

# CHUYỂN ĐỔI CAD SANG ĐỒ THỊ THEO CƠ CHẾ XÁC ĐỊNH VỚI KIỂM CHỨNG ĐỘ TIN CẬY Ở QUY MÔ TOÀN BỘ TẬP DỮ LIỆU

## DETERMINISTIC CAD-TO-GRAPH CONVERSION WITH EXPLICIT DATASET-SCALE RELIABILITY VERIFICATION

Nguyễn Văn Hải

Khoa Cơ khí – Cơ điện tử, Đại học Phenikaa, Hà Nội, Việt Nam

Email: hai.nguyenvan1@phenikaa-uni.edu.vn

### TÓM TẮT

*Bài báo đề xuất một phương pháp chuyển đổi mô hình CAD sang cấu trúc đồ thị theo cơ chế xác định, nhằm bảo đảm tính toàn vẹn dữ liệu và khả năng tái lập kết quả. Trên cơ sở bộ dữ liệu MFCAD gồm các mô hình STEP có gán nhãn theo từng mặt, quy trình được xây dựng để bảo đảm đánh chỉ số mặt ổn định, đồng bộ giữa mặt trích xuất và nhãn ngữ nghĩa, đồng thời tạo ra các đồ thị liên thông ở quy mô toàn bộ tập dữ liệu. Độ tin cậy của phương pháp được đánh giá thông qua các chỉ số cấu trúc và cơ chế băm đồ thị chuẩn hóa, cho phép so sánh định lượng giữa các lần thực thi. Kết quả cho thấy toàn bộ mô hình được chuyển đổi thành công, bảo đảm tính liên thông, đầy đủ nhãn và khả năng tái lập tuyệt đối. Mã nguồn và các cấu hình thí nghiệm được chia sẻ công khai tại GitHub nhằm phục vụ kiểm chứng và tái sử dụng. Phương pháp đề xuất cung cấp một nền tảng minh bạch và có thể kiểm chứng cho các nghiên cứu CAD dựa trên đồ thị.*

**Từ khóa:** Chuyển đổi CAD–đồ thị; Tiền xử lý xác định; Toàn vẹn dữ liệu; Biểu diễn CAD.

### ABSTRACT

*This paper proposes a deterministic approach for converting CAD models into graph representations, aiming to ensure data integrity and reproducibility. Based on the MFCAD dataset, which consists of STEP models annotated at the face level, the proposed pipeline guarantees stable face indexing, full consistency between extracted faces and semantic labels, and the generation of fully connected graphs at the dataset scale. The reliability of the approach is evaluated using structural metrics and a standardized graph hashing mechanism, enabling quantitative comparison across repeated executions. The results show that all models are successfully converted, with complete connectivity, full label coverage, and perfect reproducibility. The source code and experimental configurations are publicly available on GitHub to support verification and reuse. The proposed method provides a transparent and verifiable foundation for graph-based CAD research.*

**Keywords:** CAD-to-Graph Conversion; Deterministic Preprocessing; Data Integrity; Graph-based CAD Representation.

## 1. TỔNG QUAN

Trong những năm gần đây, biểu diễn mô hình CAD ba chiều dưới dạng đồ thị ngày càng được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu thiết kế và sản xuất dựa trên dữ liệu. Thay vì xử lý trực tiếp mô hình B-Rep, nhiều công trình chuyển đổi cấu trúc này thành đồ thị, trong đó mỗi mặt tương ứng với một nút và các quan hệ kề tô pô được biểu diễn bằng các cạnh. Cách biểu diễn này cho phép khai thác đồng thời thông tin hình học và cấu trúc, đồng thời phù hợp với các phương pháp học máy dựa trên đồ thị như GNN [1], [2], [3], [4].

Tuy nhiên, trong phần lớn các nghiên cứu hiện nay, quá trình chuyển đổi CAD–đồ thị thường được xem là hiển nhiên và ổn định, mà chưa được kiểm chứng một cách hệ thống. Trên thực tế, các yếu tố như thứ tự duyệt cấu trúc B-Rep, sai số số học trong nhân hình học hoặc cách định nghĩa quan hệ kề có thể dẫn đến sai khác cấu trúc đồ thị giữa các lần thực thi. Những sai khác này khó phát hiện, nhưng có thể ảnh hưởng trực tiếp đến độ tin cậy của dữ liệu và làm sai lệch kết quả của các mô hình học máy phía sau. Trong bối cảnh các nghiên cứu ngày càng nhấn mạnh tính tái lập, việc kiểm chứng tính xác định và toàn vẹn của bước chuyển đổi này trở thành một yêu cầu cần thiết nhưng vẫn chưa được quan tâm đầy đủ [5].

Mặc dù các phương pháp hiện tại đã chứng minh hiệu quả trong nhiều bài toán, quá trình chuyển đổi CAD–đồ thị thường được giả định là xác định và nhất quán về mặt ngữ nghĩa mà chưa được kiểm chứng định lượng. Trên thực tế, các yếu tố như thứ tự duyệt cấu trúc B-Rep, sai số số học trong nhân hình học, hay cách định nghĩa quan hệ kề có thể dẫn đến sai khác cấu trúc đồ thị giữa các lần thực thi. Những sai khác này khó phát hiện nhưng có thể ảnh hưởng trực tiếp đến độ tin cậy của dữ liệu

đầu vào và làm sai lệch kết quả của các mô hình học máy phía sau.

Bên cạnh đó, các lựa chọn trong xây dựng biểu diễn đồ thị – chẳng hạn như định nghĩa quan hệ kề (theo cạnh hoặc theo đỉnh) và mức độ chi tiết của bộ thuộc tính hình học – thường được thiết lập theo kinh nghiệm [1]. Những lựa chọn này có thể ảnh hưởng đáng kể đến mật độ cạnh, cấu trúc liên thông và các đặc trưng thống kê của đồ thị, nhưng lại thiếu đánh giá định lượng ở quy mô tập dữ liệu. Do đó, khó xác định liệu các đặc điểm quan sát được phản ánh bản chất hình học của mô hình CAD hay chỉ là hệ quả của cách xây dựng biểu diễn.



Hình 1. Ví dụ các mô hình CAD trong bộ dữ liệu MFCAD với nhãn ngữ nghĩa ở mức mặt, được sử dụng làm cơ sở xây dựng biểu diễn đồ thị.

Trong bối cảnh các mô hình học máy ngày càng nhạy với chất lượng dữ liệu đầu vào, các sai lệch trong bước tiền xử lý có thể dẫn đến tín hiệu học sai và làm giảm khả năng tái lập. Do đó, việc bảo đảm tính xác định và toàn vẹn của quá trình chuyển đổi CAD–đồ thị trở thành một yêu cầu nền tảng trong các nghiên cứu dựa trên dữ liệu.

Trong nghiên cứu này, quá trình chuyển đổi CAD–đồ thị được tiếp cận như một thành phần quyết định đến độ tin cậy của toàn bộ chuỗi xử lý. Sử dụng bộ dữ liệu MFCAD [6], như minh họa trong Hình 1. Hình này cho thấy các chi tiết điển hình với phân vùng bề mặt

Toàn bộ quy trình và kết quả được công bố công khai nhằm bảo đảm khả năng kiểm chứng và tái sử dụng trong các nghiên cứu tiếp theo.

- Đề xuất quy trình chuyển đổi CAD—

- Bố cục bài báo được tổ chức như sau: Mục 2 trình bày phương pháp, Mục 3 báo cáo kết quả thực nghiệm, và phần cuối cùng là Kết luận.

Phân tích mô hình CAD dựa trên đồ thị ngày càng được áp dụng rộng rãi trong các nghiên cứu về nhận dạng đặc trưng và học máy. Tuy nhiên, phần lớn các công trình hiện nay

The flowchart illustrates the proposed framework for graph representation learning. It begins with a 'STEP (Setup)' phase, represented by a 3D molecular structure. This leads into three parallel processing paths:

- Deterministic & Ray Extraction:** This path involves extracting structural integrity, represented by a bar chart.
- Graph Construction:** This path involves constructing a graph, represented by a network diagram, and then analyzing graph complexity, connectivity, and semantic alignment, represented by a bar chart.
- Determinism:** This path involves determining the determinism of the graph, represented by a bar chart.

These three paths converge into a **Hash-Based Verification** step, which is represented by a bar chart. The final output of the framework is **Representation Robustness**, which includes feature sets and adjacency rules, represented by a bar chart.

- (i) Trích xuất mặt B-Rep và căn chỉnh nhân một cách xác định;
- (ii) Xây dựng đồ thị và biểu diễn thuộc tính;
- (iii) Đánh giá toàn vẹn cấu trúc ở mức tập dữ liệu;
- (iv) Kiểm chứng tính xác định và độ bền vững của biểu diễn.

### 2.1. Trích xuất mặt B-Rep và căn chỉnh nhãn theo cơ chế xác định

Mỗi chi tiết CAD được cung cấp dưới dạng tệp STEP, tuân theo tiêu chuẩn ISO 10303 về trao đổi dữ liệu sản phẩm. Mô hình được phân tích bằng nhân hình học OpenCascade để

khôi phục cấu trúc tôpô B-Rep.

Trong nghiên cứu này, các mặt B-Rep được chọn làm phần tử cơ sở để xây dựng đồ thị, do mặt là đơn vị mang ý nghĩa hình học và ngữ nghĩa rõ ràng trong phân rã mô hình. Một yêu cầu quan trọng của phương pháp là bảo đảm đánh chỉ số mặt ổn định. Việc duyệt trực tiếp cấu trúc B-Rep có thể dẫn đến thứ tự mặt phụ thuộc vào chiến lược duyệt hoặc phiên bản thư viện. Để loại bỏ nguồn sai lệch này, các mặt được liệt kê thông qua cấu trúc bản đồ tôpô có chỉ mục của nhân hình học, tạo thành tập nút cố định:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (1)$$

Trong đó, mỗi nút  $v_i$  tương ứng duy nhất với một mặt CAD và không thay đổi giữa các lần thực thi.

Các nhãn ngữ nghĩa ở mức mặt do bộ dữ liệu cung cấp được ánh xạ trực tiếp vào chỉ số xác định này. Để kiểm chứng sự đồng bộ, mức độ bao phủ nhãn được định lượng bằng:

$$\text{LabelCoverage} = \frac{n_{\text{labeled faces}}}{n_{\text{extracted faces}}}. \quad (2)$$

Chỉ số này bảo đảm rằng không có mặt nào bị mất nhãn hoặc gán sai trong quá trình tiền xử lý.

## 2.2. Xây dựng đồ thị và biểu diễn thuộc tính

Mỗi chi tiết CAD được biểu diễn dưới dạng đồ thị vô hướng có thuộc tính:

$$G = (V, E) \quad (3)$$

Trong đó:

- $V$  là tập các nút tương ứng với các mặt B-Rep;

- $E$  là tập cạnh biểu diễn quan hệ kề tôpô.

Quan hệ kề giữa các mặt trong mô hình rắn được xác định thông qua các thực thể tôpô bậc thấp hơn như cạnh hoặc đỉnh. Thay vì cố định một định nghĩa duy nhất, phương pháp hỗ trợ hai cách xác định:

- Kề theo cạnh (edge-based adjacency): Hai mặt kề nhau nếu chia sẻ ít nhất một cạnh B-Rep.

- Kề theo đỉnh (vertex-based adjacency): Hai mặt kề nhau nếu chia sẻ ít nhất một đỉnh B-Rep.

Việc hỗ trợ nhiều định nghĩa quan hệ kề cho phép đánh giá có kiểm soát ảnh hưởng của lựa chọn biểu diễn đến cấu trúc đồ thị.

Mỗi nút  $v_i$  được gán một vector thuộc tính  $x_i$  mô tả đặc trưng hình học của mặt tương ứng. Hai cấu hình thuộc tính được định nghĩa:

- Bộ thuộc tính đầy đủ: Loại bề mặt, diện tích, tọa độ trọng tâm, đặc trưng hộp bao (bounding box), hướng pháp tuyến.

- Bộ thuộc tính rút gọn: Giữ nguyên cấu trúc và kích thước vector nhưng trung hòa các thuộc tính phụ thuộc mạnh vào hình học.

Việc giữ nguyên khuôn dạng thuộc tính giúp tách biệt ảnh hưởng của nội dung thuộc tính khỏi ảnh hưởng của cấu trúc tôpô.

## 2.3. Đánh giá toàn vẹn cấu trúc ở quy mô tập dữ liệu

Chuyển đổi thành công từng chi tiết riêng lẻ chưa bảo đảm tính tin cậy ở quy mô toàn bộ tập dữ liệu. Do đó, phương pháp bao gồm

bước đánh giá sức khỏe (health assessment) của tập đồ thị.

Đối với mỗi đồ thị, các đại lượng cấu trúc cơ bản được tính toán: số nút  $|V|$ , số cạnh  $|E|$ , mật độ đồ thị:

$$\text{Density}(G) = \frac{2|E|}{|V|(|V|-1)} \quad (4)$$

Tính liên thông được đánh giá thông qua số thành phần liên thông  $CC(G)$ . Ở mức tập dữ liệu, tỷ lệ đồ thị bị phân mảnh được xác định bởi:

$$r_{CC>1} = \frac{\#\{G: CC(G)>1\}}{N} \quad (5)$$

Trong đó,  $N$  là tổng số chi tiết CAD. Các chỉ số này cung cấp bằng chứng định lượng rằng cấu trúc đồ thị phản ánh trung thực tập dữ liệu của mô hình CAD.

## 2.4. Kiểm chứng tính xác định và độ bền vững biểu diễn

Để kiểm chứng tính xác định, phương pháp sử dụng cơ chế băm đồ thị chuẩn hóa. Mỗi đồ thị được chuyển sang dạng biểu diễn chuẩn thông qua:

- Sắp xếp nút và cạnh theo thứ tự xác định;
- Chuẩn hóa độ chính xác số thực.

Sau đó, giá trị băm mật mã được tính theo:

$$h(G) = \text{SHA256}(C(G)) \quad (6)$$

Trong đó,  $C(G)$  là chuỗi biểu diễn chuẩn của đồ thị.

Hai lần thực thi với cùng cấu hình được so sánh ở mức từng chi tiết, và tỷ lệ trùng khớp toàn bộ tập dữ liệu được xác định bởi:

$$\text{MatchRate} = \frac{\#\{i: h(G_i^{(1)}) = h(G_i^{(2)})\}}{N} \quad (7)$$

Chỉ số này cho phép đánh giá tính xác định một cách định lượng ở quy mô tập dữ liệu. Độ bền vững biểu diễn được kiểm tra bằng cách so sánh các cấu hình khác nhau của quan hệ kề và bộ thuộc tính. Các thống kê tổng hợp được phân tích nhằm bảo đảm rằng lựa chọn biểu diễn hợp lý không gây sai lệch cấu trúc ở mức toàn cục.

## 2.5. Phạm vi phương pháp

Phương pháp tập trung vào bảo đảm tính tin cậy của dữ liệu đầu vào cho các mô hình học máy, thay vì phát triển thuật toán học mới. Bằng cách kiểm chứng rõ ràng tính toàn vẹn cấu trúc, sự đồng bộ nhãn và tính xác định ở quy mô tập dữ liệu, khung phương pháp này cung cấp nền tảng đáng tin cậy cho các nghiên cứu CAD dựa trên đồ thị.

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Phần này trình bày các kết quả thu được ở quy mô toàn bộ tập dữ liệu khi áp dụng phương pháp chuyển đổi CAD–đồ thị đề xuất, đồng thời phân tích ý nghĩa của các kết quả này so với các giả định thường gặp trong các nghiên cứu trước đây. Trọng tâm không phải là hiệu năng học máy ở bước sau, mà là kiểm chứng các tính chất nền tảng của dữ liệu đồ thị: toàn vẹn cấu trúc, nhất quán ngữ nghĩa và tính xác định.

*Bảng 1. Tóm tắt các chỉ số sức khỏe của tập dữ liệu đồ thị CAD*

| Số mặt<br>(trung vị) | Số cạnh<br>(trung vị) | Mật độ<br>(trung vị) | Tỷ lệ<br>CC<br>> 1 | Bao phủ<br>nhãn<br>(trung vị) |
|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|-------------------------------|
| 22                   | 59                    | 0,246753             | 0                  | 1                             |

### 3.1. Tính thành công của chuyển đổi và toàn vẹn tập dữ liệu

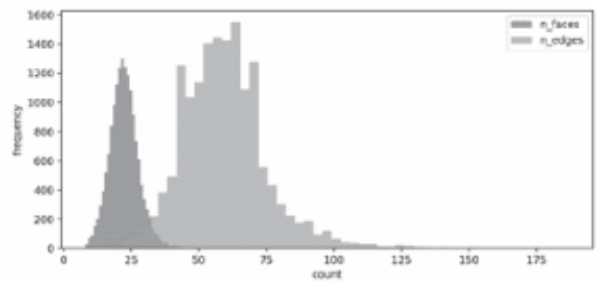
Phương pháp đề xuất đã chuyển đổi thành công toàn bộ 15.488 chi tiết CAD trong bộ dữ liệu MFCAD mà không phát sinh lỗi hay trường hợp bị bỏ qua. Điều này cho thấy quy trình có tính ổn định cao đối với các mô hình STEP dạng lăng trụ.

Tính toàn vẹn của dữ liệu được đánh giá thông qua tính liên thông và sự căn chỉnh nhãn. Như thể hiện trong Bảng 1, tất cả các đồ thị đều có đúng một thành phần liên thông, tương ứng với tỷ lệ phân mảnh bằng 0 (Hình 4). Đồng thời, hệ số bao phủ nhãn đạt giá trị 1 cho toàn bộ chi tiết, cho thấy sự đồng bộ hoàn toàn giữa các mặt được trích xuất và nhãn ngữ nghĩa ban đầu.

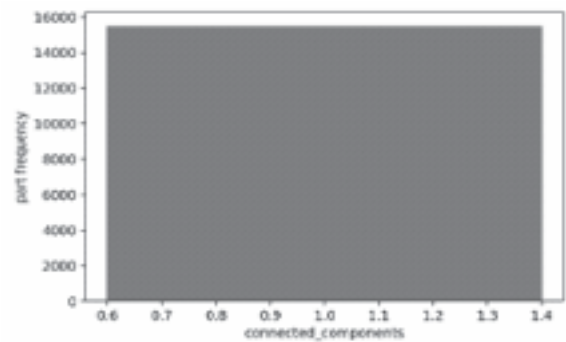
Những kết quả này cung cấp bằng chứng định lượng ở quy mô tập dữ liệu cho các giả định thường được chấp nhận trong các nghiên cứu CAD–đồ thị, nhưng hiếm khi được kiểm chứng một cách hệ thống. Điều này cho thấy việc bảo đảm tính xác định trong bước chuyển đổi là yếu tố then chốt để duy trì tính nhất quán cấu trúc và ngữ nghĩa của dữ liệu đầu vào.

### 3.2. Đặc trưng cấu trúc của các đồ thị

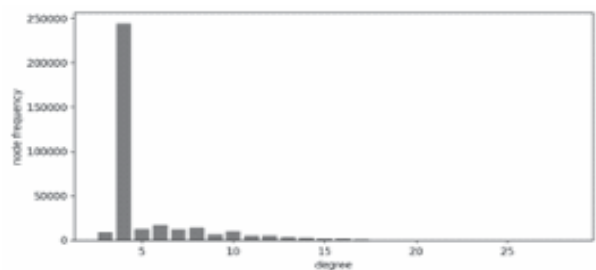
Các đặc trưng cấu trúc được tổng hợp trong Bảng 1 và thể hiện trực quan trong Hình 3. Trung vị số mặt của mỗi chi tiết là 22, trong khi trung vị số cạnh là 59, tương ứng với mật độ đồ thị xấp xỉ 0,25. Giá trị này cho thấy các đồ thị thu được có mức độ thưa vừa phải, phù hợp với đặc trưng tự nhiên của biểu diễn bề mặt trong mô hình B-Rep, trong đó mỗi mặt thường chỉ liên kết với một số hữu hạn các mặt lân cận.



Hình 3. Phân bố kích thước đồ thị trên toàn bộ tập dữ liệu.



Hình 4. Phân bố số thành phần liên thông của các đồ thị sinh ra.



Hình 5. Phân bố bậc nút tổng hợp trên toàn bộ tập dữ liệu.

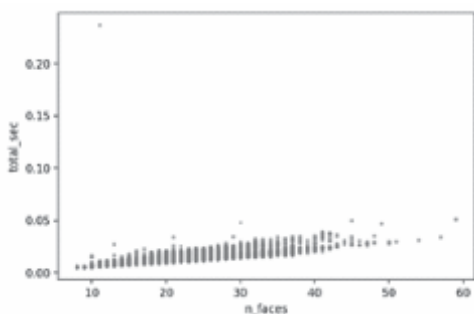
Phân bố bậc nút tổng hợp trên toàn bộ tập dữ liệu (Hình 5) cho thấy phần lớn các nút có bậc từ 3 đến 6. Khoảng giá trị này phản ánh cấu trúc tô pô cục bộ đặc trưng của các mô hình CAD, nơi mỗi mặt thường tiếp xúc với một số mặt lân cận giới hạn. Kết quả này cho thấy quy trình xây dựng đồ thị bảo toàn đúng cấu trúc hình học ban đầu, không tạo ra các kết nối nhân tạo hoặc làm sai lệch quan hệ tô pô giữa các mặt.



Điều này cho thấy biểu diễn đồ thị thu được phản ánh trung thực cấu trúc B-Rep của mô hình CAD, thay vì là hệ quả của quy tắc xây dựng đồ thị.

### 3.3. Hiệu năng chuyển đổi và khả năng mở rộng

Hiệu năng chuyển đổi được đánh giá thông qua mối quan hệ giữa thời gian xử lý và số mặt của từng chi tiết. Kết quả trong Hình 6 cho thấy thời gian xử lý tăng gần tuyến tính theo số mặt, phản ánh chi phí tính toán tỷ lệ thuận với số lượng phần tử tô pô cần xử lý trong mô hình B-Rep.



Hình 6. Thời gian chuyển đổi theo số lượng mặt của chi tiết.

Thời gian xử lý trung vị là khoảng 0,013 giây cho mỗi chi tiết, trong khi phân vị 95% vẫn dưới 0,02 giây. Giá trị này cho thấy

chi phí tính toán ở mức rất thấp, ngay cả đối với các chi tiết có độ phức tạp cao hơn, và chủ yếu phụ thuộc vào bước phân tích hình học và duyệt cấu trúc tô pô.

So với các pipeline CAD–đồ thị thông thường, nơi bước tiền xử lý thường không được tối ưu hoặc không được đánh giá định lượng, kết quả này cho thấy phương pháp đề xuất có khả năng mở rộng tốt ở quy mô tập dữ liệu lớn. Đồng thời, tính chất tăng gần tuyến tính theo số mặt cho thấy quy trình không phát sinh chi phí tính toán bậc cao ngoài cấu trúc hình học ban đầu, qua đó bảo đảm khả năng áp dụng thực tế mà không yêu cầu phần cứng chuyên dụng.

### 3.4. Tính xác định và khả năng tái lập

Tính xác định được đánh giá thông qua cơ chế băm đồ thị chuẩn hóa, cho phép so sánh cấu trúc đồ thị giữa các lần thực thi độc lập với cùng cấu hình ở mức từng chi tiết.

Kết quả cho thấy toàn bộ 15.488 đồ thị trùng khớp hoàn toàn, với tỷ lệ khớp bằng 1,0 (Bảng 2), không ghi nhận bất kỳ sai lệch nào giữa các lần chạy. Kết quả này cung cấp bằng chứng mạnh mẽ rằng quy trình chuyển đổi đề xuất có tính xác định tuyệt đối trong điều kiện cấu hình cố định.

Bảng 2. Kết quả kiểm chứng tính xác định dựa trên băm đồ thị chuẩn hóa

| Lần chạy A                         | Lần chạy B            | Số so sánh | Số khớp | Số sai lệch | Tỷ lệ khớp |
|------------------------------------|-----------------------|------------|---------|-------------|------------|
| Kề theo cạnh, bộ thuộc tính đầy đủ | Kề theo cạnh, lặp lại | 15488      | 15488   | 0           | 1          |

Khác với các quy trình CAD–đồ thị thông thường, nơi tính xác định thường chỉ được giả định, kết quả này cho thấy tính tái lập có thể được kiểm chứng định lượng ở quy mô tập dữ liệu. Điều này nhấn mạnh vai trò của cơ chế xác định trong việc bảo đảm độ tin cậy của dữ liệu đầu vào cho các mô hình học máy.

3.5. Độ bền vững của biểu diễn

Độ bền vững biểu diễn được đánh giá bằng cách so sánh nhiều cấu hình khác nhau, kết hợp giữa định nghĩa quan hệ kề và bộ thuộc tính như trong Bảng 3.

Bảng 3. So sánh các chỉ số tổng hợp giữa các cấu hình biểu diễn

| Biểu diễn                        | Mật (trung vị) | Cạnh (trung vị) | Mật độ (trung vị) | Thời gian (trung vị, s) |
|----------------------------------|----------------|-----------------|-------------------|-------------------------|
| Kề theo cạnh, thuộc tính đầy đủ  | 22             | 59              | 0,246753          | 0,012896                |
| Kề theo cạnh, thuộc tính rút gọn | 22             | 59              | 0,246753          | 0,012826                |
| Kề theo đỉnh, thuộc tính đầy đủ  | 22             | 59              | 0,246753          | 0,012826                |

Các thông kê tổng hợp cho thấy sự ổn định cao giữa các cấu hình. Mặc dù cấu trúc đồ thị ở mức từng chi tiết có thể thay đổi, các đặc trưng thống kê toàn cục gần như không bị ảnh hưởng. Điều này cho thấy các lựa chọn biểu diễn hợp lý không làm sai lệch bản chất cấu trúc của dữ liệu CAD.

Toàn bộ quy trình xử lý, mã nguồn và các cấu hình thí nghiệm được công bố công khai tại kho lưu trữ GitHub (<https://github.com/cuunien/cad-to-graph-deterministic>), cho phép tái lập và kiểm chứng độc lập các kết quả.

Tổng hợp lại, các kết quả cho thấy phương pháp đề xuất không chỉ thực hiện chuyển đổi CAD sang đồ thị, mà còn kiểm chứng định lượng ở quy mô tập dữ liệu các thuộc tính nền tảng như toàn vẹn cấu trúc, nhất quán ngữ nghĩa và tính xác định.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đề xuất một khung chuyển đổi CAD–đồ thị theo cơ chế xác định, bảo đảm đánh chỉ số mặt ổn định, đồng bộ nhãn và xây dựng đồ thị liên thông ở quy mô toàn bộ tập dữ liệu. Tính xác định được kiểm chứng bằng bấm đồ thị chuẩn hóa, cho thấy sự trùng khớp tuyệt đối giữa các lần thực thi. Kết quả cho thấy bước

chuyển đổi CAD–đồ thị có thể được kiểm chứng định lượng và đóng vai trò quan trọng trong độ tin cậy của pipeline học máy. Mã nguồn và các cấu hình thí nghiệm được chia sẻ công khai để phục vụ kiểm chứng và tái sử dụng.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Phenikaa theo đề tài mã số PU2024-1-A-04.❖

Ngày nhận bài: 05/6/2026  
Ngày phản biện: 25/6/2026

Tài liệu tham khảo:

[1]. J. G. Lambourne, K. D. Willis, P. K. Jayaraman, A. Sanghi, P. Meltzer, and H. Shayani, “Brepnet: A topological message passing system for solid models”. In: Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, 2021, pp. 12773–12782.

[2]. P. K. Jayaraman et al., “Uv-net: Learning from boundary representations”. In: Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, 2021, pp. 11703–11712.

[3]. H. Wu, R. Lei, Y. Peng, and L. Gao, “AAGNet: A graph neural network towards multi-task machining feature recognition”. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 86, p. 102661, 2024.

[4]. M. Xia, X. Zhao, and X. Hu, “Machining feature and topological relationship recognition based on a multi-task graph neural network”. Advanced Engineering Informatics, vol. 62, p. 102721, 2024.

[5]. J. Pineau et al., “Improving reproducibility in machine learning research (a report from the neurips 2019 reproducibility program)”. Journal of Machine Learning Research, vol. 22, no. 164, pp. 1–20, 2021.

[6]. hducg, “hducg/MFCAD”. (Feb. 09, 2026). Python. Accessed: Mar. 03, 2026. [Online]. Available: <https://github.com/hducg/MFCAD>