

XÂY DỰNG

TẠP CHÍ ĐIỆN TỬ CỦA BỘ XÂY DỰNG
JOURNAL OF CONSTRUCTION

TẠP CHÍ XÂY DỰNG - eISSN 3030-4482

Phương pháp kiểm tra kích thước, hình dạng ván khuôn thép bằng công nghệ quét laser 3D

Method for inspecting the dimensions and geometry of steel formwork using 3D laser scanning technology

►Trần Quang Học¹, Lê Khánh Giang^{1*}, Đỗ Văn Mạnh¹, Nguyễn Thành Lê²
¹Trường Đại học Giao thông vận tải; ²Học viện Kỹ thuật Quân sự
*Email: gianglk@utc.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Khoa học công nghệ

Ngày nhận bài: 15/4/2026

Ngày sửa bài: 27/4/2026

Ngày chấp nhận đăng: 11/5/2026

Ngày xuất bản Online: 20/5/2026

Tác giả liên hệ Email: gianglk@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Công tác kiểm tra kích thước, hình dạng của ván khuôn thép trước khi đổ bê tông có vai trò quan trọng nhằm đảm bảo độ chính xác kích thước hình học, hình dạng và chất lượng kết cấu bê tông. Đối với các ván khuôn thép có bề mặt cong và có hình dạng phức tạp, các phương pháp kiểm tra truyền thống như sử dụng thước đo, máy toàn đạc điện tử hoặc các phương pháp đo thủ công thường gặp nhiều khó khăn, do chỉ kiểm tra được một số điểm đặc trưng, rời rạc và khó đánh giá đầy đủ hình dạng bề mặt của ván khuôn.

Bài báo này trình bày phương pháp kiểm tra kích thước hình học, hình dạng ván khuôn thép bằng công nghệ quét laser 3D. Dữ liệu đám mây điểm thu nhận từ thiết bị quét laser 3D được xử lý để xây dựng mô hình bề mặt của ván khuôn, sau đó so sánh với mô hình thiết kế nhằm xác định chênh lệch kích thước hình học, hình dạng của toàn bộ cấu kiện. Kết quả thực nghiệm cho thấy sử dụng máy quét laser 3D độ chính xác của mô hình có thể đạt được 2 – 3 mm, và kiểm tra được mô hình ván khuôn 3D hiện trạng < 10 mm so với mô hình ván khuôn 3D thiết kế.

Kết quả này, cho thấy công nghệ quét laser 3D cho phép thu thập dữ liệu nhanh chóng với mật độ điểm cao, tái hiện chính xác hình dạng bề mặt cong và cung cấp cơ sở trực quan để đánh giá sai lệch hình học. Áp dụng phương pháp này góp phần

nâng cao hiệu quả và độ tin cậy trong công tác kiểm tra ván khuôn đối với các cấu kiện có hình dạng phức tạp trong xây dựng công trình.

Từ khóa: Quét laser 3D, dữ liệu đám mây điểm, ván khuôn thép, kiểm tra kích và hình dạng ván khuôn.

ABSTRACT

The inspection of the dimensions and geometry of steel formwork prior to concrete casting plays an important role in ensuring the geometric accuracy, shape conformity, and overall quality of concrete structures. For steel formwork with curved surfaces and complex geometries, traditional inspection methods such as measuring tapes, electronic total stations, or manual measurement techniques often encounter significant limitations.

These methods typically allow measurements only at a limited number of discrete characteristic points, making it difficult to comprehensively evaluate the overall surface geometry of the formwork. This paper presents a method for inspecting the geometric dimensions and shape of steel formwork using 3D laser scanning technology. Point cloud data acquired from a 3D laser scanner are processed to reconstruct the surface model of the formwork. The reconstructed model is then compared with the design model to determine the geometric and dimensional deviations of the entire component. Experimental results show that the accuracy of the reconstructed model obtained from the 3D laser scanner can reach 2 – 3 mm, while the deviation between the as-built 3D formwork model and the design 3D model is less than 10 mm.

These results demonstrate that 3D laser scanning technology enables rapid data acquisition with high point density, accurately reproduces curved surface geometries, and provides a clear visual basis for evaluating geometric deviations. The application of this method contributes to improving the efficiency and reliability of formwork inspection for construction components with complex geometries.

Keywords: 3D laser scanning; point cloud data; steel formwork; dimensional and geometric inspection of formwork.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong quá trình thi công các kết cấu bê tông cốt thép, ván khuôn là bộ phận quyết định trực tiếp đến hình dạng và kích thước hình học của cấu kiện. Độ chính xác của hệ ván khuôn không chỉ ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt bê tông mà còn liên quan đến khả năng đảm bảo các yêu cầu thiết kế về hình học và khả năng làm việc của kết cấu. Do đó, việc kiểm tra kích thước và hình dạng của ván khuôn trước khi tiến hành đổ bê tông là một nội dung quan trọng trong công tác kiểm soát chất lượng thi công.

Trong các công trình xây dựng hiện nay, đặc biệt là các công trình xây dựng dân dụng, công trình kiến trúc văn hóa hoặc các cấu kiện kiến trúc đặc biệt, nhiều cấu kiện bê tông được thiết kế với hình dạng cong hoặc hình học không gian phức tạp. Tuy nhiên, trong thực tế công trường, việc kiểm tra hình học ván khuôn chủ yếu vẫn được thực hiện bằng các phương pháp đo đạc truyền thống như sử dụng thước đo, máy toàn đạc điện tử. Các phương pháp này thường chỉ cung cấp thông tin tại một số điểm kiểm tra riêng lẻ và gặp nhiều hạn chế khi đánh giá hình dạng của các bề mặt cong hoặc bề mặt có hình học phức tạp.

Cùng với sự phát triển của các công nghệ đo đạc hiện đại, công nghệ quét laser 3D đã trở thành một công cụ hiệu quả trong việc thu thập dữ liệu hình học của đối tượng với mật độ điểm lớn và độ chính xác cao. Dữ liệu thu nhận dưới dạng đám mây điểm cho phép tái hiện hình học không gian của đối tượng và tạo cơ sở cho việc phân tích, đánh

giá sai lệch so với mô hình thiết kế. Trên thế giới và tại Việt Nam đã có các nghiên cứu, ứng dụng máy quét laser 3D để thu thập dữ liệu 3D phục vụ xây dựng các mô hình 3D, BIM công trình. Tuy nhiên, đối với công tác kiểm tra ván khuôn có dạng phức tạp thì chưa có nhiều nghiên cứu chi tiết và đánh giá độ chính xác. Xuất phát từ những yêu cầu thực tiễn nêu trên, bài báo tập trung nghiên cứu khả năng ứng dụng công nghệ quét laser 3D trong công tác kiểm tra kích thước và hình dạng ván khuôn đối với các cấu kiện có hình dạng cong. Nội dung nghiên cứu nhằm khảo sát đánh giá độ chính xác của phương pháp, thiết bị để kiểm tra kích thước hình dạng ván khuôn, góp phần nâng cao hiệu quả kiểm tra và kiểm soát chất lượng công trình.

2. NỘI DUNG

2.1 Giới thiệu công nghệ quét 3D laser scanning

Công nghệ quét laser 3D (3D Laser Scanning) là một phương pháp đo đạc hiện đại cho phép thu nhận nhanh chóng thông tin hình học ba chiều của đối tượng trong không gian. Thiết bị quét laser phát ra các tia laser tới bề mặt đối tượng và ghi nhận tín hiệu phản xạ trở lại để xác định khoảng cách từ máy quét đến điểm đo. Kết hợp với các thông tin về góc quét theo phương ngang và phương đứng, tọa độ không gian của các điểm trên bề mặt đối tượng được xác định trong hệ tọa độ của máy quét. Quá trình này được thực hiện rất nhanh, cho phép thu nhận hàng trăm nghìn đến hàng triệu điểm đo trong một giây.

Kết quả của quá trình quét được biểu diễn dưới dạng đám mây điểm (point cloud), trong đó mỗi điểm chứa thông tin tọa độ không gian (X, Y, Z) và có thể kèm theo các thuộc tính khác như cường độ phản xạ hoặc màu sắc. Tập hợp các điểm này mô tả chi tiết hình dạng bề mặt của đối tượng được quét. Từ dữ liệu đám mây điểm, có thể tiến hành các bước xử lý như lọc nhiễu, ghép nối các trạm quét, xây dựng mô hình bề mặt ba chiều hoặc trích xuất các yếu tố hình học phục vụ cho các mục đích phân tích và đánh giá.

Trong lĩnh vực xây dựng và trắc địa công trình, công nghệ quét laser 3D đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiều nhiệm vụ như khảo sát hiện trạng công trình, lập mô hình số công trình, kiểm tra kích thước và hình dạng cấu kiện, kiểm soát chất lượng thi công và quan trắc biến dạng. So với các phương pháp đo đạc truyền thống, công nghệ quét laser 3D có ưu điểm nổi bật là khả năng thu nhận dữ liệu với mật độ điểm cao trên toàn bộ bề mặt đối tượng, giúp mô tả chi tiết hình dạng hình học của các cấu kiện có hình dạng phức tạp.

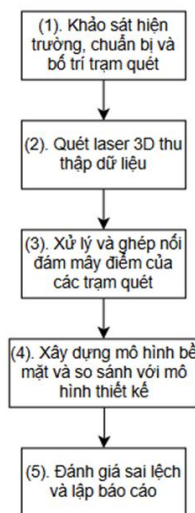
Đối với công tác kiểm tra ván khuôn trong thi công các cấu kiện bê tông có bề mặt cong, dữ liệu đám mây điểm thu được từ quét laser 3D cho phép tái hiện chính xác hình dạng không gian của ván khuôn. Trên cơ sở đó, có thể so sánh với mô hình thiết kế để xác định sai lệch hình học của toàn bộ bề mặt cấu kiện, từ đó cung cấp cơ sở đáng tin cậy cho việc đánh giá chất lượng và điều chỉnh trong quá trình thi công.



Hình 1: Máy quét 3D laser scanning.

2.2. Quy trình kiểm tra ván khuôn bằng công nghệ quét laser 3D

Quy trình kiểm tra kích thước, hình dạng ván khuôn bằng công nghệ quét laser 3D được thực hiện thông qua các bước chính từ thu thập dữ liệu hiện trường đến phân tích sai lệch hình học so với mô hình thiết kế. Quy trình này cho phép đánh giá toàn diện hình dạng không gian của ván khuôn, đặc biệt đối với các cấu kiện có bề mặt cong hoặc hình học phức tạp.



Hình 2: Sơ đồ khối quá trình kiểm tra ván khuôn bằng công nghệ quét laser 3D.

(1) Khảo sát hiện trường, chuẩn bị và bố trí trạm quét: Trước khi tiến hành quét, cần khảo sát hiện trường và xác định vị trí đặt máy quét laser sao cho đảm bảo thu nhận đầy đủ dữ liệu của bề mặt ván khuôn. Trong trường hợp ván khuôn có hình dạng phức tạp hoặc bị che khuất một phần, cần bố trí nhiều trạm quét khác nhau để đảm bảo toàn bộ bề mặt đối tượng được ghi nhận. Ngoài ra, các mục tiêu chuẩn (targets) hoặc điểm đặc trưng có thể được bố trí trong khu vực quét nhằm phục vụ cho việc liên kết và ghép nối dữ liệu giữa các trạm quét trong quá trình xử lý.

(2) Quét laser thu thập dữ liệu: Tại mỗi vị trí đặt máy, thiết bị quét laser 3D tiến hành quét bề mặt ván khuôn và thu nhận dữ liệu dưới dạng đám mây điểm. Tùy thuộc vào loại thiết bị và chế độ quét được lựa chọn, mật độ điểm đo có thể đạt tới hàng triệu điểm, cho phép mô tả chi tiết hình dạng bề mặt của ván khuôn. Quá trình quét thường được thực hiện trong thời gian ngắn và có thể ghi nhận dữ liệu trên diện rộng, giúp giảm đáng kể thời gian đo đạc so với các phương pháp kiểm tra truyền thống.

(3) Xử lý và ghép nối đám mây điểm của các trạm quét: Sau khi hoàn thành công tác quét hiện trường, dữ liệu từ các trạm quét được nhập vào phần mềm xử lý chuyên dụng để thực hiện các bước xử lý ban đầu như lọc nhiễu, loại bỏ các điểm không cần thiết và ghép nối (registration) các đám mây điểm từ nhiều trạm quét khác nhau thành một hệ dữ liệu thống nhất. Kết quả của bước này là một mô hình đám mây điểm hoàn chỉnh thể hiện hình dạng không gian của toàn bộ hệ ván khuôn.

(4) Xây dựng mô hình bề mặt và so sánh với thiết kế: Từ dữ liệu đám mây điểm đã được xử lý, có thể xây dựng mô hình bề mặt ba chiều của ván khuôn thông qua các phương pháp nội suy hoặc tạo lưới bề mặt (mesh). Mô hình này sau đó được đưa vào so sánh với mô hình thiết kế (CAD/BIM) của cấu kiện. Thông qua các công cụ phân tích trong phần mềm, sai lệch hình học giữa mô hình thực tế và mô hình thiết kế được xác

định và biểu diễn dưới dạng bản đồ sai lệch hoặc các mặt cắt kiểm tra. Điều này cho phép đánh giá trực quan mức độ phù hợp của ván khuôn so với yêu cầu thiết kế.

(5). Đánh giá sai lệch và lập báo cáo: Dựa trên kết quả phân tích sai lệch, các thông số như độ lệch vị trí, độ lệch bề mặt hoặc sai số kích thước có thể được xác định. Các kết quả này được tổng hợp dưới dạng bảng số liệu, hình ảnh trực quan hoặc bản đồ màu thể hiện mức độ sai lệch. Kết quả đánh giá là cơ sở để quyết định việc điều chỉnh ván khuôn trước khi tiến hành đổ bê tông, đồng thời phục vụ cho công tác kiểm soát chất lượng và nghiệm thu trong quá trình thi công công trình.

2.3 Đánh giá độ chính xác

Sau khi xây dựng được mô hình bề mặt của ván khuôn từ dữ liệu quét laser 3D, bước tiếp theo là xác định sai lệch hình học giữa mô hình thực tế và mô hình thiết kế. Việc đánh giá sai lệch thường được thực hiện thông qua phương pháp so sánh khoảng cách giữa các điểm trong đám mây điểm với bề mặt thiết kế.

Giả sử một điểm trong đám mây điểm thu được từ quét laser có tọa độ:

$$P_i(x_i, y_i, z_i) \quad (1)$$

Và bề mặt thiết kế được biểu diễn dưới dạng hàm:

$$F(x, y, z) = 0 \quad (2)$$

Khoảng cách sai lệch hình học từ điểm đo đến bề mặt thiết kế được xác định theo công thức:

$$d_i = \frac{|Ax_i + By_i + Cz_i + D|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \quad (3)$$

Trong đó: A, B, C, D là các hệ số của phương trình mặt phẳng hoặc bề mặt xấp xỉ thiết kế; d_i là khoảng cách sai lệch từ điểm đo đến bề mặt thiết kế.

Đối với các bề mặt cong phức tạp, sai lệch hình học thường được xác định bằng cách tính khoảng cách ngắn nhất từ điểm trong đám mây điểm đến bề mặt thiết kế (nearest surface distance) thông qua các thuật toán xử lý trong phần mềm chuyên dụng.

Để đánh giá tổng thể mức độ sai lệch của ván khuôn, các chỉ tiêu thống kê thường được sử dụng như sai lệch trung bình, sai lệch lớn nhất hoặc sai số bình phương trung bình:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (4)$$

Trong đó: d_i là sai lệch tại điểm thứ i ; n là số lượng điểm được sử dụng trong quá trình phân tích.

3. THỰC NGHIỆM

Để đánh giá khả năng ứng dụng của công nghệ quét laser 3D trong kiểm tra hình dạng ván khuôn, một thí nghiệm thực tế đã được thực hiện đối với hệ ván khuôn của cấu kiện bê tông có bề mặt cong tại công trường. Hệ ván khuôn được lắp dựng theo thiết kế nhằm tạo hình cho cấu kiện bê tông trước khi tiến hành đổ bê tông.

3.1. Thiết bị sử dụng

Thiết bị sử dụng là máy Scan Laser SPL-500E của hãng RooXen, tốc độ đo lên tới 2 triệu điểm mỗi giây và hệ thống hình ảnh HDR tiên tiến, việc tạo các đám mây điểm 3D màu có thể được hoàn thành trong vòng chưa đầy 2 phút. Một số thông số kỹ thuật chính của thiết bị như sau:



Hình 3: Hình và các thông số kỹ thuật chính của máy Scan Laser SPL-500E.

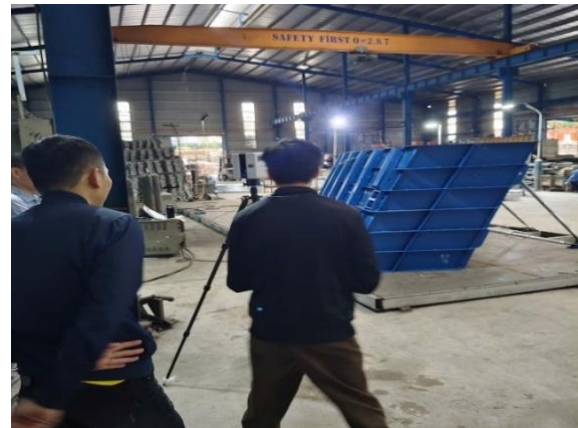
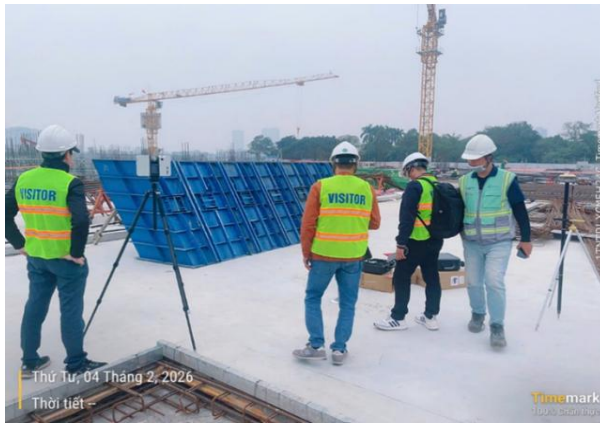
- Phạm vi quét: 0.5 - 500 m.
- Góc quét: 360° (ngang) × 300° (dọc).
- Tốc độ quét: Tối đa 2.000.000 điểm/giây.
- Độ chính xác tương đối: 1.1 mm @10 m; 1.8 mm @25 m.
- Độ chính xác góc: 0.001° (H/V).
- Tốc độ quét tối đa: 100 Hz.
- Bước quét: 0.018° (20.480 điểm/pixel 3D trên 360° H/V).
- Điều khiển ngoài hiện trường: Màn hình cảm ứng hoặc điều khiển máy tính bằng qua WLAN.
- Thời gian quét nhanh nhất ~16 giây (chỉ quét); 41 giây (quét + ảnh).
- Cảm biến laser Class-1 an toàn cho mắt (IEC 60825-1:2014).
- Bước sóng laser 1550 nm (không nhìn thấy).
- Camera HDR 2 camera tích hợp phía trước và hướng lên 45°.
- Độ phân giải ảnh 24.6 MP (12.3 MP ×2) cho mỗi lần chụp.

3.2 Khu vực thực nghiệm

Khu vực thực nghiệm được nhóm nghiên cứu thực nghiệm tại khu vực xây dựng công trình ở Hà Nội và Nhà máy Chế tạo ván khuôn tại Hải Phòng.

3.3. Thu thập dữ liệu quét laser 3D

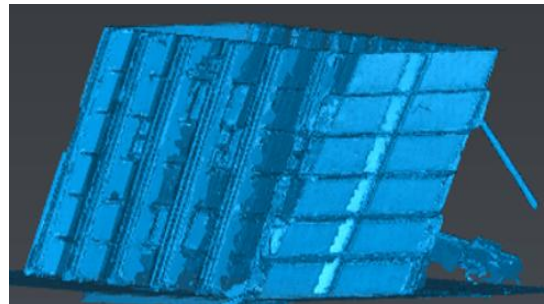
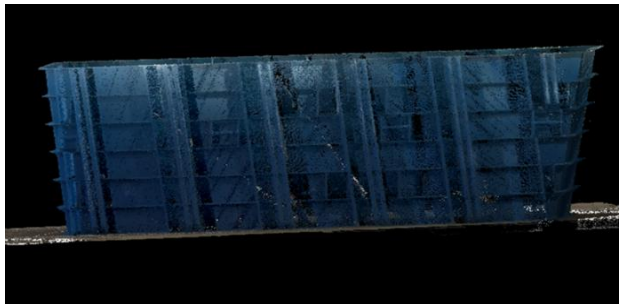
Thiết bị quét laser 3D được bố trí tại nhiều vị trí khác nhau xung quanh khu vực ván khuôn nhằm đảm bảo thu nhận đầy đủ dữ liệu bề mặt. Các trạm quét được lựa chọn sao cho hạn chế tối đa các vùng bị che khuất và đảm bảo độ phủ dữ liệu tốt. Trong quá trình quét, các mục tiêu chuẩn được bố trí để phục vụ cho việc ghép nối dữ liệu giữa các trạm quét.



Hình 4: Hình ảnh thực nghiệm tại công trình và nhà máy chế tạo ván khuôn.

3.4. Xử lý dữ liệu đám mây điểm

Sau khi hoàn thành công tác quét hiện trường, dữ liệu từ các trạm quét được nhập vào phần mềm AcuteLas Studio của hãng Rooxel để xử lý. Các bước xử lý bao gồm lọc nhiễu, loại bỏ các điểm không cần thiết và ghép nối các đám mây điểm từ nhiều trạm quét khác nhau thành một mô hình đám mây điểm thống nhất.



Hình 5: Hình ảnh đám mây điểm sau khi xử lý dữ liệu.

Kết quả xử lý cho ra báo cáo đánh giá về độ chính xác mô hình sau xử lý:

Bảng 1: Báo cáo tổng quan kết quả xử lý dữ liệu quét laser 3D>.

Sai số lớn nhất (mm)	4.75
Sai số trung bình (mm)	2.73
Tỷ lệ trùng lặp tối thiểu (%)	76.12
Số lượng quét	06
Số mặt được kết nối	14

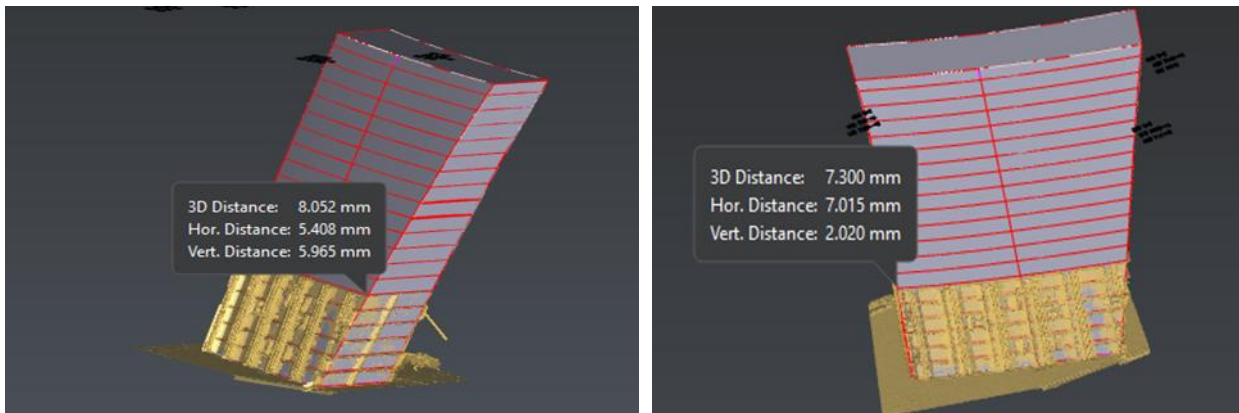
Bảng 2: Báo cáo chi tiết kết quả xử lý dữ liệu quét laser 3D.

Tên khối	Số mặt kết nối	Sai số lớn nhất (mm)	Sai số trung bình (mm)	Tỷ lệ trùng lặp tối thiểu (%)
001	04	2.52	1.77	76.18
003	05	4.75	3.04	80.39
005	05	3.98	2.23	77.89
006	05	4.58	3.12	76.18
008	04	4.75	3.99	80.39
010	05	3.10	2.32	78.28

3.5. Ghép nối và so sánh với mô hình thiết kế

Mô hình bề mặt thực tế của ván khuôn được đưa vào so sánh với mô hình thiết kế của cấu kiện trong môi trường phần mềm Cyclone của hãng Leica. Quá trình so sánh được thực hiện bằng cách xác định khoảng cách giữa mô hình 3D được tạo bởi các đám mây điểm và bề mặt 3D thiết kế của ván khuôn.

Kết quả so sánh cho phép xác định chênh lệch khoảng cách, tọa độ các điểm giữa mô hình 3D được tạo bởi các đám mây điểm và bề mặt 3D thiết kế của ván khuôn. Các khu vực có sai lệch lớn so với thiết kế được xác định rõ ràng, giúp kỹ sư thi công dễ dàng nhận biết và thực hiện điều chỉnh trước khi tiến hành đổ bê tông.



Hình 5: Hình ảnh ghép mô hình từ dữ liệu scan laser 3D với mô hình thiết kế.

Bảng 3: Bảng tổng hợp độ chênh lệch các mô hình ván khuôn quét laser 3D hiện trạng và mô hình 3D thiết kế.

TT	Tên vị trí ván khuôn	Chênh lệch lớn nhất (mm)	Ghi chú
1	11.1	5.41	Ván khuôn có giá đỡ
2	3.2.1	35.99	Ván khuôn để tự do
3	3.2.2	31.86	Ván khuôn để tự do
4	5.1.1	7.82	Ván khuôn có giá đỡ
5	5.1.2	3.32	Ván khuôn có giá đỡ
6	6.1.1	3.84	Ván khuôn có giá đỡ
7	6.1.2	23.54	Ván khuôn để tự do
8	6.2.1	11.25	Ván khuôn để tự do
9	6.2.2	8.10	Ván khuôn có giá đỡ
10	10.1	19.10	Ván khuôn để tự do
11	10.2	23.91	Ván khuôn để tự do

Nhận xét đánh giá: Dựa vào kết quả đo kiểm tra ván khuôn tại nhà máy và công trình cho thấy với các ván khuôn được lắp dựng và gia cố leo chống, chênh lệch mô hình 3D hiện trạng và mô hình thiết kế của ván khuôn < 10 mm. Với các ván khuôn thép để tự do, chênh lệch lớn hơn, nguyên nhân do các ván khuôn thép có trọng lượng lớn đã vị cong, vắn dẫn đến sự chênh lệch lớn này.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp kiểm tra kích thước và hình dạng ván khuôn thép bằng công nghệ quét laser 3D. Kết quả nghiên cứu cho thấy công nghệ quét laser 3D cho phép thu thập dữ liệu hình học bề mặt với mật độ điểm cao, phản ánh đầy đủ hình dạng thực tế của ván khuôn và hỗ trợ so sánh trực tiếp với mô hình thiết kế. Phương pháp này giúp phát hiện nhanh các sai lệch về kích thước và hình dạng, nâng cao độ chính xác, tính khách quan và hiệu quả trong công tác kiểm tra.

Kết quả thực nghiệm cho thấy việc ứng dụng công nghệ quét laser 3D trong kiểm tra ván khuôn thép là khả thi và có nhiều ưu điểm so với phương pháp đo đạc truyền thống, đặc biệt đối với các cấu kiện có hình dạng phức tạp. Phương pháp này góp phần nâng cao chất lượng kiểm soát hình học trong quá trình chế tạo và lắp dựng ván khuôn trong xây dựng công trình.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J Wang, T Yi, X Liang, T Ueda, Application of 3D Laser Scanning Technology Using Laser Radar System to Error Analysis in the Curtain Wall Construction, 2022. DOI: 10.3390/rs15010064
- [2] Phạm Trung Dũng, Cao Xuân Cường, Lê Đức Tịnh, Ngô Sỹ Cường, Nghiên cứu ứng dụng máy quét laser mặt đất trong quan trắc chuyển vị nhà cao tầng, Tạp chí Khoa học Mỏ - Địa chất, 2021.
- [3] Nguyễn Việt Nghĩa, Võ Ngọc Dũng, Nghiên cứu khả năng ứng dụng máy quét laser 3D mặt đất trong quản lý xây dựng - khai thác mỏ hầm lò, 2016.
- [4] Phạm Trung Dũng, Phạm Quốc Khánh, Cao Xuân Cường, Nguyễn Việt Hùng, “The capability of terrestrial laser scanning for monitoring the displacement of high-rise buildings”, Inżynieria Mineralna, 2021.
- [5] Lê Thị Thu Hà, Nguyễn Trung Văn, Phạm Thị Lan và nnk, Kết hợp công nghệ quét laser mặt đất và UAV trong xây dựng mô hình 3D công trình, Tạp chí Khoa học Mỏ - Địa chất, 2022.
- [6] Nguyễn Quốc Long, Nguyễn Việt Nghĩa, Cao Xuân Cường, Accuracy assessment of mine walls’ surface models derived from terrestrial laser scanning, International Journal of Coal Science & Technology, 2018.
- [7] Nghĩa N.V., Long N.Q., Cúc N.T.T., Bùi Xuân Nam, Applied terrestrial laser scanning for coal mine high definition mapping, World of Mining - Surface and Underground, 2019.
- [8] Xu Y., Wang X, Application of terrestrial laser scanning in construction quality inspection, Journa.