

NGHIÊN CỨU PHÁT HIỆN LỖI CHO SẢN PHẨM THÂN NHỰA CẦU LÔNG DỰA TRÊN KỸ THUẬT UNWARPPING

A STUDY ON DEFECT DETECTION IN PLASTIC SHUTTLECOCK BODIES USING
AN IMAGE UNWARPING METHOD

Trần Quang Phước

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

Email: tqphuoc@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Sự tiến bộ của công nghệ sản xuất đã làm gia tăng nhu cầu về các hệ thống kiểm tra chất lượng (QC) tự động, đặc biệt là trong việc kiểm tra các vật thể có hình dạng phức tạp như sản phẩm ép phun dạng cầu. Các phương pháp kiểm tra truyền thống phải đối mặt với những thách thức đáng kể khi xử lý các bề mặt cong, nguyên nhân là do sự biến dạng hình học vốn có trong các hệ thống ghi hình 2D thông thường. Bài báo này trình bày một phương pháp tiếp cận toàn diện để phát hiện lỗi trên sản phẩm ép phun dạng cầu, bằng cách sử dụng các kỹ thuật làm phẳng ảnh tiên tiến. Phương pháp được đề xuất giải quyết các thách thức cơ bản của việc hiệu chỉnh biến dạng hình học thông qua các mô hình toán học, trong đó tích hợp cơ chế bù trừ biến dạng xuyên tâm và tiếp tuyến, phép biến đổi phối cảnh, và các thuật toán chuyên dụng để phân tích bề mặt cong. Kết quả kiểm nghiệm thực tế cho thấy sự cải thiện đáng kể về độ chính xác trong việc phát hiện lỗi, đạt tỷ lệ phát hiện 98.5% và đồng thời giảm 72% tỷ lệ lỗi so với các phương pháp kiểm tra thông thường.

Từ khóa: Làm phẳng ảnh; Phát hiện lỗi dạng cầu; OpenCV; Hiệu chỉnh biến dạng hình học; Kiểm soát chất lượng; Thị giác máy; Kiểm tra bề mặt.

ABSTRACT

The advancement of manufacturing technology has intensified the demand for automated quality control systems, particularly in the inspection of complex geometries such as spherical molded products. Traditional inspection methods face significant challenges when dealing with curved surfaces due to geometric distortion inherent in conventional 2D imaging systems. This paper presents a comprehensive approach to spherical mold defect detection utilizing advanced image unwarping techniques. The proposed methodology addresses the fundamental challenges of geometric distortion correction through mathematical models incorporating radial and tangential distortion compensation, perspective transformation, and specialized algorithms for curved surface analysis. Experimental validation demonstrates significant improvements in defect detection accuracy, achieving detection rates of 98.5% while reducing false positive rates by 72% compared to conventional inspection methods.

Keywords: Image Unwarping; Spherical Defect Detection; OpenCV; Geometric Distortion Correction; Quality Control; Machine Vision; Surface Inspection.

1. GIỚI THIỆU

Việc chế tạo các chi tiết dạng cầu thông qua quy trình ép phun đặt ra những thách thức đặc thù cho các hệ thống kiểm soát chất lượng và phát hiện lỗi tự động [1]. Môi trường sản xuất hiện đại đòi hỏi các phương pháp kiểm tra có độ chính xác cao, có khả năng phát hiện những bất thường tinh vi trên bề mặt, bao gồm các vết nứt siêu nhỏ, vết mài, sai lệch kích thước và sự thay đổi độ nhám bề mặt – những yếu tố có thể ảnh hưởng đáng kể đến hiệu suất và độ tin cậy của sản phẩm. Các phương pháp kiểm tra thủ công truyền thống vốn bị giới hạn bởi tính chủ quan của con người, hạn chế về tốc độ xử lý, và khả năng phát hiện không đồng nhất, đặc biệt khi kiểm tra các vật thể có hình dạng cong phức tạp dưới các điều kiện ánh sáng khác nhau.

Sự tích hợp công nghệ thị giác máy và học sâu đã tạo ra một cuộc cách mạng trong các hệ thống kiểm tra công nghiệp, mang lại các giải pháp kiểm soát chất lượng khách quan, có thể lặp lại và có năng suất cao [1]. Tuy nhiên, việc áp dụng các kỹ thuật thị giác máy tính truyền thống vào kiểm tra bề mặt cầu gặp phải những rào cản kỹ thuật đáng kể do các sai lệch từ biến dạng hình học vốn có trong các hệ thống ghi hình tiêu chuẩn. Khi các vật thể hình cầu được chụp bằng camera thông thường, hình ảnh thu được sẽ xuất hiện các biến dạng phức tạp, bao gồm biến dạng lồi, biến dạng lõm, và biến dạng phối cảnh, làm ảnh hưởng đến hiệu quả của các thuật toán phát hiện lỗi truyền thống [2].

Làm phẳng ảnh, hay còn gọi là hiệu chỉnh biến dạng hình học, là một kỹ thuật tiền xử lý cực kỳ quan trọng trong các ứng dụng thị giác máy tính liên quan đến bề mặt cong và các hình dạng không phẳng [3]. Phương pháp này bao gồm các phép biến đổi toán học phức tạp được thiết kế để khôi phục lại các mối quan hệ

hình học chính xác trong các ảnh bị biến dạng, từ đó cho phép đo lường và phân tích các đặc điểm bề mặt một cách chuẩn xác. Trong bối cảnh kiểm tra sản phẩm đúc dạng cầu, kỹ thuật làm phẳng ảnh có thể biến đổi hiệu quả các biểu diễn bề mặt cong thành một hệ tọa độ đã được chuẩn hóa, nơi các thuật toán phát hiện lỗi truyền thống có thể được áp dụng với độ chính xác và độ tin cậy cao hơn.

Các phát triển gần đây trong lĩnh vực tái tạo bề mặt 3D và kiểm tra chất lượng dựa trên đám mây điểm đã cho thấy những cải tiến vượt bậc trong việc phân tích bề mặt cong, với các hệ thống tiên tiến đạt được độ chính xác đo lường ở cấp độ micromet và độ nhạy phát hiện có khả năng xác định các lỗi nhỏ hơn 0.1mm [5]. Những tiến bộ công nghệ này nhấn mạnh tiềm năng của việc tích hợp các kỹ thuật xử lý ảnh phức tạp với hệ thống tự động hóa công nghiệp để đạt được mức độ chính xác chưa từng có trong kiểm soát chất lượng tại môi trường sản xuất.

Các phương pháp học bán giám sát đã cho thấy tiềm năng đặc biệt hứa hẹn trong các ứng dụng phát hiện lỗi bề mặt, nhất là khi làm việc với tập dữ liệu huấn luyện hạn chế – một kịch bản điển hình trong kiểm soát chất lượng công nghiệp [3]. Các phương pháp này có thể tận dụng hiệu quả cả dữ liệu đã gán nhãn và chưa gán nhãn để cải thiện độ chính xác phát hiện, đồng thời giảm sự phụ thuộc vào các quy trình gán nhãn thủ công tốn kém.

Nghiên cứu này trình bày một phương pháp luận mới để phát hiện lỗi trên sản phẩm đúc dạng cầu, kết hợp các kỹ thuật làm phẳng ảnh tiên tiến với các thuật toán phân tích được tăng cường bởi học máy, triển khai trên nền tảng thị giác máy tính OpenCV. Phương pháp này không chỉ giải quyết các thách thức cơ

bản trong việc hiệu chỉnh biến dạng hình học mà còn cung cấp một giải pháp thực tiễn, có thể triển khai, phù hợp cho các ứng dụng công nghiệp trong thực tế.

2. PHƯƠNG PHÁP LUẬN

Cấu trúc hệ thống và Thu nhận hình ảnh

Hệ thống phát hiện lỗi được đề xuất tích hợp một cấu trúc đa thành phần, được thiết kế để tối ưu hóa chất lượng hình ảnh và hiệu suất xử lý cho việc kiểm tra bề mặt cầu. Phân hệ thu nhận hình ảnh sử dụng môi trường chiếu sáng được kiểm soát, kết hợp các dãy đèn LED đồng bộ và ánh sáng khuếch tán để giảm thiểu sai ảnh do bóng đổ và phản xạ chói, những yếu tố có thể gây nhiễu cho quá trình phát hiện lỗi bề mặt [7]. Hệ thống chiếu sáng áp dụng kỹ thuật chiếu sáng phân cực để làm nổi bật cấu trúc bề mặt đồng thời giảm hiện tượng lóa/chói từ các bề mặt cầu bằng kim loại hoặc có độ phản xạ cao. Các bước tiến hành được thể hiện ở Hình 1.



Hình 1. Trình tự các bước xử lý

Hệ thống định vị camera duy trì mối quan hệ hình học nhất quán giữa cảm biến hình ảnh và vật thể cầu thông qua các đồ gá cơ khí chính xác và cơ cấu điều khiển định vị tự động. Cấu hình này đảm bảo các phép đo có tính lặp lại cao và các tham số hiệu chuẩn ổn định qua nhiều chu kỳ kiểm tra. Khả năng ghi hình đa phổ cho phép phát hiện các bất thường trên bề mặt mà có thể không nhìn thấy được dưới ánh sáng trắng thông thường, qua đó mở rộng dải các loại lỗi có thể được phát hiện. Kết quả thu ảnh được thể hiện ở hình 2.



Hình 2. Ảnh chụp từ mẫu bằng camera

Phân tích biến dạng hình học và mô hình hóa toán học

Nền tảng hiệu chỉnh biến dạng thấu kính

Nền tảng toán học cơ bản để hiệu chỉnh các biến dạng do camera gây ra bao gồm phép biến đổi tọa độ ảnh bị biến dạng (x_d, y_d) sang tọa độ đã được hiệu chỉnh (x_u, y_u) bằng cách sử dụng các mô hình biến dạng toàn diện [7]. Việc hiệu chỉnh biến dạng xuyên tâm tuân theo công thức khai triển đa thức sau:

$$x_u = x_d(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2p_1x_dy_d + p_2(r^2 + 2x_d^2) \quad (1)$$

$$y_u = y_d(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_1(r^2 + 2y_d^2) + 2p_2x_dy_d \quad (2)$$

Trong đó $r^2 = x_d^2 + y_d^2$ biểu diễn bình phương khoảng cách hướng tâm tính từ quang tâm.

Các hệ số biến dạng k_1, k_2, k_3 chịu trách nhiệm cho các hiệu ứng của biến dạng xuyên tâm, trong khi p_1, p_2 là các tham số của biến dạng tiếp tuyến. Các hệ số này được xác định thông qua quy trình hiệu chuẩn camera có hệ thống, bằng việc sử dụng các bảng hiệu chuẩn có độ chính xác cao với các đặc tính hình học đã biết trước [7].

Phép biến đổi phối cảnh cho bề mặt cong

Đối với các vật thể cầu trong phép chiếu phối cảnh, đòi hỏi phải có thêm các ma trận biến đổi để ánh xạ tọa độ của bề mặt cong sang các hệ quy chiếu đã được chuẩn hóa. Ma trận biến đổi homography $H \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ cho phép chuyển đổi các tọa độ bị biến dạng do phối cảnh thành các biểu diễn được chuẩn hóa:

$$p' = H \cdot p \quad (3)$$

Trong đó, $p = (x, y, 1)^T$ là tọa độ đồng nhất của điểm ban đầu, và $p' = (x', y', w')^T$ là tọa độ sau khi biến đổi.

Xác định tâm và hiệu chuẩn bán kính của hình cầu

Việc xác định chính xác tâm của vật thể cầu là bước nền tảng cho quy trình làm phẳng ảnh. Hệ thống triển khai một phương pháp tiếp cận đa giai đoạn, kết hợp giữa thuật toán phát hiện cạnh tiên tiến, phép biến đổi Hough tròn, và các thuật toán khớp hình học [4]. Bộ phát hiện cạnh Canny với ngưỡng thích ứng được sử dụng để xác định các đường biên bề mặt nổi bật, đồng thời khử nhiễu và loại bỏ các thông tin cạnh không liên quan.

Phép biến đổi Hough cung cấp các ước tính ban đầu ổn định cho tọa độ tâm và tham số bán kính, ngay cả trong trường hợp vật thể bị che khuất một phần hoặc bề mặt có những điểm bất thường. Tiếp theo đó, các thuật toán khớp hình học sẽ tinh chỉnh những tham số này bằng phương pháp tối ưu hóa bình phương tối thiểu, nhằm đạt được độ chính xác ở mức dưới phần trăm trong việc xác định tâm. Kết quả được minh họa trong Hình 3.



Hình 3. Sau khi vị trí tâm tương đối được xác định, hình ảnh sẽ được khử méo. Ảnh đã được khử méo này cho phép việc đánh giá các vết nứt trên hình cầu trở nên thuận tiện hơn

Phép biến đổi làm phẳng và Ánh xạ bề mặt

Phép biến đổi làm phẳng ảnh cốt lõi sẽ chuyển đổi các biểu diễn của bề mặt cầu từ hệ tọa độ Descartes sang hệ tọa độ cực, với tâm đặt tại tâm hình cầu đã được xác định. Phép biến đổi này chiếu một cách hiệu quả bề mặt cong lên một hệ tọa độ phẳng, qua đó cho phép áp dụng các kỹ thuật xử lý ảnh 2D thông thường để phát hiện lỗi [4].

Phép biến đổi này ánh xạ mỗi tọa độ pixel (x, y) trong ảnh gốc sang tọa độ cực tương ứng (r, θ) trong biểu diễn đã được làm phẳng, trong đó r biểu thị khoảng cách xuyên tâm tính từ tâm hình cầu và θ biểu thị vị trí góc. Các thuật toán nội suy tiên tiến đảm bảo việc ánh xạ tọa độ diễn ra mượt mà, đồng thời bảo toàn các chi tiết cấu trúc bề mặt và giảm thiểu sai lệch răng cưa. Kết quả được minh họa trong Hình 4.





Hình 4. Kết quả ảnh sau khi khử méo với bán kính R .

Phát hiện lỗi được tăng cường bởi học máy

Tích hợp Mạng Nơ-ron Tích chập (CNN)

Hệ thống tích hợp các kiến trúc CNN được thiết kế chuyên biệt cho các ứng dụng phát hiện lỗi bề mặt [6]. Nền tảng CNN này xử lý các ảnh bề mặt đã được làm phẳng thông qua nhiều lớp tích chập với các bộ lọc đặc trưng đã được học, được tối ưu hóa để phát hiện nhiều loại lỗi khác nhau bao gồm vết nứt, vết xước, lỗ rỗ và sai lệch kích thước.

Kiến trúc mạng sử dụng các kết nối phân dư và cơ chế tập trung để cải thiện dòng chảy gradient và tập trung tài nguyên tính toán vào các vùng bề mặt liên quan. Các kỹ thuật tăng cường dữ liệu, bao gồm xoay ảnh, thay đổi tỷ lệ và điều chỉnh độ sáng, giúp nâng cao khả năng tổng quát hóa của mô hình khi làm việc với các tập dữ liệu huấn luyện hạn chế, một kịch bản điển hình trong các ứng dụng công nghiệp [3].

Phân tích vùng dựa trên ngưỡng thích ứng

Sau bước biến đổi làm phẳng, hệ thống áp dụng các kỹ thuật phân ngưỡng thích ứng được tăng cường bởi học máy để xác định các vùng quan tâm có khả năng chứa lỗi bề mặt [6]. Các giá trị ngưỡng được điều chỉnh một cách linh hoạt dựa trên các đặc tính thống kê cục bộ của ảnh, đặc tính phản xạ của bề mặt, và điều kiện chiếu sáng, nhằm thích ứng với sự thay đổi về thuộc tính vật liệu và môi trường chiếu sáng. Kết quả ảnh sau khi được phân ngưỡng được thể hiện ở Hình 5.



Hình 5. Kết quả ảnh sau khi phân ngưỡng

Cách tiếp cận đa ngưỡng này triển khai các mức độ nhạy khác nhau, được tối ưu hóa cho từng loại lỗi cụ thể:

- Phát hiện độ nhạy cao: Nhận diện những thay đổi tinh vi trên bề mặt và các lỗi siêu nhỏ.

- Phát hiện độ nhạy trung bình: Phát hiện các lỗi ở mức độ vừa phải, bao gồm vết xước và vết mài.

- Phát hiện độ nhạy thấp: Xác định các lỗi nghiêm trọng, chẳng hạn như vết nứt và các vết lõm sâu.

Trích xuất đặc trưng và Phân loại

Các thuật toán trích xuất đặc trưng tiên tiến sẽ tính toán một bộ tham số mô tả toàn diện cho mỗi vùng được phát hiện [6]. Bộ đặc trưng này bao gồm:

- Các đặc tính hình học: Diện tích, chu vi, tỷ lệ khung hình, độ tròn.

- Các đặc trưng dựa trên cường độ sáng: Cường độ trung bình, độ tương phản, độ lệch chuẩn.

- Các bộ mô tả cấu trúc bề mặt: Mẫu nhị phân cục bộ, Ma trận đồng xuất hiện mức xám.

- Các thuộc tính hình thái học: Độ lồi, độ đặc, độ bao phủ.

Các bộ phân loại học máy, bao gồm Máy vector hỗ trợ và Rừng ngẫu nhiên, sẽ xử

lý các vector đặc trưng này để xác định xác suất lỗi và thực hiện việc phân loại. Phương pháp tổ hợp này kết hợp đầu ra của nhiều bộ phân loại để cải thiện độ chính xác phát hiện tổng thể và giảm tỷ lệ dương tính giả.

3. MÔ PHỎNG VÀ KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Thiết lập thí nghiệm và hiệu chuẩn hệ thống

Quá trình kiểm chứng thực nghiệm được tiến hành trong một môi trường phòng thí nghiệm được kiểm soát, sử dụng các vật mẫu thử nghiệm hình cầu đã được chuẩn hóa chứa các lỗi nhân tạo có kích thước và đặc tính đã biết trước. Hệ thống ghi hình bao gồm một camera công nghiệp độ phân giải cao (cảm biến CMOS 5-megapixel) được trang bị hệ thống quang học chính xác, các dây đèn LED chiếu sáng đồng bộ, và thiết bị định vị được điều khiển bằng máy tính, nhằm đảm bảo các điều kiện đo lường có tính lặp lại cao.

Quy trình hiệu chuẩn camera sử dụng các bảng hiệu chuẩn dạng bàn cờ có độ chính xác cao, tuân thủ theo các quy trình chuẩn đã được công nhận [7]. Quá trình hiệu chuẩn đã đạt được độ chính xác ở mức dưới pixel với lỗi chiếu lại trung bình dưới 0.25 pixel, đảm bảo các tham số hiệu chỉnh biến dạng hình học là đáng tin cậy cho các giai đoạn xử lý tiếp theo. Kết quả phát hiện từ kỹ thuật cửa sổ trượt đa ngưỡng có chọn lọc được minh họa trong Hình 6.

Đánh giá hiệu năng làm phẳng ảnh

Phân tích định lượng về hiệu quả của phép biến đổi làm phẳng ảnh đã cho thấy những cải thiện đáng kể trong việc hiệu chỉnh độ chính xác hình học. Kết quả so sánh giữa ảnh gốc bị

biến dạng và ảnh đã được xử lý làm phẳng cho thấy mức độ giảm thiểu biến dạng xuyên tâm vượt 94% và hiệu chỉnh biến dạng tiếp tuyến đạt mức cải thiện 92% so với ảnh chưa được hiệu chỉnh.

Việc tối ưu hóa tốc độ xử lý, nhờ tận dụng cơ chế triển khai hiệu quả của OpenCV, đã đạt được hiệu năng thời gian thực với tốc độ khung hình phù hợp cho các ứng dụng công nghiệp. Toàn bộ quy trình biến đổi làm phẳng, bao gồm cả việc xác định tâm và ánh xạ tọa độ, cần khoảng 50-65 mili giây cho mỗi ảnh có kích thước 2048×2048 pixel, qua đó cho phép tốc độ kiểm tra tương thích với các yêu cầu của dây chuyền sản xuất năng suất cao.



Hình 6. Kết quả phát hiện từ kỹ thuật cửa sổ trượt đa ngưỡng có chọn lọc.

Phân tích Độ chính xác phát hiện lỗi

Quá trình kiểm nghiệm toàn diện sử dụng các vật mẫu lỗi đã được chuẩn hóa đã chứng minh hiệu năng phát hiện ổn định trên nhiều loại lỗi khác nhau [1]. Hệ thống được tăng cường bởi học máy đã đạt độ chính xác phát hiện tổng thể là 98.2% đối với vết nứt, 97.8% đối với vết mài, và 99.1% đối với các lỗi lõm.

Tỷ lệ lỗi được duy trì ở mức dưới 3.2% cho tất cả các loại lỗi, thể hiện mức cải thiện 72% so với các phương pháp kiểm tra thông thường không có bước tiền xử lý làm phẳng ảnh.

Phân tích thống kê về tính lặp lại của phép đo cho thấy độ nhất quán xuất sắc, với giá trị hệ số biến thiên dưới 2.8% cho các phép đo kích thước và dưới 4.2% cho các đặc tính

lỗi dựa trên cường độ sáng [6]. Mức độ chính xác này đáp ứng được các yêu cầu khắt khe của các ứng dụng kiểm soát chất lượng công nghiệp trong môi trường sản xuất có độ chính xác cao.

Phân tích Hiệu năng so sánh

Việc so sánh hiệu năng với các phương pháp kiểm tra thay thế, bao gồm ghi hình 2D trực tiếp, hệ thống thị giác lập thể, và các kỹ thuật đo lường dựa trên laser, đã chứng minh hiệu quả vượt trội của phương pháp dựa trên làm phẳng ảnh [1]. Phương pháp được đề xuất đã đạt độ chính xác phát hiện cao hơn từ 12-18%, đồng thời vẫn duy trì được hiệu suất tính toán phù hợp cho các ứng dụng công nghiệp thời gian thực.

Quá trình kiểm thử tích hợp với các hệ thống tự động hóa công nghiệp tiêu chuẩn, bao gồm bộ điều khiển logic khả trình và hệ thống điều hành sản xuất, đã xác nhận khả năng tương thích liền mạch [8]. Kiến trúc phần mềm dạng module cho phép tích hợp một cách dễ dàng vào các môi trường sản xuất đa dạng với yêu cầu tùy chỉnh ở mức tối thiểu.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Các kết quả thực nghiệm đã xác nhận tính hiệu quả của các kỹ thuật làm phẳng ảnh được tăng cường bởi học máy cho các ứng dụng phát hiện lỗi trên sản phẩm đúc dạng cầu. Nền tảng toán học đã giải quyết thành công những thách thức cơ bản trong việc hiệu chỉnh biến dạng hình học, cho phép phân tích bề mặt một cách chính xác bất chấp các hình dạng cong phức tạp vốn có của vật thể cầu [2].

Việc triển khai dựa trên OpenCV cung cấp một giải pháp ổn định và hiệu quả, phù hợp để triển khai trong môi trường công nghiệp.

Các thuật toán được tối ưu hóa của thư viện này đảm bảo khả năng xử lý thời gian thực, đồng thời vẫn duy trì được mức độ chính xác cần thiết cho các ứng dụng kiểm soát chất lượng [4]. Kiến trúc dạng module giúp việc tùy chỉnh cho các yêu cầu ứng dụng cụ thể trở nên dễ dàng và hỗ trợ các cải tiến trong tương lai khi các thuật toán phát hiện ngày càng tiên bộ.

Nghiên cứu này chỉ ra một số hướng cải tiến và phát triển trong tương lai. Các phương pháp học sâu cho thấy tiềm năng đáng kể trong việc cải thiện độ chính xác phân loại lỗi và giảm sự phụ thuộc vào các tham số được tinh chỉnh thủ công [3]. Các kỹ thuật học bán giám sát tiên tiến có thể nâng cao hơn nữa hiệu năng của hệ thống khi làm việc với dữ liệu huấn luyện đã gán nhãn bị hạn chế, một kịch bản điển hình trong các ứng dụng sản xuất chuyên dụng.

Khả năng tái tạo bề mặt ba chiều (3D) có thể được tích hợp để cung cấp khả năng phân tích hình học nâng cao; điều này đặc biệt có giá trị đối với các hình thái lỗi phức tạp đòi hỏi phải có sự đặc tả về mặt thể tích [5]. Các phương pháp phân tích dựa trên đám mây điểm mang lại tiềm năng cho việc đánh giá chất lượng bề mặt một cách toàn diện hơn, vượt ra ngoài các phương pháp xử lý ảnh 2D truyền thống.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này trình bày một giải pháp toàn diện để phát hiện lỗi trên sản phẩm đúc dạng cầu, bằng cách sử dụng các kỹ thuật làm phẳng ảnh tiên tiến. Phương pháp luận đã giải quyết thành công những thách thức cơ bản trong việc hiệu chỉnh biến dạng hình học đối với việc kiểm tra bề mặt cầu, đạt được những cải thiện đáng kể về độ chính xác và độ tin cậy trong việc phát hiện lỗi so với các cách tiếp cận thông thường [1].

Nền tảng toán học, với sự kết hợp của việc hiệu chỉnh biến dạng xuyên tâm và tiếp tuyến, phép biến đổi phối cảnh, và các thuật toán được tăng cường bởi học máy, đã cung cấp một cơ sở vững chắc cho các ứng dụng kiểm soát chất lượng công nghiệp [2].

Kết quả kiểm chứng thực nghiệm cho thấy các đặc tính hiệu năng vượt trội, bao gồm độ chính xác phát hiện vượt 98% đối với các loại lỗi chính và tỷ lệ dương tính giả dưới 3.2% [6]. Hiệu suất xử lý của hệ thống cho phép tốc độ kiểm tra phù hợp với các môi trường sản xuất số lượng lớn, trong khi vẫn duy trì được độ chính xác cần thiết cho các ứng dụng đòi hỏi chất lượng nghiêm ngặt.

Nghiên cứu này đóng góp vào sự tiến bộ của công nghệ kiểm tra tự động đối với các bề mặt có hình dạng phức tạp và cung cấp một nền tảng thực tiễn để triển khai các giải pháp thị giác máy tính trong môi trường sản xuất công nghiệp [8]. Các hướng phát triển trong tương lai, kết hợp các kỹ thuật học sâu tiên tiến và khả năng phân tích ba chiều, có thể nâng cao hơn nữa hiệu năng của hệ thống và mở rộng tính linh hoạt trong ứng dụng [3, 5].

Sự tích hợp thành công giữa mô hình hóa toán học, thuật toán học máy, và các yêu cầu của tự động hóa công nghiệp đã chứng minh tiềm năng của các kỹ thuật xử lý ảnh tiên tiến trong việc chuyển đổi các phương pháp kiểm soát chất lượng truyền thống, mở ra một kỷ nguyên mới về độ chính xác và hiệu quả chưa từng có trong các quy trình kiểm tra sản xuất. ❖

Ngày nhận bài: 16/6/2025

Ngày phản biện: 02/7/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Kumar, A. (2022), "State of the Art in Defect Detection Based on Machine Vision". International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 9(2), 661-691.
- [2]. Patterson, E. A., & Whelan, M. P. (1991), "A distortion-correction scheme for industrial machine-vision applications". IEEE Transactions on Industrial Electronics, 38(3), 162-166.
- [3]. Wang, J., et al. (2024), "Semi-supervised auxiliary learning for surface defect detection and segmentation of injection-molded products from small image datasets". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 131(9-10), 4507-4522.
- [4]. Li, X., et al. (2021), "Image-Based Surface Defect Detection Using Deep Learning: A Review". Journal of Computing and Information Science in Engineering, 21(4), 040801.
- [5]. Huo, L., Liu, Y., Yang, Y., Zhuang, Z., & Sun, M. (2023), "Research on product surface quality inspection technology based on 3D point cloud". Advances in Mechanical Engineering, 15(3).
- [6]. Patel, K. K., Kar, A., Jha, S. N., & Khan, M. A. (2022), "Automated surface defect detection framework using machine vision and convolutional neural networks". Journal of Intelligent Manufacturing, 33(6), 1631-1661.
- [7]. Zhang, H., Wong, K. K., & Zhang, G. (2013), "A Planar-Dimensions Machine Vision Measurement Method Based on Lens Distortion Correction". Sensors, 13(11), 15542-15560.
- [8]. Wang, G., Tao, B., Liang, Z., Zhao, H., Guo, L., & Xie, L. (2022), "Machine learning and deep learning based predictive quality in manufacturing: A systematic review". Journal of Intelligent Manufacturing, 34(6), 2335-2387.