

MÔ HÌNH HÓA TRƯỜNG SAI SỐ VÀ BÙ SAI LỆCH VỊ TRÍ CỦA ROBOT IRB120 BẰNG XỬ LÝ ẢNH VÀ HỌC MÁY

MODELING THE ERROR FIELD AND POSITION ERROR COMPENSATION OF THE ABB IRB120 ROBOT USING IMAGE PROCESSING AND MACHINE LEARNING

Dương Thị Thảo, Phạm Thành Long, Đỗ Thế Vinh*
 Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên
**Email: thevinh8880@tnut.edu.vn*

TÓM TẮT

Sai số định vị tuyệt đối của robot công nghiệp chuỗi hở phát sinh do sai lệch hình học, sai số lắp ráp và sai số truyền động tích lũy qua nhiều bậc khớp. Sai số này phân bố không đồng đều trong không gian làm việc và hình thành trường sai lệch phi tuyến tại điểm công tác cuối (Tool Center Point - TCP). Bài báo đề xuất phương pháp mô hình hóa trường sai số vị trí TCP của robot ABB IRB120, giữ nguyên cấu trúc hệ điều khiển của robot và cách sử dụng thiết bị, chỉ thay đổi quỹ đạo khâu cuối nhằm bù lại sai số nói trên. Sử dụng hai kênh đo vị trí điểm cuối độc lập với nhau là kênh đo theo encoder của robot và kênh đo không tiếp xúc bằng camera công nghiệp có độ phân giải cao để xác định sai số điểm cuối. Kết quả thực nghiệm cho thấy sai số trung bình giảm từ 0,45 mm xuống 0,21 mm sau khi bù, tương đương mức cải thiện hơn 50%. Phương pháp có chi phí thấp, dễ áp dụng thực tế và không yêu cầu thay đổi phần cứng robot.

Từ khóa: Robot công nghiệp; TCP; Trường sai số; Xử lý ảnh; Học máy; Bù sai lệch.

ABSTRACT

The absolute positioning error of open-chain industrial robots arises from geometric misalignment, assembly errors, and cumulative drive errors across multiple joint stages. This error is unevenly distributed in the workspace and forms a nonlinear error field at the end tool center point (TCP). This paper proposes a method for modeling the TCP position error field of the ABB IRB120 robot, maintaining the robot's control system structure and equipment usage, only changing the end link trajectory to compensate for the aforementioned error. Two independent end point position measurement channels are used: the robot's encoder measurement channel and a non-contact measurement channel using a high-resolution industrial camera to determine the end point error. Experimental results show that the average error decreased from 0.45 mm to 0.21 mm after compensation, equivalent to an improvement of over 50%. The method is low-cost, easy to apply in practice, and does not require changes to the robot's hardware.

Keywords: Industrial robots; TCP; Error field; Image processing; Machine learning; Error compensation. 

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Độ chính xác định vị tuyệt đối của robot công nghiệp là yếu tố quan trọng trong gia công chính xác, lắp ráp tự động và đo kiểm. Tuy nhiên, do cấu trúc chuỗi hở, sai số của từng khâu tích lũy dọc theo chuỗi động học và biểu hiện thành sai lệch tại TCP. Sai số này phụ thuộc vị trí không gian và thường có tính phi tuyến.

Các phương pháp hiệu chuẩn truyền thống dựa trên nhận dạng tham số động học theo mô hình D-H hoặc đo bằng laser tracker [1] cho độ chính xác cao nhưng yêu cầu thiết bị chuyên dụng và quy trình phức tạp. Trong những năm gần đây, xu hướng chuyển sang các phương pháp dựa trên thị giác và nội suy dữ liệu đã được quan tâm. Các nghiên cứu hiệu chuẩn TCP bằng camera và marker ArUco nhằm giảm chi phí thiết bị đo [2] hay xây dựng mô hình ánh xạ sai số có xét thành phần phi động học trong ứng dụng gia công robot [3] và phát triển khung hiệu chuẩn tự động dựa trên camera cho hệ thống robot linh hoạt và sử dụng hệ đo 3D để cải thiện độ chính xác trong lắp ráp robot [4], [5] cho thấy tiềm năng của thị giác và học máy trong hiệu chuẩn robot. Đáng chú ý là nghiên cứu tích hợp mạng nơ-ron vào hệ thống hiệu chuẩn nhằm hiệu chỉnh sai số đo thị giác thời gian thực [6], phần lớn tập trung vào nhận dạng tham số hoặc hiệu chỉnh tại các điểm rời rạc.

Trong bài báo này, chúng tôi giới thiệu một phương pháp để nghiên cứu xây dựng trường sai số TCP dạng liên tục trong toàn bộ không gian công tác bằng học máy và hiệu chỉnh độ chính xác của robot. Các sai số của TCP sau khi đo được sẽ chuyển đổi ngược để tìm điểm thay thế nhằm giảm sai số động học. Kỹ thuật này có thể áp dụng dễ dàng với chi phí thấp ở quy mô công nghiệp, rất phù hợp với các

hoạt động hiệu chỉnh theo chu kỳ bảo dưỡng robot.

2. NGUYÊN LÝ THIẾT LẬP HỆ THỐNG ĐO VÀ CƠ SỞ XÂY DỰNG BÙ SAI LỆCH VỊ TRÍ

Ban đầu có p_1 là vị trí danh nghĩa của TCP trong hệ quy chiếu robot mong muốn đạt được theo công nghệ, p_2 là vị trí thực nhận được nếu kể đến các sai số của cơ cấu chấp hành. Cả hai vị trí này được xác định trong cùng một hệ tọa độ O_0 gắn với giá của robot đang khảo sát, phương trình (1) dưới đây thể hiện quan hệ giữa chúng:

$$T.p_1 = p_2 \quad (1)$$

Trong đó, T là ma trận chuyển đổi tổng quát:

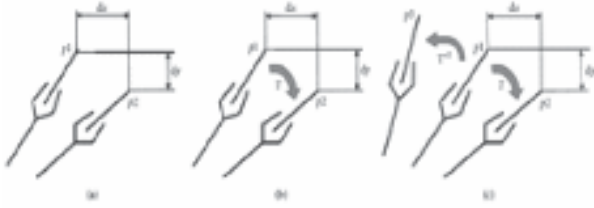
$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \pm dx \\ 0 & 1 & 0 & \pm dy \\ 0 & 0 & 1 & \pm dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dữ liệu được xác định qua 2 camera 2D bằng phương pháp Stereo Vision (thị giác lập thể) để xác định tọa độ 3D của TCP, dữ liệu mà camera thu nhận được chuyển về biểu diễn trong hệ quy chiếu O_0 bằng một ma trận chuyển trục C giữa hệ quy chiếu Camera và hệ quy chiếu O_0 do camera tự xác định. Quan hệ chuyển đổi (1) bị kéo dài thêm một bước nữa:

$$T.C.p_1 = C.p_2 \quad (3)$$

Quan hệ (4) được xác lập khi ma trận T theo (3) xác định được chính xác:

$$p_1 = T^{-1} . p_2 \quad (4)$$



Hình 1. a. Quan hệ giữa vị trí mong muốn p_1 và sai lệch điều khiển p_2 ; b. Chuyển đổi T từ p_1 thành p_2 ; c. Chuyển đổi ngược T^{-1} điểm p_1 thành p_3 để khởi tạo quỹ đạo thay thế.

Trong thực tế, sai lệch giữa hai điểm thường nhỏ, do đó có thể xác định một điểm điều khiển thay thế p_3 chuyển đổi từ p_1 tương tự như chuyển đổi từ p_1 thành p_2 xác định bởi (5) thông qua phép biến đổi nghịch:

$$p_3 = T^{-1}p_1 \quad (5)$$

Khi robot di chuyển đến điểm p_3 , TCP thực tế sẽ đạt vị trí gần với điểm mong muốn p_1 , thì quy luật chuyển đổi (3) ở trên cho ra điểm đích rất gần với p_1 :

$$p_1 \approx Tp_3 \quad (6)$$

Do đó, thay vì điều khiển robot theo quỹ đạo ban đầu gồm tập hợp các điểm p_1 , hệ thống sẽ sử dụng tập hợp các điểm thay thế p_3 để hình thành quỹ đạo thay thế. Tập hợp các điểm keypoint của quỹ đạo mong muốn được biểu diễn bởi tập hợp các điểm $p_{1i} (1 \div n)$ tập hợp các điểm thực mà camera đo được là p_{2i} . Sai lệch vị trí giữa hai điểm được xác định theo:

$$\begin{cases} dx = p_{2x} - p_{1x} \\ dy = p_{2y} - p_{1y} \\ dz = p_{2z} - p_{1z} \end{cases} \quad (7)$$

Từ đó có thể xác định ma trận biến đổi tại mỗi điểm khảo sát:

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_{2x} - p_{1x} \\ 0 & 1 & 0 & p_{2y} - p_{1y} \\ 0 & 0 & 1 & p_{2z} - p_{1z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Các điểm của quỹ đạo thay thế được xác định theo:

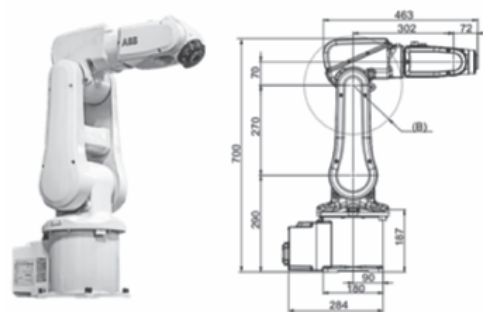
$$p_{3i} = T_i^{-1}p_{1i}, i = 1 \div n \quad (9)$$

Tập hợp các điểm p_{3i} tạo thành quỹ đạo điều khiển mới trong không gian công tác, giúp giảm sai lệch định vị của TCP. Trong nghiên cứu này, các sai lệch đo được tại nhiều điểm trong không gian làm việc được sử dụng làm dữ liệu huấn luyện để xây dựng mô hình học máy mô tả trường sai số của TCP. Mô hình này cho phép ước lượng sai lệch vị trí tại các điểm chưa đo và hỗ trợ xác định quỹ đạo thay thế với độ chính xác cao hơn.

3. MÔ HÌNH HỌC MÁY VÀ BÙ SAI LỆCH VỊ TRÍ

3.1. Thu thập, xử lý dữ liệu và mô hình học máy

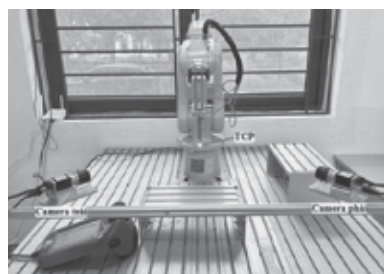
Hệ thống gồm 1 robot ABB IRB120 6 bậc tự do có các thông số động học như hình 2 và 02 camera công nghiệp Basler acA2500-14gc có tham số như hình 3.



Hình 2. Mô hình thực tế và thông số kích thước cơ bản của robot IRB120.

Bảng 1. Tham số của camera Basler acA2500-14gc

THÔNG SỐ	GIÁ TRỊ
Model	acA2500-14gc
Hãng sản xuất	Basler
Độ phân giải	5MP (Megapixel)
Giao tiếp	GigE (Gigabit Ethernet)
Tốc độ khung hình	14 fps
Cảm biến ảnh	CMOS
Định dạng	Monochrome/Color (tùy biến)
Kích thước cảm biến	2/3"



Hình 3. Bố trí thí nghiệm.

Quá trình thực nghiệm được tiến hành trên 400 lưới điểm trong không gian làm việc của robot. Hai dữ liệu về vị trí tại các điểm này được ghi lại độc lập: vị trí danh nghĩa được hiển thị trên bộ điều khiển robot, và vị trí thực tế được ghi lại bởi camera. Bộ giá trị sai số của 400 điểm là tập dữ liệu sơ cấp để huấn luyện hàm học máy.

So sánh các giá trị để nhận được sai số tại các điểm p_i . Trong bảng 2 thể hiện một phần các giá trị vị trí danh nghĩa, thực và sai lệch. Trong đó, a14, a24, a34 thể hiện bộ giá trị về vị trí px, py, pz tương ứng của tay kẹp.

Bảng 2. Bảng giá trị sai số rút gọn của 200 điểm được sử dụng làm đầu vào để xây dựng hàm học máy

STT	Vị trí danh nghĩa			Vị trí thực tế			Sai lệch		
	X	Y	Z	a14	a24	a34	delta a14	delta a24	delta a34
1	210,5	-13	113,5	210,7423	-12,8347	113,8105	0,2423	0,1653	0,3105
2	177,5	19,5	113,5	177,8804	19,3228	113,7773	0,3804	-0,1772	0,2773
3	144,5	53	113,5	144,8440	52,8091	113,7448	0,3440	-0,1909	0,2448
4	111,5	85,5	113,5	111,7097	85,4052	113,7117	0,2097	-0,0948	0,2117
5	45,5	85,5	113,5	45,8250	85,7750	113,6466	0,3250	0,2750	0,1466
6	12,5	85,5	113,5	12,8391	85,8069	113,6138	0,3391	0,3069	0,1138
7	-20,5	85,5	113,5	-20,2041	85,6430	113,5808	0,2959	0,1430	0,0808
8	79,5	-11	99	79,7156	-11,4164	99,1797	0,2156	-0,4164	0,1797
9	143,5	21	99	143,9194	21,1023	99,2443	0,4194	0,1023	0,2443
10	207,5	53,5	99	207,6939	53,8290	99,3087	0,1939	0,3290	0,3087
11	175,5	85,5	99	176,0500	85,6733	99,2761	0,5500	0,1733	0,2761

12	15,5	117,5	99	16,0212	117,1512	99,1160	0,5212	-0,3488	0,1160
13	111,5	149,5	99	111,7282	149,6755	99,2117	0,2282	0,1755	0,2117
14	-16,5	149,5	99	-16,2068	149,0220	99,0838	0,2932	-0,4780	0,0838
15	208,5	-9,5	87	209,0503	-9,2105	87,3093	0,5503	0,2895	0,3093
16	177	22	87	177,1990	22,3086	87,2772	0,1990	0,3086	0,2772
17	145,5	54	87	145,6500	54,2421	87,2456	0,1500	0,2421	0,2456
18	82,5	85,5	87	82,8374	85,6646	87,1823	0,3374	0,1646	0,1823
19	19,5	117	87	19,5917	116,5070	87,1195	0,0917	-0,4930	0,1195
20	-12	148,5	87	-11,8641	148,6998	87,0876	0,1359	0,1998	0,0876
21	50,5	-5,5	74,5	50,8803	-5,9653	74,6505	0,3803	-0,4653	0,1505
22	112,5	25	74,5	112,7520	25,2349	74,7128	0,2520	0,2349	0,2128
23	81,5	88	74,5	81,6940	87,6670	74,6817	0,1940	-0,3330	0,1817
24	205,5	150	74,5	205,1096	150,3053	74,8044	-0,3904	0,3053	0,3044
25	204,5	24,5	60	205,0107	24,8003	60,3050	0,5107	0,3003	0,3050
26	52	55	60	51,7979	55,3189	60,1518	-0,2021	0,3189	0,1518
27	174	116	60	173,7687	116,1123	60,2734	-0,2313	0,1123	0,2734
28	143,5	146	60	143,2295	146,3684	60,2432	-0,2705	0,3684	0,2432
29	84,5	-29,5	14,5	84,6226	-29,1387	14,6845	0,1226	0,3613	0,1845
30	200,5	-0,5	14,5	200,7185	-1,0591	14,8007	0,2185	-0,5591	0,3007
31	55,5	28,5	14,5	55,7347	28,2700	14,6557	0,2347	-0,2300	0,1557
32	113,5	57,5	14,5	113,6951	57,1627	14,7137	0,1951	-0,3373	0,2137
33	26,5	85,5	14,5	27,0055	86,0581	14,6274	0,5055	0,5581	0,1274
34	171,5	114,5	14,5	171,2369	114,8251	14,7714	-0,2631	0,3251	0,2714
35	229,5	143,5	14,5	228,9685	143,8345	14,8289	-0,5315	0,3345	0,3289
36	-31,5	172,5	14,5	-31,1870	172,2664	14,5698	0,3130	-0,2336	0,0698
37	57	-28,5	0	57,3004	-28,1508	0,1566	0,3004	0,3492	0,1566
38	199,5	0	0	199,7710	0,6476	0,2998	0,2710	0,6476	0,2998
39	85,5	28,5	0	85,9794	29,1663	0,1860	0,4794	0,6663	0,1860
40	-28,5	57	0	-28,2691	57,3229	0,0712	0,2309	0,3229	0,0712

Bước tiền xử lý dữ liệu tiếp theo áp dụng các phương pháp sau: Đầu tiên là phương pháp Ourlier (ngoại lệ) ám chỉ những giá trị dữ liệu có độ khác biệt quá lớn hơn mức cho phép với các giá trị còn lại của tập điểm (với dữ liệu từ thực nghiệm, nhiều nhiễu dùng $\varepsilon = 2.0$ nhằm loại bỏ các điểm ngoại lai do nhiễu ảnh, rung động); Tiếp theo nhằm phản ánh tính không đồng nhất của sai lệch vị trí trong không gian, thuật toán K-means với số cụm K

= 5 được sử dụng để phân chia không gian làm việc thành các vùng có đặc trưng sai số tương đồng; phương pháp thứ ba là bổ sung các tương tác chéo như xy , yz , zx , x^2 , y^2 , z^2 được bổ sung nhằm tăng khả năng biểu diễn phi tuyến của mô hình học máy.

Sau khi có bộ dữ liệu sơ cấp, lựa chọn phần mềm Anaconda chuyên chạy mã Python tiến hành chạy hàm học máy, lựa chọn phương

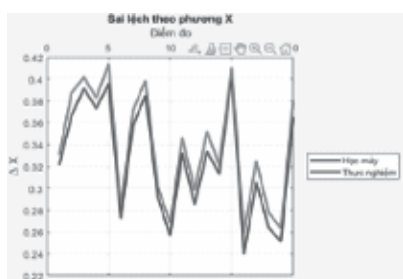
pháp Random Forest với đánh giá R^2 có độ chính xác hàm học máy rất cao tương ứng với từng tọa độ x, y, z là: 0.9644, 0.9652, 0.9999. Trong quá trình chạy hàm học máy, tiến hành xuất file nhị phân .joblib và file chỉ dẫn .json chứa các tham số đầu vào, tên cột, giá trị mean/std dùng chuẩn hóa... sẽ giúp tái hiện đầy đủ quy trình huấn luyện và dễ dàng áp dụng vào những bài toán sau này.

3.2. Khảo sát kiểm chứng, so sánh sai lệch khâu cuối bằng phương pháp đo thực nghiệm và hàm học máy

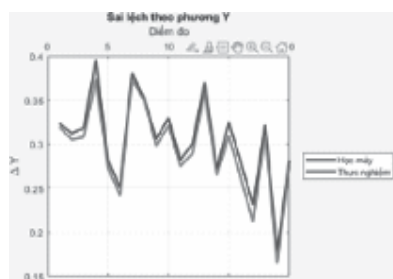
Tiến hành khảo sát kiểm chứng hàm học máy đã xây dựng được có đảm bảo yêu cầu hay không, so sánh sai số đo đo trực tiếp và sai số được dự đoán từ hàm học máy tại 20 điểm ngẫu nhiên trong không gian khảo sát. Giá trị của các sai lệch được thể hiện như bảng 3:

Bảng 3. Bảng giá trị sai số đo trực tiếp và sai số được dự đoán từ hàm học máy

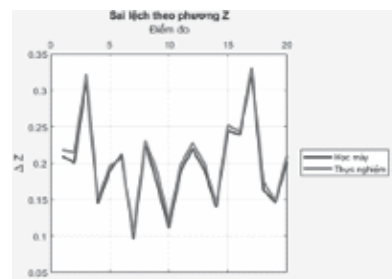
STT	Vị trí đánh nghĩa			Sai lệch khâu cuối đo từ thực nghiệm			Sai lệch khâu cuối đo từ hàm học máy		
	X	Y	Z	delta a14	delta a24	delta a34	delta a14	delta a24	delta a34
1	123	-9,5	0	0,3305	0,3194	0,2178	0,3213	0,3233	0,2094
2	121	1	15	0,3872	0,3051	0,2149	0,3663	0,312	0,2004
3	117	16	35	0,4019	0,3082	0,3219	0,3916	0,3181	0,314
4	107	58	52	0,3828	0,3735	0,1507	0,3731	0,3955	0,145
5	98	86,5	60	0,4136	0,2732	0,1958	0,3958	0,2818	0,1894
6	93,5	98	75	0,283	0,2418	0,2065	0,2724	0,2504	0,2121
7	88	110,5	85	0,3715	0,3731	0,1041	0,3573	0,3807	0,096
8	82,5	120,5	96	0,3987	0,3498	0,2305	0,3853	0,3519	0,2274
9	74	133,5	108	0,3015	0,298	0,1896	0,2922	0,3057	0,1715
10	57,5	143,5	112	0,2682	0,3209	0,1195	0,2566	0,3296	0,1104
11	42,5	136,5	120	0,3462	0,2751	0,1976	0,3323	0,282	0,1894
12	32,5	122,5	111	0,2982	0,2894	0,2275	0,2851	0,3004	0,2192
13	24	106	105	0,3521	0,3602	0,1994	0,3339	0,3701	0,1907
14	17	87	92	0,3209	0,265	0,1437	0,3128	0,2714	0,1394
15	12	72	84	0,4107	0,3099	0,2514	0,4046	0,3249	0,2442
16	7,5	58	70	0,2591	0,2612	0,2435	0,2396	0,2786	0,239
17	0	30	55	0,3255	0,2119	0,3301	0,3057	0,2312	0,3232
18	-4	14	32	0,2779	0,3118	0,1743	0,2641	0,3219	0,1629
19	-7	1	10	0,2633	0,1651	0,1481	0,2512	0,1777	0,1463
20	-10	-9,5	0	0,3795	0,2752	0,2103	0,3648	0,2816	0,201



a. Phương X



b. Phương Y



c. Phương Z

Hình 4. Biểu đồ thể hiện mối tương quan giữa sai lệch khâu cuối đo được bằng thực nghiệm và xác định theo hàm dạng theo các phương X, Y và Z.

Từ biểu đồ có thể nhận thấy, sai lệch khâu cuối được tính toán từ hàm học máy (đường màu xanh) có giá trị sai lệch so với đo thực nghiệm (đường màu đỏ) nằm trong khoảng từ 0.002mm đến 0.028mm. Như vậy, kết quả học máy hoàn toàn có thể được dùng để thay thế kết quả đo trực tiếp. Việc này giúp tiết kiệm đáng kể thời gian và chi phí cho quá trình thiết kế, hiệu chỉnh và xác định sai số robot.

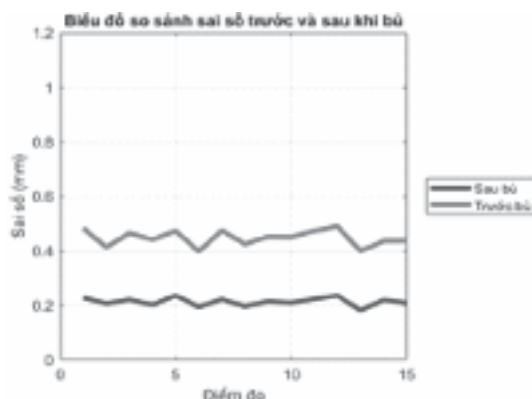
3.3. Bù sai lệch vị trí

Với giải pháp bù như đã đề xuất ở mục 2, nhóm nghiên cứu tiến hành khảo sát tại 15 điểm ngẫu nhiên nằm trong không gian làm việc. Kết quả được ghi lại ở bảng 4.

Bảng 4. Bảng giá trị sai số trước và sau khi bù sai lệch vị trí bằng hàm học máy

STT	Tọa độ mong muốn			Sai lệch ban đầu				Sai lệch sau khi bù			
	X	Y	Z	delta a14	delta a24	delta a34	Bán kính sai số	delta a14	delta a24	delta a34	Bán kính sai số
1	122	-3	0	0,2083	0,3697	0,2287	0,4821	0,1083	0,1597	0,1187	0,2266
2	120	7	10	0,3226	0,2129	0,1425	0,412	0,1826	0,0629	0,0725	0,2063
3	116	23	30	0,2494	0,3305	0,2096	0,4641	0,1394	0,1205	0,1196	0,2197
4	110	45	40	0,3414	0,2175	0,1737	0,4404	0,1734	0,0575	0,0847	0,2013
5	100	79	55	0,2732	0,3263	0,2054	0,4725	0,1432	0,1463	0,1154	0,235
6	95	93	70	0,2533	0,2462	0,1813	0,3971	0,1333	0,1062	0,0913	0,1934
7	86	115	90	0,2512	0,3418	0,2115	0,474	0,1112	0,1618	0,1015	0,221
8	68,5	140	105	0,2678	0,272	0,1838	0,4237	0,1378	0,102	0,0938	0,1954
9	52	143	110	0,3015	0,298	0,1557	0,4516	0,1615	0,118	0,0757	0,2139
10	38	130	125	0,2517	0,3094	0,2078	0,4497	0,1417	0,1094	0,1078	0,209
11	29	115,5	115	0,3462	0,2751	0,1663	0,4724	0,1862	0,0851	0,0863	0,2221
12	20	97	100	0,283	0,3103	0,2515	0,4895	0,153	0,1303	0,1215	0,2348
13	14,5	81	95	0,2944	0,2208	0,1515	0,398	0,1544	0,0608	0,0715	0,1807
14	9	63,5	80	0,3098	0,2168	0,2148	0,4349	0,1798	0,0668	0,1048	0,2186
15	5	50	65	0,3183	0,2088	0,2114	0,4354	0,1783	0,0588	0,0914	0,2088

Kết quả trước bù và sau bù được so sánh như trong biểu đồ hình 5 dưới đây. Trong đó, đường màu đỏ là sai số trước khi bù, đường màu xanh là sai số sau khi bù.



Hình 5. Biểu đồ so sánh sai số trước và sau khi bù.

Kết quả sau bù cho thấy rõ ràng rằng với việc hiệu chỉnh biến khớp, độ chính xác vị trí khâu cuối đã được cải thiện rõ rệt (trung bình sai số giảm từ 0.446 mm còn 0.212 mm). Điều này chứng tỏ tính đúng đắn và hiệu quả mà phương pháp bù sai số nghiên cứu mang lại.

4. KẾT LUẬN

Trong thực tế có nhiều cách để hiệu chỉnh robot nếu có thể đo được sai số của nó khi chuyển động, phương pháp đề xuất ở đây là đo sai số tại các vị trí mẫu làm tập dữ liệu sơ cấp để huấn luyện hàm học máy. Hàm học máy đã giúp giảm thời gian đáng kể so với các phương pháp thực nghiệm trong khi độ chính xác cao thông qua các thực nghiệm. Phương pháp bù sai lệch vị trí mà nghiên cứu đề cập cũng cho kết quả hợp lý khi có sự cải thiện rõ rệt về độ chính xác. Nghiên cứu này có thể được áp dụng thực tế trong nhà máy vì có ưu điểm là không can thiệp vào phần cứng robot, cũng như tiết kiệm thời gian khi thay đổi quỹ đạo mới. Phương pháp này có thể áp dụng cho nhiều loại robot khác nhau và với số lượng bậc tự do hay không gian làm việc bất kỳ.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Kỹ thuật Công nghiệp, Đại học Thái Nguyên đã tạo điều kiện và hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này.❖

Ngày nhận bài: **02/3/2026**

Ngày phản biện: **13/3/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. A. Balanji, A. N. Reddy, S. M. Joshi, “*Vision-based TCP calibration of industrial robots*”. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Elsevier, 2021.
- [2]. J. Ma, H. Wang, Z. Zhang, “*Comprehensive error modeling and compensation for industrial robots*”. Precision Engineering, Elsevier, 2023.
- [3]. M. Kaiser, P. R. Giordano, “*Camera-based robot calibration for industrial manipulation*”. Springer, 2024.
- [4]. L. Parpală, A. Radu, C. Popescu, “*3D laser measurement techniques for robotic assembly accuracy improvement*”. Applied Sciences, 2024.
- [5]. X. Jiang, Y. Liu, H. Zhang, “*Neural-network-based calibration method for industrial robot positioning errors*”. IEEE Access, 2022.
- [6]. Thuy Le Thi Thu, Khanh Duong Quoc, Long Pham Thanh, “*Calibration of industrial robot kinematics based on results of interpolating error by shape function*”. Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 15, No. 6, pp.1451-1461, 2020.