



TẠP CHÍ XÂY DỰNG - eISSN 3030-4482

Thiết kế, chế tạo hệ cánh tay robot dạng người tương tác điều khiển bằng thị giác máy tính

Design and fabrication of a humanoid robotic arm system interacted and controlled by computer vision

➤ **Vũ Lê Huy^{1,2,*}, Trần Hoàng Long¹, Vũ Đức Thành¹, Tô Thế Đạt¹, Nguyễn Đình Hưng¹, Trần Trọng Tú¹, Nguyễn Đình Dũng^{1,2}**

¹Khoa Cơ khí - Cơ điện tử, Trường Kỹ thuật Phenikaa, Đại học Phenikaa

²Viện Nghiên cứu và Công nghệ PHENIKAA (PRATI), Công ty Cổ phần Tập đoàn Phương Hoàng Xanh A&A

*Email: huy.vule@phenikaa-uni.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Khoa học công nghệ

Ngày nhận bài: 25/3/2026

Ngày sửa bài: 03/4/2026

Ngày chấp nhận đăng: 15/4/2026

Ngày xuất bản Online: 24/6/2026

Tác giả liên hệ:

Email: huy.vule@phenikaa-uni.edu.vn

TÓM TẮT

Hoạt động điều khiển từ xa của robot hình người đang trở thành trọng tâm cho nhiều ứng dụng, tuy nhiên các giải pháp điều khiển hiện tại thường phụ thuộc vào các thiết bị đắt tiền. Bài báo trình bày thiết kế và chế tạo một hệ thống robot hai cánh tay mô phỏng cơ thể người, với cấu hình 6 bậc tự do cho mỗi cánh tay, trong đó ứng dụng giải pháp điều khiển bám theo chuyển động của người điều khiển thông qua camera 2D tiêu chuẩn. Bài toán động học và phần mềm mô phỏng 3D được thiết lập để đánh giá khả năng nhận diện và điều khiển chuyển động của tay máy theo chuyển động của người thực. Để khắc phục sai số chiều sâu và hiện tượng che khuất các điểm ảnh tại một số tư thế, hệ thống tính toán góc khớp thông qua tích vô hướng hình chiếu 2D và xử lý dữ liệu khung xương MediaPipe bằng bộ lọc thông thấp kỹ thuật số. Khối phần cứng tích hợp động cơ bước, RC Servo và cảm biến từ trường giao tiếp thông qua I2C và SPI trong một kiến trúc điều khiển phân tán. Hệ thống đã được chế tạo và thử nghiệm thành công, kết quả cho thấy cánh tay robot vật lý bám sát ổn định cử chỉ người điều khiển, giảm thiểu được rung lắc cơ khí và độ trễ.

Từ khóa: Cánh tay robot dạng người; thiết kế và chế tạo robot; mô phỏng; thị giác máy tính.

ABSTRACT

Remote control of humanoid robots has been being a focus for many applications; however, current control solutions often rely on expensive equipment. This paper presents the design and fabrication of a two arm robotic system simulating the human' arms, with a 6-degree-of-freedom configuration for each arm, employing a control solution that tracks the operator's movements via a standard 2D camera. Kinematics and 3D simulation software were established to evaluate and control the robot arm's ability by recognizing human movement. To overcome depth errors and pixel obscuration in certain poses, the system calculates joint angles using the dot product of 2D projections and processes MediaPipe skeletal data with a digital low-pass filter. The integrated hardware includes stepper motors, RC servos and magnetic field sensors communicating via I2C and SPI in a distributed control architecture. The system has been successfully built and tested and the results show that the physical robotic arm tracks the operator's gestures stably, minimizing mechanical vibration and latency.

Keywords: Humanoid robotic arm; design and fabrication; simulation; computer vision;

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Điều khiển hệ thống cánh tay robot từ xa là một lĩnh vực nghiên cứu trọng tâm và thu hút nhiều sự quan tâm trong lĩnh vực nghiên cứu và phát triển robot hình người [1-4]. Robot hình người được xác định là có nhiều ứng dụng thực tiễn, trong đó hiện nay đang được hướng tới các ứng dụng hỗ trợ y tế, phục hồi chức năng và làm việc trong môi trường độc hại [5]. Để một hệ thống cơ khí có thể tương tác tự nhiên với con người, vấn đề cốt lõi nằm ở việc thiết kế kết cấu phần cứng linh hoạt kết hợp với nền tảng thu thập dữ liệu đầu vào ổn định. Hiện nay, các giải pháp điều khiển chủ yếu phụ thuộc vào thiết bị đeo hoặc camera chiều sâu 3D, dẫn đến sự gia tăng về chi phí và tính cồng kềnh khi triển khai thực tế.

Nghiên cứu này trình bày quá trình thiết kế và chế tạo một hệ thống robot hai cánh tay mô phỏng hệ cánh tay của con người [6, 7], thiết kế được thu gọn tối ưu với 6 bậc tự do (DOF) cho mỗi cánh tay. Đồng thời, đề xuất giải pháp điều khiển bám sát chuyển động thông qua camera 2D tiêu chuẩn, việc sử dụng camera 2D kết hợp thuật toán học sâu trích xuất các điểm mốc sinh học mang lại lợi thế về chi phí [8, 9] và tính dễ tiếp cận. Tuy nhiên, thách thức đặt ra là dữ liệu hình ảnh thường xuyên gặp hiện tượng chập chờn điểm ảnh và sai số lớn ở trục chiều sâu. Dữ liệu rời rạc này khi truyền tải xuống cơ cấu chấp hành cơ khí gây ra độ rung lắc cao và trượt bước động cơ. Cho nên, trong nghiên cứu này tập trung vào điều khiển 3 góc khớp chịu tải trọng lớn nhất là góc khớp xoay dọc, xoay ngang vai và góc khớp gập khuỷu tay [9]. Mặc dù góc khớp điều khiển đã được tinh giản nhưng bài toán động học thuận vẫn được thiết lập tổng quát trên toàn bộ 6 DOF mỗi cánh để đảm bảo tính minh bạch trong việc đánh giá sai số tọa độ điểm cuối.

Để khắc phục các nhược điểm của camera 2D đối với hệ thống, thuật toán tính toán góc quay được cải tiến bằng việc kết hợp định lý tích vô hướng vector không gian 3D và tích vô hướng của các vector hình chiếu 2D nhằm phân rã chuyển động chính xác, kết hợp với bộ lọc thông thấp kỹ thuật số. Sự kết hợp giữa nền tảng cơ khí vững chắc, thuật toán thị giác xử lý nhiễu số tạo ra hệ thống thao tác vận hành ổn định.

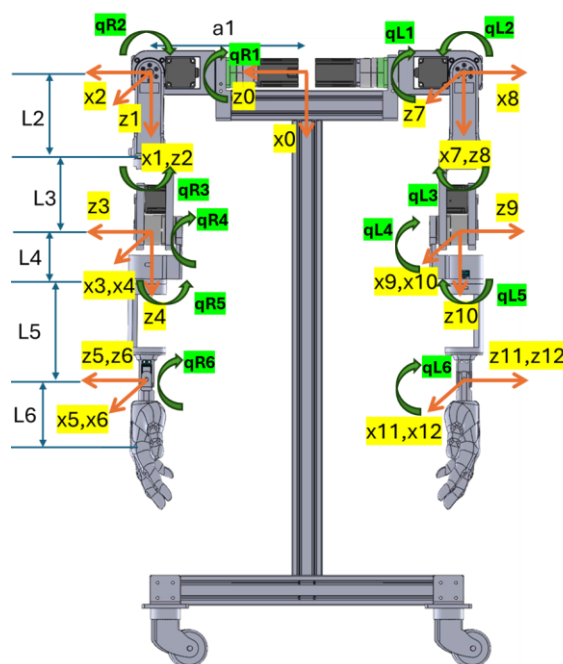
2. CẤU TRÚC CƠ KHÍ VÀ MÔ HÌNH ĐỘNG HỌC CẢNH TAY ROBOT 6 BẬC TỰ DO

2.1. Cấu trúc hệ hai cánh tay robot hình người

Hệ thống hai cánh tay robot dạng người trong nghiên cứu này được thiết kế và chế

tạo dựa trên nguyên lý mô phỏng cấu trúc giải phẫu học của chi trên cơ thể người. Thiết kế cơ khí cho phép phân bổ khối lượng và khối truyền động một cách có chiến lược. Theo đó, 4 khớp gốc (vùng vai và khuỷu tay) chịu tải trọng nặng và yêu cầu mô-men xoắn lớn được ưu tiên sử dụng động cơ bước kết hợp hộp giảm tốc. Ngược lại, hai khớp ở vùng cổ tay có chuyển động linh hoạt được thiết kế sử dụng động cơ RC Servo nhằm giảm tối đa khối lượng treo ở điểm cuối của cánh tay. Hệ thống cánh tay robot với mỗi cánh là 6 bậc tự do như trong Hình 1 có cấu trúc truyền động và chức năng tương ứng với 6 khớp. Khớp 1 thực hiện xoay vai quanh trục thẳng đứng, sử dụng động cơ bước kết hợp hộp giảm tốc Harmonic CSF14-50 (tỷ số truyền 1:50). Khớp 2 thực hiện nâng/hạ cánh tay, sử dụng động cơ bước kết hợp hộp giảm tốc HPG-14-A33 (1:33) và bộ truyền đai. Khớp 3 thực hiện xoay cánh tay quanh trục dọc, sử dụng động cơ bước kết hợp hộp giảm tốc HPG-11B-09 (1:9). Khớp 4 thực hiện gập/duỗi khuỷu tay, sử dụng động cơ bước kết hợp hộp giảm tốc HPG-11B-09 (1:9) và bộ truyền đai. Khớp 5 và 6 thực hiện tương ứng xoay và gập cổ tay, sử dụng các động cơ RC Servo. Hệ cánh tay được gá đặt trên một khung đỡ di động bằng các bánh xe (Hình 1).

Nhằm phục vụ cho quá trình theo dõi và đánh giá cho hệ thống cơ khí trước giới hạn nhận diện của camera 2D, bài toán động học thuận được thiết lập. Phương pháp Denavit-Hartenberg (D-H) được sử dụng để gán các hệ trục tọa độ cục bộ cho cả hai tay [5,10]. Sơ đồ gán trục tọa độ D-H thống nhất cho toàn bộ hệ thống hai cánh tay trái và phải như trong Hình 1 với kích thước các khâu ở hai cánh tay là như nhau nhưng có tính đối xứng. Dựa trên cấu trúc hình học, bộ thông số D-H cho các khâu ứng với các hệ trục được tổng hợp trong Bảng 1. Trong đó, các biến khớp được ký hiệu kèm với tiền tố q, khoảng cách cơ sở trên bản vai được ký hiệu là a_1 và chiều dài các khâu liên tiếp là L_2, L_3, L_4, L_5 .



Hình 1. Sơ đồ gán hệ trục tọa độ cục bộ theo nguyên tắc D-H cho hệ thống hai cánh tay trái - phải

Bảng 1. Bảng tham số Denavit-Hartenberg cho toàn bộ 6 khâu của 2 cánh tay

Cánh tay phải					Cánh tay trái				
Khâu	a	α	d	θ	Khâu	a	α	d	θ
1	0	$-\pi/2$	a_1	$-q_{R1}$	7	0	$-\pi/2$	$-a_1$	$-q_{L1}$

2	0	$-\pi/2$	0	$q_{R2}-\pi/2$	8	0	$\pi/2$	0	$q_{L2}+\pi/2$
3	0	$-\pi/2$	L_2+L_3	q_{R3}	9	0	$-\pi/2$	L_2+L_3	$-q_{L3}$
4	0	$\pi/2$	0	$-q_{R4}$	10	0	$\pi/2$	0	q_{L4}
5	0	$-\pi/2$	L_4+L_5	q_{R5}	11	0	$-\pi/2$	L_4+L_5	$-q_{L5}$
6	0	0	0	$-q_{R6}$	12	0	0	0	$-q_{L6}$

2.2. Bài toán động học thuận

Bài toán động học thuận được thiết lập đầy đủ cho mô hình 6 DOF trên cả hai cánh tay. Phương pháp Denavit-Hartenberg (D-H) được sử dụng để định vị các hệ trục cục bộ. Ma trận chuyển đổi thuần nhất cục bộ A_i từ khâu thứ $i-1$ sang khâu thứ i được xác định bằng phương trình tiêu chuẩn sau:

$$A_i = \begin{bmatrix} C_\theta & -S_\theta C_\alpha & S_\theta S_\alpha & aC_\theta \\ S_\theta & C_\theta C_\alpha & -C_\theta S_\alpha & aS_\theta \\ 0 & S_\alpha & C_\alpha & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

Trong đó, C và S lần lượt là ký hiệu của hàm cos và sin của các góc được cho bởi chỉ số dưới. Ma trận chuyển đổi tổng quát từ hệ tọa độ gốc đến điểm cuối thu được bằng cách nhân liên tiếp 6 ma trận thành phần:

$$A_6^0 = A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4 \times A_5 \times A_6 \tag{2}$$

Phương pháp này được áp dụng cho tất cả các khâu của cánh tay robot đã thiết kế với các tham số trong Bảng 1, được sử dụng để tính toán động học và điều khiển tay máy robot. Khi đó, các ma trận biến đổi cho cánh tay và bàn tay từ hệ tọa độ $X_p Y_p Z_p$ sang hệ tọa độ $X_0 Y_0 Z_0$ lần lượt được xác định như sau:

$$A_p^0 = \begin{bmatrix} C_{\theta_p} & -S_{\theta_p} & 0 & 0 \\ S_{\theta_p} C_{\alpha_p} & C_{\theta_p} C_{\alpha_p} & -S_{\alpha_p} & 0 \\ S_{\theta_p} S_{\alpha_p} & C_{\theta_p} S_{\alpha_p} & -S_{\alpha_p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

Ma trận biến đổi cho các khớp của cánh tay được viết dưới dạng tổng quát như sau:

$$A_k = \begin{bmatrix} a_{11}^k & a_{12}^k & a_{13}^k & a_{14}^k \\ a_{21}^k & a_{22}^k & a_{23}^k & a_{24}^k \\ a_{31}^k & a_{32}^k & a_{33}^k & a_{34}^k \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

Với k là chỉ số của khâu trên mỗi khớp của cánh tay. Các giá trị a_{ij}^k theo công thức (4) của các ma trận ứng với các khâu được cho trong Bảng 2.

Bảng 2. Bảng ma trận chuyển đổi thuần nhất gắn với các khâu của cánh tay phải và tay trái

Tay	Khâu	A_K	Phần tử							
Tay phải	Khâu 1	A_1	a_{11}	C_{qT1}	a_{12}	0	a_{13}	S_{qT1}	a_{14}	0
			a_{21}	0	a_{22}	0	a_{23}	C_{qT1}	a_{24}	0
			a_{31}	0	a_{32}	-1	a_{33}	0	a_{34}	a_1
	Khâu	A_2	a_{11}	$C_{qT1}S_{qT2}$	a_{12}	0	a_{13}	$C_{qT1}C_{qT2}$	a_{14}	0

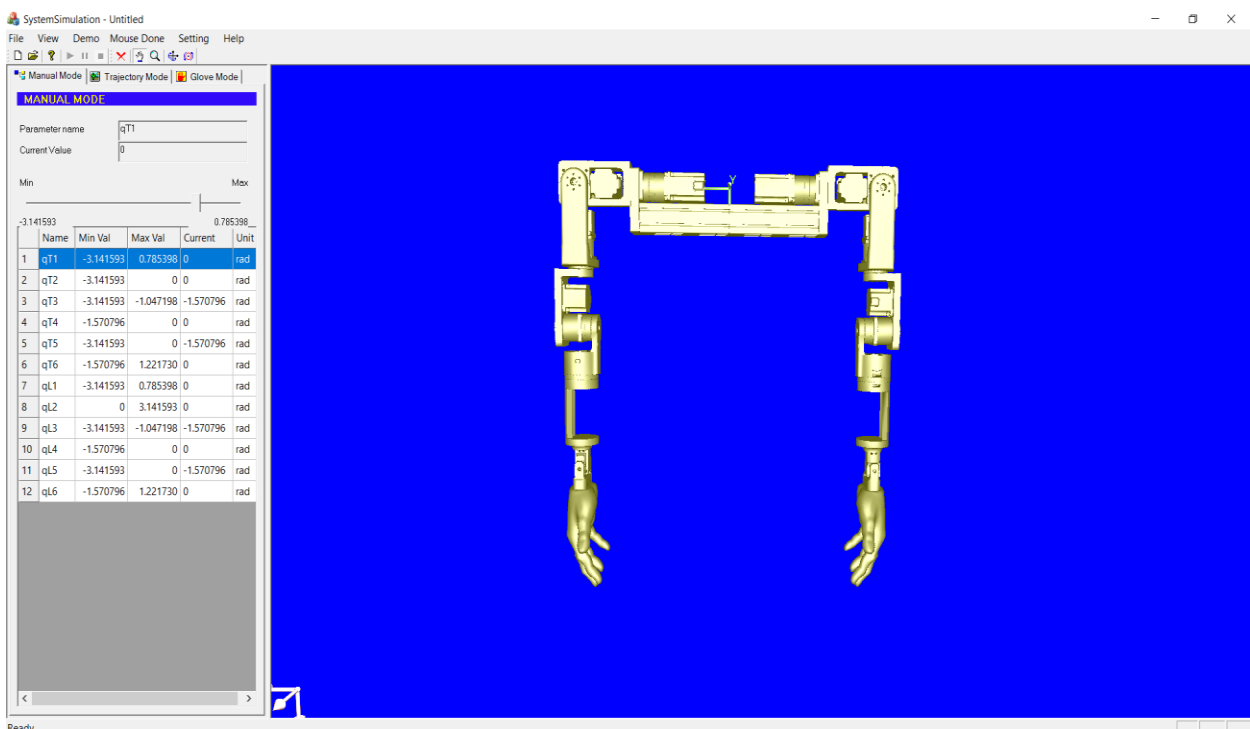
2		a_{21}	0	a_{22}	-1	a_{23}	0	a_{24}	0	
		a_{31}	C_{qT2}	a_{32}	0	a_{33}	0	a_{34}	a_1	
Khâu 3	A_3	a_{11}	$C_{qT1}S_{qT2}C_{qT3} - S_{qT1}S_{qT3}$			a_{13}	0			
		a_{12}	-1			a_{14}	$C_{qT1}C_{qT2}(L_2 + L_3)$			
		a_{21}	0			a_{23}	$S_{qT1}S_{qT2}S_{qT3} - C_{qT1}C_{qT3}$			
		a_{22}	$S_{qT1}C_{qT2}$			a_{24}	$-S_{qT1}C_{qT2}(L_2 + L_3)$			
		a_{31}	$C_{qT2}C_{qT3}$			a_{33}	0			
		a_{32}	S_{qT2}			a_{34}	$a_1 - S_{qT2}(L_2 + L_3)$			
Khâu 4	A_4	a_{11}	$C_{qR1}C_{qR2}S_{qR4} - C_{qR4}(S_{qR1}S_{qR3} - C_{qR1}C_{qR3}S_{qR2})$			a_{13}	$S_{qR4}(S_{qR1}S_{qR3} - C_{qR1}C_{qR3}S_{qR2}) + C_{qR1}C_{qR2}C_{qR4}$			
		a_{12}	0			a_{14}	$C_{qR1}C_{qR2}(L_2 + L_3)$			
		a_{21}	$-C_{qR4}(C_{qR1}S_{qR3} + C_{qR3}S_{qR1}S_{qR2}) - C_{qR2}S_{qR1}S_{qR4}$			a_{23}	$S_{qR4}(C_{qR1}S_{qR3} + C_{qR3}S_{qR1}S_{qR2}) - C_{qR2}C_{qR4}S_{qR1}$			
		a_{22}	$S_{qR1}S_{qR2}S_{qR3} - C_{qR1}C_{qR3}$			a_{24}	$-C_{qR2}S_{qR1}(L_2 + L_3)$			
		a_{31}	$C_{qR2}C_{qR3}C_{qR4} - S_{qR2}S_{qR4}$			a_{33}	0			
		a_{32}	0			a_{34}	$a_1 - S_{qR2}(L_2 + L_3)$			
Khâu 5	A_5	a_{11}	$S_{qR6}(S_{qR4}(S_{qR1}S_{qR3} - C_{qR1}C_{qR3}S_{qR2}) + C_{qR1}C_{qR2}C_{qR4}) - C_{qR6}(C_{qR5}(C_{qR4}(S_{qR1}S_{qR3} - C_{qR1}C_{qR3}S_{qR2}) - C_{qR1}C_{qR2}S_{qR4}) + S_{qR5}(C_{qR3}S_{qR1} + C_{qR1}S_{qR2}S_{qR3}))$							
		a_{12}	$-C_{qR6}(S_{qR4}(S_{qR1}S_{qR3} - C_{qR1}C_{qR3}S_{qR2}) + C_{qR1}C_{qR2}C_{qR4}) - S_{qR6}(C_{qR5}(C_{qR4}(S_{qR1}S_{qR3} - C_{qR1}C_{qR3}S_{qR2}) - C_{qR1}C_{qR2}S_{qR4}) + S_{qR5}(C_{qR3}S_{qR1} + C_{qR1}S_{qR2}S_{qR3}))$							
		a_{13}	$S_{qR6}(S_{qR4}(C_{qR1}S_{qR3} + C_{qR3}S_{qR1}S_{qR2}) - C_{qR2}C_{qR4}S_{qR1}) - C_{qR6}(C_{qR5}(C_{qR4}(C_{qR1}S_{qR3} + C_{qR3}S_{qR1}S_{qR2}) + C_{qR2}S_{qR1}S_{qR4}) + S_{qR5}(C_{qR1}C_{qR3} - S_{qR1}S_{qR2}S_{qR3}))$							
		a_{14}	$-C_{qR6}(S_{qR4}(C_{qR1}S_{qR3} + C_{qR3}S_{qR1}S_{qR2}) - C_{qR2}C_{qR4}S_{qR1}) - S_{qR6}(C_{qR5}(C_{qR4}(C_{qR1}S_{qR3} + C_{qR3}S_{qR1}S_{qR2}) + C_{qR2}S_{qR1}S_{qR4}) + S_{qR5}(C_{qR1}C_{qR3} - S_{qR1}S_{qR2}S_{qR3}))$							
		a_{21}	$-C_{qR6}(C_{qR5}(S_{qR2}S_{qR4} - C_{qR2}C_{qR3}C_{qR4}) + C_{qR2}S_{qR3}S_{qR5}) - S_{qR6}(C_{qR4}S_{qR2} + C_{qR2}C_{qR3}S_{qR4})$							
		a_{22}	$C_{qR6}(C_{qR4}S_{qR2} + C_{qR2}C_{qR3}S_{qR4}) - S_{qR6}(C_{qR5}(S_{qR2}S_{qR4} - C_{qR2}C_{qR3}C_{qR4}) + C_{qR2}S_{qR3}S_{qR5})$							
		a_{23}	$C_{qR1}C_{qR2}S_{qR4} - C_{qR4}(S_{qR1}S_{qR3} - C_{qR1}C_{qR3}S_{qR2})$							
		a_{24}	0							
		a_{31}	$-C_{qR4}(C_{qR1}S_{qR3} + C_{qR3}S_{qR1}S_{qR2}) - C_{qR2}S_{qR1}S_{qR4}$							
		a_{32}	$S_{qR1}S_{qR2}S_{qR3} - C_{qR1}C_{qR3}$							

Khâu 6	A ₆	a ₃₃	$Cq_{R2}Cq_{R3}Cq_{R4} - Sq_{R2}Sq_{R4}$							
		a ₃₄	0							
		a ₁₁	$-Cq_{R5}(Cq_{R4}(Sq_{R1}Sq_{R3} - Cq_{R1}Cq_{R3}Sq_{R2}) - Cq_{R1}Cq_{R2}Sq_{R4}) - Sq_{R5}(Cq_{R3}Sq_{R1} + Cq_{R1}Sq_{R2}Sq_{R3})$							
		a ₁₂	$-Sq_{R4}(Sq_{R1}Sq_{R3} - Cq_{R1}Cq_{R3}Sq_{R2}) - Cq_{R1}Cq_{R2}Cq_{R4}$							
		a ₁₃	$-Cq_{R5}(Cq_{R4}(Cq_{R1}Sq_{R3} + Cq_{R3}Sq_{R1}Sq_{R2}) + Cq_{R2}Sq_{R1}Sq_{R4}) - Sq_{R5}(Cq_{R1}Cq_{R3} - Sq_{R1}Sq_{R2}Sq_{R3})$							
		a ₁₄	$Cq_{R2}Cq_{R4}Sq_{R1} - Sq_{R4}(Cq_{R1}Sq_{R3} + Cq_{R3}Sq_{R1}Sq_{R2})$							
		a ₂₁	$-Cq_{R5}(Sq_{R2}Sq_{R4} - Cq_{R2}Cq_{R3}Cq_{R4}) - Cq_{R2}Sq_{R3}Sq_{R5}$							
		a ₂₂	$Cq_{R4}Sq_{R2} + Cq_{R2}Cq_{R3}Sq_{R4}$							
		a ₂₃	$Sq_{R6}(Sq_{R4}(Sq_{R1}Sq_{R3} - Cq_{R1}Cq_{R3}Sq_{R2}) + Cq_{R1}Cq_{R2}Cq_{R4}) - Cq_{R6}(Cq_{R5}(Cq_{R4}(Sq_{R1}Sq_{R3} - Cq_{R1}Cq_{R3}Sq_{R2}) - Cq_{R1}Cq_{R2}Sq_{R4}) + Sq_{R5}(Cq_{R3}Sq_{R1} + Cq_{R1}Sq_{R2}Sq_{R3}))$							
		a ₂₄	$-Cq_{R6}(Sq_{R4}(Sq_{R1}Sq_{R3} - Cq_{R1}Cq_{R3}Sq_{R2}) + Cq_{R1}Cq_{R2}Cq_{R4}) - Sq_{R6}(Cq_{R5}(Cq_{R4}(Sq_{R1}Sq_{R3} - Cq_{R1}Cq_{R3}Sq_{R2}) - Cq_{R1}Cq_{R2}Sq_{R4}) + Sq_{R5}(Cq_{R3}Sq_{R1} + Cq_{R1}Sq_{R2}Sq_{R3}))$							
		a ₃₁	$Sq_{R6}(Sq_{R4}(Cq_{R1}Sq_{R3} + Cq_{R3}Sq_{R1}Sq_{R2}) - Cq_{R2}Cq_{R4}Sq_{R1}) - Cq_{R6}(Cq_{R5}(Cq_{R4}(Cq_{R1}Sq_{R3} + Cq_{R3}Sq_{R1}Sq_{R2}) + Cq_{R2}Sq_{R1}Sq_{R4}) + Sq_{R5}(Cq_{R1}Cq_{R3} - Sq_{R1}Sq_{R2}Sq_{R3}))$							
		a ₃₂	$-Cq_{R6}(Sq_{R4}(Cq_{R1}Sq_{R3} + Cq_{R3}Sq_{R1}Sq_{R2}) - Cq_{R2}Cq_{R4}Sq_{R1}) - Sq_{R6}(Cq_{R5}(Cq_{R4}(Cq_{R1}Sq_{R3} + Cq_{R3}Sq_{R1}Sq_{R2}) + Cq_{R2}Sq_{R1}Sq_{R4}) + Sq_{R5}(Cq_{R1}Cq_{R3} - Sq_{R1}Sq_{R2}Sq_{R3}))$							
		a ₃₃	$-Cq_{R6}(Cq_{R5}(Sq_{R2}Sq_{R4} - Cq_{R2}Cq_{R3}Cq_{R4}) + Cq_{R2}Sq_{R3}Sq_{R5}) - Sq_{R6}(Cq_{R4}Sq_{R2} + Cq_{R2}Cq_{R3}Sq_{R4})$							
		a ₃₄	$Cq_{R6}(Cq_{R4}Sq_{R2} + Cq_{R2}Cq_{R3}Sq_{R4}) - Sq_{R6}(Cq_{R5}(Sq_{R2}Sq_{R4} - Cq_{R2}Cq_{R3}Cq_{R4}) + Cq_{R2}Sq_{R3}Sq_{R5})$							
Tay trái	Khâu 7	A ₇	a ₁₁	C _{qL1}	a ₁₂	0	a ₁₃	S _{qL1}	a ₁₄	0
			a ₂₁	-S _{qL1}	a ₂₂	0	a ₂₃	C _{qL1}	a ₂₄	0
			a ₃₁	0	a ₃₂	-1	a ₃₃	0	a ₃₄	-a ₁
	Khâu 8	A ₈	a ₁₁	-C _{qL1} S _{qL2}	a ₁₂	S _{qL1}	a ₁₃	C _{qL1} C _{qL2}	a ₁₄	0
			a ₂₁	S _{qL1} S _{qL2}	a ₂₂	C _{qL1}	a ₂₃	-S _{qL1} C _{qL2}	a ₂₄	0
			a ₃₁	-C _{qL2}	a ₃₂	0	a ₃₃	-S _{qL2}	a ₃₄	-a ₁
	Khâu 9	A ₉	a ₁₁	$-Cq_{L1}S_{qL2}C_{qL3} - S_{qL1}S_{qL3}$			a ₁₃	$C_{qL1}S_{qL2}S_{qL3} - S_{qL1}C_{qL3}$		
			a ₁₂	C _{qL1} C _{qL2}			a ₁₄	C _{qL1} C _{qL2} (L ₂ + L ₃)		
			a ₂₁	S _{qL1} S _{qL2} C _{qL3} - C _{qL1} S _{qL3}			a ₂₃	$-S_{qL1}S_{qL2}S_{qL3} - C_{qL1}C_{qL3}$		
			a ₂₂	-S _{qL1} C _{qL2}			a ₂₄	-S _{qL1} C _{qL2} (L ₂ + L ₃)		
			a ₃₁	-C _{qL2} C _{qL3}			a ₃₃	C _{qL2} S _{qL3}		

		a_{32}	$-S_{qL2}$	a_{34}	$-S_{qL2}(L_2 + L_3) - a_1$
Khâu 10	A_{10}	a_{11}	$-C_{qL4}(C_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} + S_{qL1}S_{qL3}) + C_{qL1}C_{qL2}S_{qL4}$	a_{13}	$S_{qL4}(C_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} + S_{qL1}S_{qL3}) + C_{qL1}C_{qL2}C_{qL4}$
		a_{12}	$-C_{qL1}S_{qL2}S_{qL3} + S_{qL1}C_{qL3}$	a_{14}	$C_{qL1}C_{qL2}(L_2 + L_3)$
		a_{21}	$C_{qL4}(S_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} - C_{qL1}S_{qL3}) - S_{qL1}C_{qL2}S_{qL4}$	a_{23}	$-S_{qL4}(S_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} - C_{qL1}S_{qL3}) - S_{qL1}C_{qL2}C_{qL4}$
		a_{22}	$S_{qL1}S_{qL2}S_{qL3} + C_{qL1}C_{qL3}$	a_{24}	$-S_{qL1}C_{qL2}(L_2 + L_3)$
		a_{31}	$-C_{qL2}C_{qL3}C_{qL4} - S_{qL2}S_{qL4}$	a_{33}	$C_{qL2}C_{qL3}S_{qL4} - S_{qL2}C_{qL4}$
		a_{32}	$-C_{qL2}S_{qL3}$	a_{34}	$-S_{qL2}(L_2 + L_3) - a_1$
Khâu 11	A_{11}	a_{11}	$C_{qL5}(-C_{qL4}(C_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} + S_{qL1}S_{qL3}) + C_{qL1}C_{qL2}S_{qL4}) - S_{qL5}(-C_{qL1}S_{qL2}S_{qL3} + S_{qL1}C_{qL3})$		
		a_{12}	$S_{qL4}(C_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} + S_{qL1}S_{qL3}) + C_{qL1}C_{qL2}C_{qL4}$		
		a_{13}	$-S_{qL5}(-C_{qL4}(C_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} + S_{qL1}S_{qL3}) + C_{qL1}C_{qL2}S_{qL4}) - C_{qL5}(-C_{qL1}S_{qL2}S_{qL3} + S_{qL1}C_{qL3})$		
		a_{14}	$(S_{qL4}(C_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} + S_{qL1}S_{qL3}) + C_{qL1}C_{qL2}C_{qL4})(L_4 + L_5) + C_{qL1}C_{qL2}(L_2 + L_3)$		
		a_{21}	$C_{qL5}(C_{qL4}(S_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} - C_{qL1}S_{qL3}) - S_{qL1}C_{qL2}S_{qL4}) - S_{qL5}(S_{qL1}S_{qL2}S_{qL3} + C_{qL1}C_{qL3})$		
		a_{22}	$-S_{qL4}(S_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} - C_{qL1}S_{qL3}) - S_{qL1}C_{qL2}C_{qL4}$		
		a_{23}	$-S_{qL5}(C_{qL4}(S_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} - C_{qL1}S_{qL3}) - S_{qL1}C_{qL2}S_{qL4}) - C_{qL5}(S_{qL1}S_{qL2}S_{qL3} + C_{qL1}C_{qL3})$		
		a_{24}	$(-S_{qL4}(S_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} - C_{qL1}S_{qL3}) - S_{qL1}C_{qL2}C_{qL4})(L_4 + L_5) - S_{qL1}C_{qL2}(L_2 + L_3)$		
		a_{31}	$C_{qL5}(-C_{qL2}C_{qL3}C_{qL4} - S_{qL2}S_{qL4}) - S_{qL5}(-C_{qL2}S_{qL3})$		
		a_{32}	$C_{qL2}C_{qL3}S_{qL4} - S_{qL2}C_{qL4}$		
		a_{33}	$-S_{qL5}(-C_{qL2}C_{qL3}C_{qL4} - S_{qL2}S_{qL4}) - C_{qL5}(-C_{qL2}S_{qL3})$		
		a_{34}	$(C_{qL2}C_{qL3}S_{qL4} - S_{qL2}C_{qL4})(L_4 + L_5) - S_{qL2}(L_2 + L_3) - a_1$		
Khâu 12	A_{12}	a_{11}	$C_{qL6}(C_{qL5}(-C_{qL4}(C_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} + S_{qL1}S_{qL3}) + C_{qL1}C_{qL2}S_{qL4}) - S_{qL5}(-C_{qL1}S_{qL2}S_{qL3} + S_{qL1}C_{qL3})) - S_{qL6}(S_{qL4}(C_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} + S_{qL1}S_{qL3}) + C_{qL1}C_{qL2}C_{qL4})$		
		a_{12}	$S_{qL6}(C_{qL5}(-C_{qL4}(C_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} + S_{qL1}S_{qL3}) + C_{qL1}C_{qL2}S_{qL4}) - S_{qL5}(-C_{qL1}S_{qL2}S_{qL3} + S_{qL1}C_{qL3})) + C_{qL6}(S_{qL4}(C_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} + S_{qL1}S_{qL3}) + C_{qL1}C_{qL2}C_{qL4})$		
		a_{13}	$-S_{qL5}(-C_{qL4}(C_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} + S_{qL1}S_{qL3}) + C_{qL1}C_{qL2}S_{qL4}) - C_{qL5}(-C_{qL1}S_{qL2}S_{qL3} + S_{qL1}C_{qL3})$		
		a_{14}	$(S_{qL4}(C_{qL1}S_{qL2}C_{qL3} + S_{qL1}S_{qL3}) + C_{qL1}C_{qL2}C_{qL4})(L_4 + L_5) + C_{qL1}C_{qL2}(L_2 + L_3)$		

			$a_{21} \quad C_{q_{L6}}(C_{q_{L5}}(C_{q_{L4}}(S_{q_{L1}}S_{q_{L2}}C_{q_{L3}} - C_{q_{L1}}S_{q_{L3}}) - S_{q_{L1}}C_{q_{L2}}S_{q_{L4}}) - S_{q_{L5}}(S_{q_{L1}}S_{q_{L2}}S_{q_{L3}} + C_{q_{L1}}C_{q_{L3}})) - S_{q_{L6}}(-S_{q_{L4}}(S_{q_{L1}}S_{q_{L2}}C_{q_{L3}} - C_{q_{L1}}S_{q_{L3}}) - S_{q_{L1}}C_{q_{L2}}C_{q_{L4}})$
			$a_{22} \quad S_{q_{L6}}(C_{q_{L5}}(C_{q_{L4}}(S_{q_{L1}}S_{q_{L2}}C_{q_{L3}} - C_{q_{L1}}S_{q_{L3}}) - S_{q_{L1}}C_{q_{L2}}S_{q_{L4}}) - S_{q_{L5}}(S_{q_{L1}}S_{q_{L2}}S_{q_{L3}} + C_{q_{L1}}C_{q_{L3}})) + C_{q_{L6}}(-S_{q_{L4}}(S_{q_{L1}}S_{q_{L2}}C_{q_{L3}} - C_{q_{L1}}S_{q_{L3}}) - S_{q_{L1}}C_{q_{L2}}C_{q_{L4}})$
			$a_{23} \quad -S_{q_{L5}}(C_{q_{L4}}(S_{q_{L1}}S_{q_{L2}}C_{q_{L3}} - C_{q_{L1}}S_{q_{L3}}) - S_{q_{L1}}C_{q_{L2}}S_{q_{L4}}) - C_{q_{L5}}(S_{q_{L1}}S_{q_{L2}}S_{q_{L3}} + C_{q_{L1}}C_{q_{L3}})$
			$a_{24} \quad (-S_{q_{L4}}(S_{q_{L1}}S_{q_{L2}}C_{q_{L3}} - C_{q_{L1}}S_{q_{L3}}) - S_{q_{L1}}C_{q_{L2}}C_{q_{L4}})(L_4 + L_5) - S_{q_{L1}}C_{q_{L2}}(L_2 + L_3)$
			$a_{31} \quad C_{q_{L6}}(C_{q_{L5}}(-C_{q_{L2}}C_{q_{L3}}C_{q_{L4}} - S_{q_{L2}}S_{q_{L4}}) - S_{q_{L5}}(-C_{q_{L2}}S_{q_{L3}})) - S_{q_{L6}}(C_{q_{L2}}C_{q_{L3}}S_{q_{L4}} - S_{q_{L2}}C_{q_{L4}})$
			$a_{32} \quad S_{q_{L6}}(C_{q_{L5}}(-C_{q_{L2}}C_{q_{L3}}C_{q_{L4}} - S_{q_{L2}}S_{q_{L4}}) - S_{q_{L5}}(-C_{q_{L2}}S_{q_{L3}})) + C_{q_{L6}}(C_{q_{L2}}C_{q_{L3}}S_{q_{L4}} - S_{q_{L2}}C_{q_{L4}})$
			$a_{33} \quad -S_{q_{L5}}(-C_{q_{L2}}C_{q_{L3}}C_{q_{L4}} - S_{q_{L2}}S_{q_{L4}}) - C_{q_{L5}}(-C_{q_{L2}}S_{q_{L3}})$
			$a_{34} \quad (C_{q_{L2}}C_{q_{L3}}S_{q_{L4}} - S_{q_{L2}}C_{q_{L4}})(L_4 + L_5) - S_{q_{L2}}(L_2 + L_3) - a_1$

Trong quá trình vận hành, tọa độ không gian điểm cuối $[x_6, y_6, z_6]$ được lấy từ cột thứ tư của ma trận A_6^0 . Các biến khớp điều khiển q_1, q_2, q_4 nhận giá trị động, trong khi các biến q_3, q_5, q_6 được gán cố định bằng 0. Đồng thời, hệ phương trình ma trận động học A_6^0 này cũng được sử dụng làm nền tảng toán học cốt lõi để xây dựng một phần mềm mô phỏng động học 3D (SystemSimulations), hỗ trợ trực quan hóa chuyển động cánh tay robot song song với hệ thống phần cứng vật lý được thể hiện trong Hình 2.

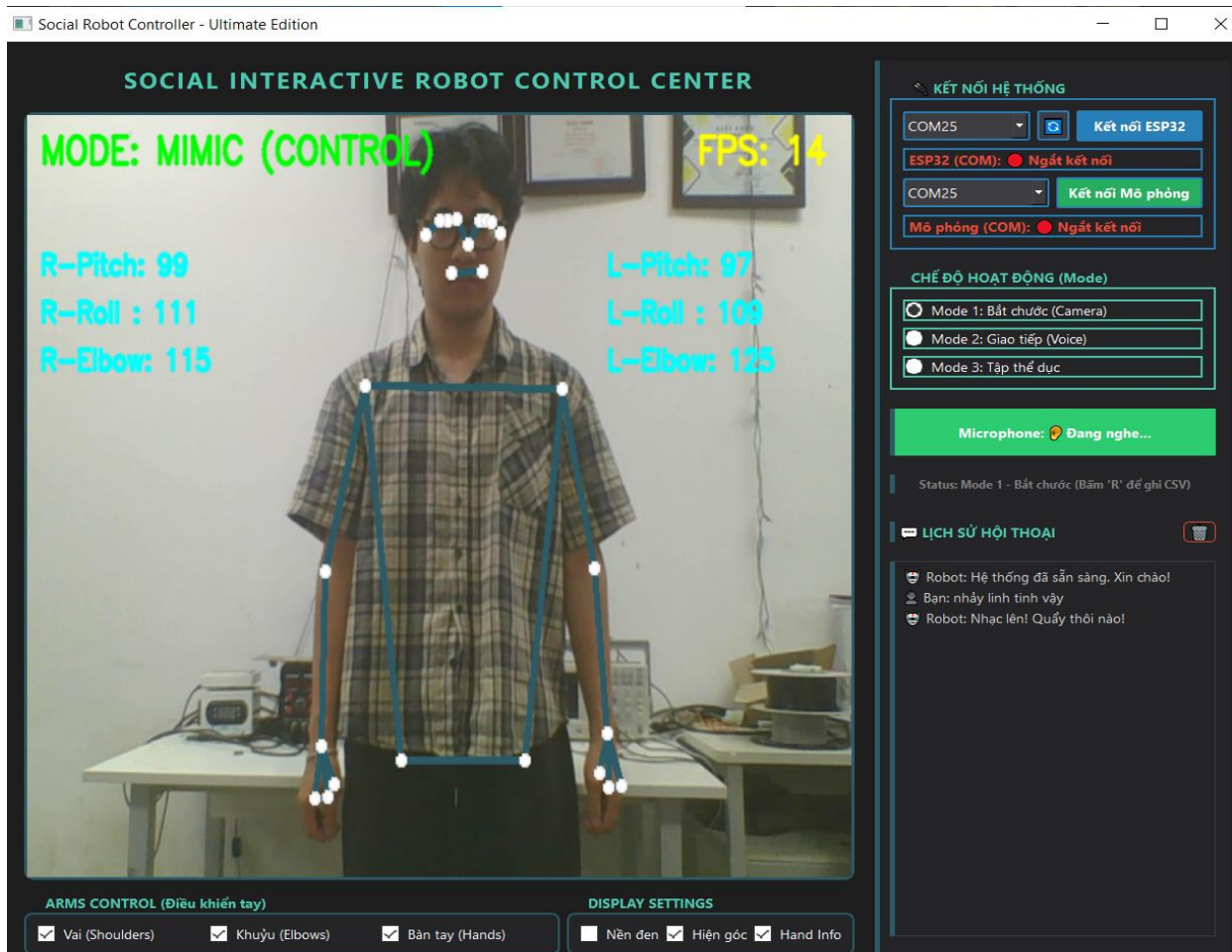


Hình 2. Phần mềm mô phỏng cánh tay robot

3. HỆ THỐNG NHẬN DIỆN VÀ KIẾN TRÚC ĐIỀU KHIỂN

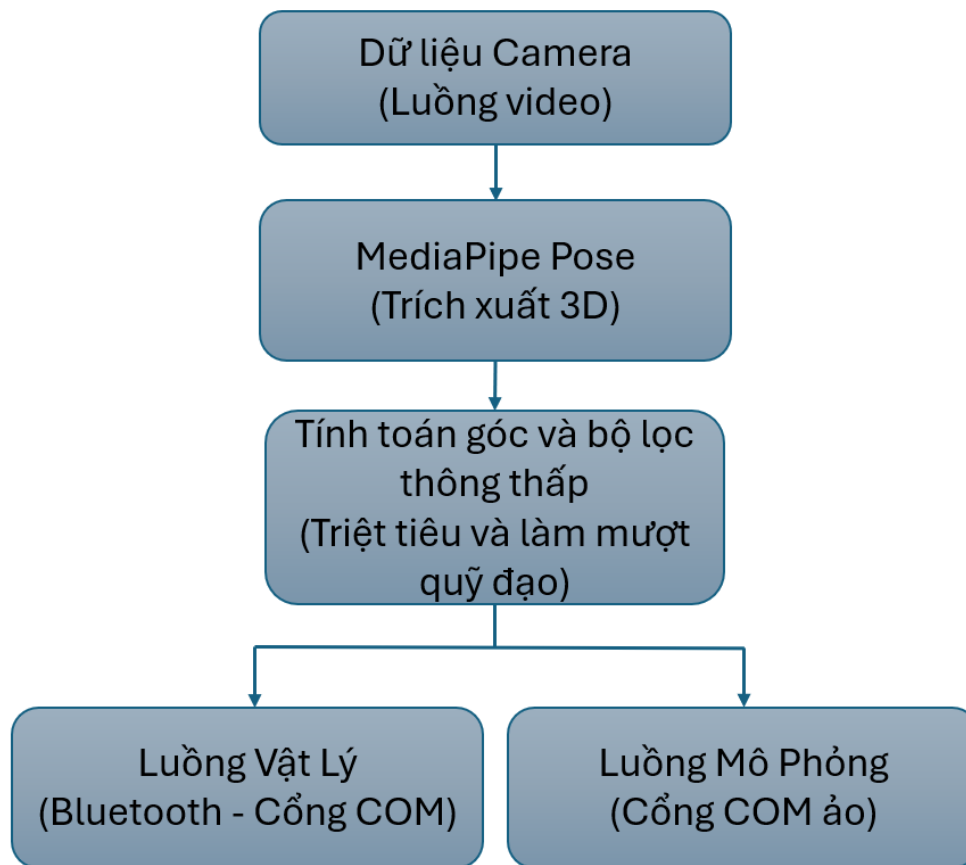
3.1. Giao diện phần mềm và các chế độ hoạt động

Để thu thập dữ liệu và quản lý toàn bộ quá trình tương tác, một phần mềm điều khiển đã được xây dựng với giao diện trực quan như trên Hình 3. Phần mềm được tích hợp ba chế độ hoạt động, trong đó Chế độ 2 (Giao tiếp qua giọng nói tích hợp lịch sử hội thoại) và Chế độ 3 (Huấn luyện tư thế) thuộc phạm vi của một dự án phát triển song song, nên trọng tâm phân tích của nghiên cứu này được đặt hoàn toàn vào Chế độ 1 (Chế độ Bất chước). Tại giao diện này, người dùng có thể quan sát luồng video trực tiếp từ camera, đồng thời giám sát thời gian thực các thông số động học cốt lõi của hai cánh tay (như góc Pitch, Roll, Elbow) được hiển thị ngay trên màn hình.



Hình 3. Giao diện phần mềm nhận diện hình ảnh chuyển động của người điều khiển

Quá trình vận hành ở Chế độ 1 (Mode 1) diễn ra liên tục theo sơ đồ luồng dữ liệu được tóm tắt trong Hình 4. Đầu tiên, dữ liệu camera từ luồng video trực tiếp được đưa vào lõi MediaPipe Pose để tiến hành trích xuất 3D tọa độ không gian của các điểm mốc sinh học quan trọng (tập trung ở vùng vai và khuỷu tay). Tiếp theo là giai đoạn tính toán góc và lọc thông thấp nhằm triệt tiêu lỗi điểm kỳ dị, sau đó xử lý tín hiệu góc thô qua bộ lọc thông thấp kỹ thuật số để triệt nhiễu, làm mượt quỹ đạo và bảo vệ cấu trúc cơ khí. Cuối cùng, dữ liệu sau khi làm mịn được rẽ thành hai nhánh song song: Luồng vật lý chịu trách nhiệm gửi lệnh điều khiển thông qua sóng Bluetooth (cổng COM) xuống phần cứng; trong khi đó, luồng mô phỏng truyền dữ liệu qua cổng COM ảo để cập nhật trạng thái đồng bộ lên bản sao kỹ thuật số 3D.



Hình 4. Sơ đồ luồng dữ liệu Chế độ 1 (Mode 1)

3.2. Tính toán góc quay thông qua hình chiếu mặt phẳng 2D

Trong hệ thống điều khiển, thư viện MediaPipe được sử dụng để trích xuất liên tục tọa độ không gian 3D [11, 12] của các điểm mốc sinh học trên cơ thể người điều khiển. Tuy nhiên, do đặc tính cơ khí và số bậc tự do của từng khớp trên cánh tay robot là khác nhau, nghiên cứu này đề xuất áp dụng hai mô hình toán học riêng biệt để xử lý dữ liệu góc quay.

Đối với khớp khuỷu tay, đây là khớp 1 bậc tự do chỉ thực hiện chuyển động gập và duỗi. Để đảm bảo tính chính xác bất kể cánh tay đang vung về hướng nào trong không gian, góc khuỷu tay được tính toán trực tiếp từ hệ tọa độ 3D nguyên bản. Hệ thống xác định 3 điểm mốc cốt lõi: Vai (P_1), khuỷu tay (P_2 đóng vai trò tâm quay) và cổ tay (P_3). Hai vector chuyển động trong không gian được thiết lập là $v_1 = P_1 - P_2$ và $v_2 = P_3 - P_2$. Vì cơ sinh học của khuỷu tay người chỉ cho phép gập một chiều (góc nằm trong giới hạn 0° đến 180°) [13], góc gập khuỷu tay θ_{elbow} được xác định một cách triệt để thông qua định lý tích vô hướng 3D:

$$\theta_{elbow} = \cos^{-1} \left(\frac{v_1 \cdot v_2}{|v_1| \cdot |v_2|} \right) \quad (5)$$

Ngược lại, khớp vai mang đặc tính của một khớp cầu đa hướng, được cơ cấu robot điều khiển bởi hai động cơ độc lập tương ứng với hai chuyển động: dang/khép (Roll) và vươn/hạ (Pitch). Nếu sử dụng phương pháp tính góc 3D trực tiếp như khớp khuỷu tay, hệ thống sẽ không thể bóc tách độc lập hai thành phần chuyển động này. Giải pháp được đưa ra là thực hiện phép chiếu các vector 3D xuống các mặt phẳng tọa độ (2D) tương ứng.

Ở mô hình này, 3 điểm mốc sinh học mới được sử dụng bao gồm: Khuỷu tay (P_1'), vai (P_2' đóng vai trò tâm quay) và hông (P_3'). Từ các điểm này, hai vector không gian

được hình thành là $u_1=P_1'-P_2'$ và $u_2=P_3'-P_2'$. Để phân rã chuyển động, ma trận tọa độ được xử lý như sau: Góc dang/khép (Roll) được tính từ các vector được chiếu vuông góc xuống mặt phẳng trần X-Y [14] (bằng cách triệt tiêu giá trị của trục chiều sâu Z); góc vươn/hạ (Pitch) được tính bởi các vector được chiếu vuông góc xuống mặt phẳng đứng dọc Y-Z (bằng cách triệt tiêu giá trị của trục ngang X). Tại mỗi mặt phẳng hình chiếu, hệ thống sử dụng các vector đã được ép phẳng (ký hiệu chung là $u_{1(2D)}$ và $u_{2(2D)}$) để tính toán từng góc quay độc lập. Góc mục tiêu của khớp vai θ_{shoulder} được xác định bằng phương trình tích vô hướng 2D:

$$\theta_{\text{shoulder}} = \cos^{-1}\left(\frac{u_{1(2D)} \cdot u_{2(2D)}}{|u_{1(2D)}| \cdot |u_{2(2D)}|}\right) \quad (6)$$

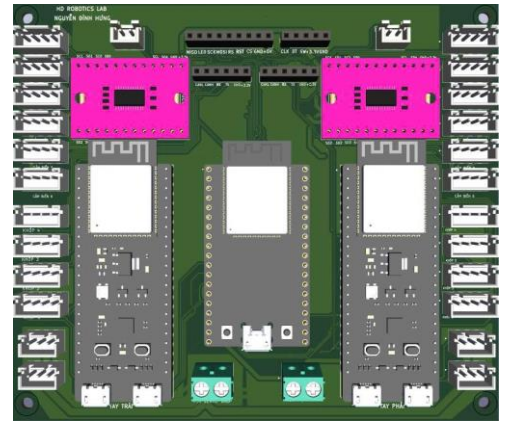
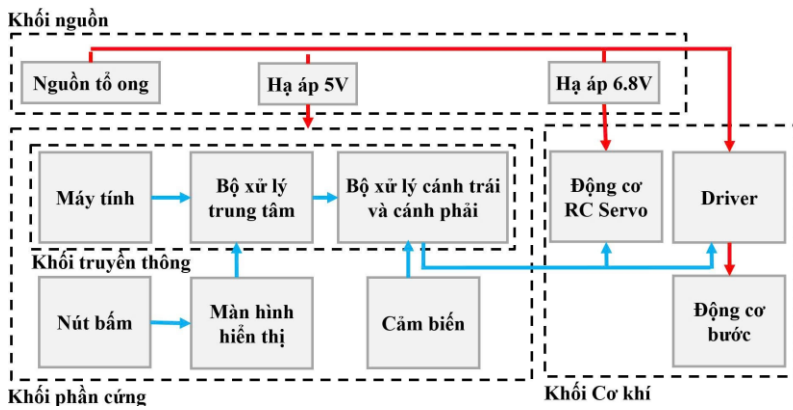
Phương pháp phân rã hình chiếu này giúp hệ thống điều khiển độc lập được từng động cơ tại khớp vai, đồng thời duy trì độ ổn định toán học khi cánh tay thực hiện các chuyển động phức tạp.

4. ĐIỀU KHIỂN CÁNH TAY ROBOT DẠNG NGƯỜI

Mô hình cánh tay robot dạng người trong nghiên cứu này có kết cấu đối xứng có sáu bậc tự do cho mỗi bên tay có khối lượng tính toán lớn và đòi hỏi duy trì tốc độ phản hồi thời gian thực, do đó một kiến trúc điều khiển phân tán được đề xuất, chia thành ba vùng chức năng chính: Khối nguồn, khối phần cứng và khối cơ khí. Sơ đồ tổng thể của kiến trúc này được khái quát tại Hình 5a. Nhằm đảm bảo hiệu suất và sự ổn định, mạng lưới năng lượng (đường mũi tên đỏ) được thiết kế phân cấp từ một nguồn tổ ong. Nguồn điện này dẫn trực tiếp đến các mạch dẫn động (Driver) thuộc khối cơ khí để đáp ứng yêu cầu sinh mô-men xoắn lớn cho các động cơ bước. Đối với các thành phần còn lại, hai mạch hạ áp độc lập được sử dụng. Mạch thứ nhất giảm điện áp xuống mức 6,8 V nhằm cấp điện năng riêng cho các động cơ RC Servo. Mạch thứ hai hạ xuống mức 5 V, đóng vai trò cung cấp nguồn nuôi an toàn cho bộ xử lý trung tâm và toàn bộ cảm biến. Về mặt xử lý tín hiệu (đường mũi tên xanh), hệ thống áp dụng cấu trúc điều khiển phân tầng chặt chẽ. Khối truyền thông bao gồm hệ thống máy tính, đóng vai trò cung cấp dữ liệu đầu vào, truyền các tọa độ không gian đến bộ xử lý trung tâm bởi vi điều khiển ESP32. Để phục vụ công tác giám sát tại chỗ, thiết bị này tiếp nhận tín hiệu từ hệ thống nút bấm thông qua màn hình hiển thị trực quan sử dụng chuẩn giao tiếp SPI [15].

Lệnh điều khiển sau khi giải mã sẽ được phân luồng xuống bộ xử lý cánh trái và cánh phải bởi vi điều khiển ESP32 S3 [16]. Tại đây, tín hiệu điện được chuyển hóa thành lệnh hành động vật lý. Để tối ưu hóa đặc tính động học, mỗi bên tay được dẫn động bởi bốn động cơ bước tại các khớp chịu tải then chốt, kết hợp cùng hai động cơ RC Servo nhằm tinh chỉnh linh hoạt khớp cổ tay. Khối xử lý hai cánh có nhiệm vụ xuất tín hiệu PWM cho cơ cấu cổ tay và cấp xung tín hiệu điều hướng cho các Driver nhằm vận hành động cơ bước ở khớp chính.

Cảm biến góc từ trường MT6701 được bố trí tại các khớp quay [17], gửi tín hiệu phản hồi liên tục về bộ xử lý cánh tay để thực hiện set góc ban đầu cho robot và phục vụ đọc dữ liệu để kiểm tra tính ổn định của hệ thống. Tuy nhiên, việc mắc nối tiếp nhiều cảm biến trên cùng một đường truyền dẫn đến hiện tượng xung đột địa chỉ I2C. Để tháo gỡ rào cản này, mô-đun chuyển kênh TCA9548A đã được bổ sung nhằm phân luồng dữ liệu I2C hiệu quả, giúp vi điều khiển đọc chính xác trạng thái từng khớp. Toàn bộ cụm linh kiện điện tử này được tối ưu hóa không gian tích hợp trên một bảng mạch in duy nhất như minh họa trong Hình 5b.



a) - Sơ đồ kiến trúc kết nối và phân bổ năng lượng hệ thống

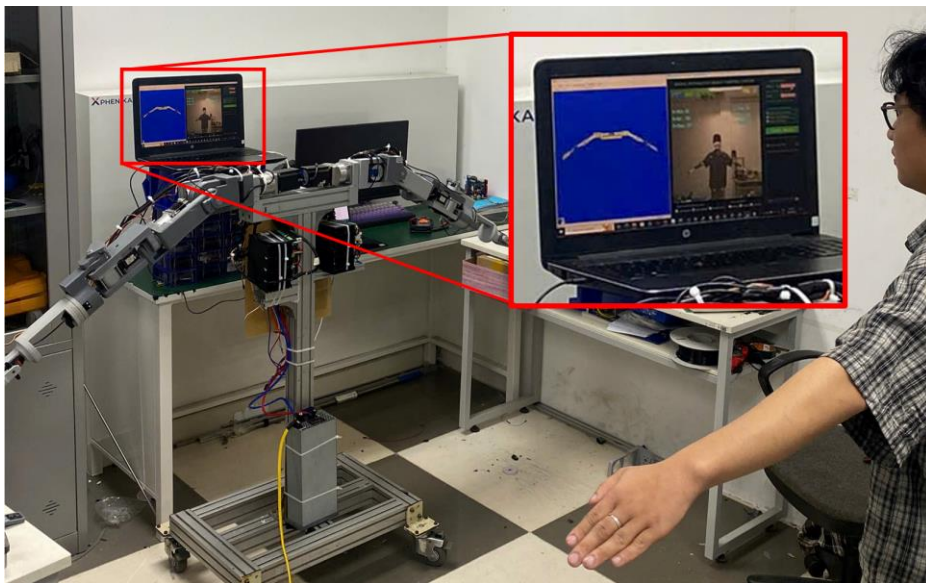
b) - Mạch in PCB thực tế

Hình 5. Kiến trúc điều khiển phân tán được đề xuất và mạch đã được thiết kế

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Từ nền tảng phần cứng và cơ khí đã được thiết kế tối ưu, toàn bộ hệ thống được lắp ráp hoàn thiện để tiến hành thử nghiệm. Hình 6 minh họa tổng thể bối cảnh không gian thực nghiệm, trong đó người điều khiển thực hiện thao tác trước phần mềm máy tính và cánh tay robot vật lý phản hồi tương ứng.

Ở chế độ Bất chước bám sát thời gian thực, thách thức lớn nhất của hệ thống đến từ hiện tượng chập chờn điểm ảnh và sự thiếu chính xác của thuật toán ước lượng chiều sâu (trục Z) từ hình ảnh 2D của phần mềm MediaPipe. Để hạn chế tối đa rủi ro từ nhược điểm bẩm sinh này, hệ thống đã áp dụng chiến lược giới hạn không gian tính toán. Cụ thể, đối với cấu hình cánh tay trái 6 bậc tự do, thuật toán động học chỉ tập trung trích xuất 3 góc quay biến thiên chịu tải lớn nhất (bao gồm: Khớp gập/duỗi vai, dang/khép vai và gập/duỗi khuỷu tay). Ba góc khớp còn lại (bao gồm: Khớp xoay dọc trục vai, xoay cẳng tay và gập/duỗi cổ tay) được thuật toán duy trì tĩnh ở góc cố định 90°.



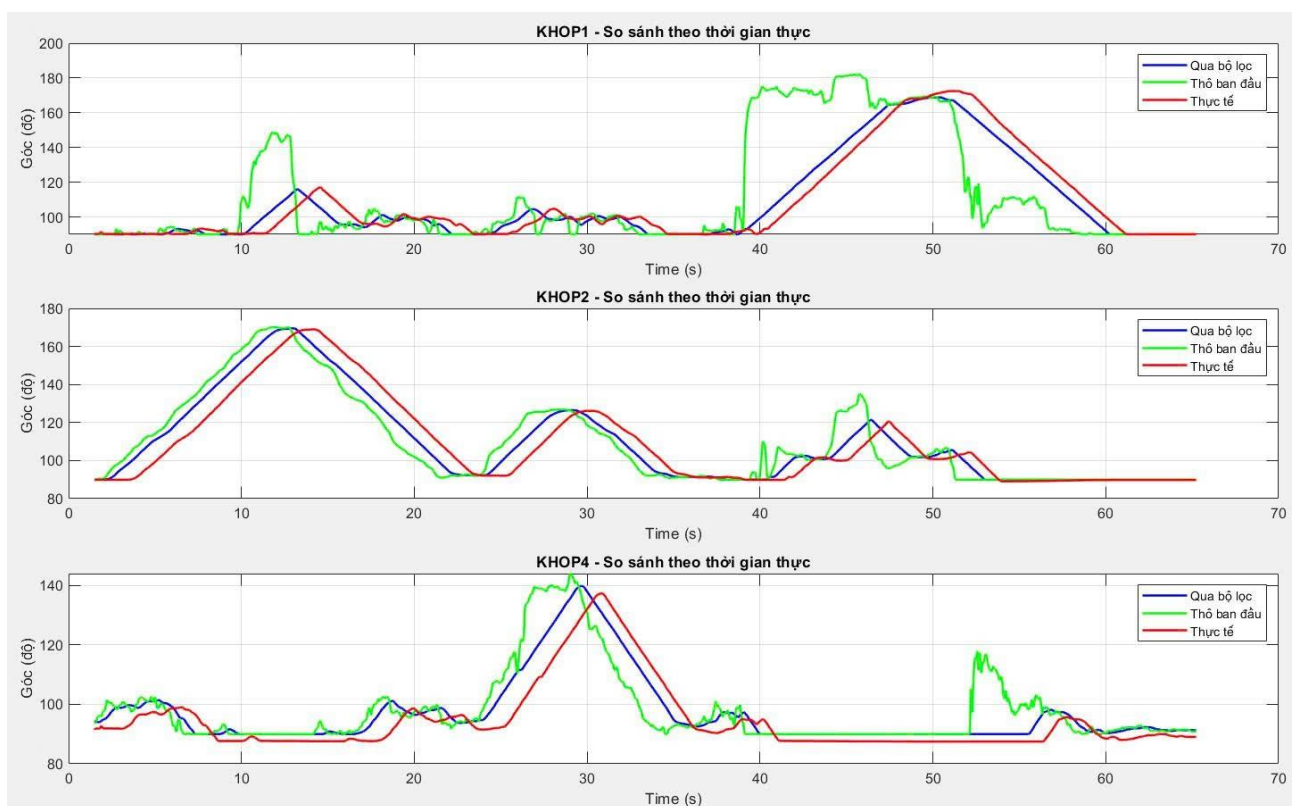
Hình 6. Tổng thể bối cảnh thực nghiệm thử nghiệm điều khiển chuyển động

Tuy nhiên, ngay cả khi đã thu hẹp phạm vi, những sai số biến thiên liên tục vẫn dẫn đến các xung nhọn sai lệch nghiêm trọng. Việc truyền trực tiếp dữ liệu thô này xuống cơ cấu chấp hành sẽ gây ra hiện tượng rung lắc và mất đồng bộ cơ khí. Để giải quyết, một

bộ lọc thông thấp kỹ thuật số bậc nhất đã được cài đặt trên phần mềm điều khiển với phương trình [18, 19]:

$$\theta_{out}[k] = \alpha \cdot \theta_{in}[k] + (1 - \alpha)\theta_{out}[k - 1] \tag{7}$$

Trong đó: $\theta_{in}[k]$ là góc mục tiêu nhận được; $\theta_{out}[k]$ là góc đã được làm mịn qua bộ lọc; $\alpha \in [0, 1]$ là hệ số cắt nhiễu. Hiệu quả triệt nhiễu của bộ lọc này được thể hiện trực quan qua đồ thị góc quay tại Hình 7. Kết quả đo kiểm cho thấy, so với góc thô ban đầu chưa qua xử lý, đường cong góc quay sau khi qua bộ lọc thông thấp đã trơn tru hơn đáng kể. Việc đối chiếu với góc thực tế của khớp quay (được đánh giá độc lập thông qua cảm biến vị trí từ tính MT6701) chứng minh rằng từng động cơ đã đáp ứng và bám sát chính xác tín hiệu góc lệnh, hoạt động mượt mà và triệt tiêu được hiện tượng trượt bước dưới tác động của quán tính cơ khí.



Hình 7. Đánh giá dữ liệu góc của 3 khớp quay

Từ đáp ứng ổn định của từng khớp đơn lẻ, để đánh giá năng lực hoạt động tổng thể của cánh tay robot trong không gian 3D, giá trị góc quay của toàn bộ 6 khớp của góc qua bộ lọc (bao gồm 3 góc biến thiên sau lọc và 3 góc cố định) và 6 khớp của góc thực tế được đo bằng MT6701 được đưa qua ma trận động học thuận đã thiết lập ở trên để nội suy ra tọa độ điểm tác động cuối. Việc kết hợp này cho phép ma trận tính toán chính xác tọa độ không gian điểm cuối để từ đó xác định sai số bám quỹ đạo không gian e theo định nghĩa sau:

$$e = \sqrt{(x_{target} - x_{actual})^2 + (y_{target} - y_{actual})^2 + (z_{target} - z_{actual})^2} \tag{7}$$

Trong đó: x_{target} , y_{target} , z_{target} là tọa độ không gian mục tiêu nội suy từ góc đã qua xử lý bộ lọc và x_{actual} , y_{actual} , z_{actual} là tọa độ không gian thực tế đạt được đo bởi cảm biến MT6701. Nhờ thuật toán xử lý tín hiệu đã cung cấp một chuỗi góc quay tham chiếu trơn tru và ổn định, khâu chấp hành vật lý thể hiện khả năng bám sát không gian

rất khả quan. Trong toàn bộ quá trình hoạt động thử nghiệm, biên độ của sai số e đã được tính toán và cho thấy luôn được giới hạn và duy trì trong ngưỡng an toàn với sai số về vị trí của bàn tay tối đa là 6 cm. Về thời gian đáp ứng, tổng thời gian trễ toàn hệ thống từ lúc người dùng phát động cử chỉ đến khi cánh tay vật lý xác lập vị trí đích được ghi nhận ở mức tối đa 1.400 ms. Độ trễ thời gian này có thể xuất phát từ cả quá trình xử lý nhận diện hình ảnh, tính toán dữ liệu, truyền thông, điều khiển động cơ cũng như độ trễ do quá trình vẽ mô phỏng mô hình 3D trên máy tính. Đây là một hạn chế cần phải khắc phục trong tương lai.

6. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày kết quả nghiên cứu thiết kế, chế tạo và điều khiển một hệ thống robot hai cánh tay dạng người và phần mềm điều khiển nhận diện chuyển động bằng thị giác máy tính đã được phát triển thành công. Mô hình vật lý và mô phỏng 3D của hệ hai cánh tay robot được thiết kế theo cấu trúc giải phẫu của chi trên con người, với 6 bậc tự do cho mỗi cánh tay. Bài toán động học được thiết lập bằng phương pháp Denavit-Hartenberg làm nền tảng cho phần mềm mô phỏng 3D và tính toán điều khiển. Hệ thống hoạt động thông qua phần mềm nhận diện hình ảnh với một camera 2D tiêu chuẩn kết hợp với MediaPipe được sử dụng để thu thập tọa độ không gian của người dùng, các góc khớp được tính toán thông qua tích vô hướng hình chiếu 2D. Nhiều dữ liệu và hiện tượng trùng điểm ảnh từ hệ thống thị giác trước và sau khi áp dụng bộ lọc kỹ thuật số đã được đánh giá để đảm bảo hiệu quả ổn định kết quả và thời gian truyền nhận dữ liệu. Cánh tay robot dạng người đã được chế tạo đã đảm bảo bám theo cử chỉ của người điều khiển với độ rung lắc cơ khí được giảm thiểu và sai số không gian ổn định trong khoảng tối đa 6 cm. Tuy nhiên, độ trễ toàn hệ thống được ghi nhận vẫn còn cao ở mức xấp xỉ 1.400 ms. Do đó, cần có những phát triển và tối ưu hóa hơn nữa đối với các ứng dụng đòi hỏi các tác vụ thời gian thực trong tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. Kofman, X. Wu, T. J. Luu, S. Verma: Teleoperation of a robot manipulator using a vision-based human-robot interface. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 5, pp. 1206-1219, 2005.
- [2] K. P. Hawkins, N. H. Al-Harhi, M. C. Mote, P. A. Vela: Anticipating Human Actions for Teleoperation of Humanoid Robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2451-2457, 2021.
- [3] E. Guizzo, E. Ackerman: How Humanoid Robots Are Adapting to the Real World. *IEEE Spectrum*, vol. 58, no. 1, pp. 34-41, 2021.
- [4] A. Peer, C. Buss: Teleoperation of Humanoid Robots: A Survey. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 24, no. 4, pp. 1-15, 2008.
- [5] J. J. Craig: *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Pearson Prentice Hall, 3rd Edition, pp. 62-80, 2005.
- [6] X. Chen, Y. Wang, B. Li: A Low-Cost Teleoperation System for Dual-Arm Robots Using RGB Camera. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 68, 102075, 2021.
- [7] T. Rakhtala, M. Ghaderi: Design and Implementation of an Anthropomorphic Robotic Arm with 6-DOF for Teleoperation. *IEEE International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation (ICMRA)*, pp. 45-50, 2022.

- [8] Y. Li, S. Liu, C. Wang: Real-time 3D Human Pose Estimation Using a Single 2D Camera for Robot Teleoperation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 98, no. 2, pp. 235-248, 2020.
- [9] C. Zimmermann, T. Brox: Learning to Estimate 3D Hand Pose from Single RGB Images. *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 4913-4921. 2017.
- [10] M. W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar: *Robot Modeling and Control*. John Wiley & Sons, pp. 85-110, 2006.
- [11] C. Lugaresi, J. Tang, H. Nash, C. McClanahan, E. Uboweja: MediaPipe: A Framework for Building Perception Pipelines. *arXiv:1906.08172 [cs.CV]*, 2019.
- [12] F. Zhang, V. Bazarevsky, A. Vakunov, A. Tkachenka, G. Sung: MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking. *arXiv:2006.10214 [cs.CV]*, 2020.
- [13] D. A. Winter: *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. John Wiley & Sons, 4th Edition, pp. 102-120, 2009.
- [14] R. C. Gonzalez, R. E. Woods: *Digital Image Processing*. Pearson, 4th Edition, pp. 150-180, 2018.
- [15] A. R. Kulkarni, N. V. Shirgure: Distributed Control Architecture for Multi-DOF Robotic Manipulators using I2C and SPI. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 1450-1456, 2016.
- [16] Espressif Systems: ESP32 Technical Reference Manual. Internet: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf (accessed: 10 April 2024).
- [17] MagnTek: MT6701 Magnetic Angle Sensor Datasheet. Internet: <http://www.magntek.com.cn/en/> (accessed: 12 April 2024).
- [18] S. W. Smith: *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. California Technical Publishing, pp. 277-284, 1997.
- [19] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer: *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice Hall, 3rd Edition, 2009.