



หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขา กลไกห้าชิ้นต่อโยง

นายณัฐนนท์ ศรีแก้ว

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2566
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขาทั่วโลกห้าชิ้นต่อโยง

นายณัฐนนท์ ศรีแก้ว

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองปริญญาโท

ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง
โดย นายณัฐนนท์ ศรีแก้ว

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

หัวหน้าภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล
(รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติวุฒิ ศุทธิวิโรจน์)

คณะกรรมการสอบปริญญาโท

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ศิลาวัฒนาไฉย)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ทานอก)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธาริณี ทองเกิด)

ชื่อ : นายณัฐนนท์ ศรีแก้ว
ชื่อปริญญาบัตร : หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขา กลไกห้าชิ้นต่อโยง
สาขาวิชา : วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตรหลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ศิลาวัชานาย
ปีการศึกษา : 2566

บทคัดย่อ

ปริญญาบัตรนี้นำเสนอต้นแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขา เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปในพื้นที่ได้หลากหลายทั้งพื้นผิวทางที่เรียบหรือพื้นผิวที่ไม่เรียบได้ ต้นแบบหุ่นยนต์ที่จัดทำขึ้นนี้มีกลไกส่วนขาแต่ละข้างเป็นรูปแบบกลไกห้าชิ้นต่อโยง ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจำนวน 8 ชุดเป็นต้นกำลัง และติดตั้งเซ็นเซอร์ตัวต้านทานปรับค่าได้ทำหน้าที่วัดตำแหน่งของแกนหมุนของมอเตอร์ ส่วนควบคุมจังหวะก้าวเดินของหุ่นยนต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวประมวลผล โดยมีโปรแกรมการทำงานสองส่วนได้แก่ ลักษณะการก้าวเดินที่กำหนดการทำงานของขาแต่ละข้าง และระบบควบคุมตำแหน่งแกนหมุนของมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมพีไอดี ผลการทดสอบได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเดินของตัวหุ่นยนต์จากลักษณะการก้าวเดิน 2 ลักษณะได้แก่ แบบเดินและวิ่งเหยาะ ๆ โดยหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ในรูปแบบการก้าวแบบเดินได้ 1.77 cm/s และรูปแบบการก้าวแบบวิ่งเหยาะ ๆ ได้ 9.39 cm/s นอกจากนี้ ตัวหุ่นยนต์ได้ติดตั้งเซ็นเซอร์ไจโร เพื่อประเมินท่าทางการเดินในรูปแบบองศาเอียงในมุม Roll และมุม Pitch ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ารูปแบบการวิ่งเหยาะ ๆ มีความผิดพลาดสัมบูรณ์ในระยะเวลาอินทิกรัลน้อยกว่ารูปแบบการก้าวเดิน ของมุม Roll 9.40% และมุม Pitch 12.03% ตามลำดับ

(ปริญญาบัตรมีจำนวนหน้าทั้งสิ้น 86 หน้า)

คำสำคัญ : หุ่นยนต์เดินสี่ขา กลไกห้าชิ้นต่อโยง จลนศาสตร์การเคลื่อนที่ผกผัน ตัวควบคุมสัดส่วน
ปริพันธ์และอนุพันธ์



อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตรหลัก

Name : Nattanon Srikaew
Project Title : Five-Bar Linkage Based Quadruped Robot
Major Field : Teacher Training in Mechatronics Engineering
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Project Advisor : Assistant Professor Dr. Chaiyaporn Silawatchananai
Academic Year : 2023

Abstract

This project proposed the prototype of a Five-Bar linkage-based quadruped robot so that the robot can move through both flat and un-terrain areas. Each leg of the robot has a five-bar linkage mechanism. The robot has eight electrical DC motors as actuators and attached potentiometers for sensing the motors' position. A single microcontroller board is used as the central processor for gait pattern control. There are two sub-tasks: gait pattern generator for defining the end-effector reference position and the PID control of the DC motor position. In this work, the walking performance of robot results compares two gait patterns of robots: walking and throttle patterns. The result shows that the robot has a movement speed of 1.77 cm/s for the walking gait patterns, and 9.39 cm/s for throttle gait patterns. Moreover, a gyroscopic sensor is attached for the robot's posture assessment in terms of roll and pitch angle during waking. The experimental result shows that the throttle gait pattern has an IATE index of less than the walking gait pattern by 9.40% and 12.03% in roll and pitch angle, respectively.

(Total 86 pages)

Keywords : Quadruped robot, Inverse Kinematic Five-bar, Linkage mechanism,
Proportional - Integral-Derivative controller



Advisor

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จเสร็จสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ศีลาวิชานาไนย อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรรพงศ์ ทานอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธาริณี ทองเกิด คณะกรรมการที่ได้ ให้คำแนะนำ จนปริญญาานิพนธ์นี้ได้สำเร็จ และขอขอบพระคุณเหล่าคณาจารย์ประจำภาควิชา ครุศาสตร์เครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนในการจัดทำปริญญาานิพนธ์ในครั้งนี้ ที่ให้คำแนะนำ และคำปรึกษาในการจัดทำปริญญาานิพนธ์ ได้เป็นอย่างดี รวมไปถึงความกรุณาในการอ่าน และแก้ไขปริญญาานิพนธ์ให้ สมบูรณ์ยิ่งขึ้นสุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าหวังว่าปริญญาานิพนธ์นี้เป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน และสามารถนำไป ประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป

ณัฐนนท์ ศรีแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 สมมติฐานของโครงการ	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 คำนิยามศัพท์เฉพาะ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 นิยามของกลไกห้าขั้นตอน	6
2.2 ทำเดินทั่วไปของหุ่นยนต์เดินสี่ขา	8
2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	9
2.4 อุปกรณ์สำหรับการควบคุมมอเตอร์ของหุ่นยนต์	10
2.5 เซ็นเซอร์	11
2.6 หลักการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมมอเตอร์	12
2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	13
2.8 ระบบควบคุมตำแหน่งด้วยตัวควบคุมพีไอดี	14
2.9 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะของตัวควบคุม	15
2.10 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน	23
3.1 ไตอะแกรมการดำเนินงาน	24
3.2 การออกแบบหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขา กลไกห้าขั้นตอน	27
3.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ทำงานหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขา กลไกห้าขั้นตอน	37

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	49
4.1 ผลการทดลองการควบคุมตำแหน่งแกนมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมพีไอดี	50
4.2 ผลการทดลองระยะในการยกตัวหุ่นยนต์	58
4.3 ผลการทดลองควบคุมการก้าวของหุ่นยนต์	61
4.4 การเปรียบเทียบขององศาการเอียงของหุ่นยนต์	72
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	77
5.1 สรุป และอภิปรายผล	77
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข	78
5.3 ข้อเสนอแนะ	78
บรรณานุกรม	79
ภาคผนวก ก	81
การออกแบบโครงสร้าง	81
ประวัติผู้จัดทำ	86

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3-1 ค่าความต้านทาน	38
3-2 ค่าความเหนียวนำของขดลวด	39
3-3 ค่าแรงเสียดทาน	40
3-4 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์	41
3-5 ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับ	42
3-6 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	42
3-7 ลำดับของตำแหน่งอ้างอิงของปลายขาที่เป็นตำแหน่ง (X,Y)	46
3-8 ลำดับของตำแหน่งอ้างอิงองศาของมอเตอร์	47
4-1 ตารางสรุปการทดสอบ	57
4-2 ผลการขยับขึ้นของหุ่นยนต์ 18 CM	60
4-3 รูปแบบการก้าวเดิน	61
4-4 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 10 ms ในรูปแบบการก้าวเดิน	62
4-5 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 15 ms ในรูปแบบการก้าวเดิน	62
4-6 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 20 ms ในรูปแบบการก้าวเดิน	63
4-7 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 25 ms ในรูปแบบการก้าวเดิน	63
4-8 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 10 ms ในรูปแบบการก้าวเดินแบบปรับค่าเกณฑ์	64
4-9 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 15 ms ในรูปแบบการก้าวเดินแบบปรับค่าเกณฑ์	64
4-10 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 20 ms ในรูปแบบการก้าวเดินแบบปรับค่าเกณฑ์	65
4-11 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 25 ms ในรูปแบบการก้าวเดินแบบปรับค่าเกณฑ์	65
4-12 รูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ	66
4-13 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 10 ms ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ	66
4-14 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 15 ms ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ	67
4-15 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 20 ms ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ	67
4-16 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 25 ms ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ	68
4-17 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 10 ms ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ แบบปรับค่าเกณฑ์	68

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-18 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 15 ms ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ แบบปรับค่าเกณฑ์	69
4-19 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 20 ms ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ แบบปรับค่าเกณฑ์	69
4-20 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 25 ms ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ แบบปรับค่าเกณฑ์	70
4-21 การเก็บผลการระบุระยะทางในรูปแบบการก้าวเดิน	71
4-22 การเก็บผลการระบุระยะทางในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ	72
4-23 ผลของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ในระยะเวลาอินทิกรัล	75

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 ขาแบบสี่ขาใช้กลไกห้าชิ้นต่อโยง	1
2-1 ส่วนประกอบของกลไกห้าชิ้นต่อโยง	6
2-2 โครงร่างกลไกห้าชิ้นต่อโยงสำหรับจรรยาบรรณการเคลื่อนที่ผกผัน	7
2-3 แสดงขาที่กำลังก้าวในรูปแบบต่าง ๆ	9
2-4 การเกิดสนามแม่เหล็กที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ (IENERGYGURU, 2015)	9
2-5 อาคิโน เมกา ARDUINO MEGA	10
2-6 บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ MDD10A	10
2-7 เซ็นเซอร์โรตารีโคป GY-521 MPU-6050	11
2-8 ตัวต้านทานปรับค่าได้กับไมโครคอนโทรลเลอร์	12
2-9 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ และสัญญาณที่ขับเคลื่อนไปที่บอร์ดไดรฟ์	12
2-10 จงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	13
2-11 ระบบควบคุมด้วยตัวควบคุม	14
2-12 มุมมองด้านบนของหุ่นยนต์ 4 เท้า (LU MING, 2022)	16
2-13 DELTA HOPPER (ซ้าย), MINITOUR (กลาง) และ JERBOA (ขวา)	17
2-14 หุ่นยนต์ทำให้มอเตอร์สามารถเอียงกระดูกสันหลัง J. DUPERRET AND D. E. KODITSCHKE 2017	17
2-15 STANFORD DOGGO: โอเพ่นซอร์ส กิ้งไดเรกต์ไดรฟ์ หุ่นยนต์ 4 เท้า	18
2-16 ต้นแบบของหุ่นยนต์ 4 เท้า Y. ZHANG ET AL. 2021	19
2-17 การออกแบบหุ่นยนต์ 1 ตัว U. KEAMORAKOT AND L. POOLPERM 2021	19
2-18 MOTION DOF ของขาที่ยืดหยุ่นของ QUADRUPED ROBOT	20
2-19 การออกแบบหุ่นยนต์ 4 เท้า (M. NANDHINI, V. KRITHIKA AND K. CHITTAL, 2017)	20
2-20 ตำแหน่งเริ่มต้นของขาหุ่นยนต์แมว DOF M. ARIYANTO, ET AL. 2019	21
2-21 JINPOONG – หุ่นยนต์เดินแบบสี่ขาด้วยไฮดรอลิก JIN TAK KIM, ET AL. 2013	22
3-1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	24
3-2 ไดอะแกรมการออกแบบชิ้นส่วนทางกล	25
3-3 ไดอะแกรมออกแบบวงจรควบคุมบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	26

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-4 แบบโครงสร้างของตัวหุ่นยนต์	28
3-5 แบบหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง	28
3-6 แบบโครงสร้างของหุ่นยนต์	29
3-7 อุปกรณ์ควบคุมบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์บนหุ่นยนต์	29
3-8 ขนาดของลิงค์ของหุ่นยนต์	30
3-9 การกระจายน้ำหนักในแต่ละขาของหุ่นยนต์	31
3-10 FBD ขาของหุ่นยนต์	31
3-11 แรงบิดที่กระทำ ณ จุด B	32
3-12 หาแรงบิดที่กระทำที่ก้าน AB	33
3-13 ไดอะแกรมหาแรงบิดของมอเตอร์	33
3-14 การวัดแรงด้วยตราซิ่ง	34
3-15 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12 V	35
3-16 อุปกรณ์ และการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ควบคุม	35
3-17 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์	36
3-18 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ความคมตำแหน่ง	37
3-19 วัดค่าความต้านทาน	38
3-20 วัดค่าความเหนียวนำของขดลวด	39
3-21 ผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์และมอเตอร์จริง	43
3-22 ผลตอบสนองจากโปรแกรม MATLAB ที่ 90°	44
3-23 ผลตอบสนองจากมอเตอร์ที่ 90°	44
3-24 ไดอะแกรมการทำงานของโปรแกรม	45
3-25 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของปลายขา	46
4-1 ตำแหน่งของมอเตอร์ตามหมายเลข	50
4-2 การเคลื่อนที่ของมอเตอร์	50
4-3 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 1 และ 2 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 45°	51
4-4 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 3 และ 4 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 45°	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-5 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 5 และ 6 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 45°	52
4-6 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 7 และ 8 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 45°	53
4-7 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 1 และ 2 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 90°	53
4-8 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 3 และ 4 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 90°	54
4-9 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 5 และ 6 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 90°	54
4-10 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 7 และ 8 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 90°	55
4-11 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 1 และ 2 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 180°	55
4-12 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 3 และ 4 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 180°	56
4-13 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 5 และ 6 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 180°	56
4-14 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 7 และ 8 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 180°	57
4-15 จุดอ้างอิงปลายขาที่ $x, y = (0,0)$ และ $x, y = (0, -95)$	59
4-16 ตำแหน่งการวางมอเตอร์ของหุ่นยนต์	59
4-17 วิธีการเก็บผลระยะการกระจัด	61
4-18 ระบุแกนของตัวหุ่นยนต์	73
4-19 ผลตอบสนองของมุม ROLL ในรูปแบบการก้าวเดิน	73
4-20 ผลตอบสนองของมุม ROLL ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ	74
4-21 ผลตอบสนองของมุม PITCH ในรูปแบบการก้าวเดิน	74
4-22 ผลตอบสนองของมุม PITCH ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ	75
ก-1 หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง	82
ก-2 ฝาข้างตัวหุ่นยนต์	82
ก-3 ขาส่วนบน	83
ก-4 ขาส่วนล่าง	83
ก-5 แผ่นตามกางตัวหุ่นยนต์	84
ก-6 ภาพวงจรของหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง	84
ก-7 ภาพลายวงจรของหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง	85

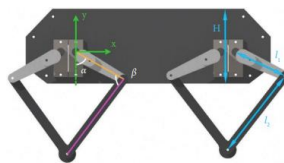
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเทคโนโลยีของหุ่นยนต์ได้มีการนำหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อมาใช้งานหลากหลายประเภท เช่น การขนส่ง การสำรวจ และงานบริการ เพื่อลดความเสี่ยงที่เกิดจากอุบัติเหตุ เช่น การตรวจตราในโรงงานไฟฟ้า โรงงานที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารเคมี และสถานที่มนุษย์ไม่สะดวกต่อการเข้าถึงได้พื้นที่

หุ่นยนต์เดินแบบสี่ขาสามารถทำงานได้ในทุกสภาพพื้นผิวทางที่เรียบกับพื้นผิวที่ไม่เรียบ และสถานที่ที่ไม่สามารถเข้าถึงได้ โดยมีรูปแบบขาหลากหลายแบบ เช่น ขากลที่ใช้ไฮดรอลิกเป็นแอคชูเอเตอร์หลักในหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขา และหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขาที่ใช้กลไกห้าชิ้นต่อโยงหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขาที่ใช้กลไกห้าชิ้นต่อโยงดังภาพที่ 1-1 ที่แสดงให้เห็นถึงลักษณะของขาที่ใช้กลไกห้าชิ้นต่อโยง และการควบคุมมอเตอร์ การใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุมรูปแบบการก้าวขาของหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขาทำเดินทั่วไปของหุ่นยนต์สี่ขาประกอบด้วย เดิน, วิ่งเหยาะ ๆ และ กระโดด



ภาพที่ 1-1 ขาแบบสี่ขาใช้กลไกห้าชิ้นต่อโยง (Lu Ming, 2022)

จากข้อความข้างต้นได้ข้อสรุปว่าหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขานั้นมีความสามารถในการเคลื่อนที่ไปในพื้นที่ได้หลากหลายทั้ง พื้นผิวทางที่เรียบ หรือพื้นผิวที่ไม่เรียบโดยมีปัจจัยที่ทำให้หุ่นยนต์เดินแบบสี่ขาสามารถเคลื่อนที่ไปได้หลายสภาพพื้นผิว คือ รูปแบบการก้าว ดังนั้นทางผู้จัดทำมีแนวคิดที่ใช้รูปแบบการก้าว 2 แบบ ได้แก่การเดินแบบ และวิ่งเหยาะ ๆ เพื่อตรวจสอบองศาการเอียงของตัวหุ่นยนต์ทำให้อาจใช้เซ็นเซอร์ไจโร ในการเปรียบเทียบว่าในแต่ละรูปแบบการก้าวของหุ่นยนต์มีองศาการเอียงอย่างไร และได้ข้อมูลในการนำไปพัฒนาในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวหุ่นยนต์

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการงาน

- 1.2.1 เพื่อสร้างต้นแบบหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขาด้วยกลไกห้าข้อต่อโยง
- 1.2.2 เพื่อออกแบบระบบควบคุม การก้าวขาของหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขา
- 1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบแต่ละท่าเดินองศาการเอียงของหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขาในรูปแบบการก้าวเดิน และวิ่งเหยาะ ๆ

1.3 สมมติฐานของโครงการงาน

หุ่นยนต์เดินแบบสี่ขาสามารถเคลื่อนที่ได้ภายนอกอาคาร

1.4 ขอบเขตของโครงการงาน

- 1.4.1 ใช้ระบบควบคุมด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์
- 1.4.2 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยกลไกขาทั้งสี่ขา
- 1.4.3 หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ในรูปแบบการก้าวเดิน และวิ่งเหยาะ ๆ
- 1.4.4 หุ่นยนต์สามารถวัดระดับความเอียงของตัวหุ่นยนต์ได้ด้วยเซ็นเซอร์ไจโร

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้ต้นแบบของหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขา
- 1.5.3 ได้หุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ในรูปแบบการก้าว เดิน และวิ่งเหยาะ ๆ สำหรับให้ผู้ที่สนใจนำข้อมูลไปประยุกต์ต่อ

1.6 คำนิยามศัพท์เฉพาะ

- 1.6.1 กลไกห้าข้อต่อโยง (Five-Bar Linkage Mechanism) กลไกห้าข้อต่อโยง คือระบบกลไกของขาหุ่นยนต์ที่มีองค์ประกอบห้าชิ้นที่เชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อ
- 1.6.2 เชื่อมต่อ (Joints) เชื่อมต่อ คือส่วนที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างส่วนของขาแต่ละชิ้นของขาของหุ่นยนต์
- 1.6.3 ไจโรสโคป (Gyroscope) ไจโรสโคป คือเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการวัดการเคลื่อนที่หรือการหมุนของหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขากลไกห้าข้อต่อโยง

1.6.4 พีไอดี (Proportional-Integral-Derivative Controller : PID) พีไอดี คืออัลกอริทึมหนึ่งที่ใช้ในควบคุมมอเตอร์ของขาของหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขาทั่วโลกทำขึ้นต่อโยงประกอบไปด้วยตัวควบคุมสัดส่วนปริพันธ์และอนุพันธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัย ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการออกแบบ ควบคุมการทำงานของ อุปกรณ์ต่าง ๆ มีความจำเป็นที่ต้องมีการศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อให้เกิดความเข้าใจ และนำ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้ามาปรับใช้ในการทำโครงการ จนสามารถนำมาเสนอกระบวนการ และ ขั้นตอนในการสร้างหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยงโดยทำการศึกษาหัวข้อดังต่อไปนี้

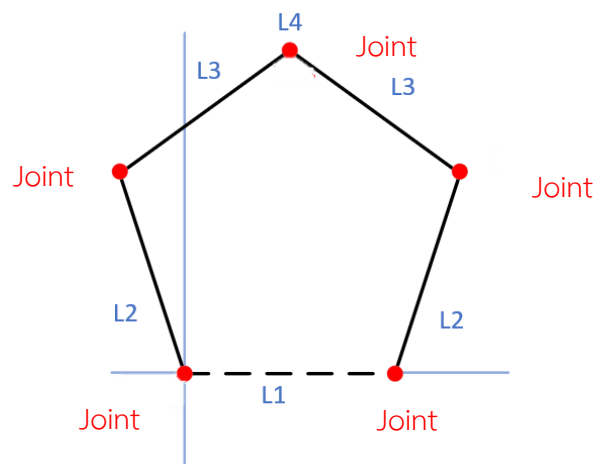
- 2.1 นิยามของกลไกห้าชิ้นต่อโยง
 - 2.1.1 ส่วนประกอบของห้าชิ้นต่อโยง
 - 2.1.2 จลนศาสตร์การเคลื่อนที่ผกผัน
- 2.2 ทำเดินทั่วไปของหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขา
- 2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- 2.4 อุปกรณ์สำหรับการควบคุมมอเตอร์ของหุ่นยนต์
 - 2.4.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์
 - 2.4.2 บอร์ดขับมอเตอร์
- 2.5 เซ็นเซอร์
 - 2.5.1 เซ็นเซอร์ไจโรสโคป
 - 2.5.2 ตัวต้านทานปรับค่าได้
- 2.6 หลักการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมมอเตอร์
- 2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- 2.8 ระบบควบคุมตำแหน่งด้วย พีไอดี
- 2.9 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะของตัวควบคุม
- 2.10 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นิยามของกลไกห้าชิ้นต่อโยง

กลไกห้าชิ้นต่อโยง เป็นรูปแบบของกลไกที่ประกอบด้วยห้าชิ้นต่อโยงที่เชื่อมต่อกันผ่านจุดเชื่อมต่อทั้งหมด 5 จุด แสดงดังภาพที่ 2-1 กลไกประเภทนี้ติดตั้งมอเตอร์หรือตัวต้นกำลังเพื่อขับชิ้นต่อโยง L2 เป็นผลให้ชิ้นต่อโยง L3 และ L4 ขยับตาม โดยที่จุดปลายหรือจุด L4 เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นต่อโยง L3 และ L4 เคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้

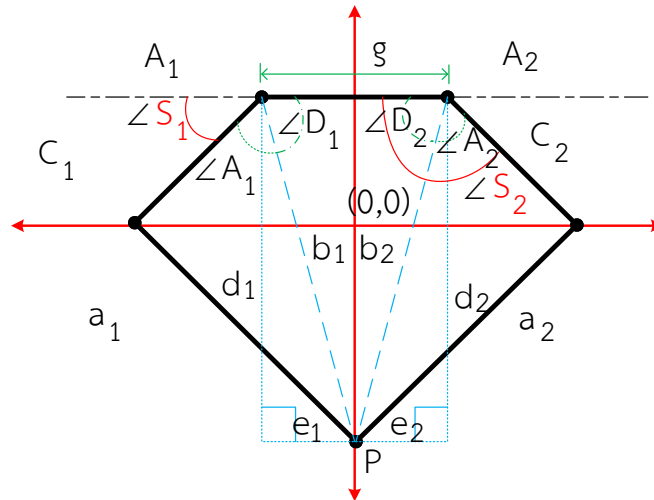
2.1.1 ส่วนประกอบของ กลไกห้าชิ้นต่อโยง ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 5 ส่วน ได้แก่

- Ground Link (L1) เป็นชิ้นต่อโยงที่ยึดอยู่กับพื้น หรือฐาน
- Input Link (L2) เป็นชิ้นต่อโยงที่รับการเคลื่อนที่จาก Actuator/Passive Link (L3) เป็นชิ้นต่อโยงที่ทำหน้าที่ถ่ายทอดการเคลื่อนที่จาก Input Link ไปยัง Output Link
- Output link (L4) เป็นชิ้นต่อโยงที่เคลื่อนที่ตาม Input Link
- Joints เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่าง ชิ้นต่อโยงแต่ละอัน



ภาพที่ 2-1 ส่วนประกอบของกลไกห้าชิ้นต่อโยง

2.1.2 จลนศาสตร์การเคลื่อนที่ผกผัน เป็นการหาตำแหน่งองศาของมอเตอร์หรือต้นกำลัง เพื่อที่เคลื่อนจุดปลายขาไปยังตำแหน่งที่กำหนด จลนศาสตร์การเคลื่อนที่ผกผันของกลไกห้าชิ้นต่อโยง มีขั้นตอนดังนี้



ภาพที่ 2-2 โครงร่างกลไกห้าชิ้นต่อโยงสำหรับจรรยาศาสตร์การเคลื่อนที่ผกผัน

จากภาพที่ 2-2 เพื่อกำหนดจุดที่ปลายขา P ให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ ผู้จัดทำได้นำหลักการ กลศาสตร์ผกผันในการคำนวณ

กำหนดให้ A_1 คือ จุดหมุน หรือตำแหน่งที่วางมอเตอร์

A_2 คือ จุดหมุน หรือตำแหน่งที่วางมอเตอร์

g คือ ระยะห่างของจุด A_1 และ A_2

C_1 คือ ก้านบนของขาของหุ่นยนต์

C_2 คือ ก้านบนของขาของหุ่นยนต์

a_1 คือ ก้านล่างของขาของหุ่นยนต์

a_2 คือ ก้านล่างของขาของหุ่นยนต์

P คือ จุดปลายของขาที่มีพิกัด (P_x, P_y)

การควบคุมตำแหน่งจุดปลายขาจำเป็นต้องทราบองศาของ $\angle S_1, \angle S_2$ เพื่อให้จุดปลายขาไปตำแหน่งที่กำหนดตามหาได้จากสมการดังนี้

การหา d_1 และ d_2 มีดังนี้

$$d_1 = A_{1y} - P_y \quad (2-1)$$

$$d_2 = A_{2y} - P_y \quad (2-2)$$

การหา e_1 และ e_2

$$e_1 = A_{1x} - P_x \quad (2-3)$$

$$e_2 = A_{2x} - P_x \quad (2-4)$$

การหา b_1 และ b_2 เป็นการใช้หลักการพีทาโกรัส

$$b^2_1 = b^2_1 + e^2_1 \quad (2-5)$$

$$b^2_2 = b^2_2 + e^2_2 \quad (2-6)$$

การหา $\angle A_1, \angle A_2, \angle D_1$ และ $\angle D_2$ ใช้หลักการกฎของโคไซน์

$$\angle A_1 = \text{acos} \left(\frac{b^2_1 + c^2_1 - a^2_1}{2(b_1)(c_1)} \right) \quad (2-7)$$

$$\angle A_2 = \text{acos} \left(\frac{b^2_2 + c^2_2 - a^2_2}{2(b_2)(c_2)} \right) \quad (2-8)$$

$$\angle D_1 = \text{acos} \left(\frac{g^2 + b^2_1 - b^2_2}{2(g)(b_1)} \right) \quad (2-9)$$

$$\angle D_2 = \text{acos} \left(\frac{g^2 + b^2_2 - b^2_1}{2(g)(b_2)} \right) \quad (2-10)$$

การหา $\angle S_1$ และ $\angle S_2$ มีดังนี้

$$\angle S_1 = 180^\circ - \angle A_1 - \angle D_1 \quad (2-11)$$

$$\angle S_2 = \angle A_2 + \angle D_2 \quad (2-12)$$

โดยการกำหนดจุดที่ปลายขา P ต้องหาสมการเพื่อแทนขาในตัวแปรดังนี้

กำหนดให้ d_1, d_2 คือ ระยะการกระจัดระหว่าง A_y กับ P_y จากสมการที่ (2-1) และ (2-2)

e_1, e_1 คือ ระยะการกระจัดระหว่าง A_x กับ P_x จากสมการที่ (2-3) และ (2-4)

b_1, b_2 คือ ระยะของด้านของสามเหลี่ยมจากสมการที่ (2-5) และ (2-6)

$\angle A_1, \angle A_2$ คือ องศาระหว่าง C_1, C_2 และ b_1, b_2 จากสมการที่ (2-7) และ (2-8)

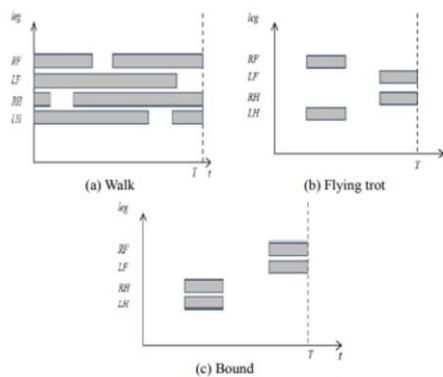
$\angle D_1, \angle D_2$ คือ องศาระหว่าง g และ b_1, b_2 จากสมการที่ (2-9) และ (2-10)

$\angle S_1, \angle S_2$ คือ องศาสำหรับการควบคุมแกนมอเตอร์จากสมการที่ (2-11)

และ (2-12)

2.2 ท่าเดินทั่วไปของหุ่นยนต์เดินสี่ขา

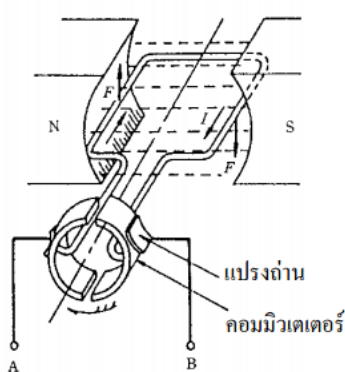
ลักษณะท่าเดินทั่วไปของหุ่นยนต์เดินสี่ขา ได้แก่ ท่าเดิน ท่าวิ่งเหยาะ ๆ มีขารองรับสามหรือสี่ขาพร้อม ๆ กันกับการเดิน ข้อดีของการเดินคือการบรรเทา และเดินบนถนนที่ขรุขระ และ ข้อเสียคือความเร็วต่ำ ท่าวิ่งเหยาะ ๆ เป็นขาในแนวทแยงสองคู่ที่ยืน และแกว่งไปมา มีลักษณะไดนามิก และการทรงตัวที่ดี ท่าวิ่งเหยาะ ๆ คือ มีระยะกลางอากาศที่มีสี่ขาเร็วกว่า ขาหน้าทั้งสองข้าง และขาหลังทั้งสองสลับกันยืน และแกว่งไปตามท่าเดิน และยังมีขั้นตอนทางอากาศที่มีสี่ขา ดังภาพที่ 2-3 (D. Ruina, 2019)



ภาพที่ 2-3 แสดงขาที่กำลังก้าวในรูปแบบต่าง ๆ (D. Ruina, 2019)

2.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

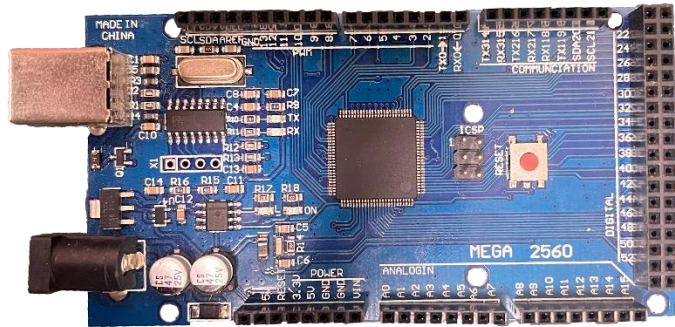
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นพลังงานกล โดยใช้หลักการของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขดลวดอาร์เมเจอร์ เมื่อขดลวดอาร์เมเจอร์หมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์เกิดแรงเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์อีกครั้ง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของตัวอาร์เมเจอร์สร้างสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ขดลวดอาร์เมเจอร์อีกครั้ง กระบวนการนี้เกิดขึ้นซ้ำ ๆ กัน ทำให้โรเตอร์หมุนอย่างต่อเนื่องสรุปได้ว่ามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำงานโดยการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงบิดบนขดลวดอาร์เมเจอร์ แรงบิดนี้ทำให้โรเตอร์หมุนไปเรื่อย ๆ ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 การเกิดสนามแม่เหล็กที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ (lenergyguru, 2015)

2.4 อุปกรณ์สำหรับการควบคุมมอเตอร์ของหุ่นยนต์

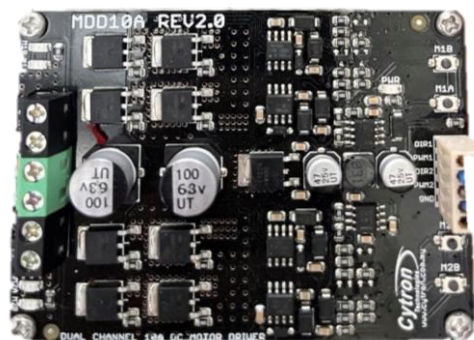
2.4.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นอุปกรณ์สำหรับการควบคุมตำแหน่งของแกนมอเตอร์ของหุ่นยนต์ และรับค่าจากเซ็นเซอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เปรียบเสมือนคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ฝังไว้ในอุปกรณ์ต่าง ๆ ทำงานตาม โปรแกรมหรืออัลกอริทึมที่เขียนไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 2-5 อาดูโน เมกา Arduino MEGA

จากภาพที่ 2-5 แสดงถึง อาดูโน เมกาที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีอินพุตเอาต์พุตดิจิทัล 54 Ch ใช้เป็นเอาต์พุตแบบพีดับเบิลยูเอ็ม ได้มี 14 ช่องสัญญาณ แอนะล็อกอินพุต 16 Ch มีทำงานที่ความถี่ 16 MHz สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยสายเคเบิลยูเอสบีเพื่อเริ่มต้นใช้งาน และมีปุ่มรีเซ็ต

2.4.2 บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์



ภาพที่ 2-6 บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ MDD10A

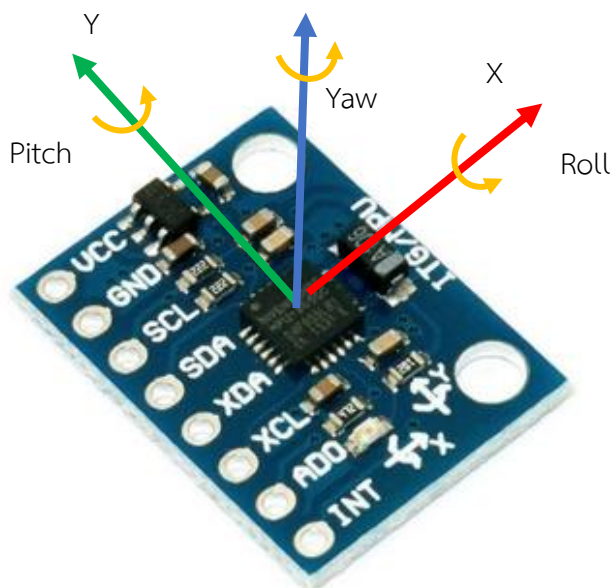
จากภาพที่ 2-6 แสดงถึง บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ ที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์กระแสตรง ยกตัวอย่างการใช้งานบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์

รุ่น MDD10A เป็นบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ที่สามารถรองรับมอเตอร์ที่ใช้แรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 30 V กระแสคงที่สูงสุด 10 A กระแสสูงสุด 30 A สามารถควบคุมมอเตอร์พร้อมกัน 2 ตัว สามารถใช้สัญญาณพีดีบีแอลยูเอ็มในการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์

2.5 เซ็นเซอร์

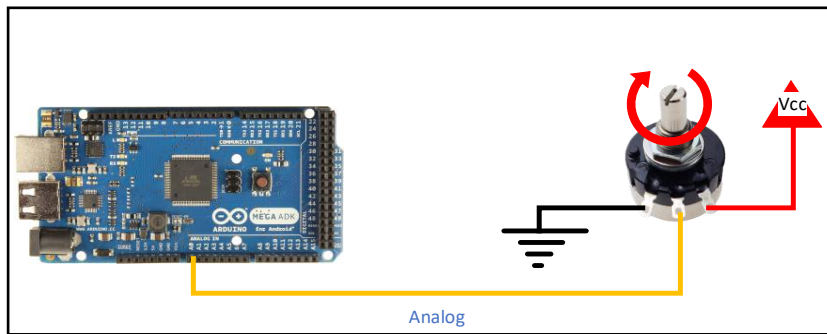
เซ็นเซอร์ คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของสิ่งต่าง ๆ แล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้า เช่น การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งองศาของมอเตอร์ ทิศทางของตัวหุ่นยนต์ ยกตัวอย่างเซ็นเซอร์ ตัวต้านทานปรับค่าได้ และเซ็นเซอร์ไจโรสโคป

2.5.1 เซ็นเซอร์ ไจโรสโคป เป็นเซ็นเซอร์ที่ทำงานโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกในการตรวจจับทิศทาง โดยอาศัยโรเตอร์ ที่ถูกตรึงเอาไว้ในกรอบเซ็นเซอร์ ตัวโรเตอร์สามารถขยับได้เมื่อมีแรงมากระทำเมื่อตัวโรเตอร์ "แตะ" กับเซ็นเซอร์ที่อยู่ตามกรอบ สามารถนำค่าข้อมูลที่ได้ไปคำนวณออกมาเป็นผลลัพธ์ข้อมูลทิศทางที่อุปกรณ์เคลื่อนที่ได้ การตรวจจับข้อมูลของเซ็นเซอร์ไจโรวัดจากอัตราเชิงมุม 3 ประเภทโดยขึ้นอยู่กับทิศทาง ประกอบไปด้วย ค่า Roll คือ มุมที่หมุนรอบแกน Y ค่า Pitch คือ มุมที่หมุนรอบแกน X ค่า Yaw คือ มุมที่หมุนรอบแกน Z ดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 เซ็นเซอร์ไจโรสโคป GY-521 MPU-6050

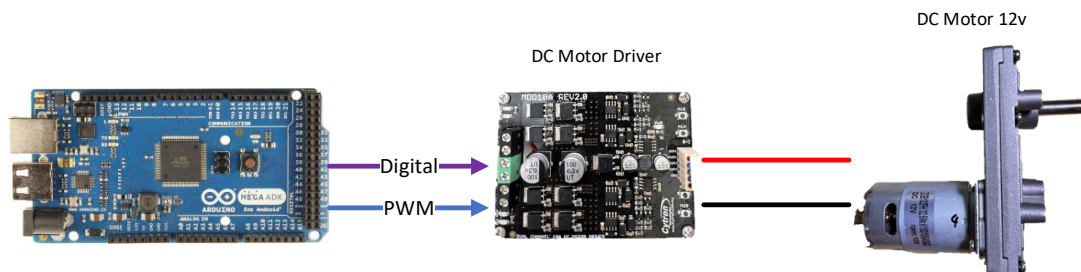
2.5.2 ตัวต้านทานปรับค่าได้ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งที่ใช้ปรับค่าความต้านทานไฟฟ้าได้ ประกอบด้วยหน้าสัมผัสเป็นองค์ประกอบที่ทำหน้าที่เลื่อนไปตามตัวต้านทาน โดยตำแหน่งของหน้าสัมผัสกำหนดค่าความต้านทานของตัวต้านทาน แกนหมุน และลูกบิดดังภาพที่ 2-8 แสดงให้เห็นการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ และตัวต้านทานปรับค่าได้



ภาพที่ 2-8 ตัวต้านทานปรับค่าได้กับไมโครคอนโทรลเลอร์

2.6 หลักการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมมอเตอร์

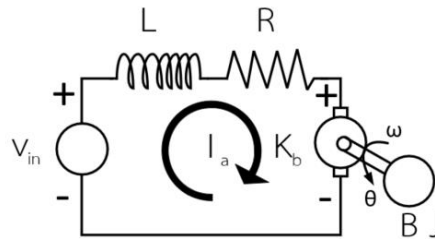
เป็นการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมทิศทาง และความเร็วของมอเตอร์ผ่านบอร์ดขับกระแส มอเตอร์ด้วยสัญญาณดิจิทัล และสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็มไปที่บอร์ดขับกระแสเมื่อเชื่อมต่อบอร์ดขับกระแสมอเตอร์เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือเขียนโปรแกรมควบคุมมอเตอร์ โปรแกรมควบคุมมอเตอร์ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ โดยกำหนดทิศทาง การหมุน และความเร็วของมอเตอร์ดังภาพที่ 2-9 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ และสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็มไปที่บอร์ดไดรฟ์



ภาพที่ 2-9 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ และสัญญาณพีดีบีเบิลยูเอ็มไปที่บอร์ดไดรฟ์

2.7 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

กำหนดให้ K_t	คือ	ค่าคงที่แรงบิดทางไฟฟ้า (Nm/A)
R_a	คือ	ค่าความต้านทาน (Ω)
I_a	คือ	กระแสไฟฟ้าในมอเตอร์ (A)
L_a	คือ	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (H)
J_m	คือ	โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (kgm^2)
D_m	คือ	แรงเสียดทาน (Nm)
K_b	คือ	ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับ (Vrad/s)
ω	คือ	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)
θ	คือ	ระยะทางเชิงมุม (rad)



ภาพที่ 2-10 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากภาพที่ 2-10 คือ วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงให้เห็นถึงต่าง ๆ ในวงจรเพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับแกนหมุนของมอเตอร์

สมการทางไฟฟ้าของมอเตอร์สามารถหาได้จากกฎแรงดันไฟฟ้าเคอร์ชอฟฟ์ (KVL)

ดังสมการที่ (2-13)

$$V_{in} - (R_a I_a) + \left(L_a \frac{di}{dt} \right) + (K_b \omega) = 0 \quad (2-13)$$

เมื่อแปลงลาปลาซได้สมการที่ (2-14)

$$V(s) - R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) + K_b \omega(s) = 0 \quad (2-14)$$

จากสมการที่ (2-16) แปลงลาปลาซของวงจรไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (2-15)

$$V(s) - K_b \omega(s) = (R_a + L_a s) I(s) \quad (2-15)$$

ส่วนของสมการทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถหาได้จากกฎที่สองของนิวตัน

$$\sum \tau = J_m \dot{\omega} \quad (2-16)$$

กำหนดให้ผลรวมแรงบิดของมอเตอร์เป็นผลรวมจากแรงบิดที่สร้างโดยมอเตอร์ τ_m และแรงบิดเสียดทานในมอเตอร์ τ_F ดังสมการที่ (2-17)

$$\begin{aligned} \sum \tau &= \tau_m - \tau_F \\ \tau_F &= D_m \omega \\ \tau_m &= K_t I_a \end{aligned} \tag{2-17}$$

ดังนั้นสมการทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังสมการที่ (2-18)

$$K_t I_a s = J_m \omega + D_m \omega \tag{2-18}$$

การแปลงลาปลาซทางกลของมอเตอร์ไฟฟ้าได้ดังสมการที่ (2-19)

$$I_a s = \frac{1}{k_t} \omega(s) (J_m s + D_m) \tag{2-19}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความเร็วเชิงมุมกับแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้างี้ดังสมการที่ (2-20)

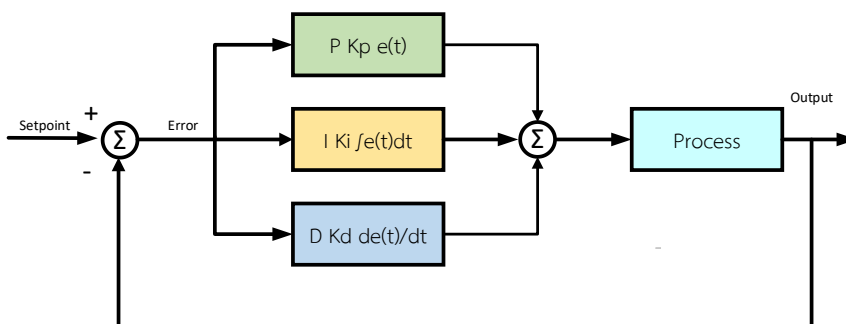
$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{K_t K_b s + (J_m s + D_m)(R_a + L_a s)} \tag{2-20}$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความเร็วเชิงมุมกับแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้างี้ดังสมการที่ (2-21)

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \left(\frac{K_t}{K_t K_b s + (J_m s + D_m)(R_a + L_a s)} \right) \left(\frac{1}{s} \right) \tag{2-21}$$

2.8 ระบบควบคุมตำแหน่งด้วยตัวควบคุมพีไอดี

ระบบควบคุมตำแหน่งด้วย พีไอดี เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้ค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งปัจจุบัน และตำแหน่งที่ต้องการเป็นตัวควบคุมสัญญาณขาเข้าเพื่อปรับตำแหน่งของวัตถุให้ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ต้องการมากที่สุด โดยระบบประกอบด้วยสามองค์ประกอบหลัก ได้แก่ ค่าสัดส่วน ค่าปริพันธ์ และค่าอนุพันธ์ดังภาพที่ 2-11 ที่แสดงให้เห็นถึงระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดี



ภาพที่ 2-11 ระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดี

ตัวควบคุมแบบพีไอดี เป็นการรวมตัวควบคุมแบบสัดส่วน แบบปริพันธ์ และแบบอนุพันธ์เข้าด้วยกันการทำงานของระบบควบคุมแบบพีไอดีมีสมการดังนี้ (2-22)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-22)$$

กำหนดให้ $u(t)$ คือ ค่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุม

K_p คือ ค่าตัวแปรเกนพีของพีไอดี

K_i คือ ค่าตัวแปรเกนไอของพีไอดี

K_d คือ ค่าตัวแปรเกนดีของพีไอดี

$e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาด ณ เวลา t

ตัวควบคุมแบบสัดส่วน การควบคุมแบบสัดส่วน ใช้ค่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมแปรผันตามค่าความผิดพลาด ทำงานของตัวควบคุมแบบสัดส่วนมีสมการดังนี้ (2-23)

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2-23)$$

ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ การควบคุมแบบปริพันธ์ทำงานด้วยความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็นแบบสัดส่วนกับค่าสัญญาณของค่าความผิดพลาด ดังสมการที่ (2-24)

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2-24)$$

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ การควบคุมแบบอนุพันธ์ทำงานโดยการปรับค่าสัญญาณการควบคุมให้แปรผันตรงตามความเร็วในการเปลี่ยนค่าความผิดพลาด การทำงานของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์มีสมการดังนี้ (2-25)

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-25)$$

2.9 ดัชนีชี้วัดสมรรถนะของตัวควบคุม

ดัชนีชี้วัดสมรรถนะของตัวควบคุม คือ การนำค่าความผิดพลาดที่เปลี่ยนตามเวลามาทำการวิเคราะห์เพื่อสามารถประเมินได้ว่าระบบมีสมรรถนะแตกต่างกันอย่างไรระหว่างรูปแบบการก้าวเดิน และวิ่งเหยาะ ๆ ดัชนีชี้วัดสมรรถนะมีดังนี้

ISE (Integral Square Error) คือ การนับผลรวมพื้นที่ใต้กราฟของความคลาดเคลื่อน กำลังสองตลอดช่วงเวลาทั้งหมดของกระบวนการ หรือการทดลอง ดัชนีชี้วัดสมรรถนะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2-26)

$$ISE = \int_0^t e^2(t) dt \quad (2-26)$$

กำหนดให้ $e^2(t)$ คือ ค่ากำลังสองของค่าความคลาดเคลื่อน

IAE (integral absolute error) คือ การนำค่าความคลาดเคลื่อนสะสมที่มีการนับผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ตลอดช่วงเวลาที่กำหนดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2-27)

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (2-27)$$

กำหนดให้ $|e(t)|$ คือ ค่าสัมบูรณ์ของค่าความคลาดเคลื่อน

ITAE (Integral Time Absolute Error) คือ การนำค่าความคลาดเคลื่อนสะสมที่มีการนับผลรวมของค่าความคลาดเคลื่อนแบบสัมบูรณ์ ที่คูณด้วยเวลาตลอดช่วงเวลาที่กำหนดสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2-28)

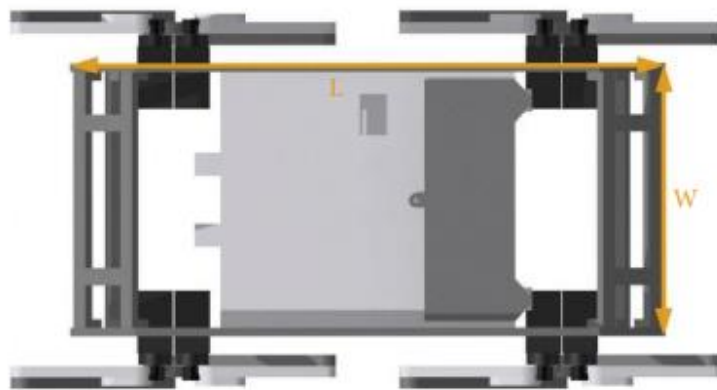
$$ITAE = \int_0^t t \cdot |e(t)| dt \quad (2-28)$$

กำหนดให้ $|e(t)|$ คือ ค่าสัมบูรณ์ค่าความคลาดเคลื่อนและเวลา

t คือ เวลา (time)

2.10 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

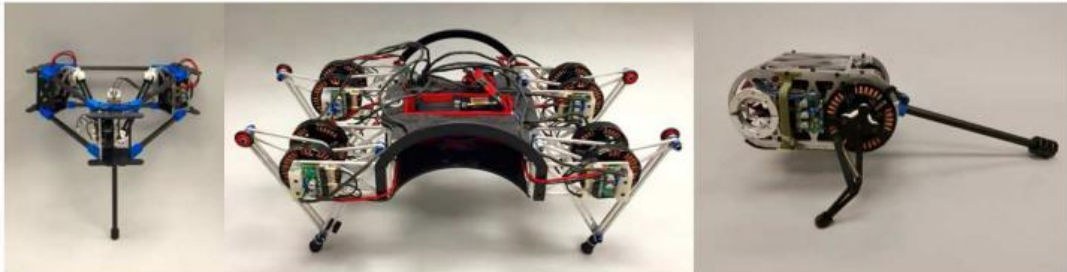
2.10.1 งานวิจัยที่ 1 งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์เดินสี่ขา โดยใช้วัสดุ พีแอลเอ ขึ้นเป็นโครงสร้างด้วยวิธีพิมพ์สามมิติ แนวคิดในการออกแบบต้องการให้มีน้ำหนักน้อยที่สุด และใช้กลไกห้าชิ้นต่อโยงเป็นส่วนของเขา มีการวิเคราะห์จลนศาสตร์ของขาของโคไซน์ และมีการออกแบบการก้าวเดินด้วยรูปแบบไซคลอยด์แสดงดังภาพที่ 2-12 ลักษณะของแบบสามมิติของหุ่นยนต์เดินสี่ขา (Lu Ming, 2022)



ภาพที่ 2-12 มุมมองด้านบนของหุ่นยนต์ 4 เท้า (Lu Ming, 2022)

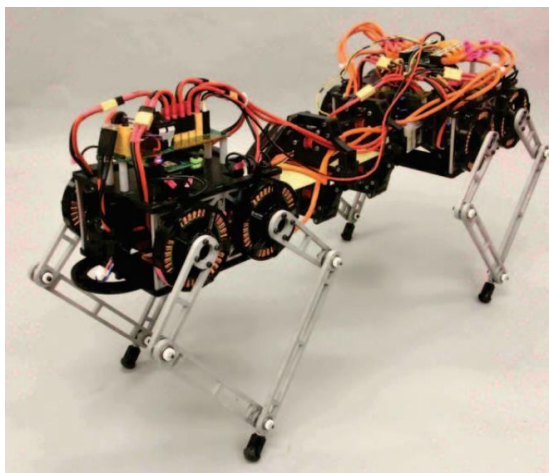
2.10.2 งานวิจัยที่ 2 งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการออกแบบหุ่นยนต์แบบมีขา โดยใช้ตัวส่งกำลังแบบขับเคลื่อนที่มีประสิทธิภาพทางกล แบนด์วิดท์หรือปริมาณการรับส่งข้อมูลในการสั่งงานสูง และกำลังเฉพาะที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบหุ่นยนต์คล้ายสัตว์ เช่น หุ่นยนต์สี่ขา

Minitaur แสดงดังภาพที่ 2-13 อุปกรณ์ทำงานแบบ DD ช่วยให้หุ่นยนต์สามารถวิ่งแบบระบบพลวัตและกระโดดได้ (G. Kenneally, 2016)



ภาพที่ 2-13 Delta Hopper (ซ้าย), Minitaur (กลาง) และ Jerboa (ขวา)
(G. Kenneally, 2016)

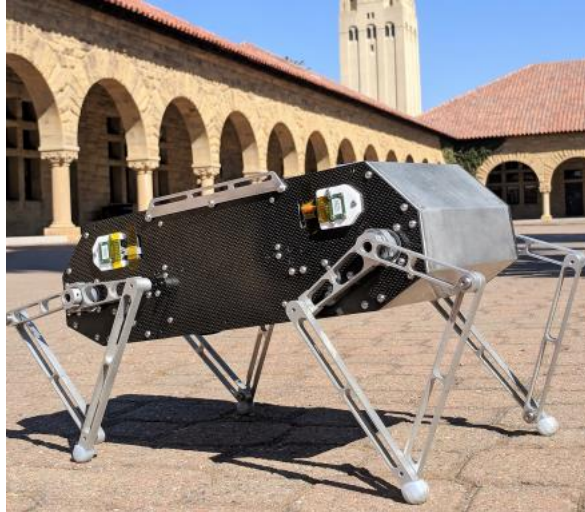
2.10.3 งานวิจัยที่ 3 งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขาแบบกลไกห้าชิ้นต่อโยง โดยมีข้อต่อทำหน้าที่คล้ายกระดูกสันหลังที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์สามารถช่วยให้หุ่นยนต์สี่ขาสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพแม้ในสภาพแวดล้อมที่เข้าถึงยาก อาจเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานหุ่นยนต์ในภารกิจต่าง ๆ เช่น การค้นหาและกู้ภัย การขนส่งสินค้า และบริการและการสำรวจพื้นที่ ดังภาพที่ 2-14 ที่แสดงถึงหุ่นยนต์ทำให้มอเตอร์สามารถเอียงกระดูกสันหลัง



ภาพที่ 2-14 หุ่นยนต์ทำให้มอเตอร์สามารถเอียงกระดูกสันหลัง (J. Duperret, 2017)

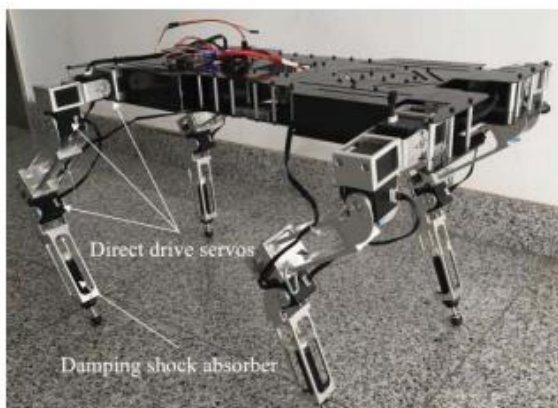
2.10.4 งานวิจัยที่ 4 งานวิจัยนี้นำเสนอต้นแบบให้เป็นโอเพนซอร์สแก่ผู้ที่สนใจด้านหุ่นยนต์แบบเดินสี่ขาแสดงดังภาพที่ 2-15 โดยใช้กลไกแบบห้าชิ้นต่อโยงเป็นส่วนของเขา ต้นแบบนี้มอเตอร์ไร้แปรงถ่านส่งถ่ายกำลังผ่านตัวขับเคลื่อนสายพานเพื่อเพิ่มแรงบิด และใช้เฟืองสายพานที่มีฟันหลายซี่เพื่อลด

ภาระของฟัน ทำให้สามารถใช้วัสดุพลาสติกน้ำหนักเบาได้ ตัวประมวลใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Teensy 3.5 คำนวณวิถีของขา และส่งคำสั่งตำแหน่งขาไปยังตัวควบคุมมอเตอร์ (N. Kau, 2019)



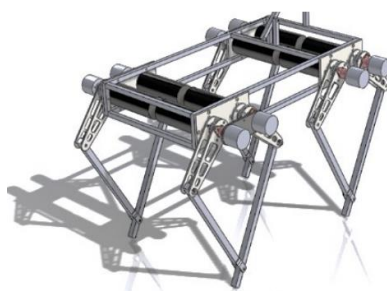
ภาพที่ 2-15 Stanford Doggo: โอเพ่นซอร์ส กิ้งไดเร็กต์ไดรฟ์ หุ่นยนต์ 4 เท้า
(N. Kau, 2019)

2.10.5 งานวิจัยที่ 5 งานนี้นำเสนอต้นแบบหุ่นยนต์เดินสี่ขาแบบใหม่ โดยมีแนวการออกแบบให้มีต้นทุน และใช้พลังงานต่ำ และใช้เซอร์โวไดรฟ์โดยตรง ขาแต่ละข้างใช้กลไกแบบสามองศาอิสระ แสดงดังภาพที่ 2-16 และใช้อัลกอริทึมการเดินเหยาะ ๆ เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเดินได้ ในงานวิจัยนี้มีแนวความคิดการออกแบบรอบการเกิดข้อผิดพลาดสำหรับหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขา หากมีโครงสร้างขาที่เสียหาย หรือมอเตอร์มีปัญหา หรือขาข้างหนึ่งหัก การเดินของหุ่นยนต์เปลี่ยนเป็นลักษณะการเดินแบบสามขาด้วยวิธีเตะ และสวิง ระบบฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์สี่ขาประกอบด้วยหน่วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และเซ็นเซอร์วัดแรงเฉื่อย (Y. Zhang, 2021)



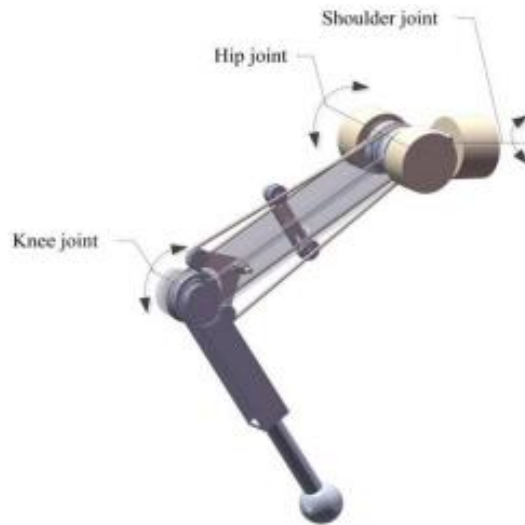
ภาพที่ 2-16 ต้นแบบของหุ่นยนต์ 4 เท้า (Y. Zhang, 2021)

2.10.6 งานวิจัยที่ 6 งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขา มีการจำลองการเคลื่อนไหว ทดสอบแสดงดังภาพที่ 2-17 และสรุปการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขา ในโปรแกรมจำลองสามมิติ เพื่อเป็นสื่อการสอนในหลักสูตรวิทยาการหุ่นยนต์อุตสาหกรรม และการพัฒนาโปรแกรม งานวิจัยได้สรุปการดำเนินงานห้าขั้นตอน มีดังนี้ การออกแบบโครงสร้าง การวิเคราะห์จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ การจำลองการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ การใช้โปรแกรมเพื่อจำลองการเคลื่อนไหวเป็นภาพ 3 มิติ และใช้หุ่นยนต์เดินแบบสี่ขาเป็นสื่อการสอน (U. Keamorakot, 2021)



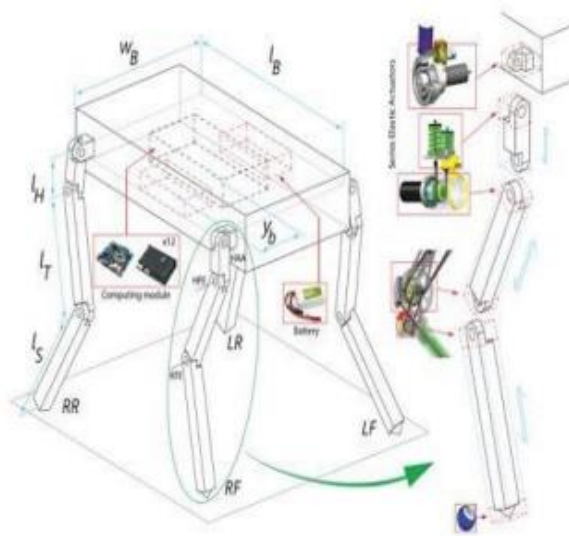
ภาพที่ 2-17 การออกแบบหุ่นยนต์ 1 ตัว (U. Keamorakot, 2021)

2.10.7 งานวิจัยที่ 7 นี้นำเสนอการออกแบบส่วนขาของหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขา โดยติดตั้งส่วนที่ยึดหุ่นพร้อมกลไกการส่งมัตต์ด้วยเชือกคู่ แสดงดังภาพที่ 2-18 จุดเด่นของการออกแบบส่วนขาด้วยกลไกนี้ คือ เพื่อรับโหลดภาระสูง เพิ่มความสามารถในการข้ามสิ่งกีดขวาง และการดูดซับแรงกระแทกได้ดี (B. Ma, 2021)



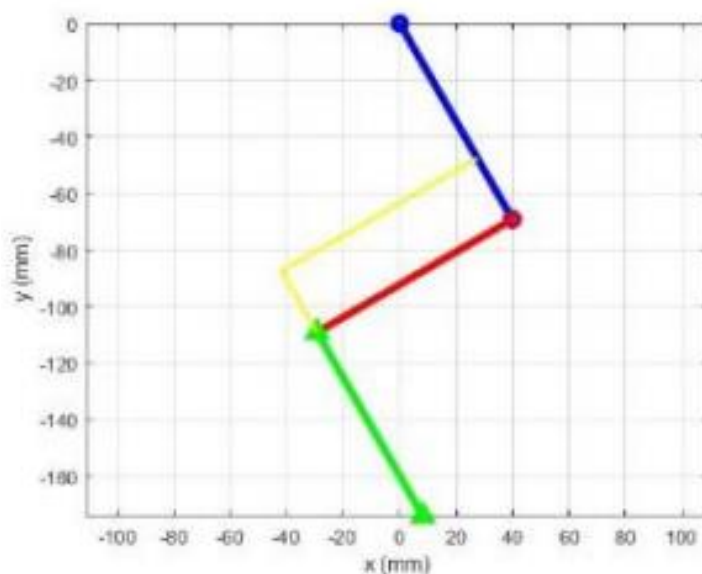
ภาพที่ 2-18 Motion DOF ของขาที่ยึดหุ่นของ Quadruped Robot
(B. Ma, 2021)

2.10.8 งานวิจัยที่ 8 งานวิจัยนี้นำเสนอการใช้สมการจลนศาสตร์ผกผัน และไปข้างหน้าสำหรับ หุ่นยนต์เดินแบบสี่ขา การวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับการวิ่งเหยาะ ๆ สี่ขานำไปสู่ความเข้าใจที่ดีขึ้นเกี่ยวกับ ทำเดินแบบระบบพลวัตอื่น ๆ เช่น การควบ และการเว้นจังหวะ และแนะนำหากเท้ามีพื้นที่สัมผัส กว้างบนพื้น ในขณะที่ยกขาอีกสองข้างขึ้น หุ่นยนต์ที่มีขาสามารถข้ามสิ่งกีดขวางตามความสูงของขา ได้ ในขณะที่หุ่นยนต์ล้อสามารถข้ามสิ่งกีดขวางที่มีความสูงได้เท่ากับ ความสูงครึ่งหนึ่งของรัศมีวงล้อ ดัง ภาพที่ 2-19 แสดงถึงภาพรวมของการออกแบบหุ่นยนต์ 4 เท้า (M. Nandhini, 2017)



ภาพที่ 2-19 การออกแบบหุ่นยนต์ 4 เท้า (M. Nandhini, 2017)

2.10.9 งานวิจัยที่ 9 งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาโมเดลที่พัฒนาหุ่นยนต์สี่เท้าที่ได้รับแรงบันดาลใจจากโครงสร้าง และการเคลื่อนไหวของแมง ในการศึกษาวิจัยระยะแรกนี้ได้จัดทำต้นแบบหุ่นยนต์ที่มีน้ำหนักรวม 1293 g และขนาดกว้างยาวสูง 20.5 x 43.0 x 22.0 cm สมการการเคลื่อนที่ใช้สมการเรขาคณิตเพื่อสร้างแบบจำลอง และกำหนดตำแหน่งของจุดปลายเท้าปลายขา และทำการจำลองจลนศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB แสดงดังภาพที่ 2-20 (M. Ariyanto, 2019)



ภาพที่ 2-20 ตำแหน่งเริ่มต้นของขาหุ่นยนต์แมง DOF (M. Ariyanto, 2019)

2.10.10 งานวิจัยที่ 10 งานวิจัยนี้นำเสนอการใช้ไฮดรอลิกเป็นแอคชูเอเตอร์หลักในหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขา จุดเด่นของอุปกรณ์นี้ คือ มีกำลังมหาศาล และช่วงความเร็วที่หลากหลาย โดยตัวอุปกรณ์ยังมีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบา แต่มีข้อเสีย คือ แรงที่สร้างจากอุปกรณ์ไฮดรอลิกที่สูงเกินไป อาจก่อให้เกิดแรงปฏิกิริยาระหว่างเท้าของหุ่นยนต์กับพื้นผิวดิน รวมถึงทำลายสมดุลของหุ่นยนต์ ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้นำเสนอต้นแบบของหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขาด้วยอุปกรณ์ไฮดรอลิกที่มีขนาดเล็กแสดงดังภาพที่ 2-21 รวมถึงระบบกันสะเทือนส่วนเท้าที่ออกแบบให้รับแรงกระแทก (Jin Tak Kim, 2013)



ภาพที่ 2-21 JINPOONG – หุ่นยนต์เดินแบบสี่ขาด้วยไฮดรอลิก (Jin Tak Kim, 2013)

บทที่ 3

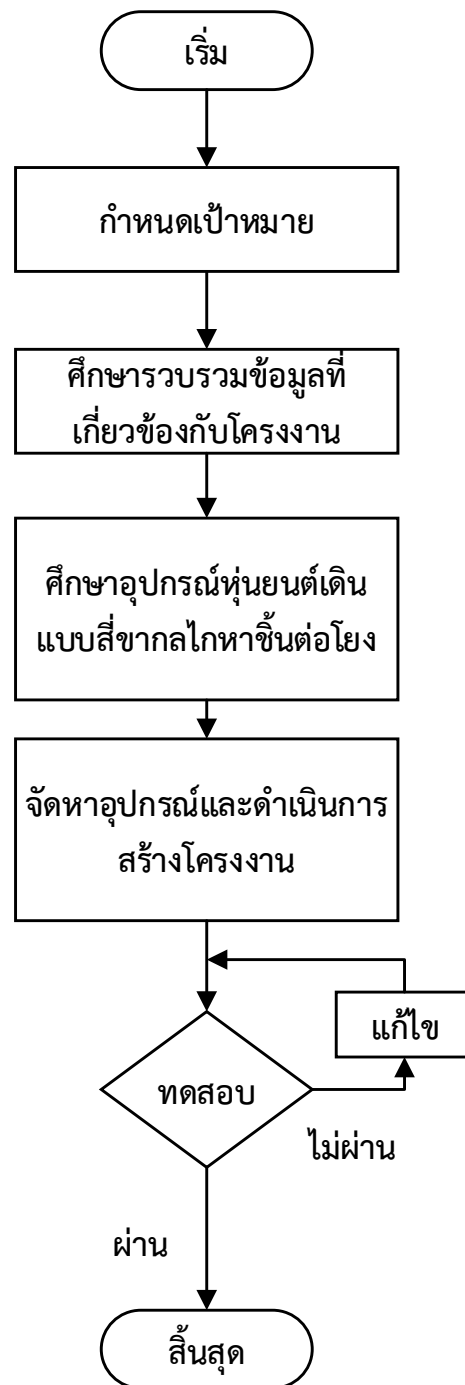
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

ในการดำเนินโครงการ จากบทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางผู้จัดทำโครงการหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง มีแผนการทำงานในการทำโครงการ การออกแบบ และการคำนวณ โดยมีการแบ่งขั้นตอน และวิธีการดำเนินโครงการต่าง ๆ ดังนี้

- 3.1 ไตอะแกรมการจัดทำโครงการ
 - 3.1.1 ไตอะแกรมการดำเนินงาน
 - 3.1.2 ไตอะแกรมการออกแบบชิ้นส่วนทางกล
 - 3.1.3 ไตอะแกรมออกแบบวงจรสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์
- 3.2 การออกแบบหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง
 - 3.2.1 การออกแบบทางกล
 - 3.2.1.1 การคำนวณแรงที่มอเตอร์ต้องรับ
 - 3.2.1.2 การเลือกใช้มอเตอร์
 - 3.2.2 การออกแบบทางไฟฟ้า
 - 3.2.2.1 การเลือกไมโครคอนโทรลเลอร์
 - 3.2.2.2 การเลือกเซ็นเซอร์
- 3.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ทำงานหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง
 - 3.3.1 การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
 - 3.3.2 การทดสอบผลตอบสนองของมอเตอร์แบบลูปเปิด
 - 3.3.3 การทดสอบการทำงานของระบบพีไอดีที่ได้จากการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- 3.4 ไตอะแกรมการทำงานของโปรแกรม

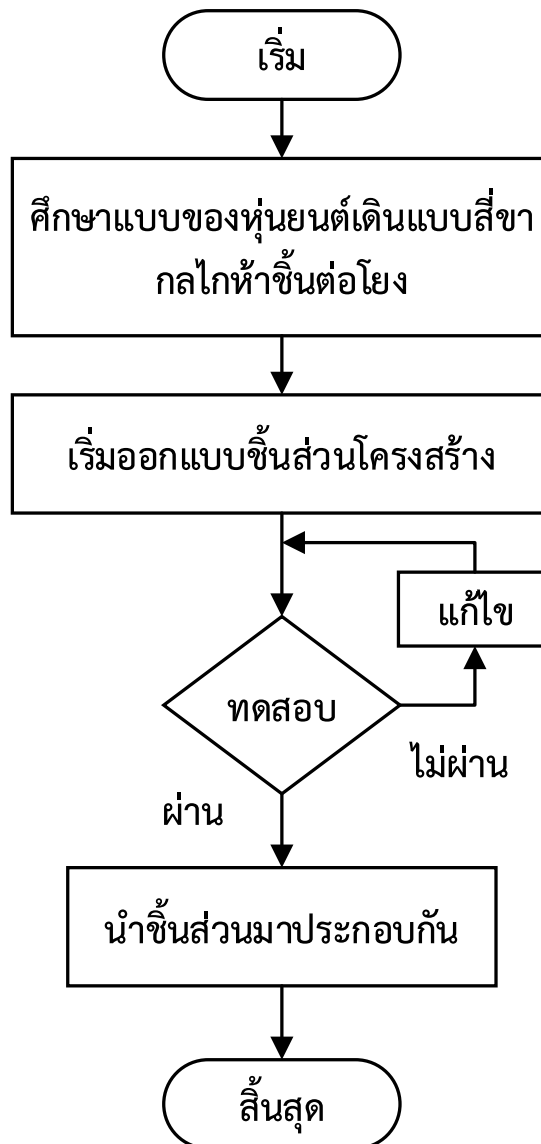
3.1 ไตอะแกรมการดำเนินงาน

3.1.1 ไตอะแกรมการดำเนินงาน เพื่อการดำเนินงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพผู้จัดทำดำเนินงานตามขั้นตอนแผนผังดังภาพที่ 3-1



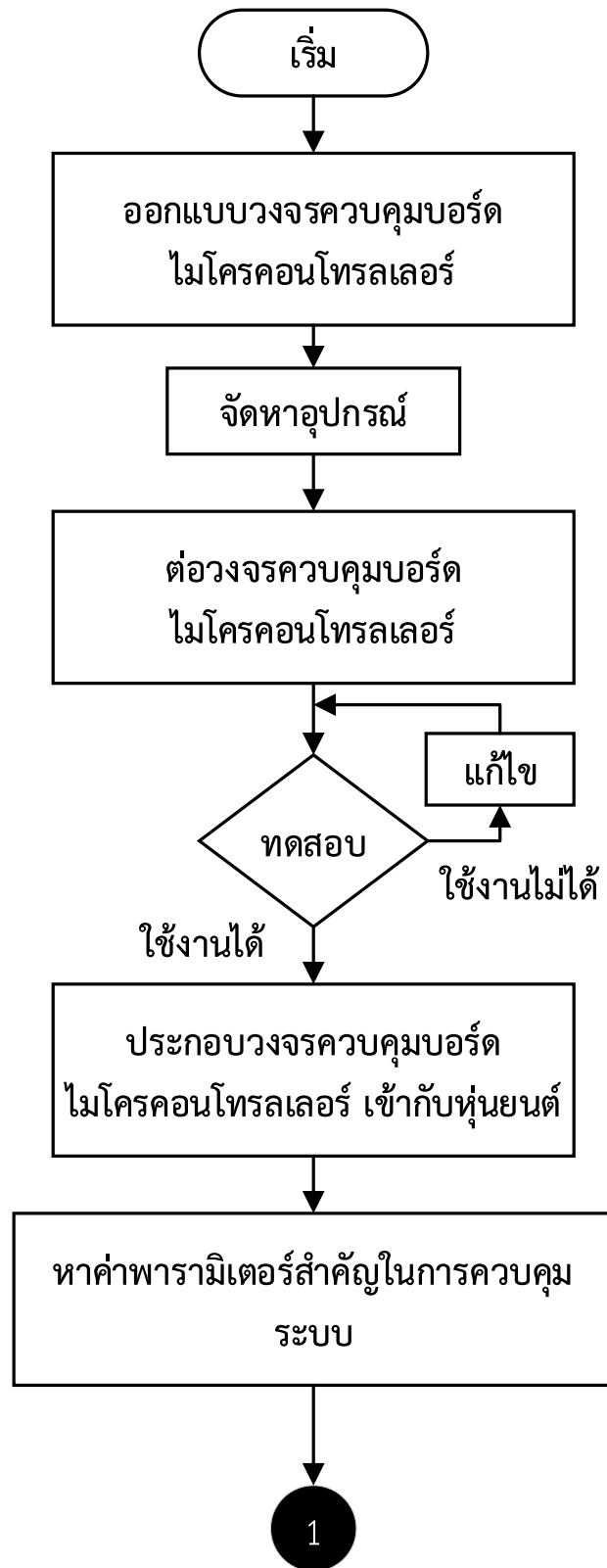
ภาพที่ 3-1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1.2 ไตอะแกรมการออกแบบชิ้นส่วนทางกล เป็นการวางแผนการออกแบบชิ้นส่วนทางกล สำหรับสร้างต้นแบบหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขา ที่ที่แผนงานย่อยประกอบไปด้วย การออกแบบโครงสร้าง การวางมอเตอร์ การออกแบบขาด้วยกลไก ห้าขั้นตอนโยงดังภาพที่ 3-2

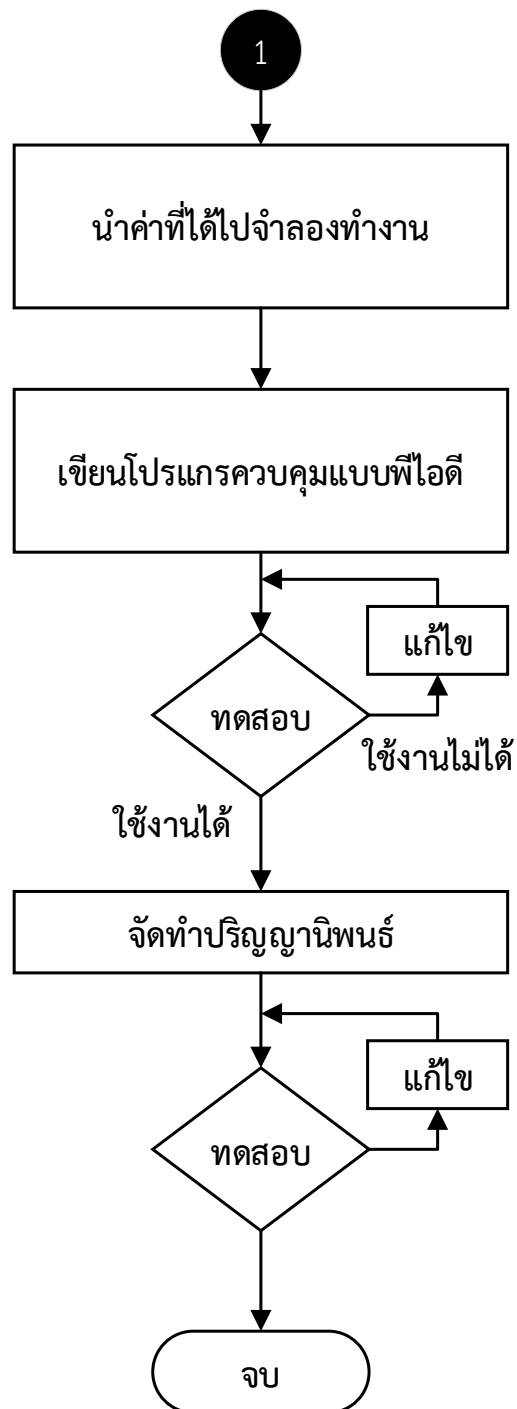


ภาพที่ 3-2 ไตอะแกรมการออกแบบชิ้นส่วนทางกล

3.1.3 ไตอะแกรมออกแบบวงจรสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นการออกแบบวงจรสำหรับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับเชื่อมต่อระหว่างตัวประมวลผลเข้ากับบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง เพื่อใช้ควบคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนขาของหุ่นยนต์ รวมไปถึงการเขียนโปรแกรมควบคุมแบบพีไอดีดังภาพที่ 3-3



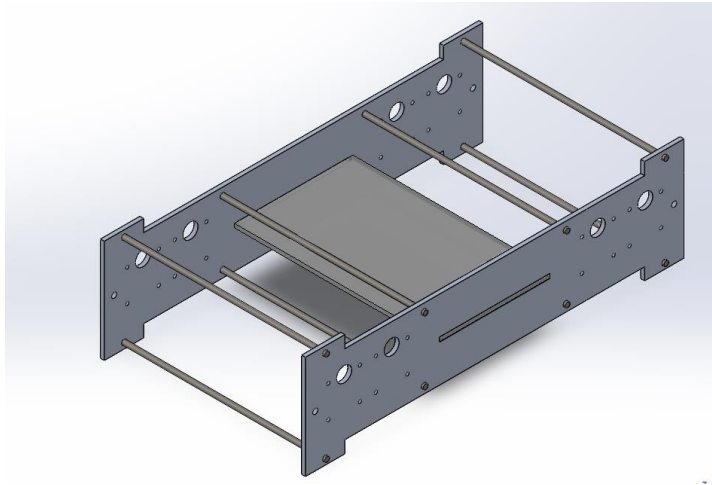
ภาพที่ 3-3 ไดอะแกรมออกแบบวงจรควบคุมบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 3-3 (ต่อ)

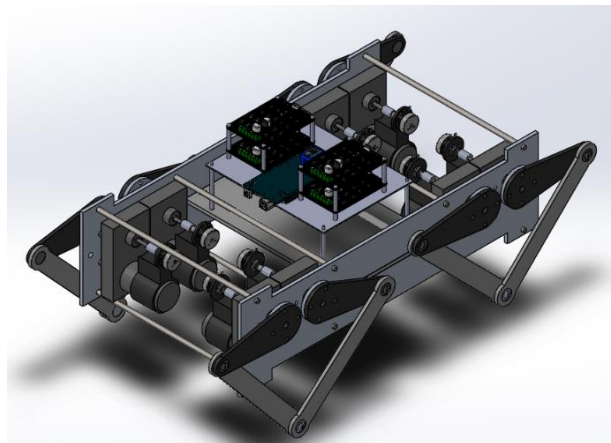
3.2 การออกแบบหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง

3.2.1 การออกแบบทางกล หุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยงผู้จัดทำได้คำนึงถึงน้ำหนักที่มอเตอร์สามารถรับได้ และแรงบิดของมอเตอร์ การเคลื่อนที่ของปลายขาเป็นต้น



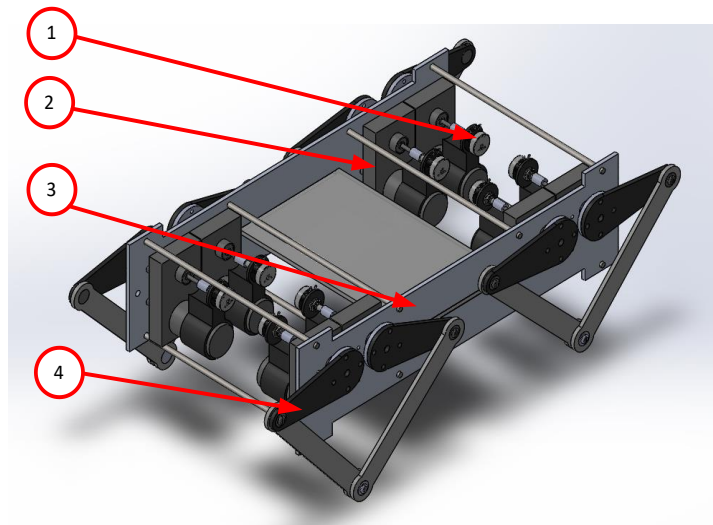
ภาพที่ 3-4 แบบโครงสร้างของตัวหุ่นยนต์

จากภาพที่ 3-4 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของตัวหุ่นยนต์ที่มีแผ่นที่ประกบเพื่อเป็นที่ยึดมอเตอร์ และโครงสร้างของหุ่นยนต์มีน้ำหนักอยู่ที่ประมาณ 1 kg ขนาด 250 mm * 456 mm * 106 mm มอเตอร์ทั้งหมด 8 ตัว น้ำหนักตัวละ ประมาณ 0.5 kg ขนาด 95.5 mm * 60.5 mm * 102.6 mm แรงบิดสูงสุด 20 Kgf.cm หรือ 1.96133 N.m ชิ้นส่วนขา \approx 2.7 kg ขนาด 214 mm * 30 mm * 5 mm ขนาด 112.5 mm * 50 mm * 5 mm น้ำหนักรวมของโครงสร้างของหุ่นยนต์ ประมาณ 7.7 Kg



ภาพที่ 3-5 แบบหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง

จากภาพที่ 3-5 แสดงให้เห็นถึงแบบสามมิติของหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง



ภาพที่ 3-6 แบบโครงสร้างของหุ่นยนต์

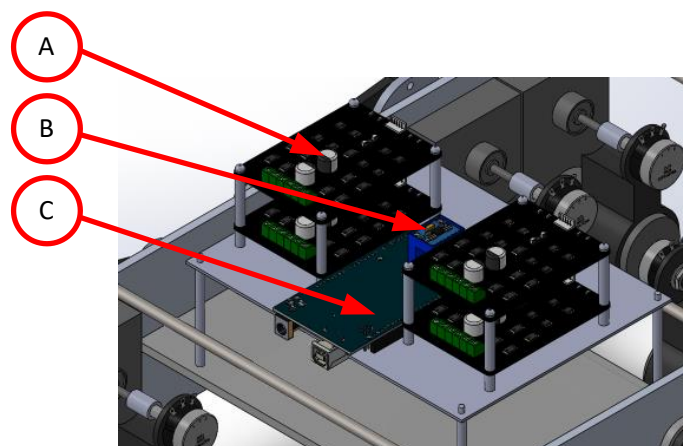
จากภาพที่ 3-6 แสดงให้เห็นส่วนต่าง ๆ ในโครงสร้าง และขาของหุ่นยนต์แบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

หมายเลข 1 คือ ตัวต้านทานปรับค่าได้ที่ติดอยู่กับมอเตอร์เพื่อรับตำแหน่งของมอเตอร์

หมายเลข 2 คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12 V ใช้ขับเคลื่อนขาของหุ่นยนต์

หมายเลข 3 คือ โครงสร้างของตัวหุ่นยนต์ใช้วัสดุเป็นอะคริลิก ความหนา 5 mm

หมายเลข 4 คือ ส่วนขาของหุ่นยนต์ใช้วัสดุเป็นอลูมิเนียม ความหนา 5 mm



ภาพที่ 3-7 อุปกรณ์ควบคุมบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์บนหุ่นยนต์

จากภาพที่ 3-7 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ควบคุมบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์บนหุ่นยนต์แบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ ดังนี้

A คือ บอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ สำหรับจ่ายกระแสไฟเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์

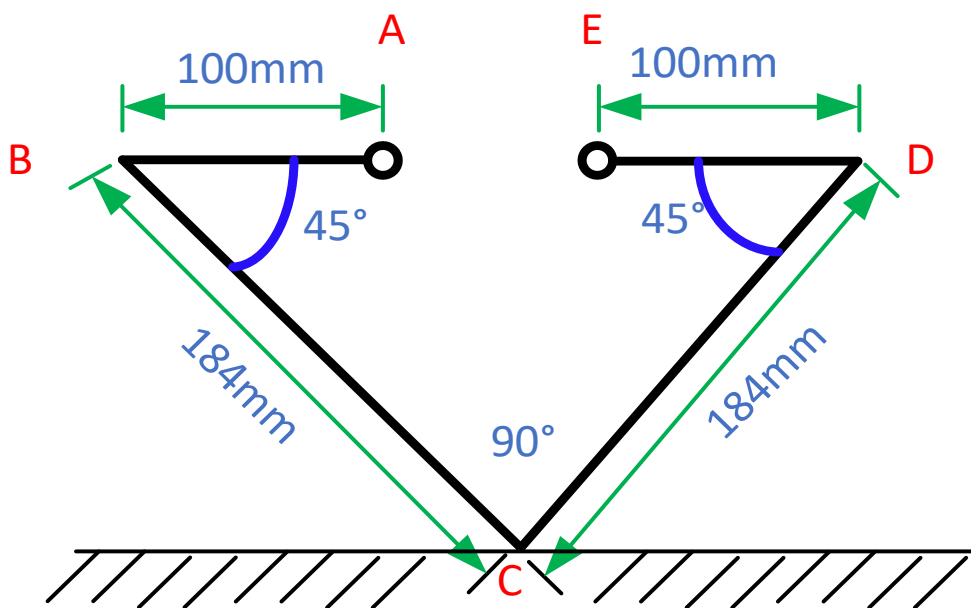
B คือ เซ็นเซอร์โรเจอร์ เพื่อวัดองศาการเอียงของตัวหุ่นยนต์

C คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ รับค่าจากเซ็นเซอร์

3.2.1.1 การวิเคราะห์แรงบิดที่กระทำต่อมอเตอร์

ขาของหุ่นยนต์มีทั้งหมด 5 ลังค์ และ 5 จุดเชื่อมต่อผู้จัดทำเลือกตำแหน่งที่ลิงค์

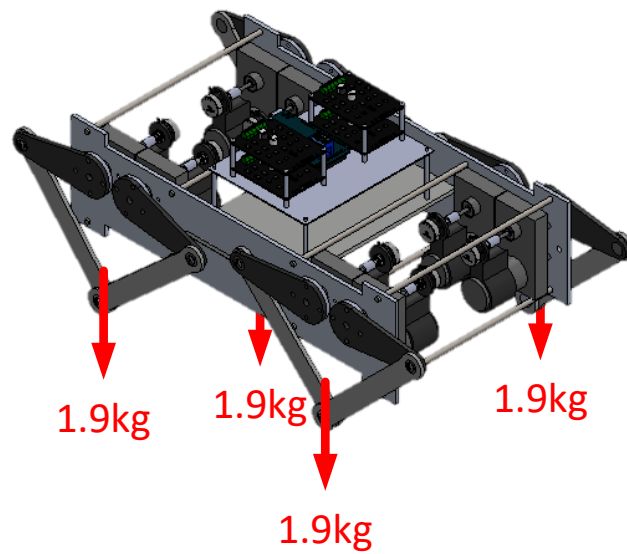
\overline{AB} และ \overline{ED} ที่ระนาบเดียวกับพื้นเป็นตำแหน่งที่มอเตอร์รับภาระสูงสุด



ภาพที่ 3-8 ขนาดของลิงค์ของหุ่นยนต์

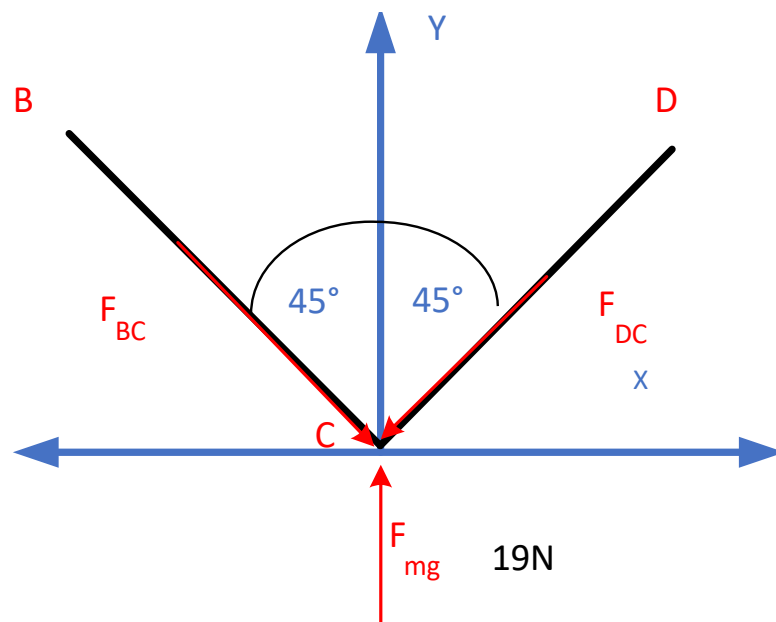
จากภาพที่ 3-8 แสดงให้เห็นถึงขนาดของลิงค์ \overline{AB} , \overline{BC} , \overline{CD} , \overline{ED} , \overline{EA} ของขา มีรายละเอียดดังนี้ \overline{AB} และ \overline{ED} มีขนาด 100 mm \overline{BC} และ \overline{DC} มีขนาด 184 mm และ \overline{EA} มีขนาด 60.2 mm

เมื่อเขียน FBD ขาของหุ่นยนต์พิจารณาให้ขาทั้งสองรับน้ำหนักของตัวหุ่นยนต์ที่แบ่งไปขาละ 1.9 kg ดังภาพที่ 3-8 เมื่อตำแหน่งที่ลิงค์ \overline{AB} และ \overline{ED} ที่ระนาบเดียวกับพื้น ทำให้จุด C ทำมุมที่ 90° หากแบ่งครึ่งได้มุมด้านละ 45° ดังภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 การกระจายน้ำหนักในแต่ละขาของหุ่นยนต์

จากภาพที่ 3-9 น้ำหนักของหุ่นยนต์อยู่ที่ 7.7 kg กระจายไปตามขาของหุ่นยนต์
ข้างละ 1.9 kg ส่งผลให้มีแรงกระทำ ณ จุด C ที่ 19 N



ภาพที่ 3-10 FBD ขาของหุ่นยนต์

จากภาพที่ 3-10 แสดงให้เห็นแรงที่กระทำ ณ จุด C มาจากการกระจาย
น้ำหนักของตัวหุ่นยนต์ การหาแรงที่จุด F_{BC} และ F_{DC} ด้วยสมการที่ (3-1) และ (3-2)

$$+\uparrow \Sigma Fy = 0 \quad (3-1)$$

$$+\uparrow \Sigma Fx = 0 \quad (3-2)$$

ตัวแปร F_{mg} คือ แรงที่กระทำ ณ จุด C

F_{BC} คือ แรงที่กระทำ ณ ก้าน \overline{BC}

F_{DC} คือ แรงที่กระทำ ณ ก้าน \overline{DC}

จากภาพที่ 3-9 แสดงให้เห็นว่า F_{BC} และ F_{DC} ทำมุม 45° จากจุด C เพื่อหาแรง F_{DC} หาได้ตามสมการที่ (3-1)

$$+19N - F_{DC}\sin 45^\circ - F_{BC}\sin 45^\circ = 0 \quad (3-3)$$

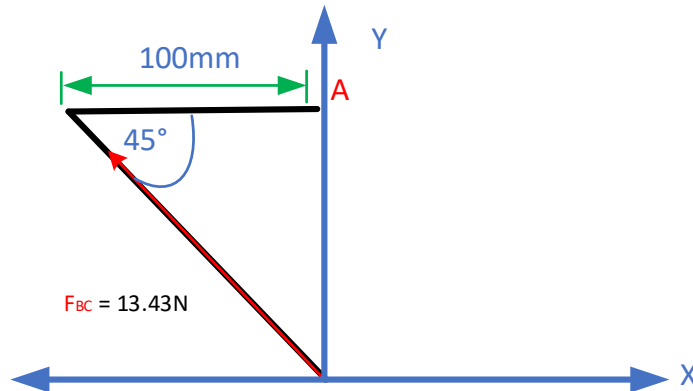
และสมการที่ (3-2) สามารถเขียนได้

$$F_{BC}\cos 45^\circ - F_{DC}\cos 45^\circ = 0 \quad (3-4)$$

จากสมการที่(3-3) และสมการที่(3-4) ได้

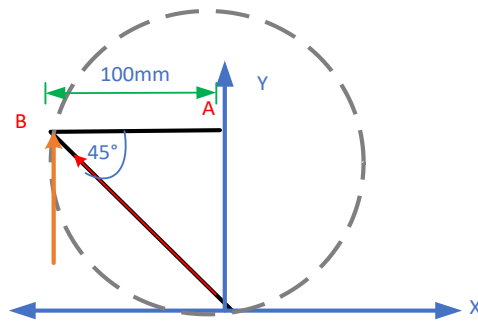
$$F_{BC} = F_{DC} = 13.43 N$$

การคำนวณแรงบิดของมอเตอร์จากสมการ



ภาพที่ 3-11 แรงบิดที่กระทำ ณ จุด B

จากภาพที่ 3-11 แสดงให้เห็นถึงแรง F_{BC} ที่กระทำ ณ จุด B



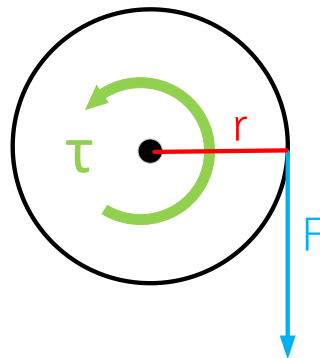
ภาพที่ 3-12 หาแรงบิดที่กระทำที่ก้าน AB

จากภาพที่ 3-12 แรง F_{BC} กระทำเป็นมุมเฉียง 45° ใช้สมการที่ (3-5) เพื่อหาแรงบิดที่กระทำที่ก้าน AB

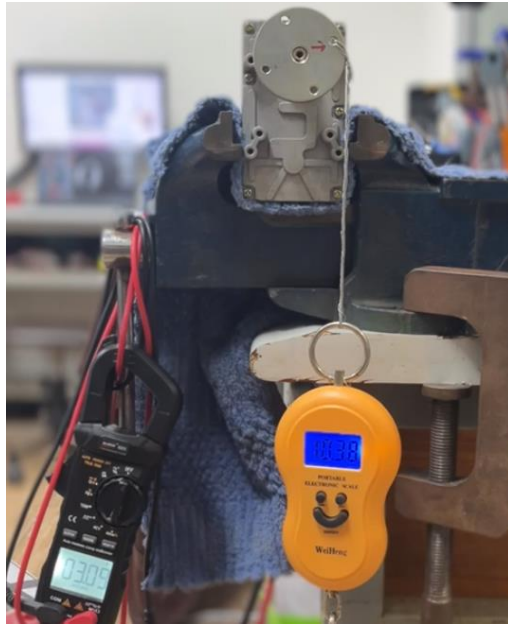
$$\tau = (F_{BC})(\sin 45^\circ) \times r \quad (3-5)$$

$$\tau = 0.949 \text{ Nm}$$

3.2.1.2 การเลือกใช้มอเตอร์ เป็นต้องเลือกมอเตอร์ที่มีแรงบิดมากกว่า 1.424 Nm ในการส่งกำลังของหุ่นยนต์ เพื่อที่ทราบแรงบิดของมอเตอร์ผู้จัดทำมีการคำนวณแรงบิดของมอเตอร์จากการวัดแรงด้วยตาซึ่งจากนั้นทำการคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์ตามภาพที่ 3-13



ภาพที่ 3-13 ไดอะแกรมหาแรงบิดของมอเตอร์



ภาพที่ 3-14 การวัดแรงด้วยตราซิ่ง

จากภาพที่ 3-14 การหาแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงใช้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\tau = F \times r \quad (3-6)$$

โดยกำหนดให้ τ คือ แรงบิดมอเตอร์ มีหน่วยเป็นนิวตันเมตร (Nm)

F คือ น้ำหนักที่มอเตอร์ดึงได้ (Kg)

r คือ ระยะห่างจุดหมุนกับแรงที่ตั้งฉากกับจุดหมุน (m)

จากสมการที่ (3-6) แรงบิดที่ได้ คือ $\tau = 2.452 \text{ N.m}$

จากมอเตอร์ที่เลือกใช้ และแรงบิดที่กระทำต่อมอเตอร์ หาค่าความปลอดภัยได้
ตามสมการดังนี้ (3-7)

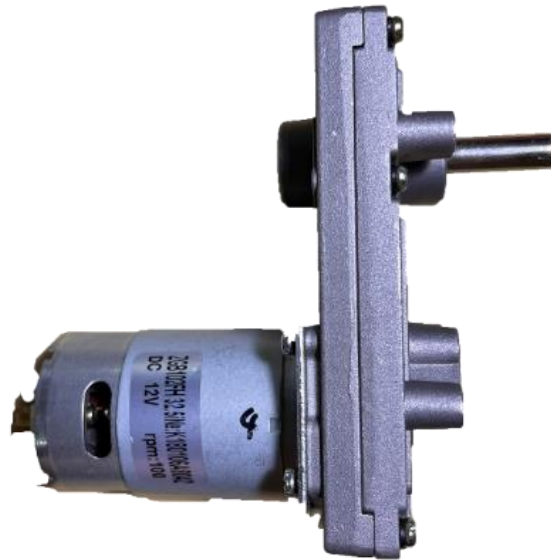
$$\text{Safety Factor} = \frac{\text{Breaking Torque}}{\text{Operating Torque}} \quad (3-7)$$

กำหนดให้ *Safety Factor* คือ ค่าความปลอดภัย

Breaking Torque คือ แรงที่ทำให้มอเตอร์หยุดทำงาน

Operating Torque คือ แรงที่มอเตอร์ต้องทำงานในสภาวะปกติ

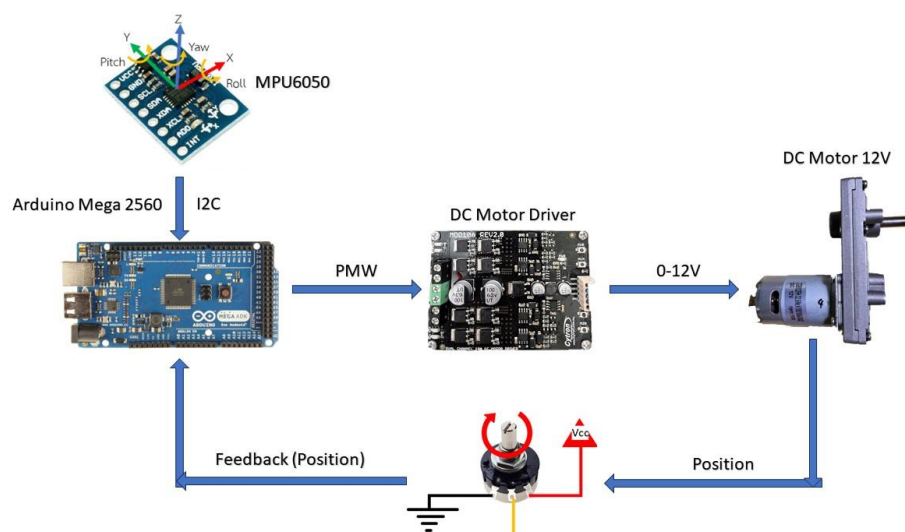
ดังนั้น $\text{Safety Factor} = 2.583$



ภาพที่ 3-15 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12 V

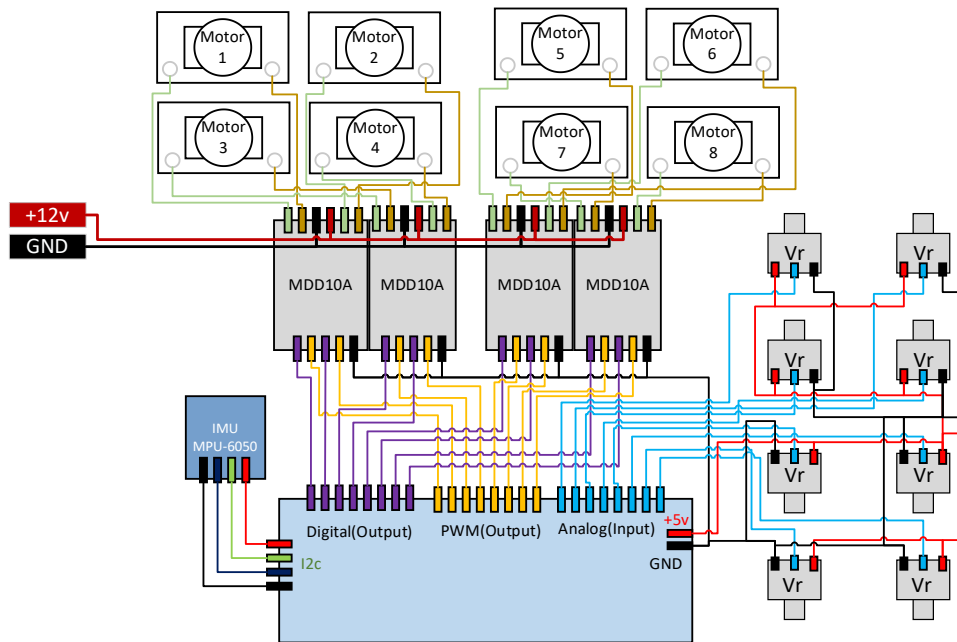
จากภาพที่ 3-15 คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 12 V แรงบิด 2.452 Nm เพียงพอกับการใช้งาน

3.2.2 การออกแบบทางไฟฟ้า สำหรับหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยงค้ำนึ่งถึงการเลือกมอเตอร์ที่ใช้กับหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง และการเขียนโปรแกรมรับค่าจากตัวต้านทานปรับค่าได้เพื่อนำไปควบคุมตำแหน่งแกนของมอเตอร์



ภาพที่ 3-16 อุปกรณ์ และการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ควบคุม

จากภาพที่ 3-16 มีการใช้ Arduino mega 2560 รับตำแหน่งองศาของมอเตอร์ด้วยตัวต้านทานปรับค่าได้ เป็นสัญญาณป้อนกลับไป Arduino mega 2560 หลังจากนั้นทำการคำนวณผ่านตัวควบคุมพีไอดี และส่งสัญญาณ พีดับเบิลยูเอ็มเพื่อไปควบคุมมอเตอร์ และรับค่ามุมเอียงของตัวหุ่นยนต์จากเซ็นเซอร์ไจโรสโคปผ่านการสื่อสารแบบ I2c



ภาพที่ 3-17 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์

จากภาพที่ 3-17 แสดงให้เห็นจำนวนของอุปกรณ์ และการเชื่อมต่อทั้งหมดโดยมีโดยมี ดิจิทัล 8 ช่องสัญญาณ เพื่อควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ใช้ ขาพีดับเบิลยูเอ็ม 8 Ch เพื่อควบคุมความเร็วมอเตอร์ใช้แอนะล็อกอินพุต 8 Ch เพื่ออ่านค่าตัวต้านทานปรับค่าได้และ เซ็นเซอร์ไจโรสโคปผ่านการสื่อสารผ่านสายแบบอนุกรมหรือ I2c

3.2.2.1 การเลือกไมโครคอนโทรลเลอร์ ทางผู้จัดทำต้องการไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่มี ขา อินพุต และเอาต์พุตเพียงพอต่อการใช้งาน และเป็นทีแพร์หลายในตลาด เลือก ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นอาดูโน เมกา 2560 (Arduino MEGA 2560)

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มี 54 ดิจิทัล อินพุต เอาต์พุต
- 14 ขา สามารถใช้เป็น เอาต์พุต แบบ พีดับเบิลยูเอ็ม
- แอนะล็อก อินพุต 16 Ch
- ยูเออาที พอร์ตอนุกรมฮาร์ดแวร์

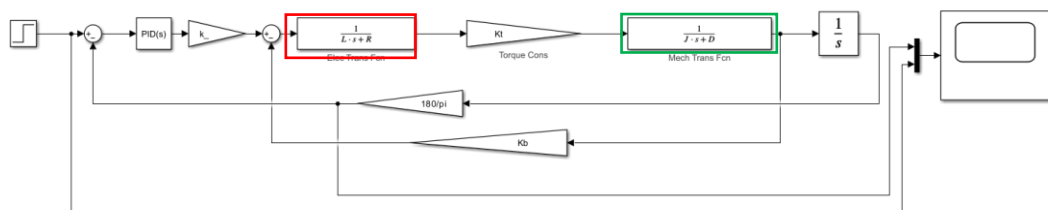
- 4 ขาทำงานที่ความถี่ 16 MHz
- สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยสายเคเบิล ยูเอสบี

3.3.2.2 การเลือกเซ็นเซอร์ ผู้จัดการต้องการวัดองศาการเอียงของหุ่นยนต์เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถรู้ได้ถึงความเอียงของหุ่นยนต์ ผู้จัดทำใช้เซ็นเซอร์ไจโร GY-521 MPU-6050 ในการวัดความเอียงของตัวหุ่นยนต์

- ขนาดยาว 20 mm กว้าง 16 mm
- ชิพ MPU - 6050
- ใช้ไฟเลี้ยง 3 – 5 V
- ช่วงในการวัด + 250 500 1000 2000°/s
- ใช้การเชื่อมต่อแบบ I2c
- ความละเอียด 16 bit

3.3 การหาค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ทำงานหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง

การควบคุมตำแหน่งแกนของมอเตอร์ของหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีผู้จัดทำใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยในการปรับค่าตัวควบคุมที่ประกอบไปด้วย K_p K_i และ K_d ของระบบโดยใช้แบบจำลองของมอเตอร์ดังภาพที่ 3-18



ภาพที่ 3-18 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ความคุมตำแหน่ง

การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนแรกค่าทางไฟฟ้า (กรอบสีแดง) และ ค่าทางกล (กรอบสีเขียวคือ) การหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าประกอบไปด้วย ค่าความต้านทานภายในขดลวด (R) ความเหนี่ยวนำของขดลวด (L) ค่าคงที่แรงบิด (K_t) ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ (J) ค่าแรงเสียดทาน (Dm) และค่าคงที่แรงดันย้อนกลับ (K_b)

การหาค่าความต้านทานหาด้วยวิธีใช้เครื่องมือวัดด้วย UNI-T UT601 LCR Meter เพื่อหาค่าเฉลี่ยโดยทำซ้ำกัน 10 ครั้งดังภาพที่ 3-19 และผลของการวัดตามตารางที่ 3-1



ภาพที่ 3-19 วัดค่าความต้านทาน

ตารางที่ 3-1 ค่าความต้านทาน

ที่	ค่าความต้านทาน (Ω)
1	5.6
2	6.1
3	5.9
4	6.5
5	7
6	6.2
7	6.4
8	6.4
9	6.4
10	6.5
R	6.3

การหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดเป็นการใช้เครื่องมือวัดด้วยเครื่องมือวัดด้วย UNI-T UT601 LCR Meter ตามดังภาพที่ 3-20 และผลของการวัดตามตารางที่ 3-2



ภาพที่ 3-20 วัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด

ตารางที่ 3-2 ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด

ครั้งที่	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด (H)
1	0.00219
2	0.00211
3	0.00218
4	0.00217
5	0.00191
6	0.00214
7	0.00192
8	0.00217
9	0.00218
10	0.00221
H	0.00212

การหาค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถหาได้จากสมการที่ (3-8) ค่าที่ได้จากสมการดังกล่าวอยู่ที่ 0.8175 Nm/A

$$K_t = \frac{\tau_m}{I_a} \quad (3-8)$$

กำหนดให้ K_t คือ แรงบิดทางไฟฟ้า มีหน่วยเป็นนิวตันเมตรต่อแอมป์ (Nm/A)

τ_m คือ แรงบิดของมอเตอร์ มีหน่วยเป็นนิวตันเมตร (Nm)

I_a คือ กระแสมอเตอร์ มีหน่วยเป็นแอมป์ (A)

การหาแรงเสียดทานของมอเตอร์ไฟฟ้า พิจารณาจากค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์และแรงเสียดทานของมอเตอร์ ที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วเชิงมุมหาความคงที่ความเร่งเป็นศูนย์ ดังสมการที่ (3-9) และค่าของแรงเสียดทานในแต่ละความเร็วเชิงมุมในตารางที่ 3-3

สมการค่าแรงเสียดทาน

$$D_m = \frac{k_t I_a}{\omega} \quad (3-9)$$

โดยกำหนดให้ D_m คือ แรงเสียดทาน มีหน่วยเป็นนิวตันเมตร (Nm)

ตารางที่ 3-3 ค่าแรงเสียดทาน

ความเร็วรอบต่อนาที (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	กระแสไฟฟ้า (A)	ค่าคงที่แรงบิด (Nm/A)	แรงเสียดทาน (Nm)
100	10.471	0.18	0.8175	0.0140
90	9.424	0.17	0.8175	0.0147
80	8.377	0.17	0.8175	0.0165
70	7.330	0.16	0.8175	0.0178
60	6.283	0.16	0.8175	0.0208
50	5.235	0.15	0.8175	0.0234
40	4.188	0.15	0.8175	0.0292
30	3.141	0.14	0.8175	0.0364
				0.0216

การหาโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ พิจารณาจากค่าคงที่เวลาของวัสดุภายในมอเตอร์ ณ ที่ทำให้มอเตอร์ทำงานด้วยความเร็วสูงสุด และเปิดวงจรเพื่อ ปิดระบบการทำงานทันทีจนมอเตอร์หยุดนิ่ง จากนั้นเก็บผลการทดลองโดยทำการวัดซ้ำ 10 ครั้งโดยความเร็วที่ต่างกันจากมากไปน้อยตามตารางที่ 3-4 และหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์จากสมการที่ (3-10)

สมการค่าคงที่เวลา

$$t = \frac{J_m}{D_m} \quad (3-10)$$

กำหนดให้ J_m คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมตารางเมตร (kgm^2)

D_m คือ แรงเสียดทาน มีหน่วยเป็นนิวตันเมตร (Nm)

t คือ ค่าคงที่เวลา มีหน่วยเป็น (s)

ตารางที่ 3-4 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์

ความเร็วรอบต่อนาที (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	ค่าคงที่เวลา (s)	แรงเสียดทาน (Nm)	โมเมนต์ความเฉื่อย ของมอเตอร์ (kgm^2)
100	10.471	0.320	0.014	0.0044
90	9.424	0.310	0.014	0.0045
80	8.377	0.264	0.016	0.0043
70	7.330	0.232	0.017	0.0041
60	6.283	0.206	0.020	0.0042
50	5.235	0.153	0.023	0.0035
40	4.188	0.124	0.029	0.0036
30	3.141	0.108	0.036	0.0039
				0.0041

การหาค่าคงที่ของแรงดันย้อนกลับ สามารถหาได้จากความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้าขาเข้ากับแรงดันย้อนกลับของมอเตอร์ และแรงดันตกคร่อมของตัวต้านทานในมอเตอร์ โดยทำการแบ่งการวัดออกตามความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ตามตารางที่ 3-5 เพื่อนำค่าเข้าสู่สมการที่ (3-11)

สมการค่าคงที่ของแรงดันย้อนกลับ

$$K_b = \frac{V_{in} - R_a I_a}{\omega} \quad (3-11)$$

กำหนดให้ K_b คือ ค่าคงที่ของแรงดันย้อนกลับ มีหน่วยเป็น (Vrad/s)

V_{in} คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้า มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

I_a คือ กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมป์แปร์ (A)

R_a คือ ความต้านทาน มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

ω คือ ความเร็วเชิงมุม มีหน่วยเป็น (rad/s)

ตารางที่ 3-5 ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับ

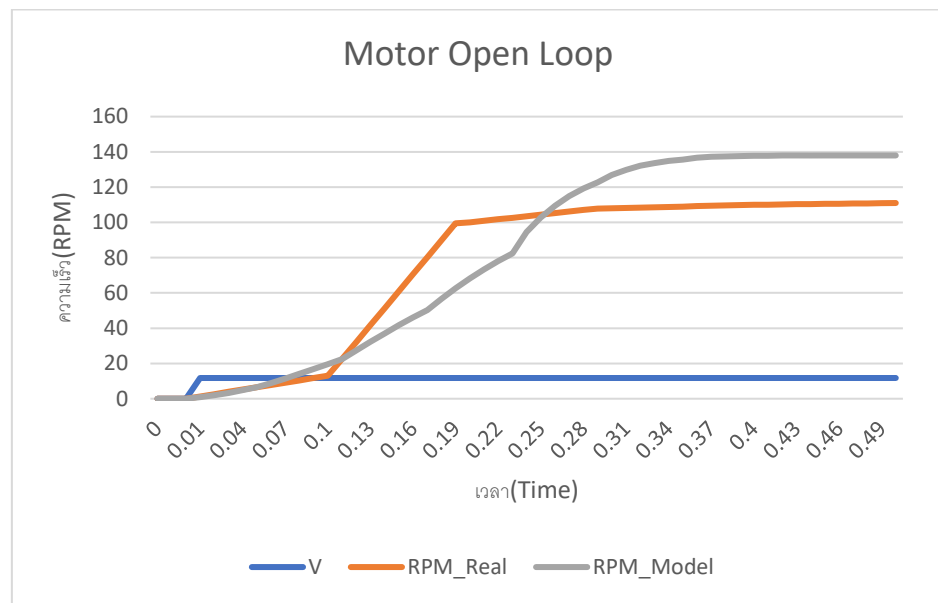
ความเร็วรอบต่อนาที (rpm)	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)	แรงดันไฟฟ้า (v)	กระแสไฟฟ้า (A)	ค่าคงที่แรงดันย้อนกลับ (Vrad/s)
100	10.471	11.88	0.18	11.77
90	9.424	10.86	0.17	10.86
80	8.377	9.61	0.17	9.61
70	7.330	8.64	0.16	8.64
60	6.283	7.66	0.16	7.66
50	5.235	6.44	0.15	6.44
40	4.188	5.27	0.15	5.27
30	3.141	4	0.14	4
				8.0314

ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากการทดลองมีดังต่อไปนี้ตามตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
R_a	ค่าความต้านทานภายในขดลวด	6.3	Ω
L_a	ความเหนี่ยวนำของขดลวด	0.0021	H
K_t	ค่าคงที่แรงบิด	0.8175	Nm/A
D_m	ค่าแรงเสียดทาน	0.0216	Kgm ²
J_m	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์	0.0041	Nm
K_b	และค่าคงที่แรงดันย้อนกลับ	8.0314	Vrad/s

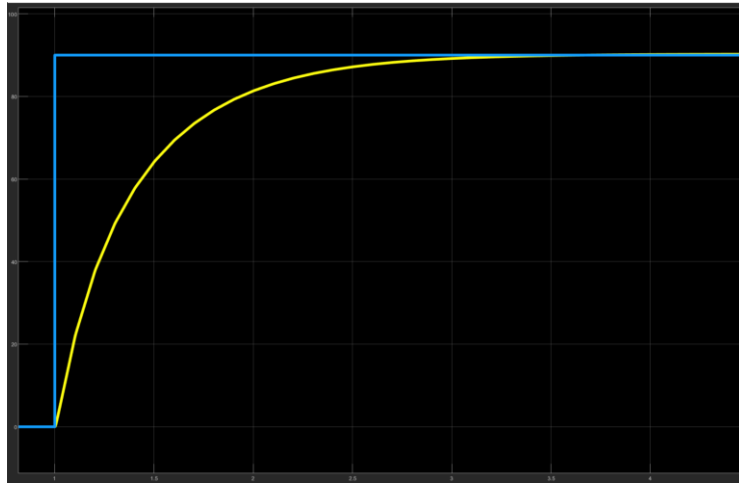
3.3.2 การทดสอบผลตอบสนองของมอเตอร์แบบลูปเปิด เป็นการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์เปรียบเทียบกับมอเตอร์ของจริง และผลตอบสนองของแบบจำลองของมอเตอร์



ภาพที่ 3-21 ผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์และมอเตอร์จริง

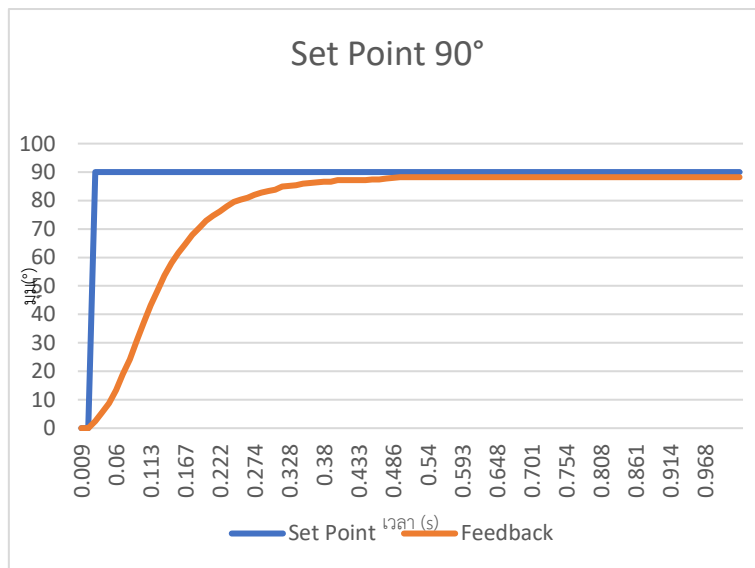
จากภาพที่ 3-21 แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ เมื่อจ่ายสัญญาณอินพุตที่ 12 V ความเร็วรอบอยู่ที่ 137 RPM มีช่วงเวลาขาขึ้น (Rise Time) 0.0078 s ค่าเวลาสู่จุดสมดุล (Settling Time) 0.0130 s และผลตอบสนองของมอเตอร์จริง เมื่อจ่ายสัญญาณอินพุตที่ 11.75 V ความเร็วรอบอยู่ที่ 110 RPM มีช่วงเวลาขึ้น 0.09 s ค่าเวลาสู่จุดสมดุล 0.19 s จากการทดสอบของผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ และผลตอบสนองของมอเตอร์จริง แสดงให้เห็นความแตกต่าง เช่น ความเร็วของมอเตอร์ มีความแตกต่างกันที่ 27 รอบต่อนาที ช่วงเวลาขาขึ้น 0.0822 s และค่าเวลาสู่จุดสมดุล 0.177 s

3.3.3 การทดสอบการทำงานของระบบพีไอดีที่ได้จากการหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ด้วยการใช้กราฟที่ได้จากโปรแกรม MATLAB โดยมีค่าเกนพีไอดีดังนี้ K_p เท่ากับ 6.521 K_i เท่ากับ 0.041 และ K_d เท่ากับ 0.232



ภาพที่ 3-22 ผลตอบสนองจากโปรแกรม MATLAB ที่ 90°

จากภาพที่ 3-22 คือ กราฟจากโปรแกรม MATLAB มีช่วงเวลาขาขึ้นอยู่ที่ 0.953 s และค่าเวลาสู่จุดสมดุล 1.635 s

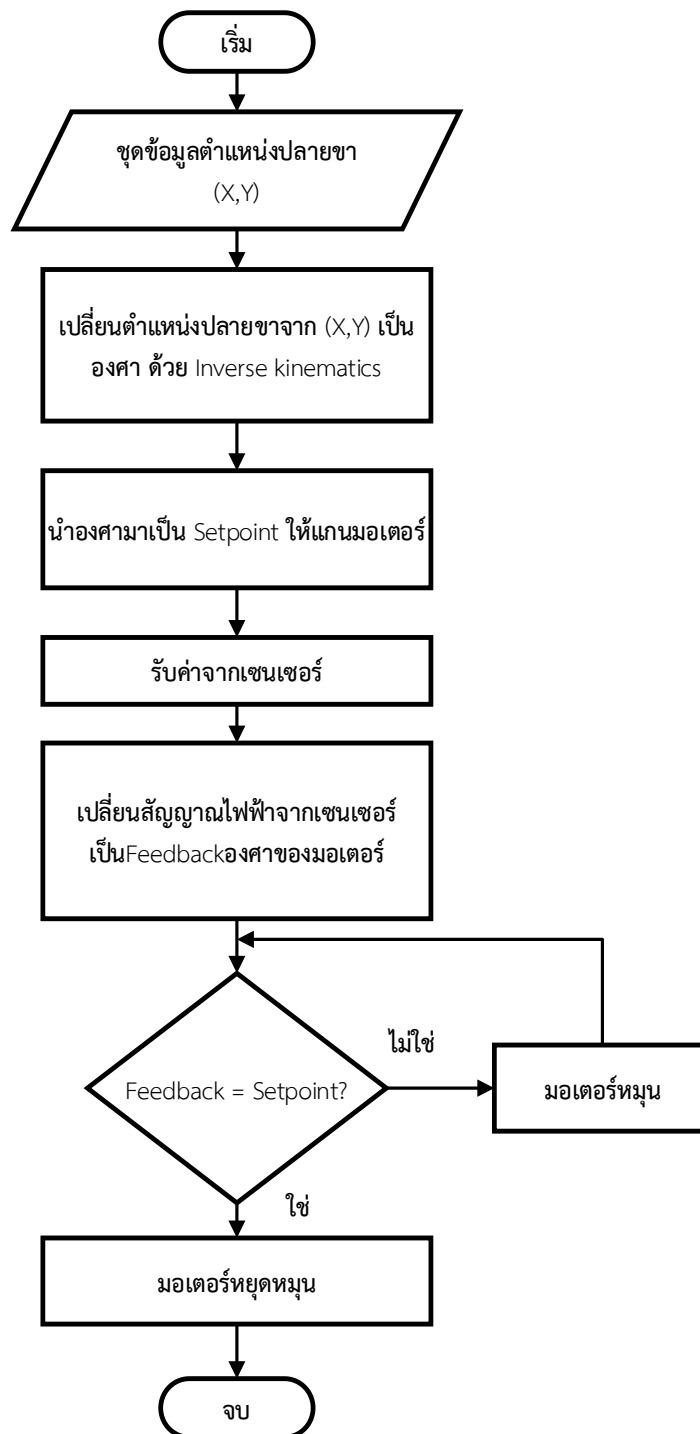


ภาพที่ 3-23 ผลตอบสนองจากมอเตอร์ที่ 90°

จากภาพที่ 3-23 ผลการตอบสนองของมอเตอร์ ที่ 90° ช่วงเวลาขาขึ้นอยู่ที่ 0.213 s และค่าเวลาสู่จุดสมดุล 0.467 s จากการทดสอบผลตอบสนองของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ และผลตอบสนองของมอเตอร์จริง แสดงให้เห็นความแตกต่าง เช่น ช่วงเวลาขึ้น 0.74 s และค่าเวลาสู่จุดสมดุล 1.168 s

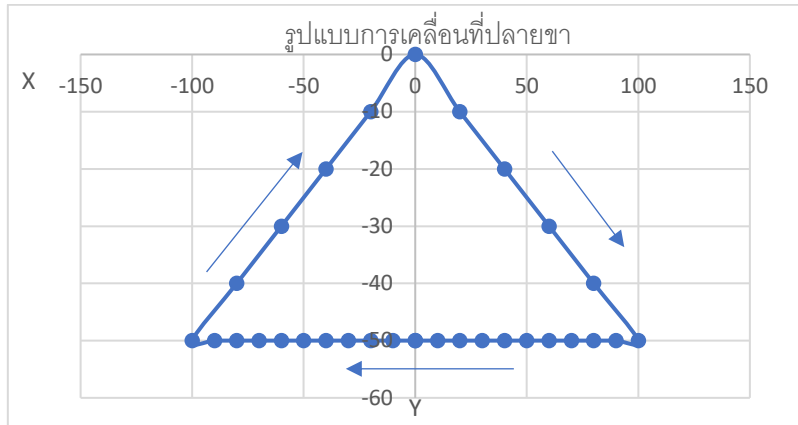
3.4 ไตอะแกรมการทำงานของโปรแกรม

การควบคุมการก้าวแบบเดิน และวิ่งเหยาะ ๆ ผู้จัดทำได้เขียนโปรแกรมให้หุ่นยนต์ทำงานตามไตอะแกรมดังภาพที่ 3-24



ภาพที่ 3-24 ไตอะแกรมการทำงานของโปรแกรม

การก้าวแบบเดิน และวิ่งเหยาะ ๆ มีรูปแบบการเคลื่อนที่ของปลายขา ดังภาพที่ 3-25



ภาพที่ 3-25 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของปลายขา

จากภาพที่ 3-25 เรียงลำดับ ตำแหน่งอ้างอิงได้ตามตารางที่ 3-7 ดังนี้

ตารางที่ 3-7 ลำดับของตำแหน่งอ้างอิงของปลายขาที่เป็นตำแหน่ง (X,Y)

ลำดับของตำแหน่งอ้างอิง											
ที่	X	Y	ที่	X	Y	ที่	X	Y	ที่	X	Y
0	0	-50	8	80	-50	16	-20	-10	24	-60	-50
1	10	-50	9	90	-50	17	-40	-20	25	-50	-50
2	20	-50	10	100	-50	18	-60	-30	26	-40	-50
3	30	-50	11	80	-40	19	-80	-40	27	-30	-50
4	40	-50	12	60	-30	20	-100	-50	28	-20	-50
5	50	-50	13	40	-20	21	-90	-50	29	-10	-50
6	60	-50	14	20	-10	22	-80	-50	30	0	-50
7	70	-50	15	0	0	23	-70	-50			

จากตารางที่ 3-7 กำหนดให้ i คือ ลำดับของ Setpoint เริ่มต้นที่ 0 และสิ้นสุดที่ 30

x คือ ตำแหน่งของแกน X

y คือ ตำแหน่งของแกน Y

จากตารางที่ 3-7 เมื่อเข้าสมการจลนศาสตร์การเคลื่อนที่ผกผันแล้วได้ Setpoint ที่เป็นองศาของมอเตอร์ได้ดังตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 ลำดับของตำแหน่งอ้างอิงองศาของมอเตอร์

ลำดับของตำแหน่งอ้างอิง											
ที่	$S\theta_1$	$S\theta_2$	ที่	$S\theta_1$	$S\theta_2$	ที่	$S\theta_1$	$S\theta_2$	ที่	$S\theta_1$	$S\theta_2$
0	25	155	8	2	119	16	16	184	24	51	174
1	21	151	9	0	114	17	31	186	25	46	172
2	17	147	10	-1	109	18	45	186	26	42	169
3	14	143	11	-4	122	19	58	184	27	37	166
4	11	138	12	-6	135	20	71	181	28	33	163
5	8	134	13	-6	149	21	66	180	29	29	159
6	6	129	14	-4	164	22	61	178	30	25	155
7	4	124	15	0	180	23	56	176			

จากตารางที่ 3-8 กำหนดให้ $S\theta_1$ คือ ตำแหน่งของมอเตอร์ θ_1

$S\theta_2$ คือ ตำแหน่งของมอเตอร์ θ_2

บทที่ 4

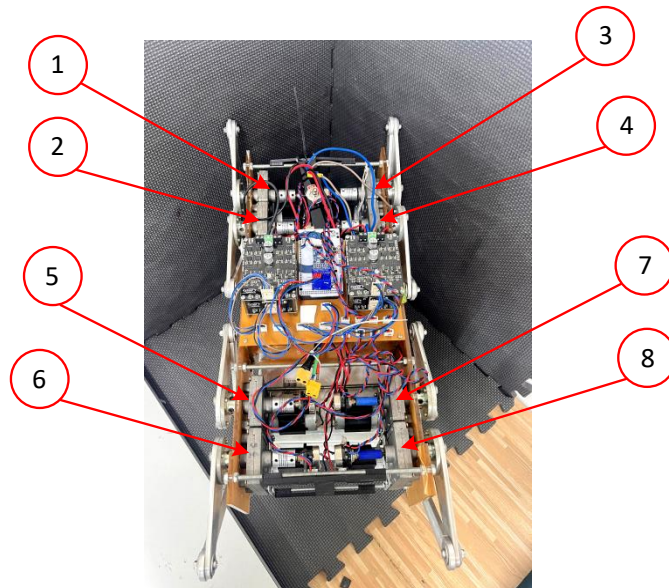
ผลการทดลอง

จากการจัดทำโครงการหุ่นยนต์มีขาหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยงได้มีการออกแบบวางแผนการทำงาน เพื่อให้ประสบความสำเร็จตามหลักวัตถุประสงค์ที่กำหนด และได้ทำการกำหนดวิธีการทดลอง เพื่อทดสอบ ความสามารถของมอเตอร์ ความสามารถเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ การเปรียบเทียบขององศาการเอียงของหุ่นยนต์ และให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์โดยสามารถแบ่งการทดลองของโครงการ ดังนี้

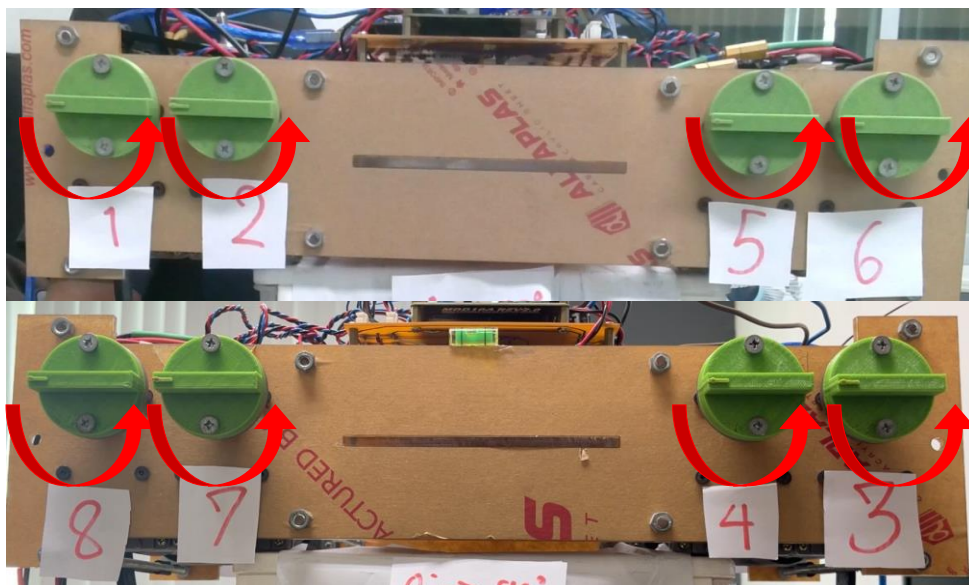
- 4.1 ผลการทดลองการควบคุมตำแหน่งแกนมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมพีไอดี
- 4.2 ผลการทดลองระยะในการยกตัวหุ่นยนต์
- 4.3 ผลการทดลองควบคุมการก้าวของหุ่นยนต์
 - 4.3.1 ผลการทดลองควบคุมการก้าวด้วยรูปแบบการก้าวแบบเดิน
 - 4.3.2 ผลการทดลองควบคุมการก้าวด้วยรูปแบบการก้าวแบบวิ่งเหยาะ ๆ
 - 4.3.3 ผลการทดลองการระบุระยะทางในการเดินด้วยเวลา
- 4.4 ผลการเปรียบเทียบขององศาการเอียงของหุ่นยนต์

4.1 ผลการทดลองการควบคุมตำแหน่งแกนมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมพีไอดี

การทดลองควบคุมตำแหน่งมอเตอร์ด้วยการด้วยการกำหนดให้มอเตอร์เคลื่อนที่ไปที่องศาต่าง ๆ เพื่อดูผลตอบสนองทั้งแบบไม่มีโหลด และแบบมีโหลดในหุ่นยนต์มีทั้งหมด 4 ขา 1 ขา ใช้มอเตอร์ 2 ตัว ดังนั้นมีมอเตอร์ที่ต้องควบคุมทั้งหมด 8 ตัวดังภาพที่ 4-1



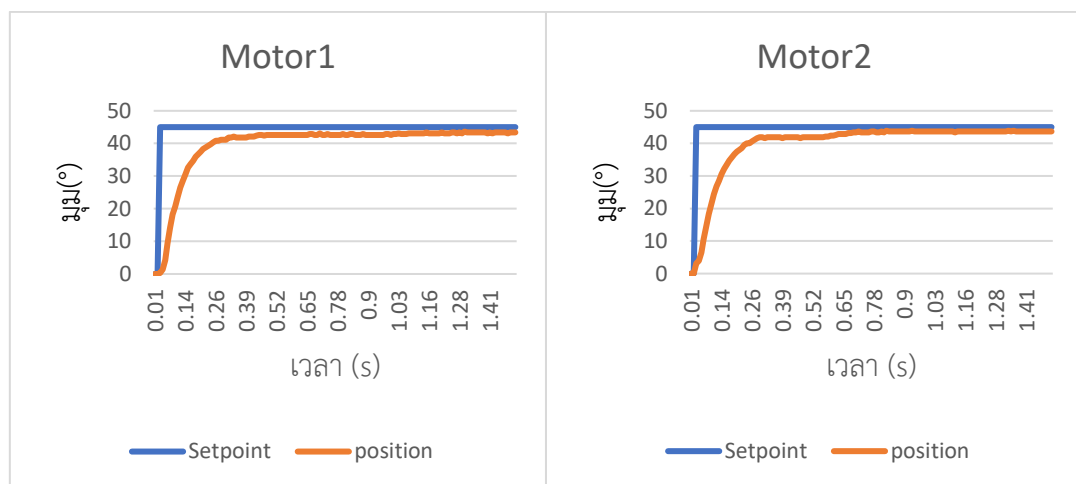
ภาพที่ 4-1 ตำแหน่งของมอเตอร์ตามหมายเลข



ภาพที่ 4-2 การเคลื่อนที่ของมอเตอร์

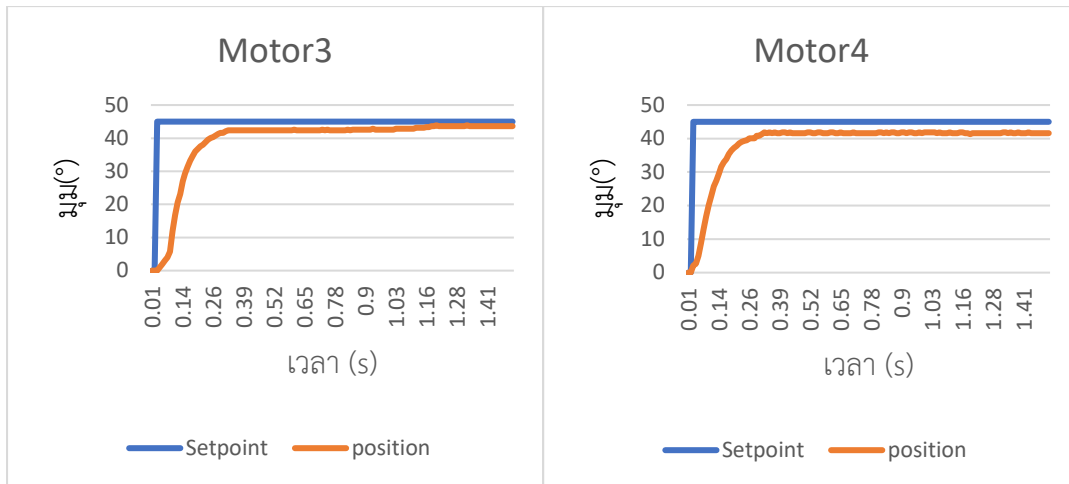
การทดสอบใช้ตำแหน่งอ้างอิงเป็นการเปลี่ยนองศาของมอเตอร์ทั้ง 8 ตัวดังนี้ จาก 0° ไป 45° , 90° และ 180° แสดงดังภาพที่ 4-2 กำหนดค่าเกนพีไอดีมีดังนี้ K_p เท่ากับ 6.521 K_i เท่ากับ 0.0415 K_d เท่ากับ 0.232 ผู้จัดทำได้ทำการสังเกตผลตอบสนองที่เกิดขึ้นของการเคลื่อนที่ของมอเตอร์กับตำแหน่งอ้างอิง เพื่อวิเคราะห์ และหาค่าความคลาดเคลื่อน โดยเปรียบเทียบในส่วนของเวลาเข้าสู่จุดสมดุล คือ เวลาที่ผลตอบสนองมีค่าเข้าใกล้ตำแหน่งอ้างอิงจากจุดเริ่มบวกลบ 2% ของตำแหน่งอ้างอิง และการหาค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว (Steady State Error) คือ ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว

จากภาพที่ 4-3 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 1 และ 2 ตำแหน่งอ้างอิง คือ จาก 0° ไปที่ 45° มอเตอร์ที่ 1 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 1.04 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 1.11° และ มอเตอร์ที่ 2 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.64 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 1.36°



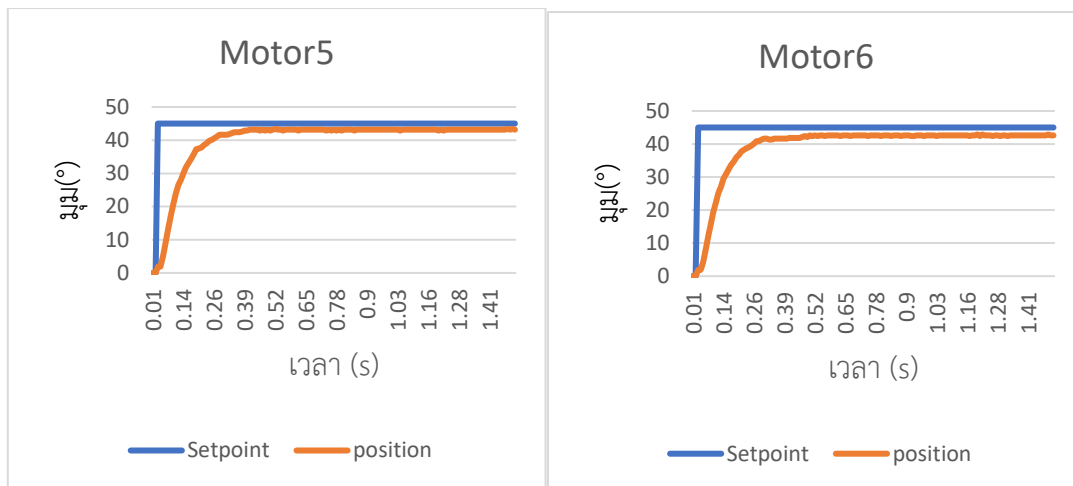
ภาพที่ 4-3 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 1 และ 2 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 45°

จากภาพที่ 4-4 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 3 และ 4 ตำแหน่งอ้างอิง คือ จาก 0° ไปที่ 45° มอเตอร์ที่ 3 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 1.08 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 1.36° และ มอเตอร์ที่ 4 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.29 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 2.64°



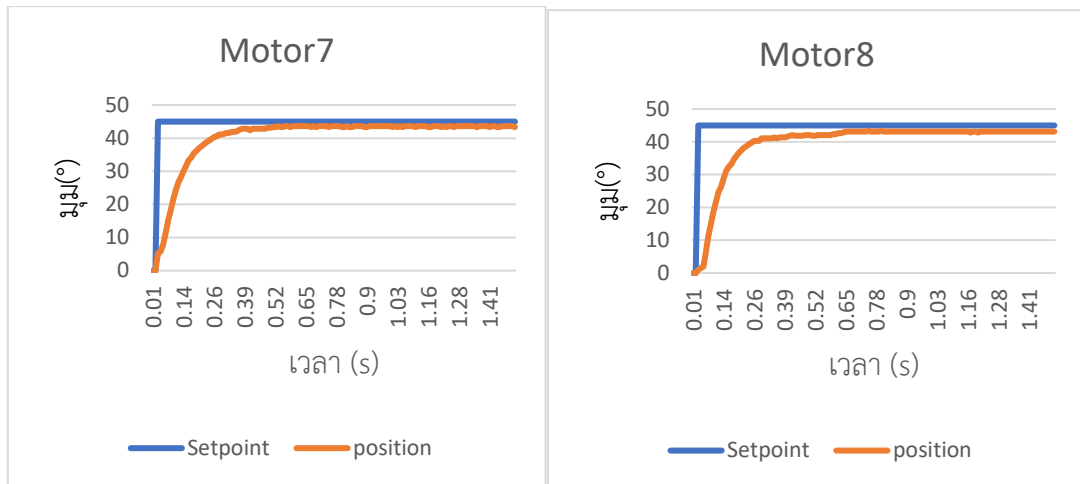
ภาพที่ 4-4 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 3 และ 4 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 45°

จากภาพที่ 4-5 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 5 และ 6 ตำแหน่งอ้างอิง คือ จาก 0° ไปที่ 45° มอเตอร์ที่ 5 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.60 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 1.87° และมอเตอร์ที่ 6 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.47 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 2.39°



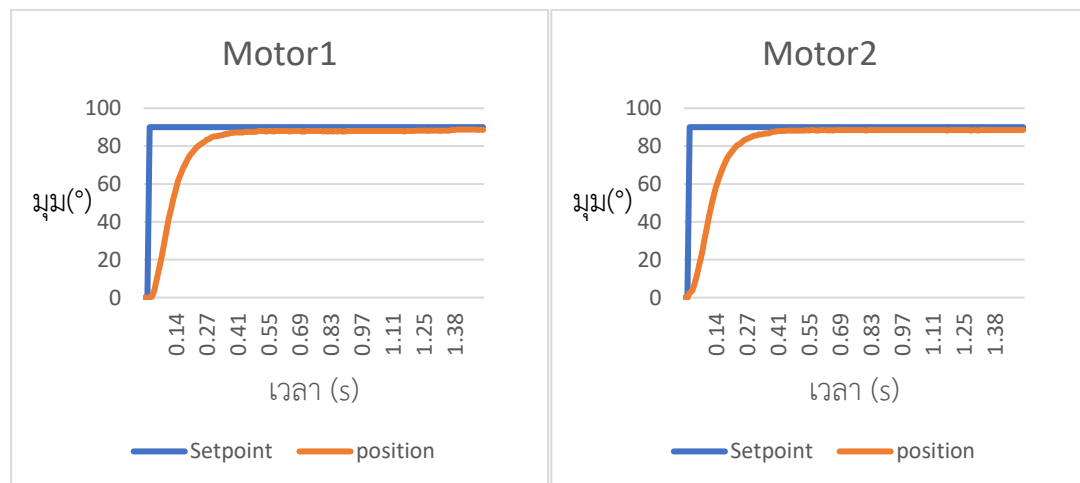
ภาพที่ 4-5 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 5 และ 6 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 45°

จากภาพที่ 4-6 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 7 และ 8 ตำแหน่งอ้างอิง คือ จาก 0° ไปที่ 45° มอเตอร์ที่ 7 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.46 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 1.36° และมอเตอร์ที่ 8 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.62 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 1.87°



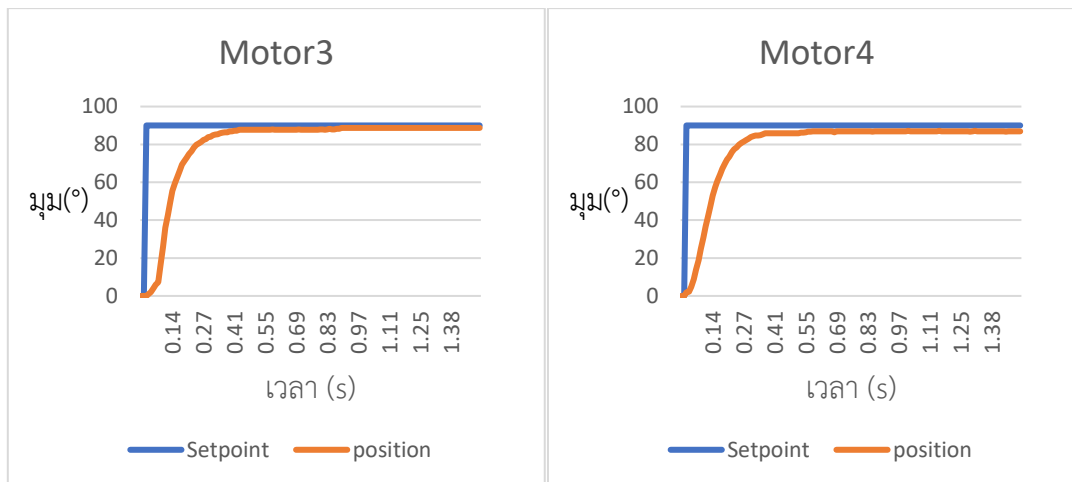
ภาพที่ 4-6 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 7 และ 8 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 45°

จากภาพที่ 4-7 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 1 และ 2 ตำแหน่งอ้างอิง คือ จาก 0° ไปที่ 90° มอเตอร์ที่ 1 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 1.19 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 1.29° และ มอเตอร์ที่ 2 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.43 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 0.53°



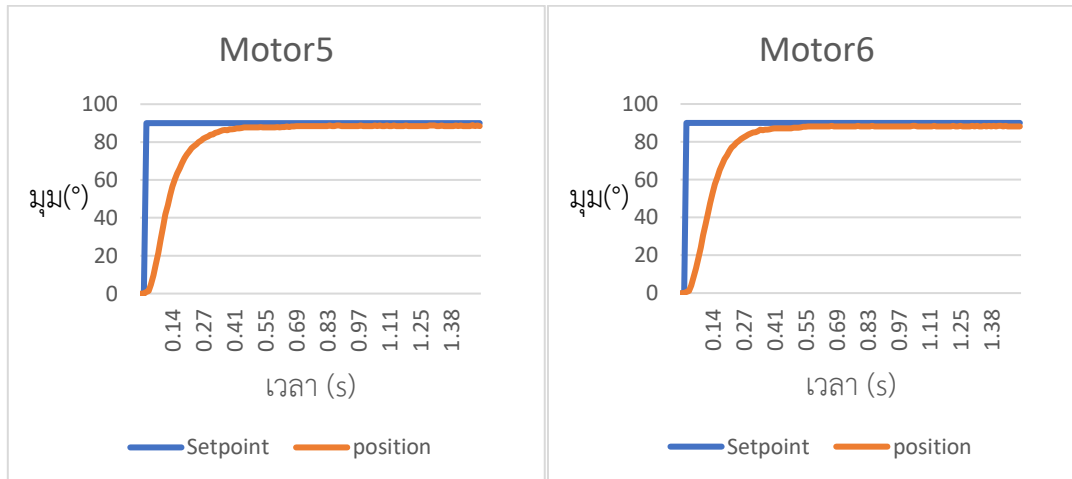
ภาพที่ 4-7 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 1 และ 2 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 90°

จากภาพที่ 4-8 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 3 และ 4 ตำแหน่งอ้างอิง คือ จาก 0° ไปที่ 90° มอเตอร์ที่ 3 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.82 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 1.29° และ มอเตอร์ที่ 4 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.51 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 2.31°



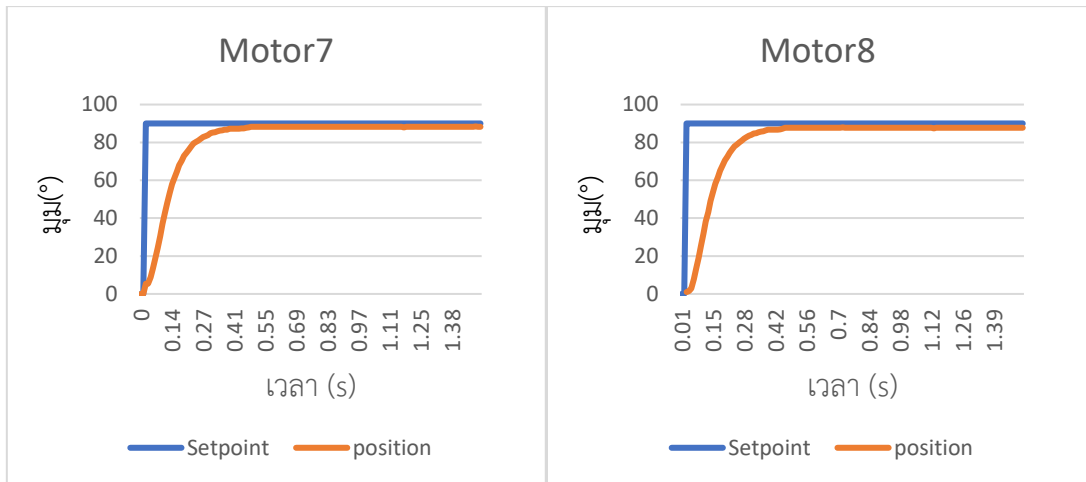
ภาพที่ 4-8 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 3 และ 4 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 90°

จากภาพที่ 4-9 ผลตอบสนองของ มอเตอร์ 5 และ 6 ตำแหน่งอ้างอิง คือ จาก 0° ไปที่ 90° มอเตอร์ที่ 3 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.63 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 1.54° และ มอเตอร์ที่ 4 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.54 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 1.54°



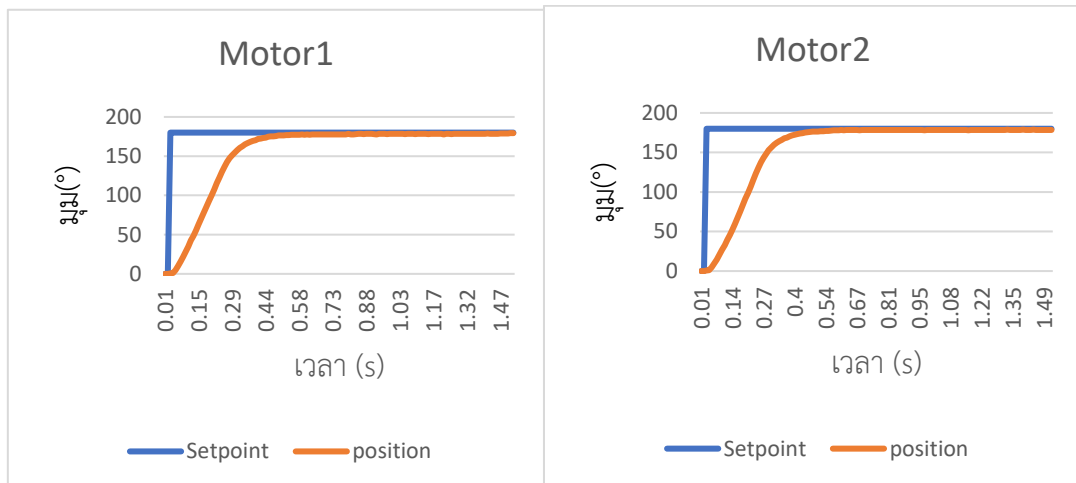
ภาพที่ 4-9 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 5 และ 6 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 90°

จากภาพที่ 4-10 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 7 และ 8 ตำแหน่งอ้างอิงคือ จาก 0° ไปที่ 90° มอเตอร์ที่ 3 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.47 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 1.29° และ มอเตอร์ที่ 4 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.43 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 2.31°



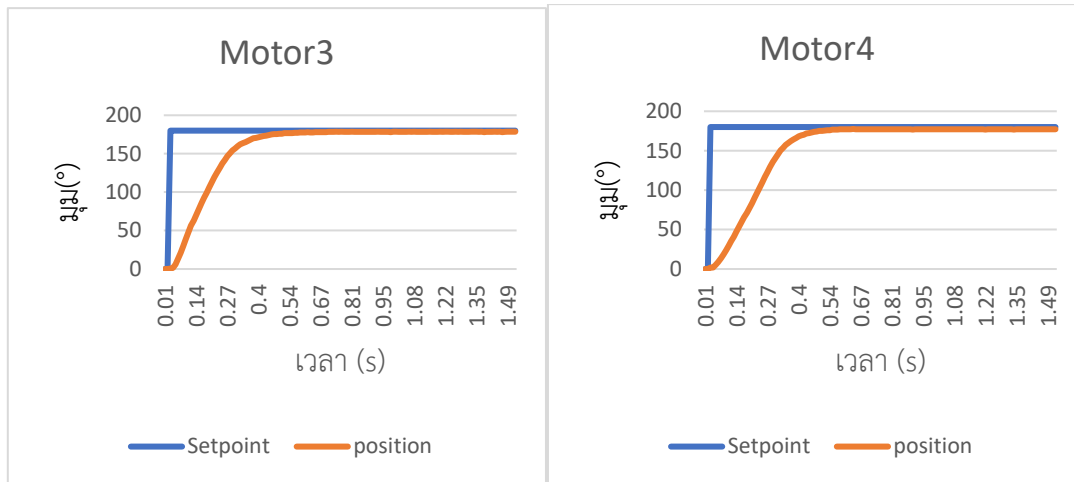
ภาพที่ 4-10 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 7 และ 8 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 90°

จากภาพที่ 4-11 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 1 และ 2 ตำแหน่งอ้างอิง คือ จาก 0° ไปที่ 180° มอเตอร์ที่ 1 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.46 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 0.62° และ มอเตอร์ที่ 2 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.44 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 0.88°



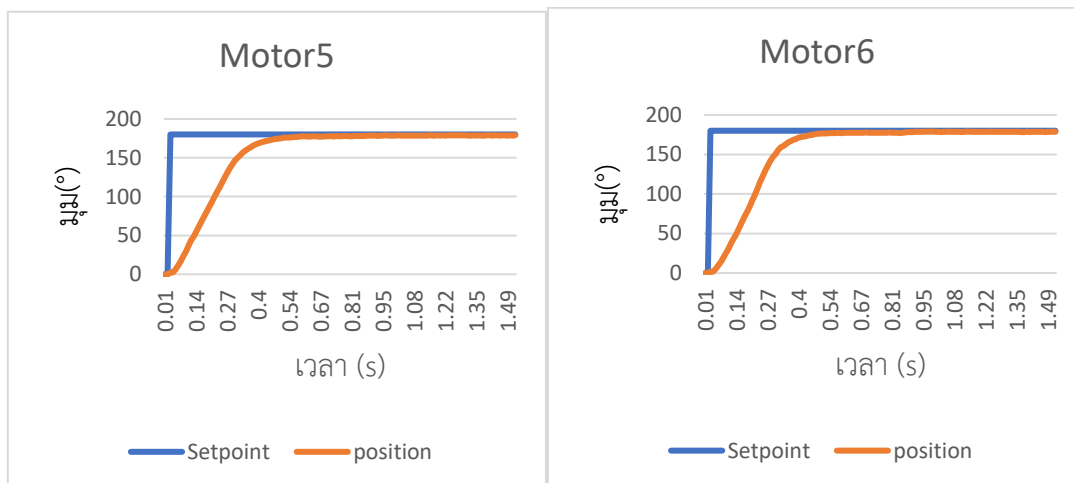
ภาพที่ 4-11 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 1 และ 2 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 180°

จากภาพที่ 4-12 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 3 และ 4 ตำแหน่งอ้างอิง คือ จาก 0° ไปที่ 180° มอเตอร์ที่ 3 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.49 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 0.62° และ มอเตอร์ที่ 4 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.51 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 2.67°



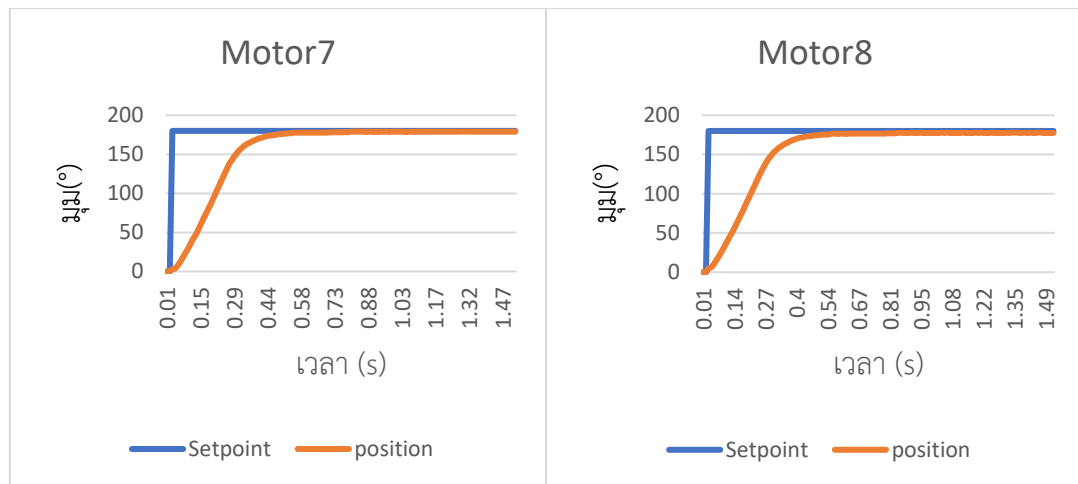
ภาพที่ 4-12 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 3 และ 4 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 180°

จากภาพที่ 4-13 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 5 และ 6 ตำแหน่งอ้างอิง คือ จาก 0° ไปที่ 180° มอเตอร์ที่ 5 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.50 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 0.62° และ มอเตอร์ที่ 6 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.45 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 1.39°



ภาพที่ 4-13 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 5 และ 6 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 180°

จากภาพที่ 4-14 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 7 และ 8 ตำแหน่งอ้างอิง คือ จาก 0° ไปที่ 180° มอเตอร์ที่ 7 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.46 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 1.14° และ มอเตอร์ที่ 8 มีค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่ 0.52 s ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ที่ 2.16°



ภาพที่ 4-14 ผลตอบสนองของมอเตอร์ 7 และ 8 ตำแหน่งอ้างอิงที่ 180°

จากตารางที่ 4-1 แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองของมอเตอร์ จากตำแหน่งอ้างอิงต่าง ๆ จากการทดลองสรุปได้ว่า ค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุลสูงสุด คือ มอเตอร์ที่ 1 ในการเข้าตำแหน่งอ้างอิงที่ 90° อยู่ที่ 1.19 s การที่มีเวลาเข้าสู่จุดสมดุลที่มากทำให้แกนของมอเตอร์เข้าสู่จุดอ้างอิงได้ช้า และค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวสูงสุด คือ มอเตอร์ที่ 4 ในการเข้าตำแหน่งอ้างอิงที่ 180° อยู่ที่ 2.67° การที่มีค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวที่มากทำให้แกนมอเตอร์มีความผิดพลาดในการควบคุมมาก สามารถใช้ค่าจากผลตอบสนองนี้เพื่อพิจารณาในการปรับค่าตัวควบคุมต่อไป

ตารางที่ 4-1 ตารางสรุปการทดสอบ

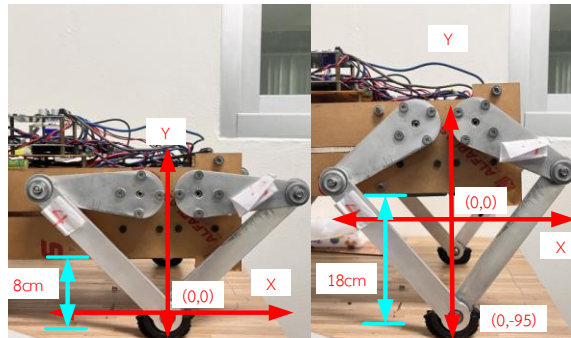
มอเตอร์	ตำแหน่งอ้างอิง	ค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุล (s)	ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว (θ)
1	45°	1.04	1.11
	90°	1.19	1.29
	180°	0.46	0.62
2	45°	0.43	0.52
	90°	0.14	2
	180°	0.44	0.88
3	45°	1.08	1.36
	90°	0.82	1.29
	180°	0.49	0.62

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

มอเตอร์	ตำแหน่งอ้างอิง	ค่าเวลาเข้าสู่จุดสมดุล (s)	ค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัว (θ)
4	45°	0.29	2.64
	90°	0.51	2.31
	180°	0.51	2.67
5	45°	0.6	1.87
	90°	0.63	1.54
	180°	0.5	0.62
6	45°	0.47	2.39
	90°	0.54	1.54
	180°	0.45	1.39
7	45°	0.46	1.36
	90°	0.47	1.29
	180°	0.46	1.14
8	45°	0.62	1.87
	90°	0.43	2.31
	180°	0.52	2.16

4.2 ผลการทดลองระยะในการยกตัวหุ่นยนต์

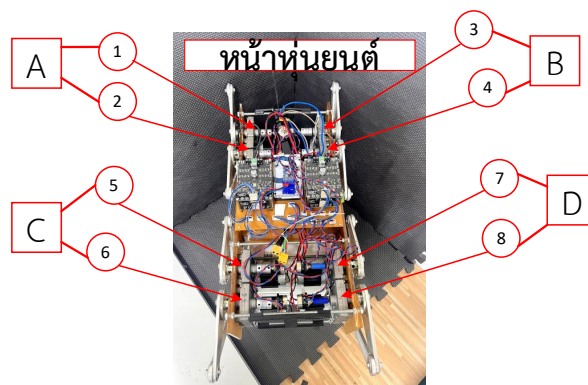
การทดลองให้หุ่นยนต์ขยับขึ้น คือ นำหุ่นยนต์วางที่ฐานให้ปลายขาสัมผัสกับพื้นผิวเมื่อสั่งให้ปลายขาของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามจุดอ้างอิง เมื่อปลายขาของหุ่นยนต์เคลื่อนที่หมายถึง องศาของแกนมอเตอร์เคลื่อนที่เพื่อไปสู่จุดอ้างอิงของแกนมอเตอร์ที่ผ่านจากการนำ จุดอ้างอิงปลายขามาผ่านสมการจลนศาสตร์การเคลื่อนที่ผกผัน เมื่อแกนมอเตอร์หมุนทำให้ตัวหุ่นยนต์ยกตัวขึ้นไป จากจุดอ้างอิงปลายขา อยู่ที่ $(x, y) = (0, 0)$ ทำให้หุ่นยนต์ยกตัวที่ 8 cm ดังภาพที่ 4-15



ภาพที่ 4-15 จุดอ้างอิงปลายขาที่ $(x, y) = (0, 0)$ และ $(x, y) = (0, -95)$

จากภาพที่ 4-15 แสดงให้เห็นระยะที่หุ่นยนต์ยกตัว ณ จุดอ้างอิงปลายขาอยู่ที่ $(x, y) = (0, 0)$ หุ่นยนต์มีระยะยกตัวจากพื้นอยู่ที่ 8 cm และยกตัวขึ้นไปจน จุดอ้างอิงปลายขาจนถึงที่ $(x, y) = (0, -95)$ การเคลื่อนที่ของปลายขาแสดงการจุดอ้างอิงเมื่อตำแหน่งปลายขาถึงจุดอ้างอิงแล้วทำให้หุ่นยนต์มีระยะยกตัวจากพื้นอยู่ที่ 18 cm กำหนดค่าตัวควบคุมแบบพีไอดีมีดังนี้ กำหนดให้มอเตอร์ทุกตัวใช้ K_p เท่ากับ 6.521 K_i เท่ากับ 0.0415 K_d เท่ากับ 0.232

การเก็บผลการทดลองผู้จัดทำได้กำหนดขาเป็นชุดขาทั้งหมดสี่ขา เพื่อเก็บผลการยกตัวของหุ่นยนต์ โดย A คือ ขาซ้ายหน้า B คือ ขาขวาหน้า C คือ ขาซ้ายหลัง และ D ขาขวาหลัง ดังภาพที่ 4-16



ภาพที่ 4-16 ตำแหน่งการวางมอเตอร์ของหุ่นยนต์

การทดลองให้หุ่นยนต์ขยับขึ้นเป็นการทดสอบมอเตอร์ที่เลือกใช้สามารถรับน้ำหนักของตัวหุ่นยนต์ได้หรือไม่ และเป็นการทดสอบสมการจลนศาสตร์การเคลื่อนที่ฝกผันในการเคลื่อนที่ของจุดปลายขาโดยมีผลการทดลองดังตารางที่ 4-2

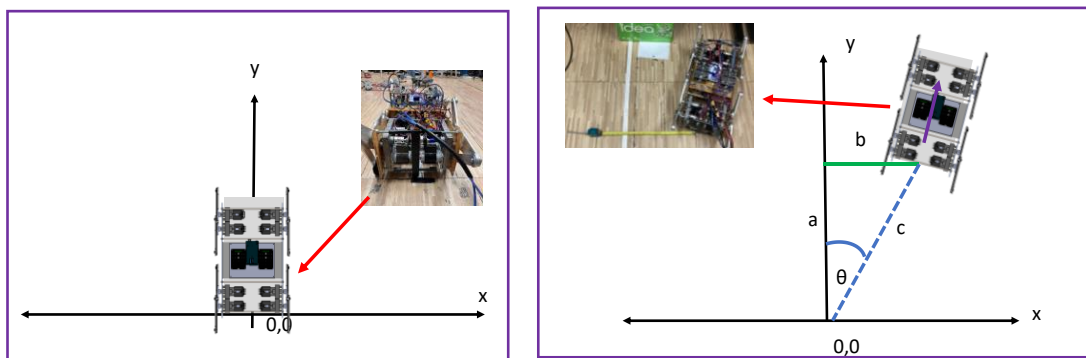
ตารางที่ 4-2 ผลการขยับขึ้นของหุ่นยนต์ 18 cm

ครั้งที่ ที่	ขาของ หุ่นยนต์	ระยะอ้างอิง (cm)	ระยะตำแหน่ง (cm)	ค่าความผิดพลาด (cm)	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%)
1	A	18	11.4	6.6	1.19
	B	18	14.1	3.9	0.70
	C	18	13	5	0.90
	D	18	15.2	2.8	0.50
2	A	18	11.6	6.4	1.15
	B	18	13.8	4.2	0.76
	C	18	13.1	4.9	0.88
	D	18	15.2	2.8	0.50
3	A	18	11.1	6.9	1.24
	B	18	13.6	4.4	0.79
	C	18	12.6	5.4	0.97
	D	18	15.1	2.9	0.52
4	A	18	11.6	6.4	1.15
	B	18	13.3	4.7	0.85
	C	18	13.1	4.9	0.88
	D	18	15.1	2.9	0.52
5	A	18	11.6	6.4	1.15
	B	18	13.3	4.7	0.85
	C	18	13.1	4.9	0.88
	D	18	15.1	2.9	0.52

จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่ามอเตอร์มีแรงพอในการขับเคลื่อนตัวหุ่นยนต์ สมการจลนศาสตร์การเคลื่อนที่ผกผันสามารถนำจุดอ้างอิงปลายขามาเป็นจุดอ้างอิงของแกนมอเตอร์ได้ และการทดลองแสดงให้เห็นว่าขา A ที่เป็นมอเตอร์ 1 และ 2 มีค่าความผิดพลาดสูงสุดเฉลี่ยในสี่ขาอยู่ที่ 6.5 cm คิดเป็น 1.17% สามารถเป็นข้อมูลในการปรับค่าตัวควบคุมต่อไป

4.3 ผลการทดลองควบคุมการก้าวของหุ่นยนต์

เพื่อทดสอบความเร็วการเคลื่อนที่ในแต่ละรูปแบบการก้าวการเก็บผลแบบระยะการกระจัดของหุ่นยนต์ในรูปแบบการก้าวเดิน ปล่อยหุ่นยนต์เดินไปข้างหน้าพร้อมกับจับเวลา 60 s และวัดจากทำยหุ่นยนต์ว่าเคลื่อนที่ไปในแกน x และ y กี่ cm โดยการวัดจากแกน x ได้ค่าระยะของ b และในการวัดในแกน y ได้ระยะของ a ผู้จัดทำใช้ทฤษฎีบทพีทาโกรัสในการช่วยหาระยะการกระจัด ดังภาพที่ 4-17 ในการหาความเร็วของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ใช้ค่าของเวลา และระยะทางและการหาองศาที่เปลี่ยนไปจากแกน Y ด้วยตรีโกณมิติ



ภาพที่ 4-17 วิธีการเก็บผลระยะการกระจัด

4.3.1 การทดลองควบคุมการก้าวแบบเดิน ลักษณะการก้าวขาแบบเดินมีลักษณะการขยับขาที่ละขาเริ่มต้นที่ ขา D, ขา C, ขา B และ สุดท้ายที่ขา A ตามตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 รูปแบบการก้าวเดิน

A				▲
B			▲	
C		▲		
D	▲			
	เคลื่อนที่			
	อยู่กับที่			

รูปแบบของโปรแกรม ผู้จัดทำได้มีการออกแบบโปรแกรมในการให้หุ่นยนต์ขับขาตามช่วงเวลาที่กำหนดไว้ คือ เวลาในการเปลี่ยนตำแหน่งอ้างอิงของตำแหน่งปลายขาตั้งตารางที่ 4-1 โดยมีเวลาดังต่อไปนี้ 10, 15, 20 และ 25 ms และกำหนดค่าเกณฑ์ไอทีมีดังนี้มีผลการทดสอบดังตารางต่อไปนี้ กำหนดให้มอเตอร์ทุกตัวใช้ K_p เท่ากับ 6.521 K_i เท่ากับ 0.0415 K_d เท่ากับ 0.232

ตารางที่ 4-4 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 10 ms ในรูปแบบการก้าวเดิน

เวลามิลลิวินาทีต่อการเปลี่ยนค่า (ms)	การก้าวแบบเดิน ในเวลา 60 s					ความเร็ว (cm/s)
	ครั้งที่	ระยะทาง (cm)			θ	
		a	b	c		
10	1	37	5	37.34	7.70	0.62
	2	32	2.5	32.10	4.47	0.53
	3	32	1	32.02	1.79	0.53
	ค่าเฉลี่ย			33.82	4.65	0.56

จากตารางที่ 4-4 ได้ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 33.82 cm องศาที่เคลื่อนไปจากแกน Y อยู่ที่ 4.65° และความเร็วอยู่ที่ 0.56 cm/s

ตารางที่ 4-5 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 15 ms ในรูปแบบการก้าวเดิน

เวลามิลลิวินาทีต่อการเปลี่ยนค่า (ms)	การก้าวแบบเดิน ในเวลา 60 s					ความเร็ว (cm/s)
	ครั้งที่	ระยะทาง (cm)			θ	
		a	b	c		
15	1	25	4.5	25.40	10.20	0.42
	2	25	1.5	25.04	3.43	0.42
	3	26	1	26.02	2.20	0.43
ค่าเฉลี่ย			25.49	5.28	0.42	

จากตารางที่ 4-5 ได้ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 25.49 cm องศาที่เคลื่อนไปจากแกน Y อยู่ที่ 5.28° และความเร็วอยู่ที่ 0.42 cm/s

ตารางที่ 4-6 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 20 ms ในรูปแบบการก้าวเดิน

เวลามิลลิวินาทีต่อการเปลี่ยนค่า (ms)	การก้าวแบบเดิน ในเวลา 60 s					ความเร็ว (cm/s)
	ครั้งที่	ระยะทาง (cm)			θ	
		a	b	c		
20	1	18	2.5	18.17	7.91	0.30
	2	13	1.5	13.09	6.58	0.22
	3	4	9	9.85	66.04	0.16
	ค่าเฉลี่ย			13.70	26.84	0.23

จากตารางที่ 4-6 ได้ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 13.70 cm องศาที่เคลื่อนไปจากแกน Y อยู่ที่ 26.84° และความเร็วอยู่ที่ 0.23 cm/s

ตารางที่ 4-7 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 25 ms ในรูปแบบการก้าวเดิน

เวลามิลลิวินาทีต่อการเปลี่ยนค่า (ms)	การก้าวแบบเดิน ในเวลา 60 s					ความเร็ว (cm/s)
	ครั้งที่	ระยะทาง (cm)			θ	
		a	b	c		
25	1	5	10.5	11.63	64.54	0.19
	2	4	6.5	7.63	58.39	0.13
	3	4	5.5	6.80	53.97	0.11
ค่าเฉลี่ย			8.69	58.97	0.14	

จากตารางที่ 4-7 ได้ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 8.69 cm องศาที่เคลื่อนไปจากแกน Y อยู่ที่ 58.97° และความเร็วอยู่ที่ 0.14 cm/s

การทดลองใช้ค่าเกณฑ์ K_p เท่ากับ 6.521 K_i เท่ากับ 0.0415 K_d เท่ากับ 0.232 เห็นได้ว่าหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เร็วที่สุดคือ 0.56 cm/s ณ เวลาที่ 10 ms ต่อการเปลี่ยนจุดอ้างอิง และความเร็วลดลงเพื่อเพิ่มเวลาการเปลี่ยนจุดอ้างอิง

จากการทดลองผู้จัดทำได้ทำการปรับค่าเกนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของแกนมอเตอร์ดังนี้

มอเตอร์ตัวที่ 1, 2 K_p เท่ากับ 15.521 K_i เท่ากับ 0.041 K_d เท่ากับ 0.132

มอเตอร์ตัวที่ 3, 4 K_p เท่ากับ 15.521 K_i เท่ากับ 0.041 K_d เท่ากับ 0.132

มอเตอร์ตัวที่ 5, 6 K_p เท่ากับ 10.521 K_i เท่ากับ 0.041 K_d เท่ากับ 0.132

มอเตอร์ตัวที่ 7, 8 K_p เท่ากับ 10.521 K_i เท่ากับ 0.041 K_d เท่ากับ 0.132

ตารางที่ 4-8 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 10 ms ในรูปแบบการก้าวเดินแบบปรับค่าเกน

เวลามิลลิวินาทีต่อการเปลี่ยนค่า (ms)	การก้าวแบบเดิน ในเวลา 60 s					
	ครั้งที่	ระยะทาง (cm)			θ	ความเร็ว (cm/s)
		a	b	c		
10	1	95.7	6.5	95.92	3.89	1.60
	2	106	1.5	106.01	0.81	1.77
	3	106.6	3.5	106.66	1.88	1.78
	ค่าเฉลี่ย			100.97	2.35	1.68

จากตารางที่ 4-8 ได้ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 100.97 cm องศาที่เคลื่อนไปจากแกน Y อยู่ที่ 2.35° และความเร็วอยู่ที่ 1.68 cm/s

ตารางที่ 4-9 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 15 ms ในรูปแบบการก้าวเดินแบบปรับค่าเกน

เวลามิลลิวินาทีต่อการเปลี่ยนค่า (ms)	การก้าวแบบเดิน ในเวลา 60 s					
	ครั้งที่	ระยะทาง (cm)			θ	ความเร็ว (cm/s)
		a	b	c		
15	1	100	9.5	100.45	5.43	1.67
	2	103	2.5	103.03	1.39	1.72
	3	110	9	110.37	4.68	1.84
	ค่าเฉลี่ย			101.74	3.41	1.70

จากตารางที่ 4-9 ได้ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 101.74 cm องศาที่เคลื่อนไปจากแกน Y อยู่ที่ 3.41° และความเร็วอยู่ที่ 1.70 cm/s

ตารางที่ 4-10 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 20 ms ในรูปแบบการก้าวเดินแบบปรับค่าเกณฑ์

เวลามีลิวินาทีต่อ การเปลี่ยนค่า (ms)	การก้าวแบบเดิน ในเวลา 60 s					ความเร็ว (cm/s)
	ครั้งที่	ระยะทาง (cm)			θ	
		a	b	c		
20	1	105.6	1.5	105.61	0.81	1.76
	2	106.4	12.5	107.13	6.70	1.79
	3	108.6	11	109.16	5.78	1.82
	ค่าเฉลี่ย			106.37	3.76	1.77

จากตารางที่ 4-10 ได้ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 106.37 cm องศาที่เคลื่อนไปจากแกน Y อยู่ที่ 3.76° และความเร็วอยู่ที่ 1.77 cm/s

ตารางที่ 4-11 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 25 ms ในรูปแบบการก้าวเดินแบบปรับค่าเกณฑ์

เวลามีลิวินาทีต่อ การเปลี่ยนค่า (ms)	การก้าวแบบเดิน ในเวลา 60 s					ความเร็ว (cm/s)
	ครั้งที่	ระยะทาง (cm)			θ	
		a	b	c		
25	1	81.2	0	81.20	0.00	1.35
	2	82	3	82.05	2.10	1.37
	3	80	0.5	80.00	0.36	1.33
	ค่าเฉลี่ย			81.63	1.05	1.36

จากตารางที่ 4-11 ได้ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 81.63 cm องศาที่เคลื่อนไปจากแกน Y อยู่ที่ 1.05° และความเร็วอยู่ที่ 1.36 cm/s

จากการทดลองปรับค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดี เห็นได้ว่าหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นที่เวลา 10 ms ต่อการเปลี่ยนจุดอ้างอิง และเร็วขึ้นในเวลา 15 ms ต่อการเปลี่ยนจุดอ้างอิงมี

ความเร็วที่สุด ณ เวลาที่ 20 ms ต่อการเปลี่ยนจุดอ้างอิงอยู่ที่ 1.77 cm/s แต่ช้าลงเมื่อเวลาการเปลี่ยนจุดอ้างอิงอยู่ที่ ณ เวลาที่ 25 ms ต่อการเปลี่ยนจุดอ้างอิง

4.3.2 ผลการทดลองควบคุมการก้าวด้วยรูปแบบการก้าวแบบวิ่งเหยาะ ๆ ลักษณะการเก็บผลเหมือนกับการทดลองการก้าวแบบเดิน โดยการก้าวแบบวิ่งเหยาะ ๆ มีลักษณะการขยับขาที่ละ 2 ขา เริ่มต้นที่ ขา D, A และ ขา B, C ตามตารางที่ 4-12

ตารางที่ 4-12 รูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ

A				
B				
C				
D				
	เคลื่อนที่			
	อยู่กับที่			

การเก็บผลแบบระยะการกระจัดในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ ใช้วิธีเดียวกันกับรูปแบบการก้าวเดิน กำหนดค่าเกณฑ์ไอดีมีดังนี้ มอเตอร์ทุกตัวใช้ K_p เท่ากับ 6.521 K_i เท่ากับ 0.0415 และ K_d เท่ากับ 0.132

ตารางที่ 4-13 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 10 ms ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ

เวลามิลลิวินาทีต่อการเปลี่ยนค่า (ms)	การก้าวแบบวิ่งเหยาะ ๆ ในเวลา 60 s					ความเร็ว (cm/s)
	ครั้งที่	ระยะทาง (cm)			θ	
		a	b	c		
10	1	100	1	100.00	0.57	1.67
	2	103	2	103.02	1.11	1.72
	3	109	3	109.04	1.58	1.82
	ค่าเฉลี่ย			104.02	1.09	1.73

จากตารางที่ 4-13 ได้ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 104.2 cm องศาที่เคลื่อนไปจากแกน Y อยู่ที่ 1.09° และความเร็วอยู่ที่ 1.73 cm/s

ตารางที่ 4-14 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 15 ms ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ

เวลามิลลิวินาทีต่อ การเปลี่ยนค่า (ms)	การก้าวแบบวิ่งเหยาะ ๆ ในเวลา 60 s					
	ครั้งที่	ระยะทาง (cm)			θ	ความเร็ว (cm/s)
		a	b	c		
15	1	105	9.5	105.43	5.17	1.76
	2	109	3	109.04	1.58	1.82
	3	109	0	109.00	0.00	1.82
	ค่าเฉลี่ย			107.82	2.25	1.80

จากตารางที่ 4-14 ได้ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 107.82 cm องศาที่เคลื่อนไปจากแกน Y อยู่ที่ 2.25° และความเร็วอยู่ที่ 1.80 cm/s

ตารางที่ 4-15 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 20 ms ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ

เวลามิลลิวินาทีต่อ การเปลี่ยนค่า (ms)	การก้าวแบบวิ่งเหยาะ ๆ ในเวลา 60 s					
	ครั้งที่	ระยะทาง (cm)			θ	ความเร็ว (cm/s)
		a	b	c		
20	1	127	0.5	127.00	0.23	2.12
	2	125	1.8	125.01	0.83	2.08
	3	125	0	125.00	0.00	2.08
	ค่าเฉลี่ย			125.67	0.35	2.09

จากตารางที่ 4-15 ได้ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 125.67 cm องศาที่เคลื่อนไปจากแกน Y อยู่ที่ 0.35° และความเร็วอยู่ที่ 2.09 cm/s

ตารางที่ 4-16 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 25 ms ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ

เวลามิลลิวินาทีต่อการเปลี่ยนค่า (ms)	การก้าวแบบเดิน ในเวลา 60 s					
	ครั้งที่	ระยะทาง (cm)			θ	ความเร็ว (cm/s)
		a	b	c		
25	1	133	1.5	133.01	0.65	2.22
	2	130	3	130.03	1.32	2.17
	3	123	3	123.04	1.40	2.05
	ค่าเฉลี่ย			128.69	1.12	2.14

จากตารางที่ 4-16 ได้ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 128.69 cm องศาที่เคลื่อนไปจากแกน Y อยู่ที่ 1.12° และความเร็วอยู่ที่ 2.14 cm/s

การทดลองใช้ค่าเกณฑ์ K_p เท่ากับ 6.521 K_i เท่ากับ 0.0415 K_d เท่ากับ 0.232 เห็นได้ว่าหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เร็วที่สุด คือ 2.14 cm/s ณ เวลาที่ 25 ms ต่อการเปลี่ยนจุดอ้างอิง และความเร็วเพิ่มขึ้นเพื่อเพิ่มเวลาการเปลี่ยนจุดอ้างอิง

จากการทดลองผู้จัดทำได้ทำการปรับค่าเกณฑ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของแกนมอเตอร์ดังนี้

มอเตอร์ตัวที่ 1, 2 K_p เท่ากับ 15.521 K_i เท่ากับ 0.041 K_d เท่ากับ 0.132

มอเตอร์ตัวที่ 3, 4 K_p เท่ากับ 15.521 K_i เท่ากับ 0.041 K_d เท่ากับ 0.132

มอเตอร์ตัวที่ 5, 6 K_p เท่ากับ 10.521 K_i เท่ากับ 0.041 K_d เท่ากับ 0.132

มอเตอร์ตัวที่ 7, 8 K_p เท่ากับ 10.521 K_i เท่ากับ 0.041 K_d เท่ากับ 0.132

ตารางที่ 4-17 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 10 ms ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ แบบปรับค่าเกณฑ์

เวลามิลลิวินาทีต่อการเปลี่ยนค่า (ms)	การก้าวแบบวิ่งเหยาะ ๆ ในเวลา 60 s					
	ครั้งที่	ระยะทาง (cm)			θ	ความเร็ว (cm/s)
		a	b	c		
10	1	470	108.5	482.36	13.00	8.04
	2	492	55.5	495.12	6.44	8.25
	3	500	20.3	500.41	2.32	8.34
	ค่าเฉลี่ย			488.74	9.72	8.15

จากตารางที่ 4-17 ได้ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 488.74 cm องศาที่เคลื่อนไปจากแกน Y อยู่ที่ 9.72° และความเร็วอยู่ที่ 8.15 cm/s

ตารางที่ 4-18 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 15 ms ในรูปแบบการก้าววิงเหยาะ ๆ แบบปรับค่าแกน

เวลามิลลิวินาทีต่อการเปลี่ยนค่า (ms)	การก้าวแบบวิงเหยาะ ๆ ในเวลา 60 s					ความเร็ว (cm/s)
	ครั้งที่	ระยะทาง (cm)			θ	
		a	b	c		
15	1	523	15	523.22	1.64	8.72
	2	544	13.8	544.18	1.45	9.07
	3	482	67	486.63	7.91	8.11
	ค่าเฉลี่ย			533.70	1.55	8.89

จากตารางที่ 4-18 ได้ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 533.70 cm องศาที่เคลื่อนไปจากแกน Y อยู่ที่ 1.55° และความเร็วอยู่ที่ 8.89 cm/s

ตารางที่ 4-19 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 20 ms ในรูปแบบการก้าววิงเหยาะ ๆ แบบปรับค่าแกน

เวลามิลลิวินาทีต่อการเปลี่ยนค่า (ms)	การก้าวแบบวิงเหยาะ ๆ ในเวลา 60 s					ความเร็ว (cm/s)
	ครั้งที่	ระยะทาง (cm)			θ	
		a	b	c		
20	1	558	52.5	560.46	5.37	9.34
	2	564	53.5	566.53	5.42	9.44
	3	548	87.5	554.94	9.07	9.25
	ค่าเฉลี่ย			563.50	5.40	9.39

จากตารางที่ 4-19 ได้ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 563.50 cm องศาที่เคลื่อนไปจากแกน Y อยู่ที่ 5.40° และความเร็วอยู่ที่ 9.39 cm/s

ตารางที่ 4-20 เวลาต่อการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 25 ms ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ แบบปรับค่าเกณฑ์

เวลามิลลิวินาทีต่อการเปลี่ยนค่า (ms)	การก้าวแบบวิ่งเหยาะ ๆ ในเวลา 60 s					
	ครั้งที่	ระยะทาง (cm)			θ	ความเร็ว (cm/s)
		a	b	c		
25	1	422	44	424.29	5.95	7.07
	2	422	7.5	422.07	1.02	7.03
	3	333	95	346.29	15.92	5.77
	ค่าเฉลี่ย			423.18	3.49	7.05

จากตารางที่ 4-20 ได้ระยะการเคลื่อนที่อยู่ที่ 314.18 cm องศาที่เคลื่อนไปจากแกน Y อยู่ที่ 3.226 และความเร็วอยู่ที่ 5.236 cm/s

จากการทดลองปรับค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมพีไอดีเห็นได้ว่าหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น เวลาที่ 10 ms ต่อการเปลี่ยนจุดอ้างอิง และเร็วขึ้นในเวลาที 15 ms ต่อการเปลี่ยนจุดอ้างอิง เร็วที่สุด ณ เวลาที่ 20 ms ต่อการเปลี่ยนจุดอ้างอิงอยู่ที่ 9.39 cm/s แต่ช้าลงเมื่อเวลาการเปลี่ยนจุดอ้างอิงอยู่ที่ ณ เวลาที่ 25 ms ต่อการเปลี่ยนจุดอ้างอิง

4.3.3 ผลการทดลองการระบุระยะทางในการเดินด้วยเวลา จากการทดลองก่อนหน้านี้ผู้จัดทำได้ข้อมูลต่าง ๆ เช่น ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ดังนั้นผู้จัดทำได้นำความสัมพันธ์ระยะทาง เวลา และความเร็วในการระบุระยะทางที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปโดยมีระยะที่ระบุ คือ 50 100 และ 150 cm โดยใช้ เวลาการเปลี่ยนจุดอ้างอิงที่ 20 ms ต่อการเปลี่ยนจุดอ้างอิงและค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมดังนี้กำหนดค่าเกณฑ์พีไอดี

มอเตอร์ตัวที่ 1, 2 K_p เท่ากับ 15.521 K_i เท่ากับ 0.041 K_d เท่ากับ 0.132

มอเตอร์ตัวที่ 3, 4 K_p เท่ากับ 15.521 K_i เท่ากับ 0.041 K_d เท่ากับ 0.132

มอเตอร์ตัวที่ 5, 6 K_p เท่ากับ 10.521 K_i เท่ากับ 0.041 K_d เท่ากับ 0.132

มอเตอร์ตัวที่ 7, 8 K_p เท่ากับ 10.521 K_i เท่ากับ 0.041 K_d เท่ากับ 0.132

ตารางที่ 4-21 การเก็บผลการระบุระยะทางในรูปแบบการก้าวเดิน

การก้าวแบบเดิน									
เซนติเมตร	ที่	เวลา (s)	ความเร็ว (cm/s)	ระยะทาง (cm)			θ	ค่าความผิดพลาด	คิดเป็น %
				a	b	c			
50	1	28	1.79	46	2.5	46.07	3.11	3.93	7.86
	2	28	1.79	51.4	2.5	51.46	2.78	-1.46	2.92
	3	28	1.79	50.4	1.9	50.44	2.16	-0.44	0.87
ค่าเฉลี่ย						50.44	2.16	0.68	1.36
100	1	56	1.79	106	5.6	106.15	3.02	-6.15	6.15
	2	56	1.79	107	4.8	107.11	2.57	-7.11	7.11
	3	56	1.79	110	6	110.16	3.12	-10.16	10.16
ค่าเฉลี่ย						110.16	3.12	-7.81	15.61
150	1	84	1.79	152	15	152.74	5.64	-2.74	1.83
	2	84	1.79	142	27.2	144.58	10.84	5.42	3.61
	3	84	1.79	151	14.7	151.71	5.56	-1.71	1.14
ค่าเฉลี่ย						151.71	5.56	0.32	0.64

จากตารางที่ 4-21 แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์การก้าวแบบเดินระยะที่ระบุ คือ 50 cm หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปได้ 50.44 cm ค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 0.68 cm ต่อมาระยะที่ระบุ คือ 100 cm หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปได้ 110.16 cm ค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 1.77 cm ระยะที่ 150 cm หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปได้ 151.71 cm ค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 0.32 cm

จากตารางที่ 4-22 แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์การก้าวแบบวิ่งเหยาะ ๆ ระยะที่ระบุคือ 50 cm หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปได้ 32.04 cm ค่าความผิดพลาดอยู่ที่ -16.62 cm ระยะที่ระบุคือ 100 cm หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปได้ 89.00 cm ค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 10.33 cm ระยะที่ 150 cm หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปได้ 148.17 cm ค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 1.23 cm

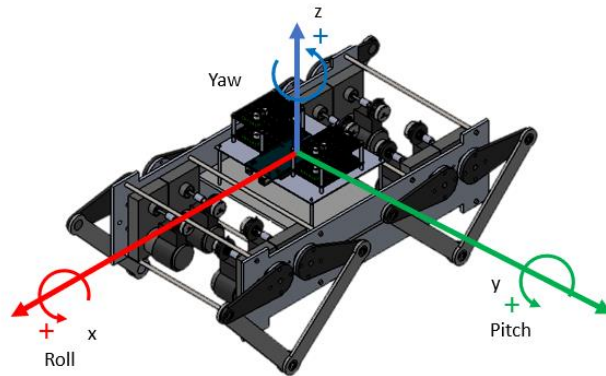
ตารางที่ 4-22 การเก็บผลการระบุระยะทางในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ

การก้าวแบบวิ่งเหยาะ ๆ									
เซนติเมตร	ที่	เวลา (s)	ความเร็ว (cm/s)	ระยะทาง (cm)			θ	ค่าความผิดพลาด	คิดเป็น %
				a	b	c			
50	1	6	8.79	32	1.5	32.04	2.68	17.96	35.93
	2	6	8.79	36	2	36.06	3.18	13.94	27.89
	3	6	8.79	32	1.5	32.04	2.68	17.96	35.93
ค่าเฉลี่ย						32.04	2.68	-16.62	33.25
100	1	11	8.79	90	0	90.00	0.00	10.00	10.00
	2	11	8.79	90	1	90.01	0.64	9.99	9.99
	3	11	8.79	89	0	89.00	0.00	11.00	11.00
ค่าเฉลี่ย						89.00	0.00	10.33	20.66
150	1	17	8.79	150	13	150.56	4.95	-0.56	0.37
	2	17	8.79	147	13	147.57	5.05	2.43	1.62
	3	17	8.79	148	7	148.17	2.71	1.83	1.22
ค่าเฉลี่ย						148.17	2.71	1.23	2.47

จากการทดลองหุ่นยนต์สามารถหยุดใกล้เคียงกับระยะที่กำหนดได้ถึงแม้ไม่มีเซ็นเซอร์ในการวัดระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระยะทาง เวลา และความเร็ว

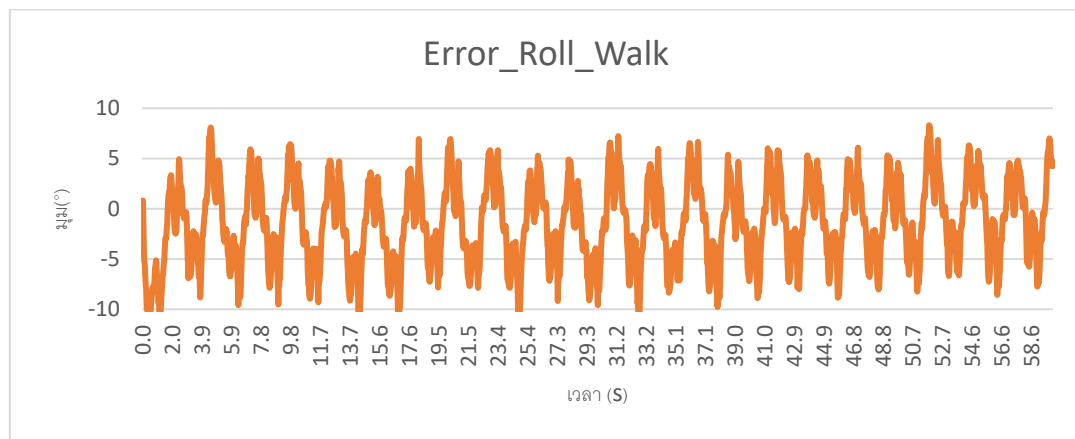
4.4 การเปรียบเทียบขององศาการเอียงของหุ่นยนต์

การเปรียบเทียบขององศาการเอียงของหุ่นยนต์ผู้จัดทำใช้ เซ็นเซอร์ไจโร MPU6050 ในการวัดองศาการเอียงของหุ่นยนต์ในแต่ละรูปแบบการก้าวโดยระบุมุมของตัวหุ่นยนต์ดังภาพที่ 4-18 เพื่อวัดประสิทธิภาพของรูปแบบการก้าวผู้จัดทำได้ใช้วิธีหาด้วยดัชนีชี้วัดสมรรถนะของตัวควบคุมที่ประกอบไปด้วย ดัชนีรวมความผิดพลาดสัมบูรณ์ตามเวลา ดัชนีรวมความผิดพลาดกำลังสอง ดัชนีรวมความผิดพลาดสัมบูรณ์



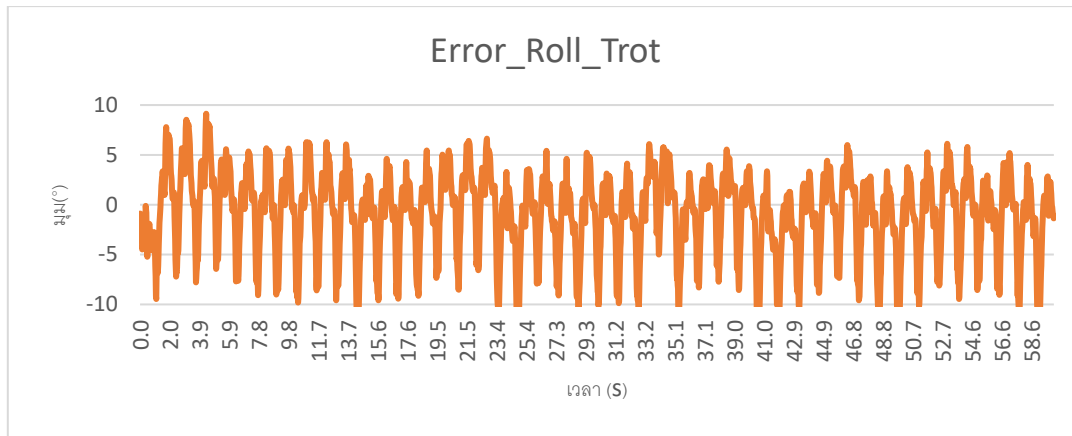
ภาพที่ 4-18 ระบุแกนของตัวหุ่นยนต์

จากภาพที่ 4-18 แสดงให้เห็นถึงการระบุแกนที่วัดมุมของตัวหุ่นยนต์ ได้แก่ มุม Roll ที่หมุนรอบแกน x แกน Pitch หมุนรอบแกน y และ แกน Yaw หมุนรอบแกน z ในการเปรียบเทียบรูปแบบการก้าว ผู้จัดทำเปรียบเทียบในมุม Roll และ Pitch มีผลการเปรียบเทียบดังต่อไปนี้



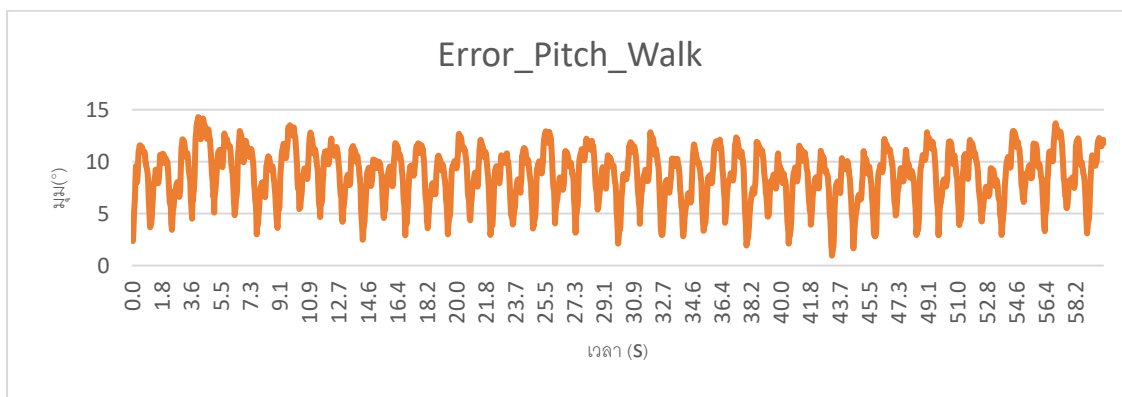
ภาพที่ 4-19 ผลตอบสนองของมุม Roll ในรูปแบบการก้าวเดิน

จากภาพที่ 4-19 คือ ผลตอบสนองขององศาการเอียงในรูปแบบการก้าวแบบ เดิน ในระยะเวลา 60 s จากกราฟแสดงให้เห็นให้หุ่นยนต์มีองศาการเอียงในมุม Roll ในรูปแบบการก้าวแบบ เดิน ที่เอียงไปมาทางซ้าย และขวาสลับไปมาอย่างสม่ำเสมอ



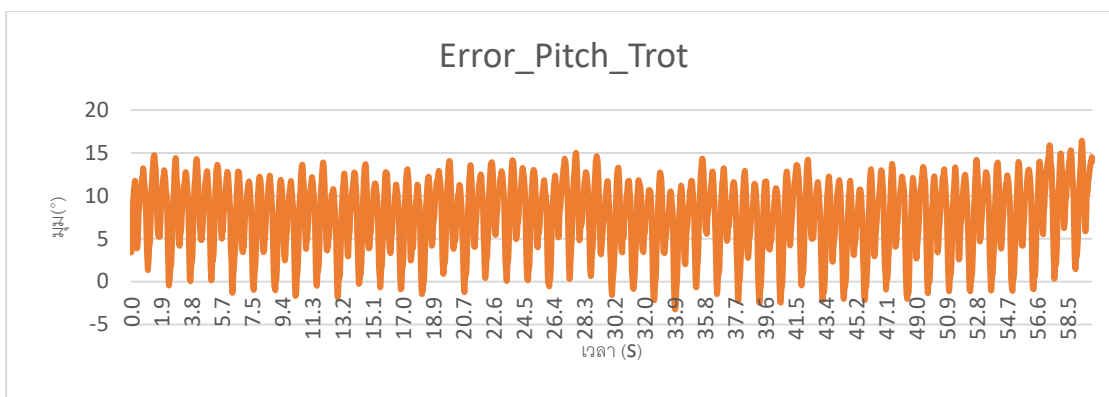
ภาพที่ 4-20 ผลตอบสนองของมุม Roll ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ

จากภาพที่ 4-20 คือ ผลตอบสนองขององศาการเอียงในรูปแบบการก้าวแบบ วิ่งเหยาะ ๆ ในระยะเวลา 60 s จากกราฟแสดงให้เห็นหุนยนต์มีองศาการเอียงในมุม Roll ในรูปแบบการก้าวแบบ วิ่งเหยาะ ๆ ที่เอียงไปมาทางซ้ายมากกว่าทางขวา และมีความถี่ที่มากกว่าในรูปแบบการก้าวแบบ เดิน



ภาพที่ 4-21 ผลตอบสนองของมุม Pitch ในรูปแบบการก้าวเดิน

จากภาพที่ 4-21 คือ ผลตอบสนองขององศาการเอียงในรูปแบบการก้าวแบบ เดิน ในระยะเวลา 60 s จากกราฟแสดงให้เห็นหุนยนต์มีองศาการเอียงในมุม Pitch ในรูปแบบการก้าวแบบ เดินที่เอียงไปข้างหน้าในลักษณะที่ม้วนหน้าลงเล็กน้อย



ภาพที่ 4-22 ผลตอบสนองของมุม Pitch ในรูปแบบการก้าววิ่งเหยาะ ๆ

จากภาพที่ 4-22 คือ ผลตอบสนองขององศาการเอียงในรูปแบบการก้าวแบบ วิ่งเหยาะ ๆ ในระยะเวลา 60 s จากกราฟแสดงให้เห็นหุนยนต์มีองศาการเอียงในมุม Pitch ในรูปแบบการก้าวแบบ วิ่งเหยาะ ๆ ที่เอียงไปข้างหน้าในลักษณะที่ม้วนลงเล็กน้อย และมีความถี่ที่มากกว่าในรูปแบบการก้าวแบบเดิน

จากผลการทดลองข้างต้นผู้จัดทำได้ทำการวัด และเปรียบเทียบของศาด้วยในแต่ละรูปแบบการก้าว ในมุม Roll และ Pitch เพื่อวัดประสิทธิภาพการเอียงของหุ่นยนต์ ด้วยค่าดัชนีรวมความผิดพลาดกำลังสองจากสมการที่ (2-26) ค่าดัชนีรวมความผิดพลาดสมบูรณ์จากสมการที่ (2-27) และความผิดพลาดสมบูรณ์ตามเวลาจากสมการที่ (2-28) ได้ตามตารางที่ 4-23

ตารางที่ 4-23 ผลของค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ในระยะเวลาอินทิกรัล

ค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ในระยะเวลาอินทิกรัล					
รูปแบบการก้าวแบบเดิน					
Roll			pitch		
ITAE	ISE	IAE	ITAE	ISE	IAE
218.338	53112.284	9924.47	528.453	227834.670	24020.600
รูปแบบการก้าวแบบวิ่งเหยาะ ๆ					
Roll			Pitch		
ITAE	ISE	IAE	ITAE	ISE	IAE
197.820	50350.375	8991.840	464.877	208995.641	21130.790

สรุปการทดลองในรูปแบบการก้าวแบบวิ่งเหยาะ ๆ มีค่าดัชนีรวมความผิดพลาดกำลังสอง ค่าดัชนีรวมความผิดพลาดสัมบูรณ์ และความผิดพลาดสัมบูรณ์ตามเวลา ที่น้อยกว่าทั้งมุม Roll และ Pitch แสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์ในรูปแบบการก้าวแบบวิ่งเหยาะ ๆ มีการเอียงของมุมที่น้อยกว่า

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป และอภิปรายผล

การสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบ หุ่นยนต์เดินแบบสี่ขา โดยใช้กลไกห้าชิ้นต่อโยงผู้จัดทำมีการศึกษาหาข้อมูลเพื่อจัดทำ หุ่นยนต์เดินแบบสี่ขา กลไกห้าชิ้นต่อโยงที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 ทำหน้าที่สร้างชุดคำสั่งการก้าวเดินของปลายเท้าทั้งสี่โดยประยุกต์ใช้จลนศาสตร์ การเคลื่อนที่ผกผัน เพื่อคำนวณหาตำแหน่งแกนหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั้ง 8 ชุด การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั้ง 8 ชุดนั้นผู้จัดทำได้มีการนำตัวต้านทานปรับค่าได้ทำหน้าที่วัด องศาของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

จากผลการทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง ในรูปแบบการก้าวเดิน และวิ่งเหยาะ ๆ ในเวลาการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 10, 15, 20 และ 25 ms ต่อการเปลี่ยนหนึ่งตำแหน่งพบว่า หากมีเวลาในการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขามากขึ้นทำให้ความเร็วการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น แต่ลดลงในเวลาการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 25 ms ทั้งสองรูปแบบการก้าวโดยการทดลองการเคลื่อนที่ในรูปแบบการก้าวเดินด้วยเวลาการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 10 ms ต่อการเปลี่ยนหนึ่งตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนด้วยความเร็วเฉลี่ย 1.68 cm/s เปรียบเทียบกับเวลาการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 20 ms ความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 1.77 cm/s และเวลาการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 25 ms ความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 1.36 cm/s ในการทดลองการเคลื่อนที่ในรูปแบบการก้าวแบบวิ่งเหยาะ ๆ การเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 10 ms ต่อการเปลี่ยนหนึ่งตำแหน่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเฉลี่ย 8.15 cm/s เปรียบเทียบกับเวลาการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 20 ms ความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 9.39 cm/s และเวลาการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 25 ms ความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 7.05 cm/s เห็นได้ว่าความเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขา แต่ลดลงเมื่อเวลาการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 25 ms เป็นผลมาจากเมื่อเวลาการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาน้อยทำให้ขาเคลื่อนที่เร็วขึ้นส่งผลให้ปลายขาเกิดการไกลความเร็วการเคลื่อนที่ลดลง เมื่อเพิ่มเวลาการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาทำให้การไกลลดลงแต่เมื่อเพิ่มเวลาการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขามากขึ้นทำให้ขาเคลื่อนที่ช้าลงทำให้ในเวลาการเปลี่ยนตำแหน่งปลายขาที่ 25 ms ทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ช้าลง

หุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยงมีการวัดท่าการเดินในรูปแบบมุมของตัวหุ่นยนต์ด้วยเซ็นเซอร์ไจโร MPU6050 ของมุม Roll และ Pitch เพื่อวัดประสิทธิภาพการเอียงของหุ่นยนต์ในแต่ละรูปแบบการก้าวในช่วงเวลา 60 s ผู้จัดทำใช้วิธีหาค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์ในระยะเวลาอินทิกรัลของมุม Roll และ Pitch การเปรียบเทียบในรูปแบบการก้าวแบบเดิน มีค่ามีค่าดัชนีรวมความผิดพลาดสัมบูรณ์ตามเวลา ค่าดัชนีรวมความผิดพลาดกำลังสอง และค่าดัชนีรวมความผิดพลาดสัมบูรณ์ของมุม Roll และ Pitch สูงกว่ารูปแบบการก้าวแบบวิ่งเหยาะ ๆ

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

เนื่องจากหุ่นยนต์ยังไม่มีระบบควบคุมทิศทางในการเคลื่อนที่ทำให้การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ยังมีความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ตรงอยู่ เพื่อให้หุ่นยนต์มีความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ตรงลดลง ควรสร้างระบบควบคุมทิศทางของหุ่นยนต์

5.3 ข้อเสนอแนะ

การสร้างระบบควบคุมทิศทางของหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง เพื่อลดความผิดพลาดทิศทางเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เดินแบบสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยงโดยการใช้เซ็นเซอร์ไจโรมาเป็นสัญญาณป้อนกลับให้หุ่นยนต์เพื่อควบคุมทิศทางของหุ่นยนต์

บรรณานุกรม

- Ruina, D., et al. (2019). "The Analysis of Key Technologies for Advanced Intelligent Quadruped Robots." 2019 4th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC). Vol.4 : 70-74.
- Ming, L., et al. (2022). "Design of a Small Quadruped Robot with Parallel Legs." Advanced Control and Optimization for Complex Energy Systems 2022. Vol.2022 : 1-11.
- Kenneally, G., Avik, D. and Koditschek, D. E. (2016). "Design Principles for a Family of Direct-Drive Legged Robots." IEEE Robotics and Automation Letters. Vol.1 : 900-907.
- Duperret, J., and Koditschek, D. E. (2017). "Empirical validation of a spined sagittal-plane quadrupedal model." 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Vol.10 : 1058-1064.
- Kau, N., et al. (2019). "Stanford Doggo: An Open-Source, Quasi-Direct-Drive Quadruped." IEEE International Conference on Robotics and Automation 2019. Vol.10 : 6309-6315.
- Zhang, Y., et al. (2021). "A Novel Low-Cost Quadruped Robot with Joint Fault-Tolerant Control." 2021 6th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC). Vol.6 : 19-24.
- Keamorakot, U. and Poolperm, L. (2021). "Development of the quadruped robot modeling and movement simulation for Education." 2021 6th International STEM Education Conference (iSTEM-Ed). Vol.6 : 1-4.
- Ma, B., et al. (2021). "Research on Leg Transmission Mechanism of Quadruped Robot," 2021 6th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC). Vol.6 : 36-40.

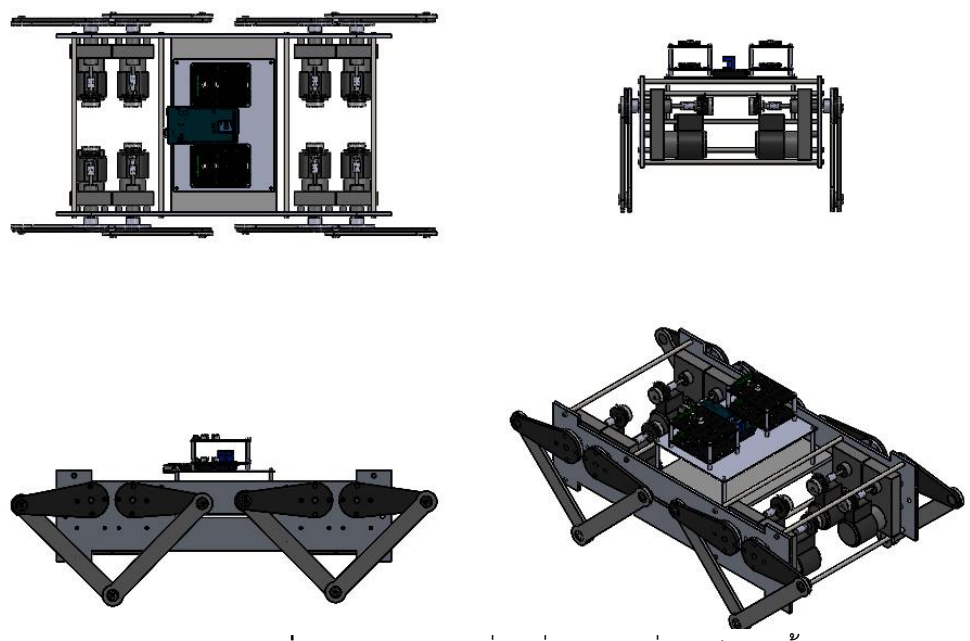
บรรณานุกรม (ต่อ)

- Nandhini, M., Krithika, V. and Chittal, K. (2017). “Design of four pedal quadruped robot.” 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPSI). Vol.10 : 2548-2552.
- Ariyanto, M., et al. (2019). “Design and Kinematic Analysis of Quadrupedal Cat-Like Robot.” 2019 International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI). Vol.5 :398-402.
- Jin Tak Kim, et al. (2013). “Experimental investigation on the design of leg for a hydraulic actuated quadruped robot.” IEEE ISR 2013. Vol.2 :1-5.
- ienergyguru. (2015). [วารสารออนไลน์] การเกิดแรงดันกระแสตรง. [4 ตุลาคม 2565]. จาก ienergyguru.com/2015/11/ไฟฟ้ากระแสตรง

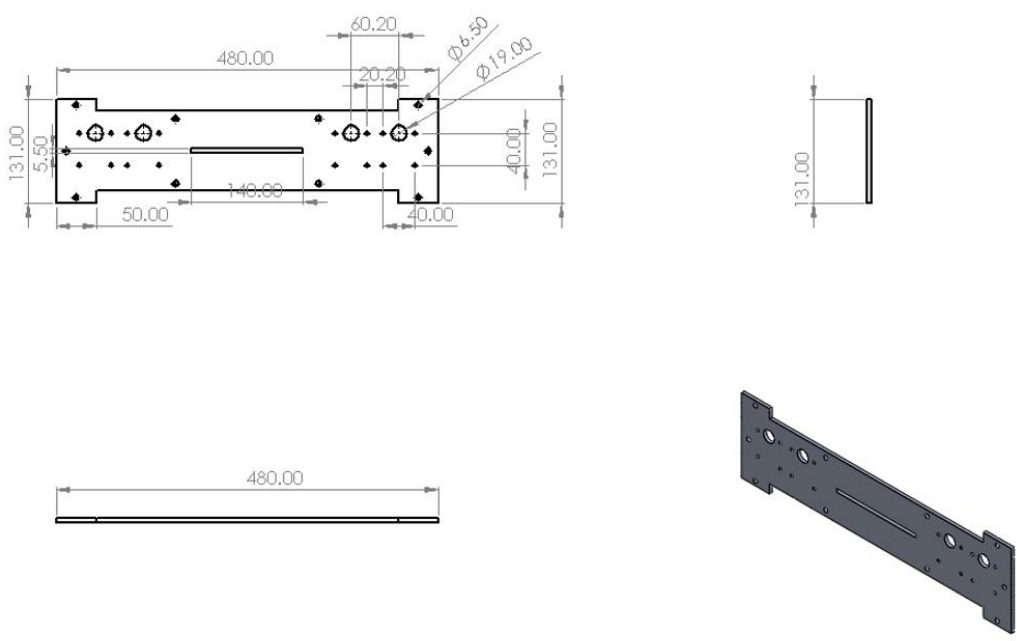
ภาคผนวก ก

การออกแบบโครงสร้าง

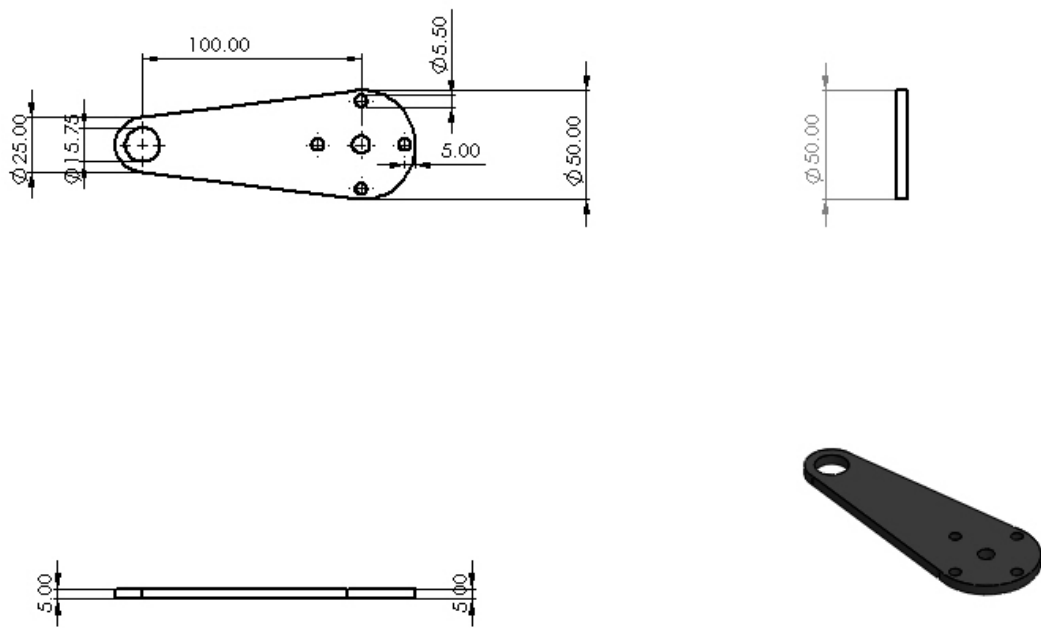
ภาพรวมหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง



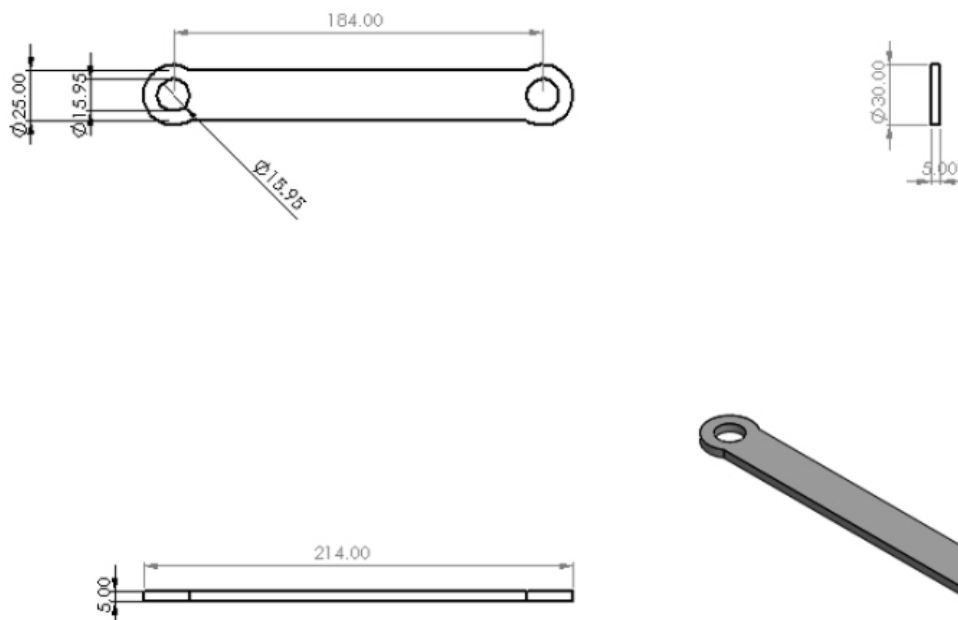
ภาพที่ ก-1 หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง



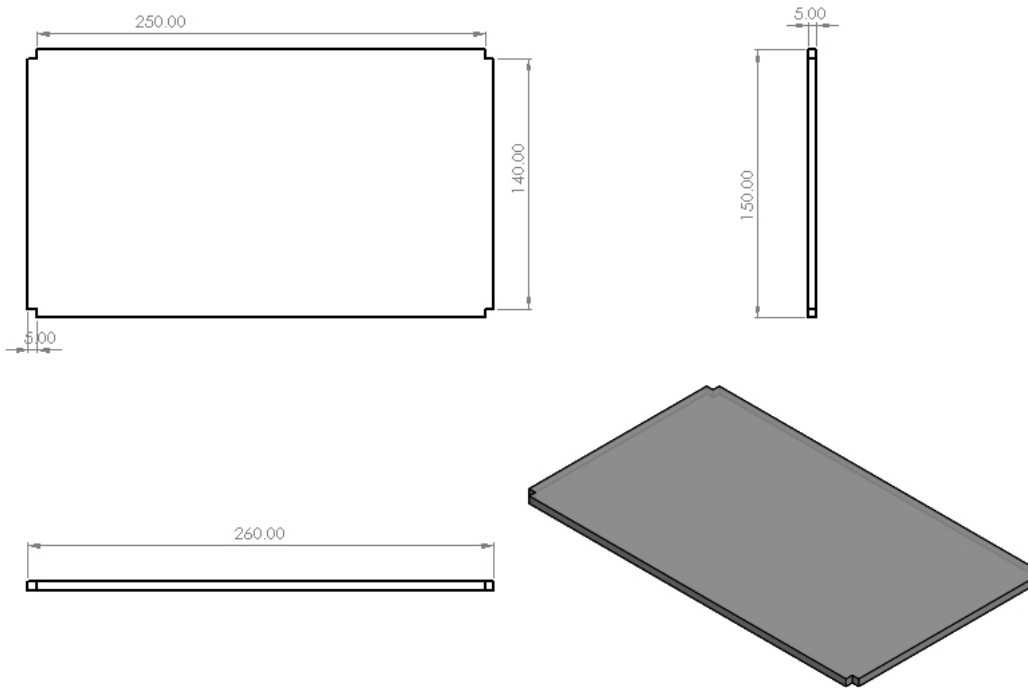
ภาพที่ ก-2 ฝาข้างตัวหุ่นยนต์



ภาพที่ ก-3 ขาส่วนบน

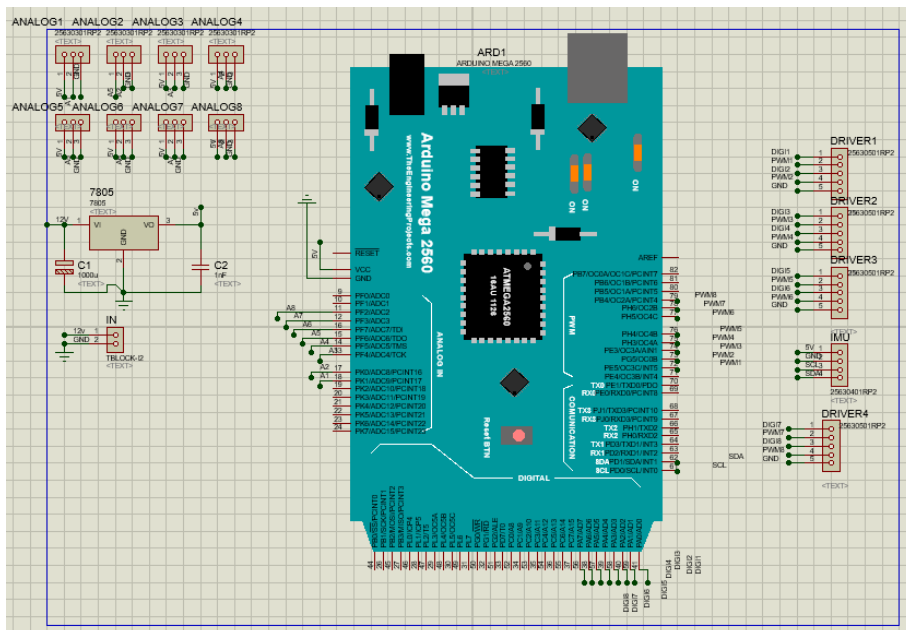


ภาพที่ ก-4 ขาส่วนล่าง

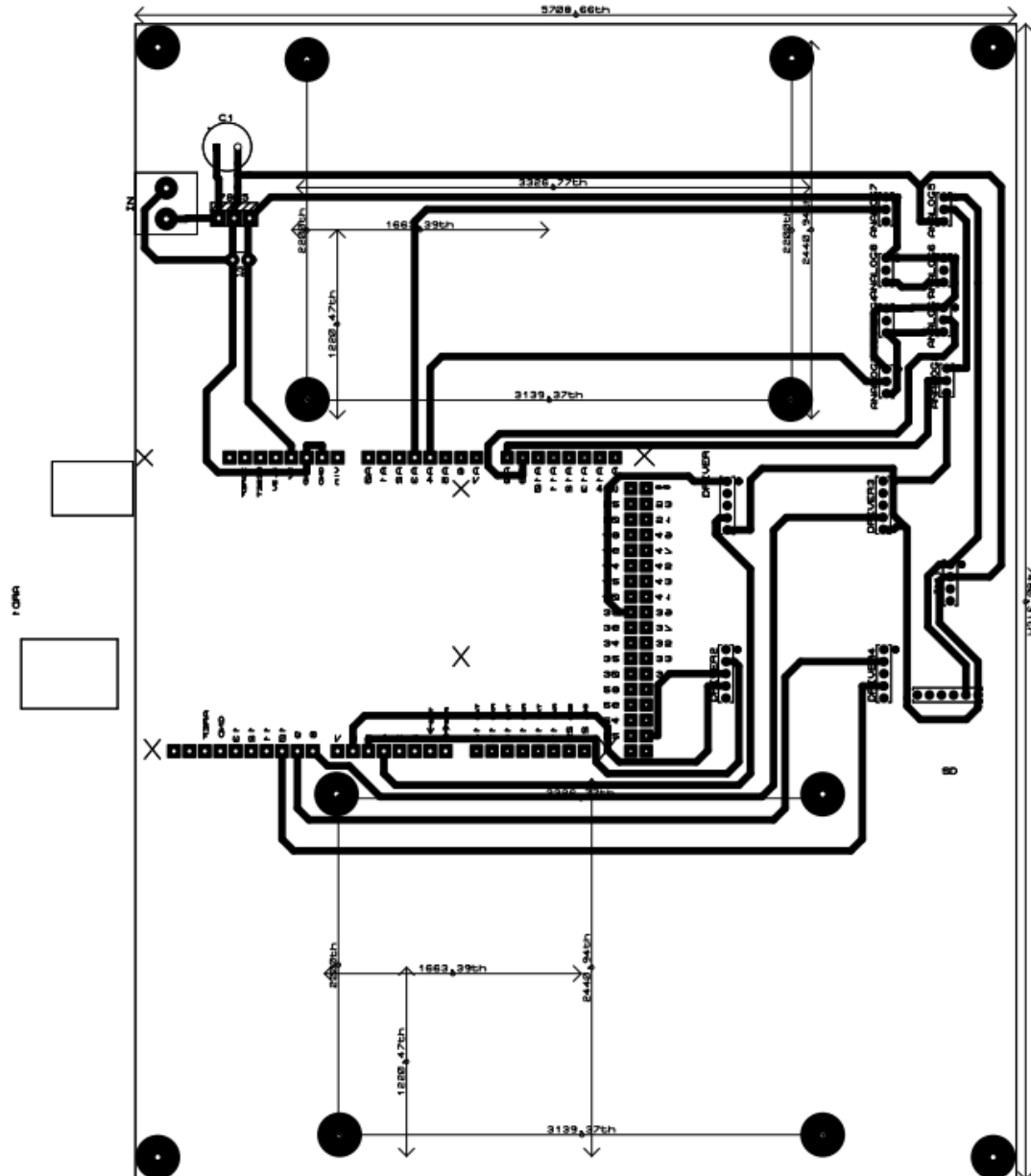


ภาพที่ ก-5 แผ่นตามกลางตัวหุ่นยนต์

ภาพรวมวงจรหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขา กลไกห้าชิ้นต่อโยง



ภาพที่ ก-6 ภาพวงจรของหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขา กลไกห้าชิ้นต่อโยง



ภาพที่ ก-7 ภาพลายวงจรของหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง

ประวัติผู้จัดทำ

ชื่อ : นายณัฐนนท์ ศรีแก้ว

ชื่อปริญญาบัตร : หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเดินสี่ขากลไกห้าชิ้นต่อโยง

สาขาวิชา : วิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

ประวัติ

ประวัติการศึกษา : - การศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาอิเล็กทรอนิกส์
อุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคนิคธัญบุรี ปีการศึกษา 2562

- การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ภาควิชาครุ
ศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2566

สถานที่ติดต่อ : 12/848 หมู่ 4 ตำบล บึงยี่โถ อำเภอ ธัญบุรี จังหวัด ปทุมธานี
รหัสไปรษณีย์ 12130

เบอร์ติดต่อ : 091-025-6097