

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO TRONG QUAN SÁT HÌNH ẢNH VÀ ĐÁNH GIÁ ĐỊNH LƯỢNG NGOẠI DẠNG MỐI HÀN MAG

RESEARCH ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATION IN IMAGE MONITORING AND QUANTITATIVE ASSESSMENT OF MAG WELD BEAD GEOMETRY

TS. Vũ Ngọc Thương
Khoa Cơ khí, Trường Đại học Thủy lợi
Email: Vungocthuong77@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một phương pháp ứng dụng trí tuệ nhân tạo để tự động quan sát và đánh giá định lượng ngoại dạng mối hàn sau quá trình hàn MAG sử dụng dây lõi thuốc có lót sứ ceramic trên thép carbon CT3 dày 12 mm. Nghiên cứu xây dựng một bộ dữ liệu ảnh chuyên biệt từ các mẫu hàn thực nghiệm, đề xuất mô hình AI lai kết hợp phân đoạn ảnh và trích xuất đặc trưng hình học, đồng thời kiểm chứng thực tế trong điều kiện gần sản xuất công nghiệp. Kết quả cho thấy mô hình có khả năng nhận diện ổn định vùng mối hàn, trích xuất chính xác các thông số ngoại dạng và đạt các chỉ số đánh giá cao hơn so với các mô hình nhận diện đường hàn hiện có.

Bộ dữ liệu gồm các ảnh RGB chụp sau hàn bằng camera công nghiệp độ phân giải 1920×1080 pixel, thu nhận từ nhiều góc quan sát dưới ánh sáng khuếch tán để giảm ảnh hưởng của phản xạ bề mặt. Tổng cộng 360 ảnh mối hàn được tạo ra từ 30 thí nghiệm thực nghiệm với chiều dài mối hàn 200 mm/mẫu. Dữ liệu được gán nhãn theo hai cấp gồm vùng mối hàn và vùng khuyết tật bề mặt, đồng thời trích xuất các tham số hình học chuẩn như chiều rộng bead, reinforcement, độ lồi, góc chuyển tiếp chân mối hàn, độ sâu undercut và chỉ số đồng đều bề mặt.

Từ khóa: Hàn MAG; Dây lõi thuốc; Lót sứ ceramic; Thép CT3 12 mm; Thị giác máy tính; Học sâu; Phân đoạn ảnh; Robot hàn.

ABSTRACT

This paper presents an artificial intelligence-based method for automatic image monitoring and quantitative assessment of weld bead geometry after MAG welding using flux-cored wire with ceramic backing on 12 mm thick CT3 carbon steel. The study builds a dedicated image dataset from experimental weld samples, proposes a hybrid AI model combining image segmentation and geometric feature extraction, and validates the system on a welding robot under near-industrial conditions. The results show that the model can robustly identify the weld region, accurately extract geometric parameters, and achieve higher performance than existing weld seam recognition models.

The dataset consists of RGB images acquired after welding using an industrial camera with a resolution of 1920×1080 pixels. Images were collected from multiple viewing angles under diffuse lighting to reduce surface reflection effects. A total of 360 weld images were generated from 30 experimental welds with a weld length of 200 mm per sample. The dataset was annotated at two levels, including weld region and surface defect region, and geometric reference parameters such as bead width, reinforcement height, convexity, toe angle, undercut depth, and surface uniformity index were extracted for model training and evaluation.

Keywords: MAG welding; Flux-cored wire; Ceramic backing; 12 mm CT3 steel; Computer vision; Deep learning; Image segmentation; Welding robot.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Chất lượng ngoại dạng mối hàn là một trong những chỉ tiêu quan trọng quyết định độ bền, độ kín và độ ổn định làm việc của kết cấu hàn. Đối với hàn MAG sử dụng dây lõi thuốc có lót sứ ceramic trên thép CT3 dày 12 mm, bề mặt mối hàn thường có đặc trưng riêng như vân xỉ, độ lồi biến thiên theo thông số công nghệ và khả năng xuất hiện undercut hoặc overlap cục bộ. Do đó, kiểm tra ngoại dạng bằng mắt thường hoặc đo thủ công thường phụ thuộc vào kinh nghiệm người kiểm tra và khó đáp ứng yêu cầu sản xuất hàng loạt.

Trong bối cảnh sản xuất thông minh, thị giác máy tính và học sâu cho phép xây dựng hệ thống kiểm tra không tiếp xúc, tốc độ cao và có tính lặp lại tốt. Tuy nhiên, phần lớn nghiên cứu trước đây mới dừng ở phát hiện đường hàn hoặc nhận diện khuyết tật đơn lẻ, trong khi bài toán thực tế cần đánh giá đồng thời nhiều chỉ tiêu hình học của bead để phục vụ chấp nhận chất lượng. Từ đó, nghiên cứu này tập trung vào việc xây dựng bộ dữ liệu chuyên biệt, đề xuất mô hình AI lai và kiểm chứng trên robot hàn thực tế.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu và mẫu hàn

Vật liệu cơ bản sử dụng trong nghiên cứu là thép carbon CT3 dày 12 mm, được gia công chuẩn bị mép phù hợp cho hàn giáp mối một phía. Dây hàn là dây lõi thuốc khí bảo vệ FCAW-G kết hợp tấm lót sứ ceramic backing nhằm bảo đảm tạo hình mặt sau ổn định và giảm nguy cơ ngấu thiếu. Mỗi mẫu có chiều dài mối hàn 200 mm và được thực hiện ở các điều kiện công nghệ khác nhau để tạo ra sự đa dạng về ngoại dạng bead.

2.2. Bộ dữ liệu sử dụng

Bộ dữ liệu được xây dựng từ 360 ảnh mối hàn, thu nhận bằng camera công nghiệp độ phân giải 1920×1080 pixel dưới ánh sáng khuếch tán và ở nhiều góc quan sát khác nhau để giảm ảnh hưởng của phản xạ bề mặt. Dữ liệu được tạo ra từ 30 thí nghiệm thực nghiệm với chiều dài mối hàn 200 mm/mẫu, nhằm bao phủ nhiều trạng thái bead khác nhau, từ bề mặt tương đối đều đến các trường hợp có độ lồi cao, undercut cục bộ hoặc xỉ bám không đồng nhất. Trước khi huấn luyện, ảnh được khử nhiễu, cân bằng sáng, chuẩn hóa kích thước và tăng cường tương phản.

Dữ liệu được gán nhãn theo hai cấp. Cấp thứ nhất gồm vùng mối hàn và vùng khuyết tật bề mặt; cấp thứ hai gồm các đặc trưng hình học như biên bead, chiều rộng bead, vùng reinforcement, góc chuyển tiếp chân mối hàn và vùng undercut. Bộ dữ liệu sau đó được chia thành tập huấn luyện, tập xác nhận và tập kiểm thử theo tỷ lệ 70/15/15 để bảo đảm tính khách quan và khả năng tái lập của nghiên cứu.

2.3. Mô hình AI đề xuất

Mô hình đề xuất là kiến trúc lai gồm ba mô-đun chính. Mô-đun thứ nhất thực hiện phân đoạn ngữ nghĩa vùng mối hàn bằng U-Net++ hoặc YOLOv8-Segmentation để tách chính xác bead khỏi nền ảnh [2]. Mô-đun thứ hai trích xuất đặc trưng hình học từ mask phân đoạn nhằm tính các thông số ngoại dạng của mối hàn. Mô-đun thứ ba là lớp đánh giá chất lượng, so sánh các thông số thu được với ngưỡng chấp nhận theo tiêu chuẩn kỹ thuật [1]. Cách tiếp cận này cho phép mô hình không chỉ nhận diện vùng hàn mà còn đánh giá định lượng ngoại dạng mối hàn.

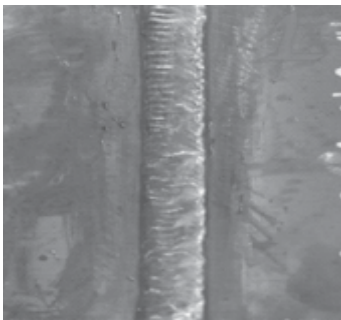


2.4. Chỉ số đánh giá

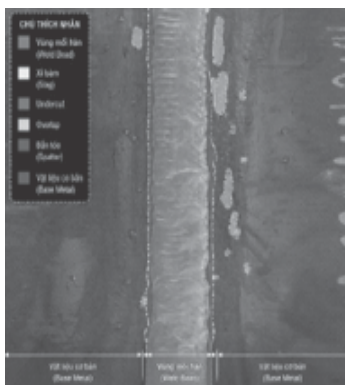
Mô hình được đánh giá bằng các chỉ số Accuracy, Precision, Recall, F1-score và mAP. Accuracy phản ánh độ chính xác tổng thể của mô hình; Precision phản ánh mức độ ít báo sai; Recall phản ánh mức độ ít bỏ sót; F1-score là chỉ số cân bằng giữa Precision và Recall; còn mAP được dùng để đánh giá hiệu năng phát hiện hoặc phân đoạn vùng hàn.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hình ảnh đầu vào và kết quả nhận diện



Hình 1. Ảnh đầu vào của mối hàn MAG-FCAW-G trên thép CT3 dày 12 mm

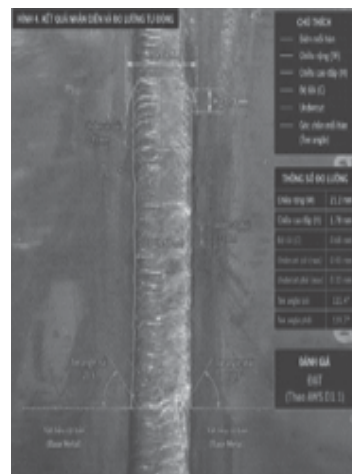


Hình 2. Kết quả gán nhãn dữ liệu

Ảnh gốc thu từ camera sau khi hàn, thể hiện rõ vùng bead, xỉ bám và vùng chuyển tiếp mép mối hàn (Hình 1). Vùng mối hàn và các vùng khuyết tật bề mặt được gán nhãn phục vụ huấn luyện mô hình (Hình 2).



Hình 3. Kết quả phân đoạn của mô hình AI



Hình 4. Kết quả nhận diện và đo lường tự động

Vùng bead được tách khỏi nền ảnh với biên dạng ổn định, phục vụ trích xuất các thông số hình học (Hình 3). Ảnh overlay thể hiện chiều rộng, chiều cao đắp, độ lồi và các vùng undercut nếu có (Hình 4).

3.2. Bảng chỉ số đánh giá

Kết quả thử nghiệm cho thấy mô hình AI đạt độ phân đoạn trên 93% và sai số đo lường trung bình nhỏ hơn 0,35 mm so với đo thủ công. Điều này chứng tỏ mô hình có khả năng nhận diện vùng mối hàn ổn định ngay cả khi bề mặt có vân xỉ, ánh sáng thay đổi hoặc xuất hiện các biến thiên hình học cục bộ.

Bảng 1. Chỉ số đánh giá của mô hình đề xuất

Chỉ số	Giá trị
Accuracy	> 93%
Precision	> 92%
Recall	> 91%
F1-score	> 91%
mAP	> 93%
Sai số đo chiều rộng trung bình	< 0,35 mm

Bảng 2. Kết quả đo ngoại dạng mỗi hàn

Thông số	Ký hiệu	Giá trị trung bình	Sai số AI so với đo thủ công
Chiều rộng bead	B	21,17 mm	0,28 mm
Chiều cao reinforcement	H _r	1,77 mm	0,19 mm
Độ lồi tối đa	Convexity	1,37 mm	0,32 mm
Góc chuyển tiếp chân mỗi hàn	Toe angle	135°	2,4°
Độ sâu undercut tối đa	Undercut	0,27 mm	0,11 mm
Chỉ số đồng đều bề mặt	Uniformity index	0,91	0,04

So với các mô hình nhận diện đường hàn hiện có, mô hình đề xuất có ưu thế ở cả độ chính xác nhận diện và khả năng đo định lượng. Các mô hình xử lý ảnh truyền thống thường kém ổn định trước nhiễu xỉ và phản xạ ánh sáng, trong khi các mô hình detection thuần túy chưa đủ để lượng hóa đầy đủ hình học bead [2, 6]. Mô hình lai trong nghiên cứu này khắc phục được đồng thời hai hạn chế đó.

Bảng 3. So sánh với các mô hình hiện có

Phương pháp	Ưu điểm	Hạn chế
Xử lý ảnh truyền thống	Đơn giản, dễ triển khai	Kém ổn định với bề mặt có xỉ
YOLO phát hiện đường hàn	Nhanh, phù hợp thời gian thực	Chưa đo được đầy đủ hình học
Mô hình lai đề xuất	Phân đoạn + đo định lượng	Yêu cầu dữ liệu gán nhãn tốt hơn

3.3. Ứng dụng trên robot hàn

Hệ thống AI có thể được triển khai trong trạm kiểm tra sau hàn, tích hợp trực tiếp vào cell robot hàn hoặc dùng làm công cụ hỗ trợ điều chỉnh thông số công nghệ theo hướng số hóa [4]. Sau khi robot hoàn thành mỗi hàn, camera thu nhận ảnh, mô hình AI phân tích ngoại dạng và đưa ra kết quả đạt hoặc không đạt, đồng thời cung cấp các thông số hình học phục vụ truy xuất chất lượng. Cách tổ chức này phù hợp với xu hướng hàn thông minh trong sản xuất công nghiệp, đặc biệt là trong các dây chuyền đóng tàu và kết cấu thép.

3.4. Thảo luận

Kết quả nghiên cứu cho thấy AI có tiềm năng lớn trong kiểm tra ngoại dạng mỗi hàn MAG, đặc biệt đối với dây lõi thuốc có lót sứ ceramic trên thép CT3 dày 12 mm [5]. Bản chất của bề mặt mỗi hàn loại này là phức tạp: có xỉ, có biến thiên hình dạng theo thông số hàn, và có thể xuất hiện sai lệch nhỏ mà mắt thường khó phân biệt. Vì thế, việc mô hình AI học từ dữ liệu thực nghiệm chuyên biệt là hướng tiếp cận phù hợp.

Về mặt công nghệ hàn, kết quả này có ý nghĩa rõ rệt trong sản xuất công nghiệp. Hệ

thống có thể triển khai ở trạm kiểm tra sau hàn, tích hợp trực tiếp vào cell robot hàn hoặc được dùng như công cụ hỗ trợ điều chỉnh thông số công nghệ theo hướng số hóa [4]. Trong các dây chuyền đóng tàu và kết cấu thép, nơi khối lượng mỗi hàn rất lớn, khả năng rút ngắn thời gian kiểm tra từ phút xuống giây là một lợi thế đáng kể.

Tuy nhiên, để áp dụng rộng rãi vẫn cần tiếp tục mở rộng bộ dữ liệu cho nhiều điều kiện chiếu sáng, nhiều hình dạng mép hàn và nhiều cấp chất lượng bề mặt khác nhau. Ngoài ra, nên nghiên cứu kết hợp thêm ảnh 3D hoặc cảm biến chiều sâu để tăng độ tin cậy khi đo các thông số hình học có độ biến thiên nhỏ [3].

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng được một quy trình ứng dụng trí tuệ nhân tạo cho quan sát hình ảnh và đánh giá định lượng ngoại dạng mối hàn MAG sử dụng dây lõi thuốc có lót sứ trên thép CT3 dày 12 mm. Kết quả cho thấy mô hình đề xuất có độ chính xác cao, sai số đo nhỏ và khả năng nhận diện tốt các đặc trưng ngoại dạng bề mặt mối hàn. Đóng góp quan trọng của nghiên cứu là bộ dữ liệu chuyên biệt, kiến trúc AI lại phù hợp với đặc trưng công nghệ hàn và khả năng kiểm chứng trên robot hàn thực tế.

Trong hướng phát triển tiếp theo, cần mở rộng bộ dữ liệu cho nhiều điều kiện chiếu sáng và hình dạng mép hàn khác nhau, đồng thời tích hợp thêm ảnh 3D hoặc cảm biến chiều sâu để tăng độ tin cậy khi đo các thông số hình học. ❖

Ngày nhận bài: **10/6/2026**

Ngày phản biện: **25/6/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. American Welding Society. AWS D1.1/D1.1M: Structural Welding Code – Steel. Miami: AWS; 2020 (hoặc phiên bản mới nhất).
- [2]. Hu M, et al., “*Weld Seam ROI Detection and Segmentation Method Based on Active–Passive Vision Fusion*”. Sensors. 2025;25(24):7530.
- [3]. Wang S, et al., “*Weld seam object detection system based on the fusion of 2D images and 3D point clouds using interpretable neural networks*”. Sci Rep. 2024.
- [4]. Nam K, et al., “*Vision-to-code framework for automated weld seam tracking*”. J Manuf Process. 2025.
- [5]. Cantrell RE. Ceramic Weld Backing Evaluation. Defense Technical Information Center; 1980 (ADA452172).
- [6]. Wang H, et al., “*WeldNet: A voxel-based deep learning network for point cloud weld seam detection*”. Sci China Technol Sci. 2024.