การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 48
The 48th Electrical Engineering Conference (EECON-48)
วันที่ 19-21 พฤศจิกายน 2568 ณ โรงแรมฟูราม่า จังหวัดเชียงใหม่

การพัฒนาระบบควบคุมแขนกลหุ่นยนต์แบบห้าแกนด้วยสมองกลฝังตัวแบบแยกส่วน

Development of the 5-axis Manipulator Robot Controller using Embedded Control System

วนายุทธ์ แสนเงิน* และ วรานนท์ บุญมั่น
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม wanayuth.sa@spu.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบควบคุมแขนกลหุ่นยนต์แบบห้าแกน ด้วยสมองกลฝังตัวแบบแยกส่วน ประกอบด้วยตัวประมวลผลหลักไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 และตัวประมวลผลย่อยไมโครคอนโทรลเลอร์ Atmega328 จำนวน 5 ตัว ด้วยการสื่อสารอนุกรมระหว่างตัวประมวลผลหลักและตัวประมวลผลย่อยผ่าน i2c bus โดยตัวประมวลผลย่อยจะทำหน้าที่ควบคุมมุมองศาของจุดหมุนของแขนกลหุ่นยนต์ 5-axis SCORBOT-ER9 ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี ในการทดสอบการระบบควบคุมมุมองศาของแต่ละส่วนและคำนวณตำแหน่งจุดปลายแขนกลไปพร้อมกัน จากผลการทดลองมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงมุมของข้อต่อไม่เกิน ±0.48° และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงตำแหน่งของปลายแขนกลไม่เกิน ±2.81 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับแขนกลแบบ 5 แกนได้ รวมถึงลดต้นทุน ทั้งยังประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนเชิงปฏิบัติการแขนกลหุ่นยนต์

คำสำคัญ: แขนกลหุ่นยนต์, สมองกลฝังตัว, จลนศาสตร์ทางกล

Abstract

This article presents the development of the 5-axis manipulator robot controller by using the embedded control system, which consists of the microcontroller ESP32 as a master controller and five microcontrollers of Atmega328P as the slave controller. The data communication between them used the i2c bus for interfacing the data protocol. The slave controller is computing PID control of each joint motion of 5-axis SCORBOT-ER9. In the experiments, the joint angle changes and the position of end-effector is to calculate simultaneously. As the experimental results, the standard deviation of joint angles about ±0.48° degree, and the standard deviation at the end-effector position is about ±2.81 mm. which can be applied to other 5-axis manipulator robot arm, including reducing costs, and it is also applied in teaching the manipulator robot arm workshops.

Keywords: Manipulator Robot, Embedded System, Forward Kinematics

1. บทนำ

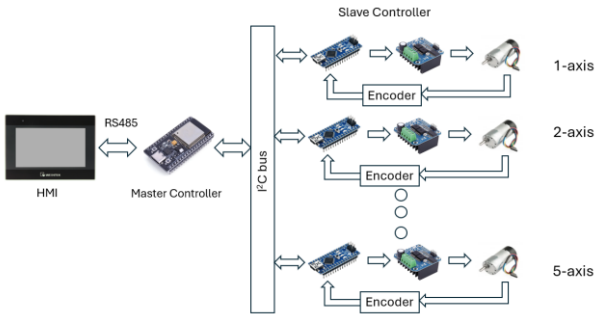
ปัจจุบันแขนกลหุ่นยนต์ มีการพัฒนาเทคโนโลยีอย่างรวดเร็ว และใช้งานแพร่หลายในงานภาคอุตสาหกรรมระบบอัตโนมัติอย่างต่อเนื่อง ด้วยการทำงานที่มีองศาอิสระ การทำงานเลียนแบบคล้ายแขนมนุษย์ ตามจุดหมุนของข้อต่อต่างๆ ซึ่งจำนวนข้อต่อจุดหมุน Degree of Freedom [1] ทำให้แขนกลหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนไหวและทำงานได้ในพื้นที่จำกัด การประยุกต์ใช้งานแขนกลหุ่นยนต์ได้รับความนิยมสูงในภาคอุตสาหกรรม [2] ด้วยความสามารถในการเคลื่อนที่หลายองศาอิสระ จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำ เช่น งานเชื่อมประสาน งานประกอบชิ้นส่วน งานจัดเรียงสินค้า เป็นต้น ปัจจุบันเทคโนโลยีแขนกลหุ่นยนต์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้แขนกลหุ่นยนต์ที่ใช้งานมีระบบควบคุมที่แตกต่างเทคโนโลยีตามยุคสมัย ชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ในยุคต้น ไม่สามารถนำมาใช้เชื่อมต่อกับระบบใหม่ได้ ซึ่งแขนกลหุ่นยนต์ยังคงมีโครงสร้างทางกลที่สมบูรณ์ แต่ระบบควบคุมมีข้อจำกัดด้วยเทคโนโลยีเดิม หากระบบควบคุมเสียหาย ก็ยากที่จะหาอุปกรณ์ทดแทน หรือต้นทุนที่สูงเกิน จึงทำให้กลายเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ ในกรณีของอุปกรณ์ควบคุมที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ [3] แต่โครงสร้างและอุปกรณ์ทางกลยังสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

ดังนั้นบทความนี้ได้พัฒนาระบบควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ห้าแกนด้วยสมองกลฝังตัวแบบแยกส่วน ในการพัฒนาระบบควบคุมแขนกลหุ่นยนต์แบบต้นทุนต่ำ ทดแทนชุดควบคุมเดิมที่เสียหาย ของระบบควบคุมแขนกลแบบห้าแกน SCORBOT-ER 9 ในห้องปฏิบัติการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ แสดงดังรูปที่ 1

รูปที่ 1 แขนกลหุ่นยนต์ SCORBOT-ER 9

2. โครงสร้างการทำงานของระบบ

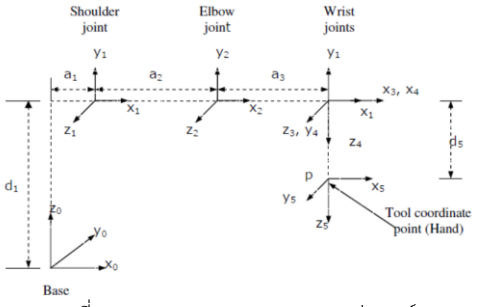
2.1 ภาพรวมของระบบ



รูปที่ 2 ภาพรวมของระบบควบคุมแขนกลหุ่นยนต์

จากรูปที่ 2 ระบบควบคุมสมองกลฝังตัวแบบแยกส่วน ได้ออกแบบระบบประมวลผลแบบแยกส่วน คือส่วนประมวลผลหลัก (Master Controller) และตัวประมวลผลย่อย (Slave Controller) มีระบบสื่อสารข้อมูลแบบ I²C โดยกำหนดความถี่ในการสื่อสารที่ 400 kHz ระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผลหลัก และไมโครคอนโทรลเลอร์ Atmega328P ทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผลย่อย ในการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง (DC Servo Motor) ในแต่ละแกนหมุน รวม 5 ตัวที่เชื่อมต่อไปยังวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไปยังเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงติดตั้งเซนเซอร์นับรอบชนิด Incremental Encoder ความละเอียด 512 slots เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดมุมองศาป้อนกลับไปยังตัวประมวลผลย่อยเพื่อควบคุมการทำงานแบบปิด โดยตัวประมวลผลหลักจะสื่อสารข้อมูลอนุกรมผ่าน RS485 โดยกำหนดบอดเรตที่ 9600 bps ไปยังหน้าจอสัมผัส HMI ซึ่งทำหน้าแสดงผลข้อมูลและสถานะต่างๆ ของการทำงาน มุมองศาของแต่ละจุดหมุน (Joint Angle Mode) และตำแหน่งปลายทางของแขนกล (End-effecter) โดยระบบควบคุมสามารถกำหนดมุมองศาแต่ละจุดหมุนของแขนกลแต่ละแกนผ่านหน้าจอสัมผัส HMI โดยแกนที่ 1 ระยะมุมขอบเขต 270 องศา แกนที่ 2 ระยะมุมขอบเขต 145 องศา แกนที่ 3 ระยะมุมขอบเขต 210 องศา แกนที่ 4 ระยะมุมขอบเขต 196 องศา แกนที่ 5 ระยะมุมขอบเขต 737 องศา การแสดงผลมุมข้อต่อและการแสดงผลตำแหน่งเชิงพื้นที่ของปลายแขนกล (End-Effector Position Mode)

2.2 จลศาสตร์แขนกลหุ่นยนต์



รูปที่ 3 แนวแกนของจุดหมุนแขนกลหุ่นยนต์

จากรูปแบบโครงสร้างแขนกลหุ่นยนต์ SCORBOT-ER 9 [4] ที่ใช้เป็นแขนกลชนิดข้อต่อหมุนซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยข้อต่อจำนวน 5 แกน ได้แก่ แกนที่ 1 คือ ฐาน (Base), แกนที่ 2 คือ หัวไหล่ (Shoulder), แกนที่ 3 คือ ข้อศอก (Elbow), แกนที่ 4 คือข้อมือ (Wrist Pitch) และ แกนที่ 5 คือ ข้อมือแบบหมุนรอบตัวเอง (Wrist Roll) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 นอกจากนี้ ยังมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแขนกลโดยใช้หลักการ Denavit-Hartenberg (DH Parameters) ซึ่งแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 DH พารามิเตอร์ของแขนกล

Link	θ_i(°)	α_i(°)	a_i(mm)	d_i(mm)
1 (Base)	θ_1	90	70	388
2 (Shoulder)	θ_2	0	0	0
3 (Elbow)	θ_3	0	230	0
4 (Wrist Pitch)	θ_4	-90	0	0
5 (Wrist Roll)	θ_5	0	0	231

ด้วยข้อมูลตารางที่ 1 คำนวณจลศาสตร์ทางกลด้วยสมการ forward kinematics [5] ของแขนกลหุ่นยนต์ จุดหมุนจากแกนที่ 1 ถึงแกนที่ 5 ของแขนกล ดังสมการที่ 1 และตำแหน่งจุดปลายแขนกล ดังสมการที่ 2

$$T_j^{j-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_j & -\sin\theta_j\cos\alpha_j & \sin\theta_j\sin\alpha_j & a_j\cos\theta_j \\ \sin\theta_j & \cos\theta_j\cos\alpha_j & -\cos\theta_j\sin\alpha_j & a_j\sin\theta_j \\ 0 & \sin\alpha_j & \cos\alpha_j & d_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ดังนั้นจะได้ค่าพารามิเตอร์ของแกนหมุน ดังนี้

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & 70\cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & 70\sin\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 388 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_2^1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & 230\cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 230\sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_4^3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & -\sin\theta_4 & 0 \\ \sin\theta_4 & 0 & \cos\theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & -\sin\theta_5 & 0 & 0 \\ \sin\theta_5 & \cos\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 231 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ดังนั้น $T_5^0 = T_1^0\, T_2^1\, T_3^2\, T_4^3\, T_5^4$ (2)

$$T_5^0 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

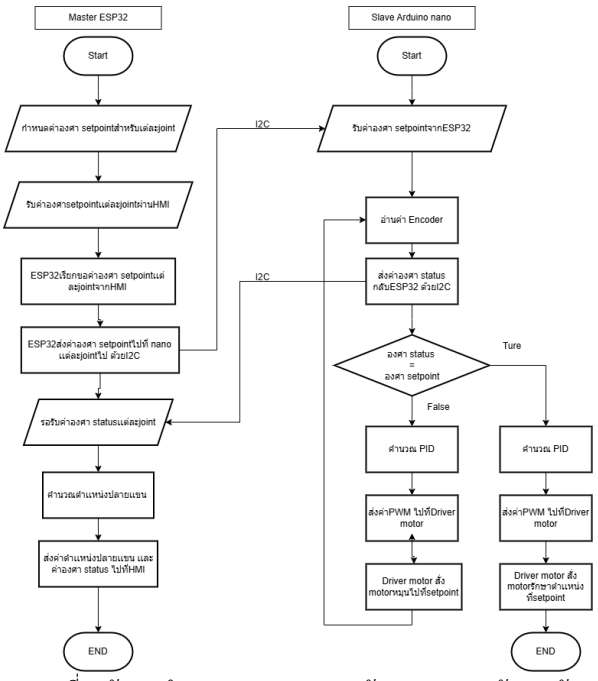
โดยกำหนดให้

$$\begin{aligned} n_x &= -s_1s_5 + c_1c_5\,c_{234} \\ n_y &= c_1s_5 + s_1c_5\,c_{234} \\ n_z &= s_5s_{234} \\ o_x &= -s_1c_5 - c_1c_5\,c_{234} \\ o_y &= -c_1c_5 + s_1s_5\,c_{234} \\ o_z &= c_5s_{234} \\ a_x &= -c_1s_{234} \\ a_y &= -s_1s_{234} \\ a_z &= c_{234} \\ p_x &= (-231s_{234} + 230c_{23} + 70)c_1 \\ p_y &= (-231s_{234} + 230c_{23} + 70)s_1 \\ p_z &= 231c_{234} + 230s_{23} + 388 \end{aligned}$$

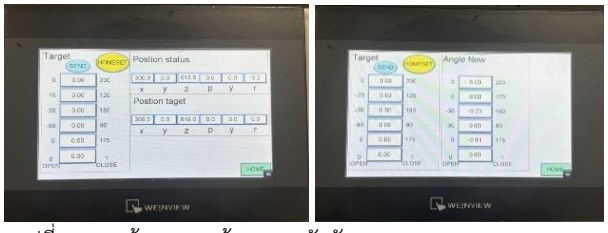
$$\begin{aligned} c_{23} &= \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ c_{234} &= \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \\ s_{23} &= \sin(\theta_2 + \theta_3) \\ s_{234} &= \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \end{aligned}$$

3. การออกแบบโปรแกรมควบคุม

การออกแบบระบบควบคุมแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนของ JOG mode กำหนดค่ามุมองศาของแต่ละแกนหมุน จำนวน 5 จุดหมุน ของแขนกลหุ่นยนต์ ผ่านหน้าจอแบบสัมผัส HMI ไปยังตัวประมวลหลัก เพื่อคำนวณค่าสมการแขนกลหุ่นยนต์ และส่งข้อมูลไปยังหน่วยประมวลผลย่อยของแต่ละแนวแกน รวมถึงตำแหน่งปลายทางแขนกล End-Effector Position ผลค่ามุมของแต่ละจุดหมุน คำนวณหาตำแหน่งปลายแขนกลในพิกัดเชิงพื้นที่ X, Y, Z, Pitch, Yaw, Roll โดยใช้วิธี Forward Kinematics ซึ่งค่ามุมของแต่ละจุดหมุน จะถูกส่งไปยังหน่วยประมวลผลย่อยของแต่ละแกนหมุน เพื่อควบคุมมุมองศาด้วยตัวควบคุมแบบ PID ด้วยการปรับค่าเกนของ kp, ki และ kd ของแต่ละแนวแกนด้วยวิธี trial-and-error method เพื่อควบคุมการทำงานให้ค่าผิดพลาดน้อยที่สุด โดยแสดงผังงานของระบบควบคุมของตัวประมวลผลหลักและตัวประมวลผลย่อย แสดงดังรูปที่ 4 และรูปแบบหน้าจอแบบสัมผัส HMI ของการกำหนดค่ามุมองศาแต่ละแนวแกน แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ผังการทำงานของระบบควบคุมตัวประมวลผลหลักและตัวประมวลผลย่อย



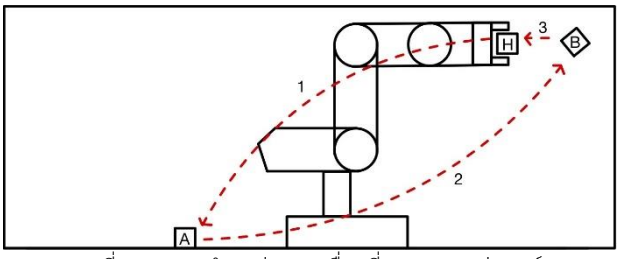
รูปที่ 5 แสดงข้อมูลบนหน้าจอแบบสัมผัส HMI มุมองศาของแกนหมุน 5 แกนหมุน และตำแหน่งปลายทางแขนกลหุ่นยนต์

รูปที่ 6 ชุดระบบควบคุมสมองกลแบบแยกส่วนของแขนกลหุ่นยนต์

ด้วยการพัฒนาระบบควบคุมแขนกลหุ่นยนต์แบบแยกส่วนแบบต้นทุนต่ำ โดยใช้ตัวประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นตัวประมวลผลหลัก รองรับฟังก์ชันระบบการสื่อสารข้อมูลผ่านเครือข่ายไร้สาย 2.4 Hz ผ่านการสั่งการแบบบังคับมือด้วย Joystick และ Atmega328P Nano 3.0 ตัวประมวลผลย่อยจำนวน 5 ชุด และ 1 ชุด สำหรับมือจับ (Gripper) แสดงดังรูปที่ 6

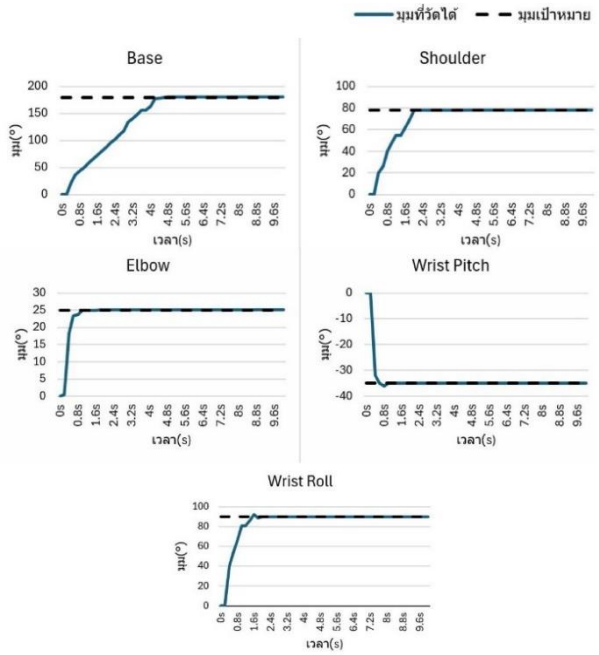
4. ผลการทดลอง

ผลการทดลองแขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ กำหนดเส้นทางที่ 1 จากตำแหน่ง Home position (H) ไปยังตำแหน่ง A, เส้นทางที่ 2 ต่อเนื่องจากตำแหน่ง A ไปยังตำแหน่ง B, เส้นทางที่ 3 ต่อเนื่องจากตำแหน่ง B ไปยังตำแหน่ง H กลับสู่ตำแหน่งเริ่มต้นอีกครั้งกระบวนการข้างต้นถูกทำซ้ำทั้งหมด 10 รอบ แสดงดังรูปที่ 7 โดยตำแหน่ง A ประกอบด้วยมุม θ_1=180°, θ_2=78°, θ_3=25°, θ_4=-35°, θ_5=90° และตำแหน่ง B ประกอบด้วยมุม θ_1=0°, θ_2=60°, θ_3=60°, θ_4=30°, θ_5=0° ตามลำดับ



รูปที่ 7 ทดสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์

ในการเคลื่อนที่ได้ทำการบันทึกค่ามุมองศาจริงของข้อต่อแต่ละแกนด้วยเซนเซอร์เอ็นโค้ดเดอร์ และคำนวณตำแหน่งจุดปลายแขนกล ด้วยตัวควบคุมแบบ PID โดยกำหนดค่าเกนของตัวประมวลผลย่อย ดังนี้ แกนที่ 1 Base กำหนดค่าเกน Kp=22, ki=0.01, kd=9.5 ; แกนที่ 2 Shoulder กำหนดค่าเกน Kp=22, ki=0.015, kd=1.5 ; แกนที่ 3 Elbow กำหนดค่าเกน Kp=37, ki=0.007, kd=12.5 ; แกนที่ 4 Wrist Pitch กำหนดค่าเกน Kp=31, ki=0.01, kd=2 ; และ แกนที่ 5 Wrist Roll กำหนดค่าเกน Kp=25, ki=0.00625, kd=3.32 โดยระบบควบคุมพีไอดีของตัวประมวลย่อย แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟมุมอาศาของแขนกลหุ่นยนต์ 5 แกนด้วยระบบควบคุมพีไอดี

ผลลัพธ์ของการควบคุมการเคลื่อนที่ของตำแหน่ง A ไปยังตำแหน่ง B มุมองศาที่ได้จากระบบควบคุมแสดงดังตารางที่ 2 และตำแหน่งปลายแขนกลที่ได้จากการคำนวณ แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ค่ามุมที่วัดได้จากแต่ละแกนในตำแหน่ง A และ B

NO	ค่ามุมเป้าหมายแต่ละแกนของแขนกลที่ตำแหน่ง A โดยมี θ_1=180°,θ_2=78°,θ_3=25°,θ_4=-35°,θ_5=90°	ค่ามุมเป้าหมายแต่ละแกนของแขนกลที่ตำแหน่ง B โดยมี θ_1=0°,θ_2=60°,θ_3=60°,θ_4=30°,θ_5=0°
1	180.46,78.14,25.15,-35,90.12	0.27,61.93,59.65,30,0.19
2	180.54,78.24,24.49,-35,89.57	0.48,62.11,59.45,30,-0.45
3	180.47,78.24,24.5,-35,90.51	0.44,62.02,59.36,30,0.67
4	180.53,78.26,24.47,-35,89.64	0.39,61.82,59.22,30,-0.34
5	180.53,78.22,24.46,-35,90.47	0.35,61.57,59.32,30,-0.03
6	180.5,78.24,24.55,-35,89.5	0.42,61.92,59.11,30,-0.31
7	180.56,78.27,24.56,-35,90.71	0.34,61.58,59.32,30,0.41
8	180.53,78.24,24.53,-35,89.43	0.38,61.89,59.18,30,0.16
9	180.52,78.22,24.6,-35,90.24	0.37,62.14,59.3,30,0.25
10	180.5,78.26,24.56,-35,90.34	0.34,62.09,59.18,30,0.27

ตารางที่ 3 ค่าตำแหน่งปลายแขนกลจากการคำนวณในตำแหน่ง A และ B

NO	ค่าพิกัดของแขนกลที่เคลื่อนที่ X,Y,Z,P,Y,R (mm) โดยมีตำแหน่งที่ A :195.9,0,698.6,-68,-89.9,0	ค่าพิกัดของแขนกลที่เคลื่อนที่ X,Y,Z,P,Y,R (mm) โดยมีตำแหน่งที่ B :-160.5,0,387.1,0,180,150
1	197.5,1.6,697.2,-68.3,-89.4,-0.3	-160.3,-0.5,381.4,0,179.9,151.2
2	194.4,1.8,699.8,-67.7,-89.6,1	-160.4,-1,383.3,0.2,179.1,150.9
3	194.5,1.6,699.7,-67.7,-89.3,1.2	-160.4,-1.2,381.6,-0.3,179.6,151.3
4	194.4,1.8,699.8,-68,-89.6,0.8	-160.3,-1.3,382.2,0.1,179.2,151
5	194.2,1.7,700,-67.6,-89.2,-1.1	-160.3,-1.2,390.7,0,179.5,151.5
6	194.8,1.7,698.6,-68,-89.9,1.2	-160.3,-1.2,381.1,0.1,179.2,151.3
7	195,1.6,699.3,-67.8,-89.1,-1.7	-160.3,-1.2,382.7,-0.1,179.8,151.2
8	194.6,1.8,699.6,-67.7,-89.6,1.3	-160.4,-1,383.1,0,179.8,151
9	194.8,1.8,699.4,-67.8,-89.3,-0.6	-160.4,-0.9,381.6,-0.1,179.9,151.3
10	194.9,1.7,699.4,-67.8,-89.3,-0.8	-160.4,-1.2,382,-0.1,179.9,151.2

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกลไปยังตำแหน่ง A กับตำแหน่ง B ด้วยสมองกลฝังตัวแบบแยกส่วน สำหรับแขนกลหุ่นยนต์ SCORBOT-ER9 มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของมุมข้อต่อแต่ละแกนในเชิงมุม รวมถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่งปลายแขนกลในเชิงพิกัด แสดงไว้ในตารางที่ 4 และตารางที่ 5 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถรักษาความแม่นยำเชิงมุมได้ โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงมุมของแต่ละแกนเฉลี่ยไม่เกิน ±0.5° ขณะที่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงตำแหน่งของปลายแขนเฉลี่ยไม่เกิน ±3 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เพียงพอสำหรับการใช้งานด้านการเรียนการสอนและการทดลองในห้องปฏิบัติการเท่านั้น

ตารางที่ 4 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงมุมแต่ละแกนของแขนกล

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแต่ละแกนของแขนกลเชิงมุม(°)					
ตำแหน่ง	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
A	± 0.031	± 0.037	± 0.203	± 0.000	± 0.475
B	± 0.059	± 0.203	± 0.156	± 0.000	± 0.359

ตารางที่ 5 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเชิงตำแหน่งจุดปลายของแขนกล

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแขนกลเชิงตำแหน่งปลายแขน						
ตำแหน่ง	x	y	z	pitch	yaw	roll
A	± 0.9445mm	± 0.0876mm	± 0.8270 mm	± 0.2066°	± 0.2406°	± 1.1205°
B	± 0.053 mm	± 0.236 mm	± 2.813 mm	± 0.140°	± 0.321°	± 0.179°

เอกสารอ้างอิง

[1] K. Lynch and F. Park, (2017), “Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control,” Cambridge University Press. https://modernrobotics.org.

[2] International Federation of Robotics, (2025), “Record of 4 million robots working in factories worldwide,” [online]. Available: https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-of-4-million-robots-working-in-factories-worldwide. [Accessed: 28-Jun-2025].

[3] H. McGloin, M. Studley, R. Mawle, and A. Winfield, (2023), “Introducing the Concept of Repurposing Robots; to Increase their Useful Life, Reduce Waste, and Improve Sustainability in the Robotics Industry,” *Proc. 8th Int. Conf. Robot Ethics and Standards (ICRES)*, Utrecht, Netherlands, pp.16-27.

[4] Intelitek, SCORBOT-ER IX User Manual, [online]. Available: https://www.theoldrobots.com/book45/scorbot-ERIX.pdf. [Accessed: 28-Jun-2025].

[5] วิโรจน์ ขาวละออ และ กิตติยา นาคพันธ์, (2564), “การวิเคราะห์จลนศาสตร์ไปข้างหน้าของหุ่นยนต์แขนกลรุ่น Denso VS-6577,” วารสารเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม (JEET), ปีที่ 8, ฉบับที่ 1, หน้า 60–68.