐỘ NHÁM BỀ MẶT VÀ THÁCH THỨC

Ngoài việc đánh giá các thông số hình học vĩ mô và cục bộ của các cấu kiện thép bị hư hại, một hướng phát triển tiềm năng và đầy thách thức của nghiên cứu là khả năng đánh giá độ nhám bề mặt (Surface Roughness Assessment) từ dữ liệu đám mây điểm. Điều này đặc biệt quan trọng để đánh giá thiệt hại bề mặt do hỏa hoạn (ví dụ: bong tróc lớp sơn, thay đổi cấu trúc bề mặt) hoặc chuẩn bị bề mặt cho công tác sửa chữa/phục hồi.

4.1. Tầm quan trọng của độ nhám bề mặt

Độ nhám bề mặt là một đặc tính vật liệu quan trọng có ảnh hưởng đáng kể đến:

- Hiệu suất lớp phủ bảo vệ: Độ nhám bề mặt phù hợp (profile bề mặt) là yếu tố quyết định độ bám dính của lớp sơn chống ăn mòn, kéo dài tuổi thọ lớp phủ. Sau hỏa hoạn, lớp sơn cũ có thể bị hư hại, việc đánh giá độ nhám bề mặt còn lại là cần thiết cho công tác làm sạch và sơn lại.

- Đặc tính ma sát: Trong các mối nối ma sát bằng bulông cường độ cao, độ nhám bề mặt tiếp xúc ảnh hưởng trực tiếp đến hệ số ma sát và khả năng truyền lực của mối nối.

- Khả năng chống ăn mòn: Bề mặt quá thô có thể tạo điều kiện cho sự tích tụ độ ẩm và chất gây ăn mòn, đặc biệt sau khi lớp bảo vệ bị mất đi.

4.2. Phương pháp đề xuất để đánh giá độ nhám bề mặt từ đám mây điểm

Để đánh giá độ nhám ở quy mô vi mô từ đám mây điểm, cần các phương pháp và thiết bị tiên tiến hơn:

(1) Thu thập dữ liệu độ phân giải siêu cao: Thay vì máy quét 3D laser thông thường cho hình học, cần sử dụng các thiết bị quét bề mặt chuyên dụng (ví dụ: máy quét laser độ phân giải cao cho bề mặt, hệ thống quang học theo nguyên lý thị giác lập thể hoặc chiếu vân) có khả năng thu được đám mây điểm với mật độ và độ chính xác ở cấp độ micromet (μm).

(2) Tiền xử lý chuyên biệt: Các bước lọc nhiễu cần được thực hiện cực kỳ cẩn thận để bảo toàn thông tin về độ nhám. Các thuật toán phân tách sóng (waviness) và nhám (roughness) cần được áp dụng để cô lập các đặc trưng nhám [22].

(3) Định lượng độ nhám: Từ một vùng nhỏ của đám mây điểm bề mặt đã được làm sạch, có thể tính toán các thông số độ nhám tiêu chuẩn:

- + Trung bình độ lệch tuyệt đối (R_a - Average Roughness): Giá trị trung bình của độ lệch tuyệt đối của profile nhám so với đường trung bình [23].

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (11)$$

(Đối với profile 2D) hoặc mở rộng cho 3D [24].

- + Trung bình bình phương sai lệch (R_q - Root Mean Square Roughness): Độ lệch căn bậc hai trung bình của profile nhám [23].

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L y(x)^2 dx} \quad (12)$$

(Đối với profile 2D).

- + Các chỉ số khác như R_z (chiều cao trung bình của 5 đỉnh cao nhất và 5 đáy sâu nhất), R_{max} (chiều cao lớn nhất của profile) [23].

- + Các thuật toán này sẽ yêu cầu xác định một mặt phẳng hoặc đường cong tham chiếu cục bộ rất chính xác cho từng vùng nhỏ của bề mặt.

(4) Trực quan hóa và báo cáo: Kết quả độ nhám có thể được hiển thị dưới dạng bản đồ nhiệt trên bề mặt 3D của cấu kiện, cho phép nhanh chóng xác định các vùng có độ nhám không đạt yêu cầu.

(5) Tiêu chuẩn liên quan: So sánh các giá trị độ nhám đo được với các yêu cầu về chuẩn bị bề mặt trước khi sơn hoặc mạ trong các tiêu chuẩn như TCVN 9378:2012 (về chuẩn bị bề mặt và lớp phủ)

[6] hoặc các tiêu chuẩn quốc tế về độ nhám bề mặt (ví dụ: ISO 4287, ISO 4288) để đảm bảo chất lượng bề mặt phù hợp với mục đích sử dụng [25, 26].

4.3. Thách thức và giới hạn

- Chất lượng dữ liệu: Việc thu thập đám mây điểm với độ chính xác và mật độ ở cấp độ micromet là một thách thức lớn, yêu cầu thiết bị đắt tiền và quy trình quét tỉ mỉ.

- Xử lý nhiễu: Phân biệt giữa nhiễu từ thiết bị và các dao động thực sự của bề mặt ở quy mô rất nhỏ là rất khó khăn.

- Năng lực tính toán: Xử lý các đám mây điểm siêu dày đặc cho phân tích vi mô đòi hỏi năng lực tính toán và thuật toán tối ưu.

- Tiêu chuẩn hóa: Cần có sự nghiên cứu sâu hơn để phát triển các phương pháp tiêu chuẩn hóa việc đo độ nhám từ đám mây điểm 3D và tương quan nó với các phương pháp đo 2D truyền thống.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

5.1. Kết luận

Nghiên cứu này đã trình bày một khung toàn diện và tiềm năng để ứng dụng công nghệ đám mây điểm và trí tuệ nhân tạo (đặc biệt là PointNet) trong việc đánh giá sự toàn vẹn về mặt hình học của các cấu kiện kết cấu thép trong các công trình đã gặp sự cố hoặc bị ảnh hưởng. Khả năng tự động phân loại, phân đoạn và định lượng các sai lệch hình học và khuyết tật như độ võng, độ nghiêng, độ phẳng, vặn xoắn, mất ổn định cục bộ và móp đã được chứng minh về mặt khái niệm.

Ưu điểm nổi bật của giải pháp là khả năng cung cấp đánh giá sơ bộ hình học nhanh chóng, định hướng cho các khảo sát chi tiết hơn, và hỗ trợ kỹ sư trong việc phân loại cấu kiện để quyết định giữa loại bỏ, tái sử dụng hay nghiên cứu thêm.

Quan trọng hơn, việc liên kết các kết quả phân tích này với các giới hạn và dung sai trong các Tiêu chuẩn Việt Nam (TCXDVN 9381:2012 [3], TCVN 2337:2023 [4], TCVN 5575:2012 [5], TCVN 9378:2012 [6], TCVN 9262-1:2012 [7], TCVN 9264:2012 [8], TCVN 9400:2012 [9], TCVN 9398:2012 [10]) cung cấp một công cụ mạnh mẽ cho các kỹ sư và chuyên gia trong việc điều tra sự cố, đánh giá mức độ hư hại và lập phương án khắc phục. Hệ thống này không chỉ nâng cao độ chính xác và hiệu quả của quy trình đánh giá sự cố mà còn giảm thiểu rủi ro từ các lỗi thủ công và cung cấp dữ liệu khách quan cho việc ra quyết định.

5.2. Kiến nghị

Để đưa nghiên cứu này vào ứng dụng thực tiễn trong bối cảnh đánh giá công trình sự cố, chúng tôi kiến nghị:

- Thử nghiệm thực tế trên công trình sự cố: Tiến hành thu thập dữ liệu đám mây điểm từ các trường hợp công trình thực tế đã gặp sự cố (ví dụ: công trình bị lún nghiêng, võng, hỏa hoạn hoặc lỗi thi công) để huấn luyện và kiểm định mô hình với số liệu đa dạng hơn về các loại biến dạng và hư hại.

- Phát triển phần mềm tích hợp: Xây dựng một phần mềm hoặc công cụ tích hợp cho phép tự động hóa toàn bộ quy trình từ nhập dữ liệu đám mây điểm (của hiện trạng sau sự cố) đến xuất báo cáo đánh giá hư hại theo TCVN.

- Nghiên cứu sâu hơn về độ nhám bề mặt: Đầu tư nghiên cứu chuyên sâu về các phương pháp thu thập và phân tích dữ liệu đám mây điểm ở cấp độ micromet để định lượng độ nhám bề mặt một cách đáng tin cậy, đặc biệt để đánh giá thiệt hại bề mặt sau hỏa hoạn hoặc chuẩn bị cho công tác phục hồi lớp bảo vệ.

- Hợp tác với các cơ quan tiêu chuẩn: Phối hợp với các tổ chức tiêu chuẩn quốc gia để đề xuất hoặc điều chỉnh các tiêu chuẩn Việt Nam sao cho phù hợp với các phương pháp kiểm tra bằng công nghệ quét 3D laser tiên tiến và đánh giá hư hại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Daif, H., & Marzouk, M. (2025). Point cloud classification and part segmentation of steel structure elements. *Neural Computing and Applications*, 37, 4387-4407.
- [2] Qi, C. R., Su, H., Mo, K., & Guibas, L. J. (2017). PointNet: Deep learning on point sets for 3D classification and segmentation. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*,⁵ 77-85.
- [3] TCXDVN 9381:2012 về Hướng dẫn đánh giá mức độ nguy hiểm của kết cấu nhà.
- [4] TCVN 2337:2023 về Tải trọng và tác động - Tiêu chuẩn thiết kế.
- [5] TCVN 5575:2012 về Kết cấu thép - Tiêu chuẩn thiết kế.
- [6] TCVN 9378:2012 về Kết cấu thép - Gia công, lắp ráp và nghiệm thu - Yêu cầu kỹ thuật và nghiệm thu.

- [7] TCVN 9262-1:2012 (ISO 7976-1:1989) về Dung sai trong xây dựng công trình - Phương pháp đo kiểm công trình và cấu kiện chế sẵn của⁶ công trình - Phần 1: Phương pháp và dụng cụ đo.⁷
- [8] TCVN 9264:2012 (ISO 7976-2:1989) về Dung sai trong xây dựng công trình - Phương pháp đo kiểm công trình và cấu kiện chế sẵn của công trình - Phần 2: Vị trí các điểm đo.⁸
- [9] TCVN 9400:2012 về Quy trình kỹ thuật xác định độ lún công trình dân dụng và công nghiệp bằng phương pháp đo cao hình học.
- [10] TCVN 9398-2012 về Công tác trắc địa trong xây dựng công trình - Yêu cầu chung.
- [11] Autodesk. (2023). Revit 2023 Release Notes.
- [12] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- [13] Strang, G. (2016). *Introduction to Linear Algebra*. Wellesley-Cambridge Press.
- [14] Everingham, M., Van Gool, L., Williams, C. K. I., Winn, J., & Zisserman, A. (2010). The PASCAL Visual Object Classes (VOC) Challenge. *International Journal of Computer Vision*, 88(2), 303-338.⁹
- [15] Bolstad, W. M. (2009). *Doing Bayesian Data Analysis: A Tutorial with R and BUGS*. Academic Press.
- [16] Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2012). *Mechanics of Materials* (8th ed.). Cengage Learning.
- [17] Jolliffe, I. T. (2002). *Principal Component Analysis* (2nd ed.). Springer.
- [18] Farin, G. E. (2002). *Curves and Surfaces for CAGD: A Practical Guide* (5th ed.). Morgan Kaufmann.
- [19] Chen, P., & Li, R. (2019). Geometric deformation analysis of steel structures using point cloud data. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(6), 04019039.
- [20] Wang, X., & Liu, X. (2020). Automated detection of local buckling in steel plates using 3D point cloud data. *Automation in Construction*, 111, 103058.
- [21] Parian, M. (2014). Automated detection of dents on pipelines using 3D laser scanning. *Measurement*, 55, 396-407.
- [22] Gadelmawla, E. S., Koura, M. M., Maksoud, W. A., Elewa, I. M., & Soliman, H. H. (2002). Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 123(1), 133-145.
- [23] Whitehouse, D. J. (2002). *Handbook of Surface Metrology*. IoP Publishing.
- [24] Conroy, A., & O'Brien, R. (2017). Three-dimensional surface roughness measurement using a fringe projection system. *Precision Engineering*, 47, 57-65.
- [25] ISO 4287:1997: Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters.
- [26] ISO 4288:1996: Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture.