■ Ngày nộp bài: 26/5/2026 ■ Ngày sửa bài: 12/6/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 26/6/2026

Thiết kế và tích hợp mô hình robot song song Delta ứng dụng xử lý ảnh phục vụ đào tạo nghề Cơ điện tử

Design and integration of a vision-based Delta parallel robot platform for mechatronics vocational training

> THS NGUYỄN CÔNG HÙNG[1,*], TS BÙI THANH LÂM[2], THS NGUYỄN THỊ HUYÊN[3]
[1]Trường Cao đẳng nghề Kỹ thuật Công nghệ
[2]Trường Cơ khí - Ô tô, Đại học Công nghiệp Hà Nội
[3]Trường Cao đẳng Lai Châu
[*]Email: hungktcn@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày thiết kế và tích hợp mô hình robot song song Delta ba bậc tự do phục vụ đào tạo nghề Cơ điện tử. Hệ thống gồm ba cụm servo-hộp giảm tốc, PLC Siemens S7-1200, camera RGB và máy tính chạy YOLO11; kiến trúc phân tầng tách biệt xử lý ảnh và chuyển đổi tọa độ khỏi khối điều khiển chấp hành, cho phép dạy từng kỹ năng độc lập trước khi vận hành toàn chu trình. Kết quả vận hành ghi nhận sai số định vị trung bình 0,77 mm tại 5 điểm kiểm tra và tỷ lệ phân loại đúng 96,3% trên 300 mẫu sáu lớp vật thể - phù hợp cho thực hành phòng thí nghiệm.

Từ khóa: Robot Delta; xử lý ảnh; YOLO11; PLC Siemens S7-1200; cơ điện tử; mô hình đào tạo; homography.

ABSTRACT

This paper presents the design and integration of a 3-DOF Delta parallel robot platform for mechatronics vocational training. The system pairs a Siemens S7-1200 PLC with a host computer running YOLO11; a layered architecture separates vision processing and coordinate conversion from real-time actuation, enabling skill-by-skill instruction before full automation. Validation yielded an average positioning error of 0.77 mm across five reference points and 96.3% classification accuracy on 300 samples covering six object classes - adequate for laboratory training.

Keywords: Delta robot; machine vision; YOLO11; Siemens S7-1200 PLC; mechatronics; instructional platform; homography.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sinh viên Cơ điện tử thường có thể lập trình PLC, xử lý ảnh và điều khiển servo riêng lẻ, nhưng khi tích hợp cả ba vào một hệ thống tự động hoàn chỉnh thì phần lớn đều lúng túng. Nguyên nhân không nằm ở thiếu hụt kiến thức từng phần, mà ở chỗ ít môi trường đào tạo nào yêu cầu người học tự tay vận hành hệ thống từ đầu đến cuối. Theo triết lý CDIO, người học cần trải qua toàn bộ vòng đời sản phẩm kỹ thuật - từ ý tưởng đến tích hợp và đánh giá - thay vì tiếp thu từng môn học tách biệt [1].

Robot công nghiệp thương mại tích hợp đầy đủ nhưng chi phí cao, phần mềm đóng và không cho phép can thiệp vào lớp điều khiển bên dưới [2]. Các mô hình tự chế đơn giản thường chỉ minh họa một chức năng điều khiển động cơ, lập trình PLC hoặc xử lý ảnh, hiếm khi phối hợp cả ba. Robot song song Delta, do Clavel đề xuất năm 1988 trong bối cảnh gắp vật thể tốc độ cao [3] là lựa chọn phù hợp: Cấu trúc vòng kín ba nhánh đối xứng giảm quán tính phần động, đạt tốc độ đáp ứng tốt mà không đòi hỏi kết cấu nặng [4]. Động học cơ bản của họ robot này đã được phân tích bởi Tsai [5] và Merlet [4]; phân tích kỳ dị của Gosselin và Angeles [6] chỉ ra rằng điều kiện tránh kỳ dị có vai trò quyết định trong vận hành an toàn của cơ cấu vòng kín.

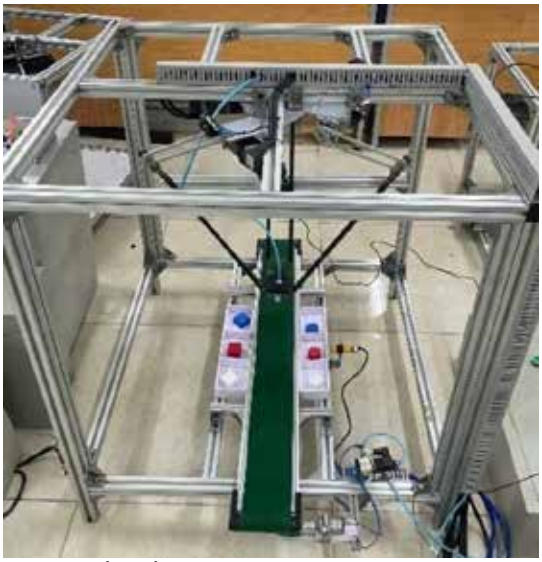
Để robot nhận dạng và phân loại vật thể cần tích hợp hệ thống xử lý ảnh dựa trên học sâu [7]. Kiến trúc hai giai đoạn như Faster R-CNN [8] đạt độ chính xác cao nhưng chậm; kiến trúc một giai đoạn như SSD [9] và YOLO [10] suy luận nhanh hơn đáng kể, phù hợp với yêu cầu thời gian gần thực của băng chuyền. YOLO11 do Ultralytics phát hành [11] được chọn nhờ hệ sinh thái huấn luyện thuận lợi cho người dùng không chuyên về học sâu.

Tích hợp các thành phần trên đòi hỏi kiến trúc phân tầng rõ ràng giữa khối tính toán cấp cao và khối điều khiển thời gian thực - nguyên tắc phổ biến trong hệ thống robot công nghiệp. Bài báo trình bày thiết kế và tích hợp mô hình robot song song Delta ứng dụng xử lý ảnh phục vụ đào tạo nghề Cơ điện tử, với 3 đóng góp chính: Cấu trúc tích hợp đầy đủ giữa robot Delta, PLC Siemens, camera, YOLO11, Python và cơ cấu hút chân không trong nền tảng đào tạo mở có thể tái dựng; kiến trúc phân tầng tách biệt khối xử lý ảnh và khối điều khiển chấp hành theo nguyên tắc phân vai trong robot công nghiệp hiện đại; kết quả

vận hành minh họa - sai số định vị và tỷ lệ phân loại - xác nhận hệ thống hoạt động được trong điều kiện phòng thực hành, kèm đề xuất 8 bài thực hành có cấu trúc.

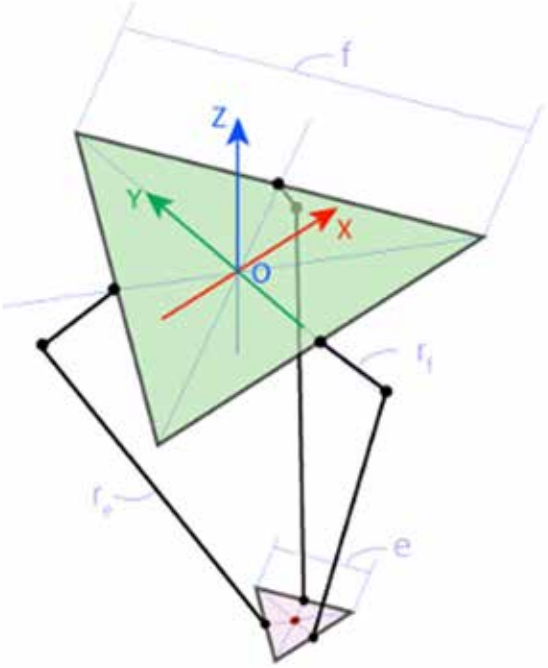
2. CẤU TRÚC TỔNG THỂ CỦA HỆ THỐNG

Mô hình được thiết kế cho bài toán nhận dạng, gắp và phân loại vật thể nhẹ trên băng chuyền, gồm 8 khối chính: Robot Delta ba bậc tự do, băng chuyền, cụm hút chân không, ba cụm servo-hộp giảm tốc, PLC Siemens S7-1200, camera RGB, máy tính xử lý ảnh và phần mềm giám sát. Luồng xử lý đi từ camera, qua YOLO11 phát hiện vật thể, chuyển đổi tọa độ ảnh sang tọa độ robot, ghi vào vùng nhớ trao đổi của PLC, điều khiển robot gắp và đưa vật thể đến khay phân loại.



Hình 1. Cấu trúc tổng thể hệ thống robot Delta ứng dụng xử lý ảnh

3. THIẾT KẾ CƠ KHÍ VÀ TRUYỀN ĐỘNG



Hình 2. Thông số hình học chính của robot Delta

3.1. Thông số hình học

Robot Delta có ba nhánh đối xứng 120°, mỗi nhánh gồm khâu chủ động nối trục servo và cụm thanh song song nối bệ di động. Cấu trúc này giữ hướng bệ công tác gần như cố định, điều kiện cần thiết cho cơ cấu hút thẳng đứng. Bốn tham số hình học - bán kính bệ cố định Rb = 86,6 mm, bán kính bệ di động Rp = 34,6 mm, chiều dài khâu chủ động r_f = 150 mm và chiều dài khâu bị động re = 310 mm được giữ nhất quán từ mô phỏng đến chương trình điều khiển (Bảng 1, Hình 2).

Bảng 1. Thông số hình học thiết kế của robot Delta

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Bán kính bệ cố định	R_b	86,6	mm
Bán kính bệ di động	R_p	34,6	mm
Chiều dài khâu chủ động	r_f	150	mm
Chiều dài khâu bị động	r_e	310	mm
Giới hạn góc khâu chủ động	θ_{lim}	±45	độ
Đường kính vùng làm việc	D_w	≥ 300	mm
Chiều sâu vùng làm việc	H_w	≈ 200	mm

Sau lắp ráp, cần đo lại chiều dài thực tế của từng khâu và tọa độ tâm các cụm servo, cập nhật vào chương trình động học. Nếu chỉ dùng kích thước danh nghĩa, sai số lắp ráp tích lũy, đặc biệt ở các điểm xa tâm có thể làm tăng sai số đầu công tác lên đáng kể.

3.2. Kiểm tra vùng làm việc và điều kiện tránh kỳ dị

Vùng làm việc hợp lệ không trùng với hình bao hình học. Một điểm $\mathrm{p} = [x, y, z]^T$ chỉ được nhận khi đồng thời thỏa mãn 3 điều kiện: Nghiệm động học nghịch tồn tại, góc khớp nằm trong dải cho phép và Jacobian không suy biến. Phát biểu tổng quát:

$$\mathbf{p} \in \Omega \Leftrightarrow \begin{cases} \theta_{min} \le \theta_i(\mathbf{p}) \le \theta_{max}, i = 1,2,3 \\ \sigma_{min}(\mathbf{J}) > \varepsilon_J \\ \text{không gây va chạm cơ khí} \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó: θ_i là góc khâu chủ động thứ i; $\mathbf{J}$ là ma trận Jacobian và $\sigma_{min}(\mathbf{J})$ là giá trị kỳ dị nhỏ nhất. Khi robot tiến gần cấu hình kỳ dị, σ_{min} giảm về 0, mô-men yêu cầu tăng đột biến và sai số bám quỹ đạo nhảy bậc - đây là hiện tượng đã được Gosselin và Angeles phân tích chi tiết trong nghiên cứu nền tảng về kỳ dị robot vòng kín. Trong chương trình điều khiển, điều kiện (1) được kiểm tra trước khi phát lệnh cho servo. Nếu không thỏa mãn, lệnh bị từ chối và giao diện hiển thị nguyên nhân để người học hiểu.

3.3. Cụm truyền động

Mỗi nhánh dùng servo AC kết hợp hộp giảm tốc hành tinh. Servo Mitsubishi HF-KN13 công suất 100 W nhận lệnh từ driver MR-JN-10A và được PLC điều khiển theo chế độ xung/hướng. Hộp giảm tốc tỉ số 1:25 tăng mô-men đầu ra và cải thiện độ phân giải góc tại khâu chủ động. Thông số đầy đủ của cụm truyền động ghi trong Bảng 2.

Bảng 2. Thông số cụm truyền động servo-hộp giảm tốc

Thành phần	Thông số chọn
Servo motor	Mitsubishi HF-KN13, 100 W
Mô-men định mức	0,32 N·m
Tốc độ định mức	3.000 vòng/phút

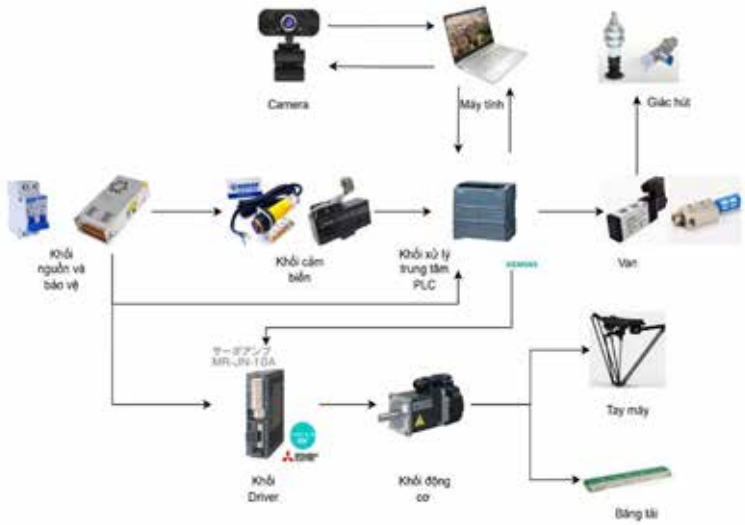
Encoder	17-bit, 131.072 xung/vòng
Driver	Mitsubishi MR-JN-10A
Hộp giảm tốc	Hành tinh 1:25
Mô-men đầu ra ước tính	≈ 7,6 N·m

3.4. Cơ cấu hút chân không

Cơ cấu gắp dùng giác hút chân không vì vật thể thử có khối lượng nhỏ và bề mặt tương đối phẳng. Hệ khí nén gồm bộ lọc-điều áp, van điện từ 3/2 (24 VDC), bộ Venturi tạo chân không, ống dẫn PU và giác hút cao su mềm Ø25 mm. Thiết kế hệ thống khí nén thực hiện theo nguyên tắc an toàn của ISO 4414.

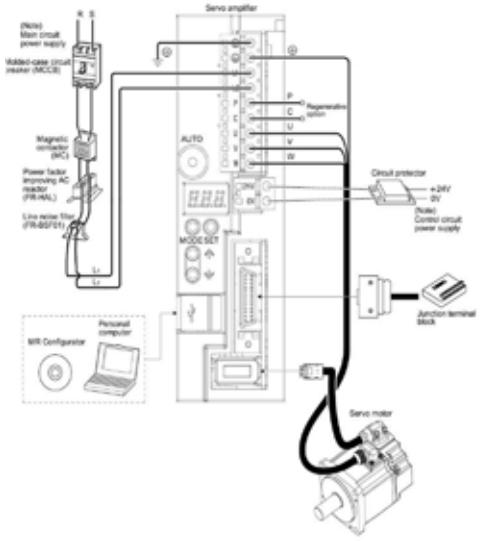
4. THIẾT KẾ ĐIỆN - ĐIỀU KHIỂN

PLC Siemens S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC là trung tâm chấp hành: Homing, phát xung/hướng cho servo, điều khiển băng chuyền, đóng/ngắt van hút và xử lý liên động an toàn. Máy tính xử lý ảnh tính toán nhận dạng và chuyển đổi tọa độ, ghi kết quả vào vùng nhớ DB của PLC. Cấu trúc này bảo toàn tính tiền định của vòng điều khiển servo trong khi tận dụng năng lực tính toán cao của máy tính cho khâu nhận dạng (Hình 3).



Hình 3. Sơ đồ khối hệ thống điện-điều khiển

Servo Mitsubishi vận hành ở chế độ điều khiển vị trí: PLC phát tín hiệu xung/hướng, driver xử lý vòng điều khiển bên trong. Cáp động lực, cáp encoder và cáp tín hiệu cần đi riêng máng và đấu chống nhiễu vỏ-đất theo khuyến cáo Mitsubishi - biện pháp hạn chế nhiễu xung clock xâm nhập kênh encoder khi servo công suất nhỏ vận hành gần biến tần. Sơ đồ đấu nối PLC-driver-servo tại Hình 4; phân bổ I/O tại Bảng 3.



Hình 4. Sơ đồ đấu nối PLC-driver-servo

Bảng 3. Phân bổ tín hiệu I/O của PLC

Nhóm tín hiệu	Địa chỉ đề xuất	Chức năng
DI0–DI2	I0.0–I0.2	Công tắc home ba trục
DI3	I0.3	Cảm biến vật trên băng chuyền
DI4–DI6	I0.4–I0.6	Tín hiệu alarm từ ba driver
DO0 / DO1	Q0.0 / Q0.1	Hướng trục 1
DO2 / DO3	Q0.2 / Q0.3	Hướng trục 2
DO4 / DO5	Q0.4 / Q0.5	Hướng trục 3
DO6	Q0.6	Van hút chân không
DO7	Q0.7	Điều khiển băng chuyền
Ethernet	DB dữ liệu	Nhận nhãn và tọa độ từ Python

Trong vận hành, ba trục chỉ được nhận lệnh sau khi homing thành công, không có alarm từ driver và vùng làm việc không có vật cản. Giới hạn mềm về tọa độ cũng cần được đặt trong PLC để tránh robot đi vào vùng gần kỳ dị - một biện pháp phòng ngừa cấp phần mềm bổ sung cho điều kiện (1) đã kiểm tra ở cấp kế hoạch quỹ đạo.

5. TÍCH HỢP XỬ LÝ ẢNH VÀ TRUYỀN DỮ LIỆU

5.1. Nhận dạng vật thể bằng YOLO11

Camera RGB được gắn cố định phía trên băng chuyền, hướng vuông góc với mặt phẳng băng. Máy tính xử lý ảnh chạy chương trình Python nạp mô hình YOLO11 đã huấn luyện cho sáu lớp vật thể. Sở dĩ chọn kiến trúc một giai đoạn thay vì Faster R-CNN là vì tốc độ suy luận phù hợp hơn với yêu cầu thời gian gần thực của băng chuyền; SSD cũng thuộc nhóm này nhưng YOLO và phiên bản YOLO11 được chọn vì hệ sinh thái công cụ huấn luyện thuận lợi hơn cho người dùng không chuyên về học sâu.

Tọa độ tâm hộp bao vật thể trên ảnh được xác định từ hai góc đối diện:

$$u_c = \frac{u_{min}+u_{max}}{2}, v_c = \frac{v_{min}+v_{max}}{2} \quad (2)$$

Sau đó, chương trình kiểm tra vật thể có nằm trong vùng gắp quy ước trước khi gửi dữ liệu sang PLC.

5.2. Chuyển đổi tọa độ ảnh sang tọa độ robot

Vật thể nằm trên mặt phẳng băng chuyền có chiều cao thay đổi không đáng kể, nên phép biến đổi homography đủ để chuyển tọa độ ảnh (u, v) sang tọa độ thực (X, Y) trên hệ tọa độ robot. Nền tảng lý thuyết của kỹ thuật hiệu chỉnh camera phẳng đã được Zhang xây dựng trong công trình được trích dẫn rộng rãi; OpenCV cung cấp các hàm triển khai phù hợp. Quan hệ homography:

$$s\begin{bmatrix}X\\Y\\1\end{bmatrix} = \mathbf{H}\begin{bmatrix}u\\v\\1\end{bmatrix} \quad (3)$$

Ma trận $\mathbf{H}$ (3×3) được xác định từ tối thiểu 4 cặp điểm có tọa độ ảnh và tọa độ thực đã biết trên bảng chuẩn, dùng hàm findHomography của OpenCV. Sai số chuyển đổi tọa độ tại điểm thứ i:

$$e_i = \sqrt{(X_i - \hat{X}_i)^2 + (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (4)$$

Sai số bình phương trung bình căn trên n điểm kiểm chứng:

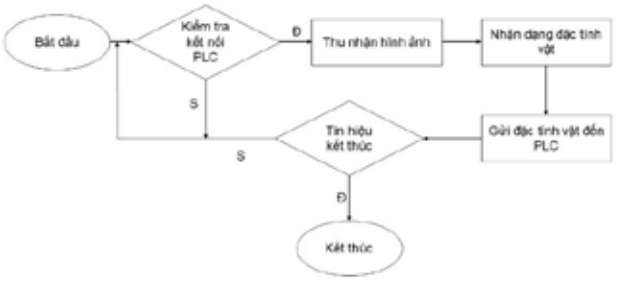
$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e_i^2} \quad (5)$$

5.3. Truyền dữ liệu Python - PLC

Sau khi nhận dạng và chuyển đổi tọa độ, Python ghi dữ liệu vào vùng nhớ DB của S7-1200. Cấu trúc dữ liệu đơn giản, gồm 2 cờ phối hợp theo nguyên tắc bắt tay: Valid (Python báo dữ liệu mới sẵn sàng) và Ack (PLC xác nhận đã đọc). Cờ Ack đóng vai trò khóa mềm, chỉ khi PLC trả Ack = 1, Python mới ghi vật thể tiếp theo ngăn PLC đọc lặp cùng một đối tượng qua nhiều khung hình liên tiếp (Bảng 4).

Bảng 4. Cấu trúc vùng nhớ trao đổi giữa Python và PLC

Biến	Địa chỉ gợi ý	Ý nghĩa
ObjectFlag	DB4.DBB0	Bit 0-5 tương ứng 6 lớp
X_pos	DB4.DBD2	Tọa độ X vật thể (mm)
Y_pos	DB4.DBD6	Tọa độ Y vật thể (mm)
Valid	DB4.DBX10.0	Python báo dữ liệu mới hợp lệ
Ack	DB4.DBX10.1	PLC xác nhận đã đọc xong
ErrorCode	DB4.DBW12	Mã lỗi truyền thông hoặc xử lý ảnh



Hình 5. Lưu đồ xử lý ảnh và truyền tín hiệu đến PLC

6. KẾT QUẢ VẬN HÀNH MINH HỌA

6.1. Sai số định vị robot

Thử nghiệm định vị được thực hiện tại 5 điểm trong vùng làm việc trung tâm, mỗi điểm lặp 10 lần. Cách trình bày sai số và độ lặp lại tham chiếu tinh thần của ISO 9283 về đánh giá đặc tính thao tác của robot, nhưng phạm vi áp dụng được giới hạn ở mô hình đào tạo. Sai số vị trí tại lần thử thứ k:

$$e_{p,k} = \sqrt{(x_k - x_d)^2 + (y_k - y_d)^2 + (z_k - z_d)^2} \quad (6)$$

Giá trị trung bình và độ lệch chuẩn mẫu trên n lần lặp:

$$\bar{e}_p = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} e_{p,k}, s_e = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{k=1}^{n}(e_{p,k} - \bar{e}_p)^2} \quad (7)$$

Khi cần biểu diễn khoảng tin cậy cho kết quả đo lặp, cách trình bày theo hướng dẫn JCGM 100:2008 về biểu diễn độ không đảm bảo đo được khuyến nghị. Kết quả đo ghi trong Bảng 5.

Bảng 5. Kết quả kiểm tra sai số định vị tại 5 điểm (50 lần đo)

Điểm thử	Tọa độ đặt (X; Y; Z), mm	Số lần lặp	Sai số TB (mm)	Sai số cực đại (mm)	Độ lặp lại (mm)
P1	0; 0; −390	10	0,62	1,10	0,28
P2	80; 0; −390	10	0,75	1,32	0,34
P3	−80; 0; −390	10	0,78	1,38	0,36
P4	0; 80; −400	10	0,84	1,46	0,39
P5	0; −80; −400	10	0,88	1,52	0,42
TB	—	**50**	**0,77**	**1,52**	**0,36**

Sai số trung bình 0,77 mm nằm dưới 1 mm và phù hợp với mục tiêu gắp vật thể nhẹ bằng giác hút Ø25 mm. Điểm P4 và P5 nằm xa tâm hơn, cho sai số cao hơn P1, phù hợp với phân tích về Jacobian gần kỳ dị khi tiến về biên vùng làm việc. Khi vận hành bài thực hành, giảng viên nên hạn chế lệnh gắp ở vùng trung tâm cho đến khi sinh viên đã quen với đặc tính của hệ thống.

6.2. Kết quả phân loại vật thể

Thử nghiệm phân loại thực hiện trên 300 mẫu chia đều cho 6 lớp vật thể, mỗi lớp 50 mẫu. Tỷ lệ phân loại đúng toàn hệ thống:

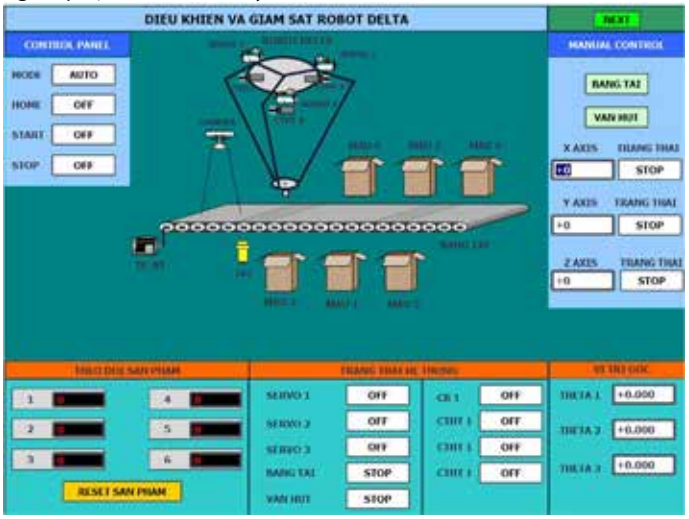
$$Acc = \frac{N_{correct}}{N_{total}} \times 100\% = \frac{289}{300} \times 100\% = 96{,}3\% \quad (8)$$

Bảng 6. Kết quả phân loại 300 mẫu thuộc sáu lớp vật thể

Lớp vật thể	Số mẫu thử	Phân loại đúng	Phân loại sai	Tỷ lệ đúng (%)
Tròn - Trắng	50	49	1	98,0

Tròn - Đỏ	50	47	3	94,0
Tròn - Xanh	50	49	1	98,0
Vuông - Trắng	50	50	0	100,0
Vuông - Đỏ	50	46	4	92,0
Vuông - Xanh	50	48	2	96,0
Tổng cộng	**300**	**289**	**11**	**96,3**

Các kết quả ở Mục 6.1 và 6.2 đủ để xác nhận hệ thống đã vận hành đúng chu trình thiết kế trong điều kiện phòng thực hành. Việc khẳng định năng lực vận hành dài hạn hoặc đưa vào dây chuyền sản xuất công nghiệp đòi hỏi thêm kiểm chứng theo ISO 9283 với số lượng mẫu lớn hơn và điều kiện ánh sáng đa dạng - nội dung nằm ngoài phạm vi bài báo này.



Hình 6. Giao diện vận hành và giám sát hệ thống

7. KHẢ NĂNG TRIỂN KHAI TRONG ĐÀO TẠO

Giá trị cốt lõi của mô hình không chỉ ở chỗ robot gắp được vật thể. Điểm khác biệt nằm ở khả năng tổ chức thành chuỗi bài thực hành liên thông, trong đó người học tự tay thực hiện từng bước từ nhận diện cơ khí đến đánh giá sai số của cả hệ thống. Cách tiếp cận này gắn với triết lý CDIO: Sinh viên cần được xây dựng và tích hợp, không chỉ được dạy.

8. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày thiết kế và tích hợp mô hình robot song song Delta ba bậc tự do phục vụ đào tạo nghề Cơ điện tử. Hệ thống gồm 3 cụm servo-hộp giảm tốc, PLC S7-1200, camera RGB và YOLO11 theo kiến trúc phân tầng tách biệt xử lý ảnh và điều khiển chấp hành, cho phép người học tiếp cận từng khối kỹ thuật độc lập trước khi vận hành toàn hệ thống. Kết quả vận hành ghi nhận sai số định vị trung bình 0,77 mm tại 5 điểm kiểm tra và tỷ lệ phân loại đúng 96,3% trên 300 mẫu 6 lớp vật thể - trong dải chấp nhận cho thực hành phòng thí nghiệm; khẳng định năng lực công nghiệp cần kiểm chứng bổ sung theo ISO 9283 với bộ mẫu lớn hơn và điều kiện chiếu sáng đa dạng. Hướng phát triển gồm kiểm chứng dài hạn về độ ổn định nhiệt và độ rơ, mở rộng dữ liệu YOLO11, nâng cấp điều khiển bám quỹ đạo và chuẩn hóa học liệu chuyển giao để triển khai diện rộng.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Bộ Giáo dục và Đào tạo / Thiết kế, chế tạo mô hình robot song song ứng dụng trí tuệ nhân tạo phục vụ đào tạo nghề Cơ điện tử - CB2025-11 đã hỗ trợ kinh phí thực hiện nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Crawley, E. F., Malmqvist, J., Östlund, S., Brodeur, D. R., & Edström, K. Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach (2nd ed.), Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-319-05561-9, 2014.

[2] Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G. Robotics: Modelling, Planning and Control, Springer, https://doi.org/10.1007/978-1-84628-642-1, 2010.

[3] Clavel, R. DELTA, a fast robot with parallel geometry. Proceedings of the 18th International Symposium on Industrial Robots, Lausanne, 91-100, 1988.

[4] Merlet, J.-P. Parallel Robots (2nd ed.), Springer, https://doi.org/10.1007/1-4020-4133-0, 2006.

[5] Tsai, L.-W. Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. John Wiley & Sons, 1999.

[6] Gosselin, C., & Angeles, J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 6(3), 281-290, https://doi.org/10.1109/70.56660, 1990.

[7] LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. Deep learning. Nature, 521(7553), 436-444, https://doi.org/10.1038/nature14539, 2015.

[8] Ren, S., He, K., Girshick, R., & Sun, J. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. Advances in Neural Information Processing Systems, 28, 91-99, 2015.

[9] Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C.-Y., & Berg, A. C. SSD: Single Shot MultiBox Detector. Computer Vision - ECCV 2016, LNCS 9905, 21-37, https://doi.org/10.1007/978-3-319-46448-0_2, 2016.

[10] Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. You only look once: Unified, real-time object detection. Proceedings of the IEEE CVPR 2016, 779-788, https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91, 2016.

[11] Ultralytics. Ultralytics YOLO11 Documentation. Ultralytics, https://docs.ultralytics.com, 2024.