

การออกแบบและสร้างต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ชนิดสามองศาอิสระ
สำหรับติดตั้งบนหุ่นยนต์เคลื่อนที่



นางสาวนพวรรณ เนื่อนवलสุวรรณ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

**A DESIGN AND PROTOTYPING OF A 3-DOF
ARTICULATED ROBOT ARM FOR
INSTALLATION ON MOBILE ROBOT**



Noppawan Nurnuansuwan

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering in Mechatronics Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2020

การออกแบบและสร้างต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ชนิดสามองศาอิสระสำหรับติดตั้ง
บนหุ่นยนต์เคลื่อนที่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.รัชทิน จันทรเจริญ)

ประธานกรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.โสทรฎา แจ้engar)

กรรมการ



(อ. ดร.พิจิตรา เอื้องไพโรจน์)

กรรมการ



(รศ. ดร.นัตถชัย โชติชอุยกุร)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
และประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นพวรรณ เนื่อนวลสุวรรณ : การออกแบบและสร้างต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ชนิดสามองศาอิสระสำหรับติดตั้งบนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (A DESIGN AND PROTOTYPING OF A 3-DOF ARTICULATED ROBOT ARM FOR INSTALLATION ON MOBILE ROBOT)
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ขำนิประศาสน์, 83 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบแขนกลหุ่นยนต์อาร์ทิกูเลต (Articulated robot arm) ชนิดสามองศาอิสระและได้สร้างต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดสตีปเปอร์จำนวน 3 ตัว เป็นตัวขับเคลื่อน (Actuator) ของหุ่นยนต์ และได้วิเคราะห์จลนศาสตร์ (Kinematics) ของแขนกลหุ่นยนต์เพื่อสร้างหน้าโปรแกรมสำหรับผู้ใช้งาน โดยผู้ใช้งานสามารถควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ด้วยการกดปุ่มหรือกรอกตัวเลขในหน้าโปรแกรมได้ทั้งในพิกัดแกน (Joint space coordinate) และพิกัดฉาก (Cartesian space coordinate) และผู้ใช้งานสามารถเขียน โปรแกรมควบคุมการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ได้ทั้งในรูปแบบการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วที่ไม่สนใจเส้นทางในการเคลื่อนที่ (Path) ของแขนกลหุ่นยนต์และในรูปแบบที่ให้เส้นทางในการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงได้ ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นการสร้างต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่สามารถทำงานได้จากการวิเคราะห์จลนศาสตร์ของแขนกลหุ่นยนต์ และโดยต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์นี้มีขอบเขตในการทำงานแกนที่ 1 ระหว่าง -165 องศาถึง 160 องศา, แกนที่ 2 ระหว่าง -45 องศาถึง 140 องศา, แกนที่ 3 อยู่ระหว่าง -150 องศาถึง 150 องศา มีค่าความคลาดเคลื่อนจากพิกัดจุดที่กำหนด (Accuracy) อยู่ในช่วง 13.28 – 72.83 มิลลิเมตร, ค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) มีค่า 35.48 มิลลิเมตร ที่ความเชื่อมั่น 99.7% และมีค่าความละเอียดในการเคลื่อนที่ (Resolution) อยู่ในช่วง 0.3474 – 0.8597 มิลลิเมตร ขึ้นกับตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลหุ่นยนต์ และต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์นี้สามารถผลิตขึ้นได้เองภายในมหาวิทยาลัย ทั้งยังเป็นส่วนช่วยในส่งเสริมการเรียนรู้ทางด้านวิทยาการหุ่นยนต์แก่นักศึกษาและผู้ที่สนใจต่อไปอีกด้วย

สาขาวิชา วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

Abm

กนต์

NOPPHAWAN NURNUANSUWAN : A DESIGN AND PROTOTYPING
OF A 3-DOF ARTICULATED ROBOT ARM FOR INSTALLATION ON
MOBILE ROBOT. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. FLT.LT.
KONTORN CHAMNIPRASART, Ph.D., 83 PP.

ARTICULATE ROBOT ARM/MOBILE ROBOT/KINEMATIC MODEL

For this research, a prototype of 3-DOF articulated robot arm is designed, manufactured, and assembled. 3 stepper motor, one type of electrical motors, are actuators of the robot arm. Kinematics of the robot arm is analyzed to generate a program to control the robot are both joint space coordinate and cartesian space coordinate. Users can control the robot arm by graphic user interface that user can manually control the robot arm by click on buttons or enter some values on the interface. In addition, users can also generate a program by teaching sets of angles of each joint or positions of the robot arm and can select type of motion between points to be motion without regular part or motion with linear path. The result of this research is a prototype of 3-DOF articulated robot arm installed on a mobile robot which can be control by user based on kinematics analyzation. The accuracy is between 13.28 – 72.83 mm, the repeatability is 35.48 mm with 99.7% confident, and resolution is between 0.3474 – 0.8597 mm. The robot arm can be manufactured and assembled in a university and can improve learning of robotics for other students.

School of Mechatronics Engineering

Academic year 2020

Student's Signature 

Advisor's Signature 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มคนต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนการให้ความช่วยเหลือและสนับสนุน ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่ให้วิชาความรู้ คำแนะนำ การสนับสนุน ทั้งด้านวิชาการ ตลอดจนการดำเนินชีวิต จนสามารถผ่านอุปสรรคต่าง ๆ มาได้เสมอมา ทั้งยังเป็นผู้มอบโอกาสทางการศึกษาทั้งในระดับบัณฑิตศึกษาและในระดับปริญญาตรี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันท์เจริญ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสทรฎา แจ้งการ, และอาจารย์ ดร.พิจิตรา เอื้องไพโรจน์ ที่สละเวลาในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนการตรวจสอบเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสทรฎา แจ้งการ, อาจารย์ ดร.จิตติมา วรรณกุล, อาจารย์ อภิลักษณ์ หล่อกลาง, อาจารย์ ดร.รววัฒน์ ล้วนนท์, อาจารย์ ปณิธิ เพชรนอก และอาจารย์ จีรวรรณ หอมจันทร์ ที่คอยให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำ และแนวทางการแก้ไข เมื่อพบปัญหา ตลอดจนการสร้างแรงกระตุ้น จนผู้วิจัยสามารถดำเนินงานวิจัยได้สำเร็จลุล่วง

คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ในด้านต่าง ๆ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนทุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา

ขอขอบคุณ หน่วยวิจัย FYLE LAB ภายใต้การดูแลของ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ที่ได้เอื้อเฟื้อวัสดุ อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการดำเนินงานวิจัย ไปจนกระทั่งคำแนะนำ ความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากคณาจารย์และนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภายในหน่วยวิจัยนี้ทุกท่าน จนทำให้งานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน ตลอดจนส่งเสริมในด้านการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา ตลอดจนญาติพี่น้อง เพื่อน รุ่นพี่ รุ่นน้องทุก ๆ คนที่เป็นกำลังใจให้เสมอมา จนทำให้งานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นพวรรณ เนื่อนवलสุวรรณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 สถานที่ทำการวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรัชษฐ์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 แขนกลหุ่นยนต์อาร์ทีคิวเลต (Articulated robot arm).....	8
2.3 การวิเคราะห์แบบจำลองทางจลนศาสตร์ (Kinematic model) ของหุ่นยนต์.....	9
2.3.1 Link และ Joint.....	9
2.3.2 Denavit-Hartenberg notation.....	10
2.3.3 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ (Kinematic model).....	12
2.4 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ (Mobile robot).....	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	สเต็ปเปอร์ มอเตอร์ (Stepper motor).....	13
2.6	อาร์ดูโน้ (Arduino).....	16
2.6.1	ชนิดของบอร์ดอาร์ดูโน้	17
2.6.2	Arduino UNO.....	17
2.7	Raspberry Pi	18
2.8	การติดต่อสื่อสารระหว่าง Raspberry Pi และ Arduino	19
3	วิธีดำเนินการวิจัย	21
3.1	บทนำ	21
3.2	การออกแบบแขนกลหุ่นยนต์.....	22
3.2.1	การออกแบบแขนกลหุ่นยนต์	22
3.2.2	การคำนวณและเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้า	23
3.2.3	การออกแบบแบบจำลอง 3 มิติของแขนกลหุ่นยนต์	26
3.2.4	การขึ้นรูปชิ้นส่วนและประกอบแขนกลหุ่นยนต์	26
3.2.5	การออกแบบการเดินสายไฟ.....	27
3.3	การวิเคราะห์วิทยาการหุ่นยนต์ (Robotics) ของแขนกลหุ่นยนต์	28
3.3.1	การกำหนดกรอบอ้างอิง (Coordinate Frame) และการหาตัวแปร ของ DH (DH Parameters).....	28
3.3.2	การคำนวณจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward kinematic).....	29
3.3.3	การคำนวณจลนศาสตร์แบบย้อนกลับ (Inverse kinematic).....	30
3.3.4	การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ (Path generation).....	30
3.4	ชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์และการเขียน โปรแกรม	32
3.4.1	ชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์	32
3.4.2	ภาษา Python.....	32
3.4.3	Graphic User Interface	33
3.4.4	การติดต่อสื่อสารระหว่าง Raspberry Pi และ Arduino	34
3.4.5	บอร์ด Arduino.....	35

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4 ผลการดำเนินการวิจัย.....	37
4.1 บทนำ.....	34
4.2 การออกแบบและสร้างต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์.....	37
4.2.1 ผลการออกแบบแขนกลหุ่นยนต์.....	37
4.2.2 การประกอบแขนกลหุ่นยนต์.....	38
4.2.3 น้ำหนักของแขนกลหุ่นยนต์.....	39
4.3 การวิเคราะห์วิทยาการหุ่นยนต์ (Robotics) ของแขนกลหุ่นยนต์.....	39
4.3.1 การกำหนดกรอบอ้างอิง (Coordinate frame) และการหาตัวแปร ของ DH.....	39
4.3.2 การคำนวณจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward kinematics)	40
4.3.3 การคำนวณจลนศาสตร์แบบย้อนกลับ (Inverse kinematics)	41
4.3.4 การชดเชยขนาดของเครื่องมือที่ปลายแขน (Tool point/ End-effector point compensation).....	47
4.3.5 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ (Path generation)	49
4.4 การออกแบบ Graphic User Interface	56
4.4.1 หน้าโปรแกรมสำหรับการควบคุมแขนกลหุ่นยนต์	56
4.4.2 หน้าโปรแกรมสำหรับการเขียน โปรแกรมควบคุมแขนกลหุ่นยนต์	56
4.4.3 หน้าโปรแกรมสำหรับการตั้งค่าแขนกลหุ่นยนต์.....	57
4.5 ประสิทธิภาพการทำงาน (Performance) ของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์	58
4.5.1 พื้นที่ในการทำงานของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ (Working space).....	58
4.5.2 ความถูกต้องของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ (Positioning accuracy)	60
4.5.3 ความสามารถในการทำซ้ำ (Positioning repeatability)	60
4.5.4 ความละเอียดในการเคลื่อนที่ (Resolution).....	61
5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	63
5.1 สรุปผลการวิจัย	63

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.1	ผลการออกแบบแขนกลหุ่นยนต์	63
5.1.2	ผลการวิเคราะห์วิทยาการหุ่นยนต์ (Robotics) ของแขนกล หุ่นยนต์.....	63
5.1.3	ผลการออกแบบ Graphic User Interface	64
5.1.4	ประสิทธิภาพการทำงาน (Performance) ของต้นแบบแขนกล หุ่นยนต์.....	64
5.2	ข้อเสนอแนะ	65
	รายการอ้างอิง.....	66
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. แบบทางกลและส่วนประกอบของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์.....	68
	ภาคผนวก ข. ผลการวัดค่าพิกัดจุดของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์จากเครื่อง Coordinate Measuring Machine (CMM)	75
	ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	80
	ประวัติผู้เขียน	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 อัตราทด, แรงบิดหลังจากทดเฟือง และ Safety Factor.....	25
3.2 DH-Parameters	28
4.1 น้ำหนักของคั่นแบบแขนกลหุ่นยนต์	39
4.2 DH-Parameters	40
4.3 ขอบเขตในการเคลื่อนที่ของแกนแต่ละแกนของคั่นแบบแขนกลหุ่นยนต์	58
ข.1 พิกัดจุดที่กำหนดคบนแขนกลหุ่นยนต์และพิกัดจุดที่แปลงมายังระบบพิกัดจุด ของเครื่อง CMM โดยคำนวณจากจุดอ้างอิง	76
ข.2 ผลการวัดพิกัดจุดของปลายแขนกลหุ่นยนต์จำนวน 20 จุด วัดซ้ำจุดละ 5 ครั้ง.....	77
ข.3 การคำนวณค่าความถูกต้องของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ (Positioning accuracy)	78
ข.4 การคำนวณค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Positioning repeatability).....	79



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	อุตสาหกรรมแห่งอนาคตทั้ง 10 อุตสาหกรรม 1
1.2	Roadmap การพัฒนาเครื่องมืออัจฉริยะและหุ่นยนต์ใช้เทคโนโลยี เมคคาทรอนิกส์..... 2
2.1	ระบบแกนอ้างอิงสำหรับวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์ 5
2.2	การหาผลเฉลยของจลนศาสตร์แบบย้อนกลับด้วยวิธีการทางเรขาคณิต 6
2.3	ระบบ Mobile industrial manipulation 7
2.4	โครงสร้างของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ 8
2.5	องค์ประกอบของแขนกลหุ่นยนต์เมื่อเปรียบเทียบกับแขนของมนุษย์ 8
2.6	ลักษณะและพื้นที่การทำงานของแขนกลอาร์ทีคูลेट 9
2.7	ชนิดของ Joints และแกนการเคลื่อนที่ 9
2.8	การกำหนดหมายเลข Joints และ Links ของแขนกลหุ่นยนต์ชนิด สามองศาอิสระ (3-DOF) 10
2.9	การกำหนด Frames สำหรับ Links และกำหนด Joint-link parameters ตามวิธีการ ของ Denavit-Hartenberg 11
2.10	แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Direct kinematic model 12
2.11	หุ่นยนต์เคลื่อนที่สำหรับงานสำรวจ 13
2.12	ชนิดของ Stepper motor 14
2.13	การควบคุม Stepper motor รูปแบบเต็มสเต็ป 1 เฟส (Full step mode 1 Phase) 14
2.14	การควบคุม Stepper motor รูปแบบเต็มสเต็ป 2 เฟส (Full step mode 2 Phase) 15
2.15	การควบคุม Stepper motor รูปแบบครึ่งสเต็ป (Half step mode) 15
2.16	การควบคุม Stepper motor รูปแบบไมโครสเต็ป (Micro stepping mode) 16
2.17	บอร์ดอาร์ดูโนชนิดต่าง ๆ 17
2.18	ขารับส่งสัญญาณดิจิทัลของบอร์ด Arduino UNO 18
2.19	บอร์ด Raspberry Pi 18

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 การสื่อสารแบบอนุกรมผ่านสาย USB ระหว่างบอร์ด Raspberry Pi และ บอร์ด Arduino	20
2.21 การสื่อสารแบบอนุกรมผ่าน GPIOs ระหว่างบอร์ด Raspberry Pi และ บอร์ด Arduino	20
3.1 แบบร่างของแขนกลหุ่นยนต์	22
3.2 แผนภาพอิสระของแขนกลหุ่นยนต์	24
3.3 โมเมนต์ความเฉื่อยในการหมุนของแท่งบางและอนุภาค	24
3.4 การออกแบบแบบจำลอง 3 มิติของแขนกลหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks.....	26
3.5 การขึ้นรูปชิ้นส่วนแขนกลหุ่นยนต์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ	26
3.6 การเดินสายไฟภายในและ Connector ณ จุดเชื่อมต่อต่าง ๆ.....	27
3.7 Connector ระหว่างตัวแขนกลหุ่นยนต์และมอเตอร์	27
3.8 การกำหนดกรอบอ้างอิงที่แกนต่าง ๆ ของแขนกลหุ่นยนต์	28
3.9 ลักษณะเส้นทางในการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement	31
3.10 ลักษณะเส้นทางในการเคลื่อนที่แบบ Linear interpolation path	31
3.11 แผนผังการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดควบคุม	32
3.12 แผนผังการทำงานของ GUI.....	33
3.13 แผนผังการทำงานของ Tab สำหรับควบคุมการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์	34
3.14 แผนผังการส่งข้อมูลควบคุมการทำงานของมอเตอร์	35
3.15 แผนผังการทำงานของบอร์ด Arduino	36
4.1 Drawing ของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์พร้อมขนาด	37
4.2 ต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ที่ติดตั้งอยู่บนหุ่นยนต์เคลื่อนที่	38
4.3 เครื่องชั่งสปริงดิจิทัล.....	39
4.4 การกำหนดกรอบอ้างอิงที่แกนต่าง ๆ ของแขนกลหุ่นยนต์	40
4.5 มุมมอง Top view ของแขนกลหุ่นยนต์.....	42
4.6 มุมมอง Top view ของแขนกลหุ่นยนต์และทิศทางของมุมมองที่ตรงเข้าไปหา แกน 2 และแกน 3	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 มุมมองที่ตรงเข้าไปหาแกน 2 และแกน 3 สำหรับหา θ_3	44
4.8 มุมมองที่ตรงเข้าไปหาแกน 2 และแกน 3 สำหรับหา θ_2	46
4.9 การกำหนดระยะของ Tool point	48
4.10 การกำหนดระยะและการชดเชยของ Tool point	48
4.11 การเปลี่ยนไปของมุมในแต่ละแกนจากการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement	50
4.12 เส้นทางในการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลหุ่นยนต์ใน 3 มิติ (มุมมอง Isometric) จากการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement	50
4.13 เส้นทางในการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลหุ่นยนต์ใน 3 มิติ (มุมมองตั้งฉากกับ ระนาบ XY, XZ, และ YZ) จากการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement	51
4.14 เส้นทางในการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลหุ่นยนต์ใน 2 มิติ (มุมมองตั้งฉากกับ ระนาบ XY, XZ, และ YZ) จากการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement	51
4.15 การเปลี่ยนไปของมุมในแต่ละแกนจากการเคลื่อนที่แบบ Linear interpolation path	53
4.16 เส้นทางในการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลหุ่นยนต์ใน 3 มิติ (มุมมอง Isometric) จากการเคลื่อนที่แบบ Linear interpolation path	53
4.17 เส้นทางในการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลหุ่นยนต์ใน 3 มิติ (มุมมองตั้งฉากกับ ระนาบ XY, XZ, และ YZ) จากการเคลื่อนที่แบบ Linear interpolation path	54
4.18 เส้นทางในการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลหุ่นยนต์ใน 2 มิติ (มุมมองตั้งฉากกับ ระนาบ XY, XZ, และ YZ) จากการเคลื่อนที่แบบ Linear interpolation path	54
4.19 เส้นทางในการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลหุ่นยนต์ใน 3 มิติ (มุมมอง Isometric) จากการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement และ Linear interpolation path	55
4.20 การเปลี่ยนไปของมุมในแต่ละแกนจากการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement และ Linear interpolation path	55
4.21 GUI หน้าโปรแกรมสำหรับการควบคุมแขนกลหุ่นยนต์.....	56
4.22 GUI หน้าโปรแกรมสำหรับการควบคุมแขนกลหุ่นยนต์.....	57
4.23 GUI หน้าโปรแกรมสำหรับการตั้งค่าแขนกลหุ่นยนต์	57
4.24 Working space ของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์จากมุมมอง Right side view.....	58
4.25 Working space ของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์จากมุมมอง Top view	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 Working space ของแขนกลหุ่นยนต์.....	59
4.27 การวัดพิกัดจุดโดยใช้เครื่อง CMM	60
4.28 ความละเอียดในการเคลื่อนที่ (Resolution) ในระนาบแกน X-Y	62
4.29 ความละเอียดในการเคลื่อนที่ (Resolution) ในระนาบแกน R-Z.....	62
ก.1 แบบทางกลของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์.....	69
ก.2 แบบทางกลของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ Link ที่ 0.....	70
ก.3 แบบทางกลของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ Link ที่ 1.....	71
ก.4 แบบทางกลของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ Link ที่ 2.....	72
ก.5 แบบทางกลของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ Link ที่ 3.....	73
ก.6 แบบทางกลของแผ่นติดตั้งอุปกรณ์ที่ปลายแขนของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์.....	74

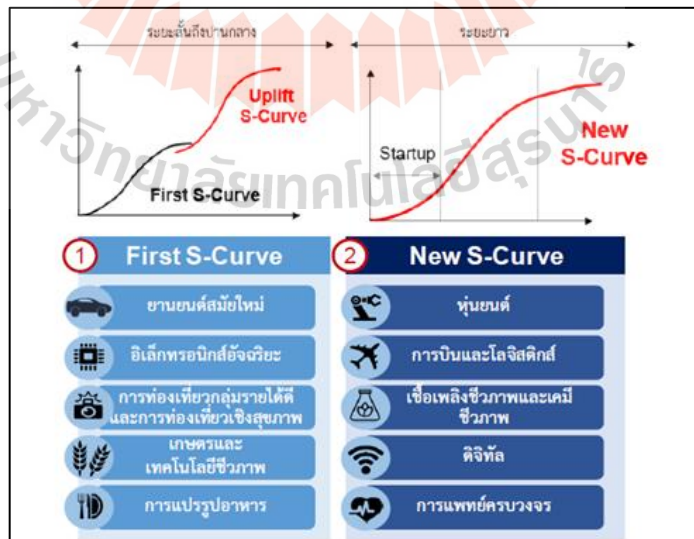
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

ในปัจจุบันประเทศไทยได้มีโมเดล Thailand 4.0 ซึ่งเป็นโมเดลเศรษฐกิจที่จะนำพาประเทศไทยให้หลุดพ้นจากกับดักประเทศรายได้ปานกลาง กับดักความเหลื่อมล้ำ และกับดักความไม่สมดุล พร้อม ๆ กับเปลี่ยนผ่านประเทศไทยไปสู่ประเทศในโลกรุ่นหนึ่งที่มีความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน ในบริบทของ โลกยุค The Fourth Industrial Revolution อย่างเป็นทางการเป็นรูปธรรมตามแนวทางที่แผนยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี ได้วางไว้ด้วยการสร้างความเข้มแข็งจากภายในควบคู่ไปกับการเชื่อมโยงกับประชาคมโลก ตามแนวคิด “ปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง” โดยขับเคลื่อนผ่านกลไก “ประชารัฐ”

จากพิมพ์เขียว Thailand 4.0 โมเดลขับเคลื่อนประเทศไทยสู่ความมั่งคั่ง มั่นคง และยั่งยืน โดยกองบริหารงานวิจัยและประกันคุณภาพการศึกษา (2559) รัฐบาลได้มีการกำหนดทิศทางการพัฒนาภายใต้หลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง ซึ่งประกอบไปด้วย 5 วาระ โดยในวาระที่ 2 การพัฒนาคลัสเตอร์เทคโนโลยีและอุตสาหกรรมแห่งอนาคต รัฐบาลได้เล็งเห็นความสำคัญในประเด็นนี้ จึงได้กำหนดให้มีการพัฒนา 10 อุตสาหกรรมแห่งอนาคต ดังต่อไปนี้



รูปที่ 1.1 อุตสาหกรรมแห่งอนาคตทั้ง 10 อุตสาหกรรม

(กองบริหารงานวิจัยและประกันคุณภาพการศึกษา, 2559)

โดยเป้าหมายหลักของ Thailand 4.0 คือ การปรับเปลี่ยนเชิงโครงสร้าง จากการ “ปักขา” ผู้การมี “รากแก้ว” ของตนเอง ดังนั้นภายใต้ 10 อุตสาหกรรมแห่งอนาคตรัฐบาลมีนโยบายสำคัญในการปรับเปลี่ยนจาก “ระบบเศรษฐกิจที่พึ่งพาเทคโนโลยีจากภายนอกเป็นส่วนใหญ่” ผู้ “ระบบเศรษฐกิจที่เน้นการพัฒนาเทคโนโลยีของตนเองในระดับที่เหมาะสม” จึงได้กำหนด 5 กลุ่มเทคโนโลยี/อุตสาหกรรมเป้าหมายที่ต้องการพัฒนาขึ้นในประเทศ ดังนี้

กลุ่มที่ 1 กลุ่มเกษตรและอาหาร ใช้เทคโนโลยีชีวภาพ (Food & Agriculture – Biotech)

กลุ่มที่ 2 กลุ่มสุขภาพ ใช้เทคโนโลยีชีวการแพทย์ (Health & Wellness – Biomedical)

กลุ่มที่ 3 กลุ่มเครื่องมืออัจฉริยะและหุ่นยนต์ ใช้เทคโนโลยีเมคคาทรอนิกส์ (Smart Devices & Robotics – Mechatronics)

กลุ่มที่ 4 กลุ่มดิจิทัลและอินเทอร์เน็ตออฟติง ใช้เทคโนโลยีสมองกลฝังตัว (Digital & IOT – Embedded Technology)

กลุ่มที่ 5 กลุ่มสร้างสรรค์และวัฒนธรรม ใช้ Service Design ในการสร้างมูลค่า (Creative & Culture – High Value Services)

ในส่วนของกลุ่มที่ 3 เครื่องมืออัจฉริยะและหุ่นยนต์ ใช้เทคโนโลยีเมคคาทรอนิกส์ (Smart Devices & Robotics – Mechatronics) ได้มีวิสัยทัศน์ในการผลักดันให้ประเทศไทยเป็นผู้นำของอาเซียนด้านระบบอัตโนมัติ หุ่นยนต์อุตสาหกรรม และหุ่นยนต์บริการ โดยมีเป้าหมายในการสร้างมูลค่าทางเศรษฐกิจในระยะเวลา 20 ปี สูงถึง 300,000 ล้านบาท และมี Roadmap ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 Roadmap การพัฒนาเครื่องมืออัจฉริยะและหุ่นยนต์ใช้เทคโนโลยีเมคคาทรอนิกส์ (กองบริหารงานวิจัยและประกันคุณภาพการศึกษา, 2559)

และจากพิมพ์เขียว Thailand 4.0 โมเดลขับเคลื่อนประเทศไทยสู่ความมั่งคั่ง มั่นคง และยั่งยืน พุทธศักราช 2559 จะเห็นว่าหุ่นยนต์เป็นหนึ่งในส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาประเทศ และยังมีมูลค่าทางเศรษฐกิจที่สูงมาก

แขนกลหุ่นยนต์ (Robot arm) เป็นหุ่นยนต์ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจในวงการอุตสาหกรรม การผลิตได้ถูกนำมาใช้แทนแรงงานมนุษย์ในงานที่ต้องทำอย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง, งานที่ต้องทำซ้ำ ๆ กันตลอดเวลา, งานที่เป็นอันตราย, งานที่หนักและยากเกินที่มนุษย์จะทำไหว นอกจากนี้ การที่มีหุ่นยนต์ทำงานแทนคนนั้นยังช่วยให้ ประสิทธิภาพการทำงานก็จะดีขึ้น, มีความแน่นอน แม่นยำ, จำนวนชิ้นงานที่ทำก็มากขึ้น และทำงานได้โดยไม่มีวันหยุด

ส่วนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (Mobile Robots) เป็นหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ โดยอาศัยล้อ รางหรือขา หุ่นยนต์ชนิดนี้ถูกพัฒนาไปใช้อย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นการนำไปใช้ในการสำรวจ การเคลื่อนย้ายวัสดุอุปกรณ์ในโรงพยาบาลหรือในโกดังสินค้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ และยังถูกนำไปใช้ในทั้งในทางด้านอุตสาหกรรมและทางทหารและการรักษาความปลอดภัย

การนำแขนกลหุ่นยนต์มาติดตั้งบนหุ่นยนต์เคลื่อนที่จะสามารถเพิ่มความหลากหลายในการทำงานของหุ่นยนต์หลากหลายยิ่งขึ้นและยังเป็นต้นแบบที่สำคัญสำหรับการศึกษาและพัฒนาหุ่นยนต์ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในด้านการออกแบบและสร้างต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์สำหรับติดตั้งหุ่นยนต์เคลื่อนที่

- 1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์อาร์ทิกูเลชันชนิดสามองศาอิสระ
- 1.2.2 เพื่อวิเคราะห์จลนศาสตร์ของแขนกลหุ่นยนต์
- 1.2.3 เพื่อออกแบบการควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ในระบบพิกัดข้อต่อ (Joint space coordinate) และระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian space coordinate)
- 1.2.4 เพื่อติดตั้งแขนกลหุ่นยนต์บนหุ่นยนต์เคลื่อนที่

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบ วิเคราะห์จลนศาสตร์ และสร้างต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์สามองศาอิสระ โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้

- 1.3.1 สร้างต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์อาร์ทิกูเลชันชนิดสามองศาอิสระ
- 1.3.2 Actuator ทั้งหมดของแขนกลหุ่นยนต์คือ มอเตอร์ไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับชุดเฟืองทด

1.3.3 วิเคราะห์จลนศาสตร์ของแขนกลหุ่นยนต์เมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิงพื้นฐานของแขนกลหุ่นยนต์ โดยไม่คำนึงถึงกรอบอ้างอิงบนพื้นโลกและการเปลี่ยนแปลงของกรอบอ้างอิงพื้นฐานของแขนกลหุ่นยนต์เทียบกับกรอบอ้างอิงบนพื้นโลก เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่เคลื่อนที่ไป

1.3.4 คิดตั้งแขนกลหุ่นยนต์บนหุ่นยนต์เคลื่อนที่

1.3.5 สามารถเขียน โปรแกรมสำหรับสั่งการแขนกลหุ่นยนต์โดยวิธีการสอนและจดจำตำแหน่งของแขนกลหุ่นยนต์

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ทบทวนการศึกษา รวบรวมข้อมูล รวมทั้งสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ออกแบบแขนกลหุ่นยนต์ โดยใช้โปรแกรม SolidWorks

1.4.3 กำหนดข้อมูลจำเพาะของวัสดุอุปกรณ์และดำเนินการจัดซื้อวัสดุอุปกรณ์

1.4.4 ขึ้นรูปชิ้นส่วนและประกอบแขนกลหุ่นยนต์

1.4.5 วิเคราะห์แบบจำลองจลนศาสตร์ (Kinematic model) ของแขนกลหุ่นยนต์

1.4.6 เขียนโปรแกรมสำหรับควบคุมหุ่นยนต์และสำหรับประสานกับผู้ใช้งาน (User interface)

1.4.7 ทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์และปรับปรุงแก้ไข

1.4.8 คิดตั้งแขนกลหุ่นยนต์บนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ ทดสอบการทำงาน และปรับปรุงแก้ไข

1.4.9 สรุปผลการศึกษาและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 สถานที่ทำการวิจัย

1.5.1 อาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่ทางผู้วิจัยคาดว่าจะได้รับมีสิ่งสำคัญดังต่อไปนี้

1.6.1 ได้ต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ชนิดสามองศาอิสระที่คิดตั้งบนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่สามารถทำงานตามคำสั่งที่ผู้ใช้ต้องการ

1.6.2 ได้ต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์สำหรับการศึกษาและพัฒนาทางด้านหุ่นยนต์

1.6.3 ใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนทางด้านการออกแบบ วิเคราะห์ ทางด้านวิทยาการหุ่นยนต์ (Robotics) หรือทางด้านการควบคุมและเขียน โปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์

1.6.4 สามารถพัฒนาต่อยอดให้แขนกลหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ต่อไปได้

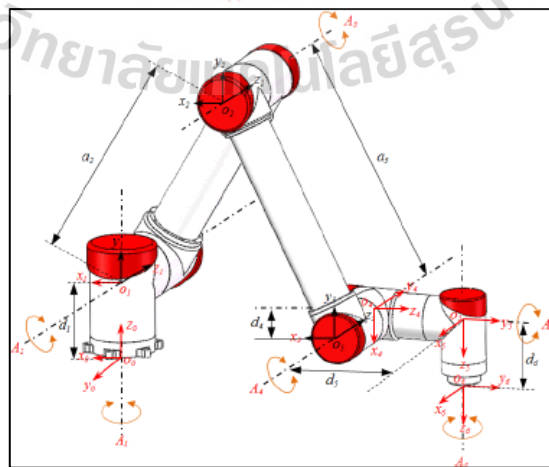
บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

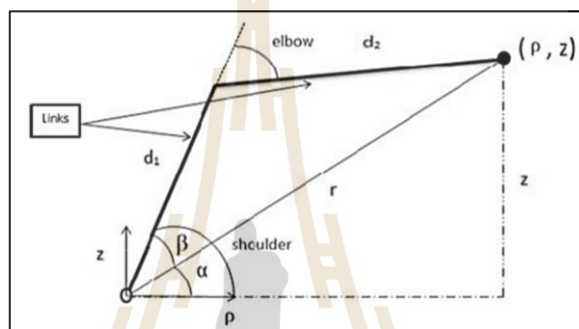
ในส่วนแรกนี้เป็นส่วนที่ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าเอกสาร รายงานการวิจัย วิทยานิพนธ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ได้ดำเนินการอยู่พบว่า มีบทความและเอกสารต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องและสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ดำเนินการอยู่นี้เท่านั้น

Saixuan, C., et al. (2017) ได้นำเสนอว่า จลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward kinematic) และจลนศาสตร์แบบย้อนกลับ (Inverse kinematic) ของแขนกลหุ่นยนต์ เป็นจุดเชื่อมต่อไปยังระบบการเคลื่อนที่เชิงกลและระบบควบคุม ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีผลเฉลยที่สามารถเขียนในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ได้โดยตรง กระบวนการของการประมาณค่าเชิงตัวเลขแบบซ้ำ ๆ (Numerical iterative algorithm) มักถูกนำมาใช้บ่อยครั้ง แต่กระบวนการนี้ก็ยังเป็นกระบวนการที่ยากที่จะตอบสนองได้ตามเวลาจริงได้อย่างแม่นยำ เมื่อพิจารณาลักษณะในการทำงานของ Cobot แขนกลหุ่นยนต์ชนิดทกองศาอิสระ ได้ถูกออกแบบขึ้น โดยใช้วิธีการวิเคราะห์จลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าและจลนศาสตร์แบบย้อนกลับของหุ่นยนต์เพื่อให้ตอบสนองได้ตามเวลาจริงและแม่นยำ



รูปที่ 2.1 ระบบแกนอ้างอิงสำหรับวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์ (Saixuan Chen., et al., 2017)

Ayush G., et al. (2018). ได้นำเสนอว่า การวิเคราะห์จลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward kinematics) และจลนศาสตร์แบบย้อนกลับ (Inverse kinematics) ถูกใช้ในการออกแบบทุก ๆ ระบบทางหุ่นยนต์ (Robotic system) โดยการหาผลเฉลยของจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า จะมีผลเฉลยที่จำเพาะเพียงผลเฉลยเดียว ซึ่งแตกต่างกับการหาผลเฉลยของจลนศาสตร์แบบย้อนกลับ ซึ่งจะมีผลเฉลยหลายรูปแบบสำหรับชุดค่าที่ให้สำหรับการคำนวณชุดหนึ่ง ๆ โดย Ayush G., et al. ได้เสนอวิธีการหาผลเฉลยของจลนศาสตร์แบบย้อนกลับด้วยวิธีการทางเรขาคณิต (Geometric method) ดังรูปที่ 2.2 และได้ผลเฉลยของจลนศาสตร์แบบย้อนกลับดังสมการที่ 2.1, 2.2, และ 2.3



รูปที่ 2.2 การหาผลเฉลยของจลนศาสตร์แบบย้อนกลับด้วยวิธีการทางเรขาคณิต
(Ayush G., et al. 2018)

$$\theta_{Base} = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (2.1)$$

$$\theta_{Elbow} = -\cos^{-1}\left(\frac{x^2 + y^2 + z^2 - d_1^2 d_2^2}{2d_1 d_2}\right) \quad (2.2)$$

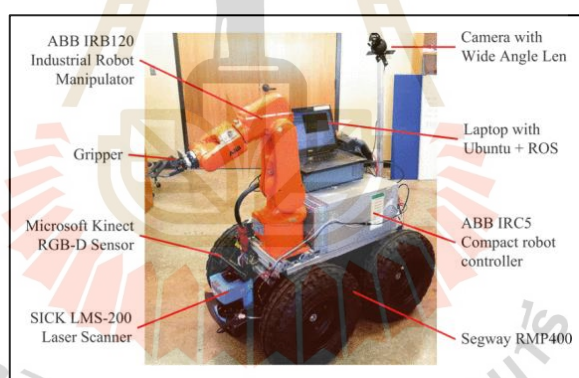
$$\theta_{Shoulder} = \sin^{-1}\left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{d_2 \sin \theta_{elbow}}{d_1 + d_2 \cos \theta_{elbow}}\right) \quad (2.3)$$

Singh, T. P., et al. (2017) ได้ศึกษาการวิเคราะห์จลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward kinematics) และ จลนศาสตร์แบบย้อนกลับ (Inverse kinematics) ของแขนกลหุ่นยนต์ชนิดห้าองศาอิสระและหกองศาอิสระ ตัวแปรเสริม DH (DH Parameter) ถูกใช้ในการคำนวณพิกัดจุด (Position) และทิศทาง (Orientation) ของปลายแขนหุ่นยนต์ (End effector) สำหรับจลนศาสตร์

แบบไปข้างหน้าก่อนข้างง่ายที่จะออกแบบ แต่สำหรับจลนศาสตร์แบบย้อนกลับ ต้องอาศัยวิธีการในการวิเคราะห์ จากนั้นได้เปรียบเทียบผลระหว่างผลเฉลยจากการวิเคราะห์และความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้

Zhao, T., and Yuan, J. (2006) ได้พัฒนาแขนกลหุ่นยนต์ชนิดเจ็ดองศาอิสระสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ที่ออกแบบมาจากร่างกายมนุษย์ (Mobile humanoid robot) และได้นำเสนอจลนศาสตร์ (Kinematic) ของแขนกลเช่น พื้นที่การทำงาน (Workspace) ลักษณะเฉพาะตัว (Singularity) แนวคิดและระเบียบวิธีของจลนศาสตร์แบบย้อนกลับ (Inverse kinematic) ขึ้นอยู่กับลักษณะของหุ่นยนต์เอง การกำหนดพลศาสตร์ (Dynamic) ผลมาจากการวิเคราะห์มวลถ่วงของแขนกล

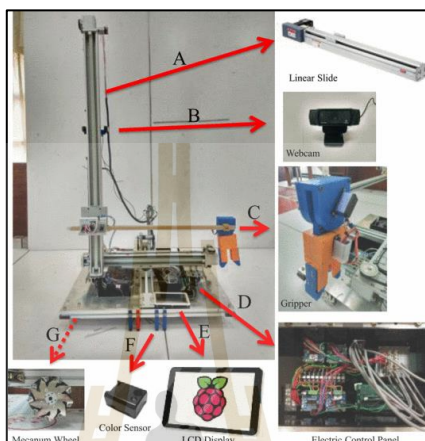
Chen, H., et al. (2013) ได้เสนอว่า หุ่นยนต์อุตสาหกรรมเคลื่อนที่ได้ (Mobile industrial manipulator) หรือ MIM เป็นการรวมข้อดีของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ (Mobile robot) และหุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Industrial robot) การเคลื่อนไหวที่ง่าย (Mobility) ความคล่องตัว (Flexible) และความสามารถในการทำงานต่าง ๆ (Functionality) ของ Mobile industrial manipulator จะทำให้หุ่นยนต์ชนิดนี้เป็นหุ่นยนต์แห่งยุคต่อไป



รูปที่ 2.3 ระบบ Mobile industrial manipulation (Heping Chen., et al., 2013)

Lee, J., et al. (2018) ได้เสนอว่า โรงงานอัตโนมัติได้กลายมาเป็นกระแสในปัจจุบันในการทำงานของสายการผลิตอัตโนมัติ หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ (Mobile robot) ถือเป็นส่วนสำคัญในการเชื่อมต่อระหว่างแต่ละจุดทำงาน โดยในงานวิจัยได้พัฒนาหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้พร้อมด้วยระบบการมองเห็น (Vision system) สำหรับการขนส่ง หยิบจับ และระบุตัวตน ขั้นแรก โครงสร้างของฐานเคลื่อนที่ได้ (Mobile platform) ได้ถูกประกอบขึ้นมาจากแผ่นอลูมิเนียมและล้อ Mecanum wheel) และใช้ Digital signal processor หรือ DSP เป็นตัวควบคุมหลัก หุ่นยนต์สามแกนถูกสร้างมาจากแกนเคลื่อน (Linear slide) 3 ตัวบนฐานเคลื่อนที่ได้ ซึ่งสามารถทำให้หุ่นยนต์สามารถหยิบจับ

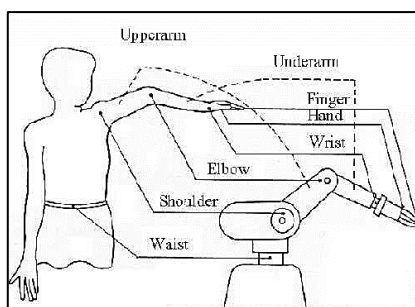
ชิ้นงานได้ในพื้นที่ที่กว้าง ขั้นตอนสุดท้ายภาพถูกประมวลจากการมองเห็นของ Raspberry PI ระบบการมองเห็นสามารถระบุเป้าหมายและเลือกภารกิจเพื่อสั่งการหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่อย่างว่องไวไปยังบริเวณที่ระบุไว้ สุดท้ายแล้วการเคลื่อนที่ที่พื้นฐานและภารกิจที่ต้องการสำหรับรถเก็บของสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (Jeng Dao Lee., et al., 2018)

2.2 แขนกลหุ่นยนต์อาร์ทีคิวเลต (Articulated robot arm)

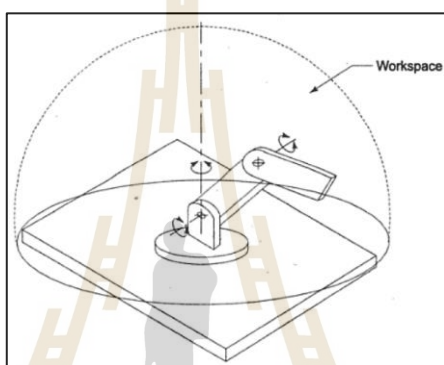
แขนกลหุ่นยนต์อาร์ทีคิวเลต (Articulated robot arm) เป็นแขนกลหุ่นยนต์ชนิดหนึ่งที่ถูกออกแบบมาจากการจำลองแขนของมนุษย์ จึงมักถูกอ้างถึงว่าเป็น แขนกลที่มีการเคลื่อนไหวคล้ายมนุษย์ (Anthropomorphic Manipulator) โดยข้อต่อ (Joint) ของแขนกลแต่ละข้อต่อถูกจำลองมาจาก เอว หัวไหล่ ข้อศอก และข้อมือ ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 องค์ประกอบของแขนกลหุ่นยนต์เมื่อเปรียบเทียบกับแขนของมนุษย์

(<http://www.engineerfriend.com/2012/articles/6723/>, 2012)

ข้อต่อทั้งหมดของหุ่นยนต์ชนิดนี้เป็นข้อต่อแบบหมุนรอบแกน (Revolute joint - R joint) จากการที่ข้อต่อทั้งหมดของแขนกลชนิดนี้เป็นข้อต่อแบบหมุนรอบแกน ทำให้มีพื้นที่การทำงาน (Workspace) เป็นรูปร่างทรงกลม แขนกลหุ่นยนต์ชนิดนี้แม้จะมีระบบพิกัดที่ซับซ้อน การเคลื่อนที่และการควบคุมทำความเข้าใจได้ยาก แต่ด้วยแขนกลหุ่นยนต์ชนิดนี้สามารถเข้าถึงชิ้นงานได้จากหลากหลายทิศทางและมีพื้นที่การทำงานมาก ทำให้แขนกลหุ่นยนต์ชนิดนี้ถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น งานเชื่อมโลหะ งานพ่นสี งานตัด งานเคลื่อนย้ายของหรืองานที่ต้องอาศัยการเคลื่อนที่ที่ค่อนข้างยาก

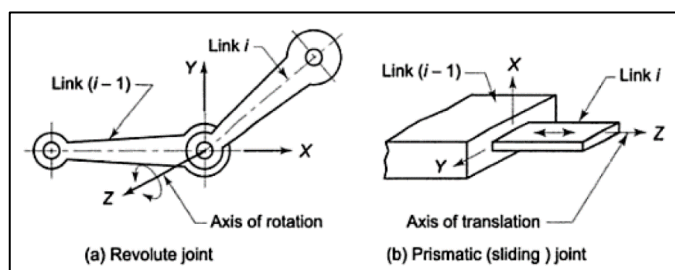


รูปที่ 2.6 ลักษณะและพื้นที่การทำงานของแขนกลอาร์ทีคูลेट (Mittal and Nagrath, 2003)

2.3 การวิเคราะห์แบบจำลองทางจลนศาสตร์ (Kinematic model) ของหุ่นยนต์

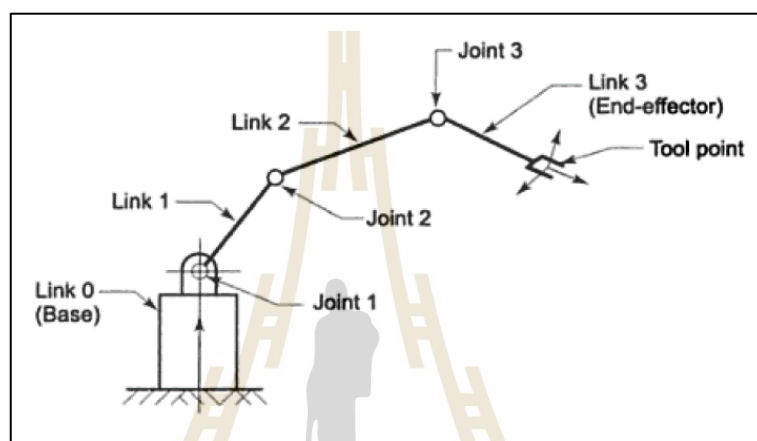
2.3.1 Link และ Joint

แขนกลหุ่นยนต์ประกอบด้วย วัตถุแข็งเกร็ง (Rigid bodies) จำนวนมากที่เรียกว่า Links มาเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อ หรือ Joints ซึ่งอาจเป็นชนิดหมุน (Revolute joint) หรือชนิดเคลื่อนที่เชิงเส้น (Prismatic joint)



รูปที่ 2.7 ชนิดของ Joints และแกนการเคลื่อนที่ (Mittal and Nagrath, 2003)

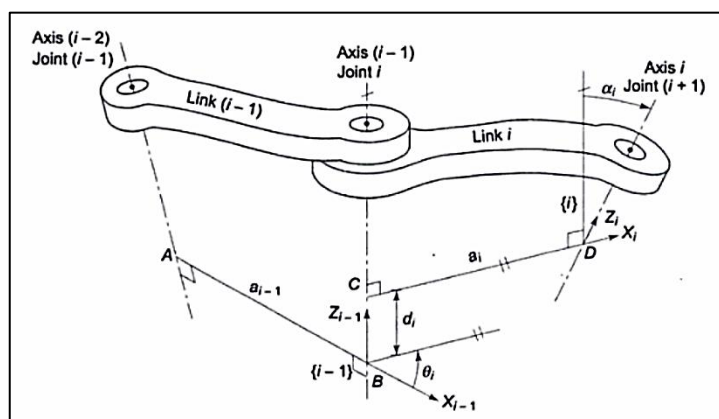
Mittal and Nagrath (2003) อธิบายว่า สำหรับแขนกลหุ่นยนต์ n องศาอิสระ (n -DOF) จะประกอบขึ้นจาก Link จำนวน n Links มาต่อกันด้วย Joint ชนิดหมุน (Revolute joint) และ/หรือ Joint ชนิดเคลื่อนที่เชิงเส้น (Prismatic joint) ในการวิเคราะห์ถึง พิกัดจุด (Position) และทิศทาง (Orientation) ทำได้โดยการตั้งกรอบพิกัด (Coordinate frame) ไว้ที่แต่ละ Link และตั้งชื่อว่า Frame $\{i\}$ สำหรับ Link i ซึ่งพิกัดจุด (Position) และทิศทาง (Orientation) ของ Frame $\{i\}$ จะสัมพันธ์กับกรอบก่อนหน้า Frame $\{i-1\}$ โดยอาศัย Homogeneous transformation matrix



รูปที่ 2.8 การกำหนดหมายเลข Joints และ Links ของแขนกลหุ่นยนต์ชนิดสามองศาอิสระ (3-DOF) (Mittal and Nagrath, 2003)

2.3.2 Denavit-Hartenberg notation

Mittal and Nagrath (2003) อธิบายว่า ในการนิยามแขนกลหุ่นยนต์สามารถนิยามได้จากตัวแปร 4 ตัว เรียกว่า “Joint-link parameters” ขั้นตอนนี้ถูกเสนอขึ้นมาโดย Denavit และ Hartenberg หรือรู้จักในชื่อ Denavit-Hartenberg notation โดยจะกำหนดให้ Frame $\{i\}$ อยู่ที่ปลายของ Link i และเคลื่อนหรือเลื่อนไปตาม Link i สำหรับแขนกลชนิด n องศาอิสระ (n -DOF) จะประกอบด้วย Frames ทั้งหมด $n+1$ Frames โดย Frame $\{0\}$ หรือ Frame base จะเป็นกรอบอ้างอิงเฉื่อย (Reference inertial frame) และ Frame $\{n\}$ จะเป็นกรอบของเครื่องมือ (Tool frame)



รูปที่ 2.9 การกำหนด Frames สำหรับ Links และกำหนด Joint-link parameters ตามวิธีการของ Denavit-Hartenberg (Mittal and Nagrath, 2003)

รูปที่ 2.9 แสดงถึง Link 2 links ที่อยู่ติดกันคือ Link (i-1) และ Link i ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับ Joint (i-1), i และ (i+1) และแกน (i-2), (i-1) และ i โดยเส้นตรง AB ในรูป มักจะตั้งฉากกับแกน (i-2) และ (i-1) และเส้นตรง CD มักจะตั้งฉากกับแกน (i-1) และ i สำหรับ Frame i สามารถกำหนดจาก Link i ได้ดังนี้

แกน z_i จะวางตัวขนานไปกับแกน i (axis i) โดยทิศทางของแกนสามารถกำหนดได้อย่างอิสระ ขึ้นกับความต้องการว่าจะให้ทิศทางบวกในการหมุนของ joint ไปในทิศทางใด

แกน x_i จะตั้งฉากกับแกน z_{i-1} และแกน z_i โดยทิศทางพุ่งออกจากแกน z_{i-1} หรือพุ่งไปตามแนวเส้น CD นั่นเอง

จุดกำเนิดของกรอบพิกัดที่ i (Origin of i^{th} coordinate frame) หรือจุดกำเนิดของ Frame {i} จะถูกกำหนดไว้ที่จุดตัดระหว่างแกนของ Joint (i+1) หรือ แกน i กับเส้นตรง CD

สุดท้ายแกน y_i จะเป็นไปตามกฎมือขวาของกรอบพิกัด (Right handed orthonormal coordinate frame) i

ในส่วนของ frame {i-1} และ frame {i} จะมี 4 ตัวแปร DH (DH-parameters) คือ 2 link parameters (a_i, α_i) และ 2 joint parameters (d_i, θ_i) ดังนี้

ความยาวแขน หรือ Link length (a_i) คือ ระยะทางที่วัดตามแนวแกน x_i จากจุดตัดของแกน x_i และ แกน z_{i-1} (จุด C) ไปยังจุดกำเนิดของกรอบ {i}

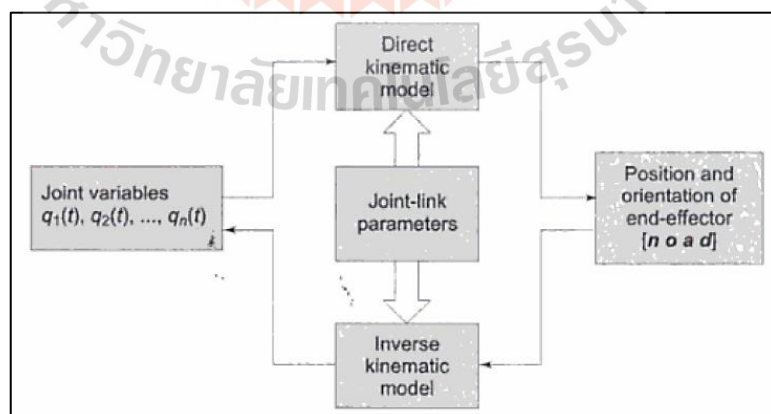
มุมบิดแขน หรือ Link twist (α_i) คือ มุมระหว่างแกน z_{i-1} และแกน z_i รอบแกน x_i ตามกฎมือขวา

ระยะข้อต่อ หรือ Joint distance (d_i) คือ ระยะตามแนวแกน z_{i-1} โดยวัดจากจุดกำเนิดของกรอบ $\{i-1\}$ (จุด B) ไปยังจุดตัดระหว่างแกน x_i และแกน z_{i-1} (จุด C) หรือความยาวของเส้นตรง BC นั้นเอง

มุมข้อต่อ หรือ Joint angle (θ_i) คือ มุมระหว่างแกน x_{i-1} และแกน x_i รอบแกน z_{i-1} ตามกฎมือขวา

2.3.3 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ (Kinematic model)

Mittal and Nagrath (2003) อธิบายว่า แขนกลหุ่นยนต์ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อทำงานในเนื้อที่ 3 มิติ (3D space) โดยปลายของแขนกล (End effector) ต้องเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการเคลื่อนที่ที่กำหนดไว้ ในการควบคุมพิกัดจุด (Position) และทิศทาง (Orientation) ของ End effector จำเป็นต้องควบคุมตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อให้ได้ แบบจำลองทางจลนศาสตร์ (Kinematic model) จะอธิบายถึงตำแหน่งของข้อต่อ (Joint) และ แขน (Link) ของหุ่นยนต์ และเชื่อมโยงกับ Position และ Orientation ของ End effector โดยปัญหาทางจลนศาสตร์จะถูกแบ่งออกเป็นสองปัญหา ปัญหาแรกคือ เมื่อทราบตัวแปรของข้อต่อและแขน (Joint-link parameter) และตำแหน่งในการหมุนของแต่ละ Joint (Joint variables) แล้วต้องการคำนวณหา Position และ Orientation ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยแบบจำลองทางจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Direct kinematic model) ปัญหาที่สองคือ เมื่อทราบตัวแปรของข้อต่อและแขน (Joint-link parameter) และ Position และ Orientation แล้วต้องการคำนวณหา ตำแหน่งในการหมุนของแต่ละ Joint (Joint variables) ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยแบบจำลองทางจลนศาสตร์แบบย้อนกลับ (Inverse kinematic model) หรือสามารถแสดงเป็นแผนภาพอย่างง่ายได้ ดังรูปที่ 2.10

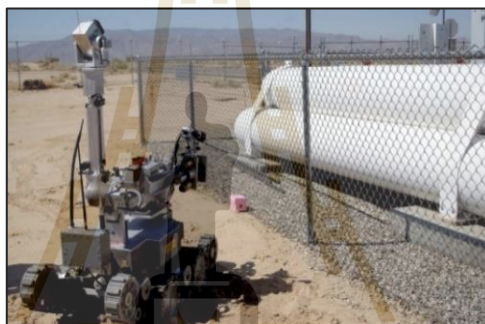


รูปที่ 2.10 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง Direct kinematic model และ Inverse kinematic model

(Mittal and Nagrath, 2003)

2.4 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ (Mobile robot)

หุ่นยนต์เคลื่อนที่ หรือ Mobile robot เป็นหุ่นยนต์ชนิดหนึ่งที่ไม่ได้ถูกยึดไว้กับที่สามารถเคลื่อนที่ได้โดยอาศัยตัวขับเคลื่อนเช่น การขับเคลื่อนด้วยล้อหมุน การขับเคลื่อนด้วยสายพานหรือกลไกที่มีลักษณะคล้ายขา ปัจจุบันหุ่นยนต์ชนิดนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตอย่างแพร่หลาย เช่น การใช้งานขนส่งลำเลียงแบบอัตโนมัติ (Automation Guided Vehicles, AVG) เพื่อทำการขนส่งลำเลียงชิ้นส่วนไปยังสถานีการผลิตต่าง ๆ หรือนำไปจัดเก็บในคลังจัดเก็บต่อไป หรือแม้กระทั่งการประยุกต์ไปใช้ในที่ต้องอาศัยการควบคุมจากระยะไกลเช่น หุ่นยนต์กู้ภัย หุ่นยนต์เก็บกู้วัตถุระเบิด เป็นต้น จุดเด่นของหุ่นยนต์ชนิดนี้คือหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่ต้องการปฏิบัติงานได้



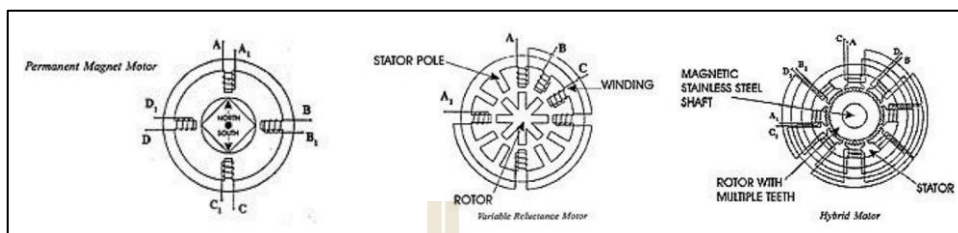
รูปที่ 2.11 หุ่นยนต์เคลื่อนที่สำหรับงานสำรวจ (Humphrey and Adams, 2012)

สำหรับการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่มีหลากหลายวิธี แต่โดยส่วนมากมักใช้วิธีการดังต่อไปนี้ การควบคุมด้วยมนุษย์จากระยะไกล (Remote control) การควบคุมการทำงานด้วยระบบนำทาง เช่น การใช้แถบนำแสง หรือวิธีการควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติ (Automatic control) หรือการควบคุมการทำงานด้วยตัวเอง (Autonomous control)

2.5 สเต็ปเปอร์ มอเตอร์ (Stepper motor)

มอเตอร์ไฟฟ้าชนิด Stepper motor เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ไม่มีแปรงถ่านชนิดหนึ่ง ลักษณะการหมุนของมอเตอร์ชนิดนี้จะเป็นการหมุนแบบไม่ต่อเนื่อง โดยจะมีการหมุนเป็นขั้น ๆ (Step) โดยจะขับเคลื่อนได้เป็นมุมเท่าไรนั้นจะขึ้นกับความละเอียดของ Stepper motor รุ่นนั้น ๆ Stepper motor เป็นมอเตอร์ชนิดหนึ่งที่นิยมนำไปใช้งานทางด้านระบบอัตโนมัติและหุ่นยนต์ เนื่องจากมอเตอร์ชนิดนี้สามารถควบคุมตำแหน่งและความเร็วของการหมุนได้โดยไม่ต้องอาศัยอุปกรณ์ตรวจวัดและป้อนกลับ หรือ Open loop control

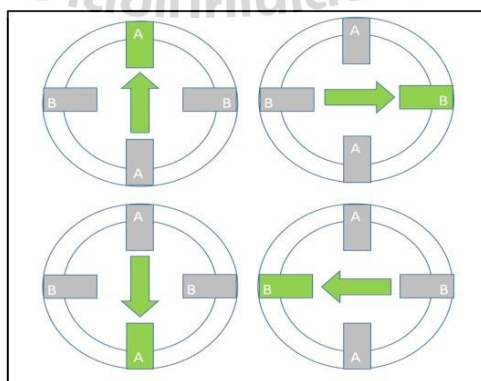
Stepper motor สามารถถูกจำแนกได้หลัก ๆ 3 ชนิด ขึ้นกับชนิดของวัสดุของแกนหมุนมอเตอร์ (Rotor) คือ (1) แม่เหล็กถาวร (Permanent magnet), (2) Variable reluctance, (3) แบบผสม (Hybrid)



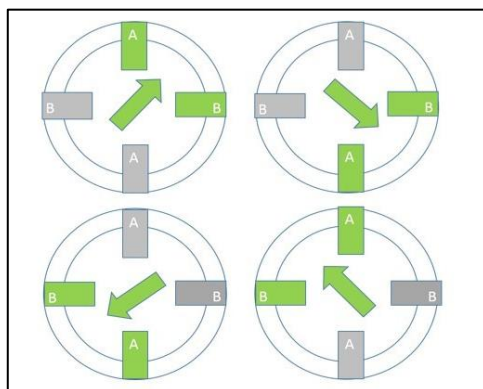
รูปที่ 2.12 ชนิดของ Stepper motor (Donald R. Dentler II, 2008)

สำหรับการควบคุม Stepper motor จะมีรูปแบบในการควบคุมที่หลากหลายขึ้นกับลำดับในการจ่าย Pulse ให้กับมอเตอร์ โดยแบ่งเป็น 3 รูปแบบหลัก ๆ คือ

1. รูปแบบเต็มสเต็ป (Full step mode) สามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบย่อย คือ Full step mode 1 Phase และ Full step mode 2 Phase โดยทั้งสองรูปแบบย่อยจะเคลื่อนที่ไปครั้งละเต็มสเต็ป เช่น Stepper motor โดยทั่ว ๆ ไปจะมีความละเอียด (Resolution) ที่ 200 สเต็ป/รอบ หากควบคุมมอเตอร์ด้วยรูปแบบเต็มสเต็ปนี้ ในการหมุนแต่ละสเต็ป มอเตอร์จะเคลื่อนที่ไปสเต็ปละ 1.8 องศา หรือ 360 องศาหารด้วย 200 สเต็ป/รอบ ข้อแตกต่างระหว่างการควบคุมแบบ 1 Phase และ 2 Phase คือแบบ 1 Phase จะจ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดในมอเตอร์ทีละ 1 Phase ทำให้การควบคุมแบบนี้จะมีแรงบิดที่น้อยกว่าแบบ 2 Phase ที่จ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดในมอเตอร์พร้อม ๆ กันทีละ 2 Phase

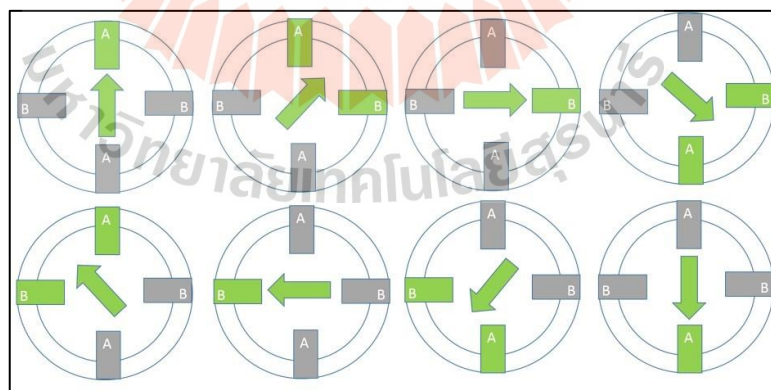


รูปที่ 2.13 การควบคุม Stepper motor รูปแบบเต็มสเต็ป 1 เฟส (Full step mode 1 Phase) (Greig RS, 2008)



รูปที่ 2.14 การควบคุม Stepper motor รูปแบบเต็มสเต็ป 2 เฟส (Full step mode 2 Phase) (Greig RS, 2008)

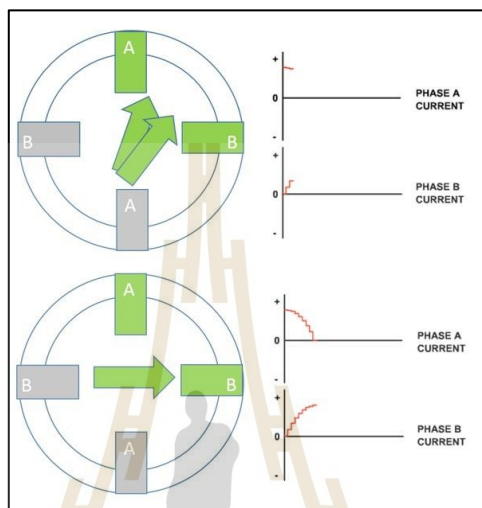
2. รูปแบบครึ่งสเต็ป (Half step mode) เป็นการนำเอาการควบคุมแบบ Full step mode 1 Phase และแบบ Full step mode 2 Phase มาผสมกัน ซึ่งจะทำให้มอเตอร์สามารถครึ่งละครึ่งสเต็ป กล่าวคือ หาก Stepper motor โดยทั่ว ๆ ไปจะมีความละเอียด (Resolution) ที่ 200 สเต็ป/รอบ ควบคุมมอเตอร์ด้วยรูปแบบเต็มสเต็ป มอเตอร์จะเคลื่อนที่ไปครึ่งละ 1.8 องศา แต่หากควบคุมด้วยรูปแบบครึ่งสเต็ปนี้จะเคลื่อนที่ได้ครึ่งละ 0.9 องศา หรือลดลงครึ่งหนึ่งจากรูปแบบเต็มสเต็ป ดังนั้นการควบคุมรูปแบบนี้จะได้การเคลื่อนที่ที่มีความละเอียดมากขึ้น แต่จะมีความเร็วที่ลดลงเมื่อจ่าย Pulse ด้วยความถี่ที่เท่ากัน



รูปที่ 2.15 การควบคุม Stepper motor รูปแบบครึ่งสเต็ป (Half step mode) (Greig RS, 2008)

2. รูปแบบไมโครสเต็ป (Micro stepping mode) เป็นรูปแบบการควบคุมมอเตอร์รูปแบบใหม่ โดยอาศัยการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแต่ละเฟสของ Stepper motor ซึ่งจะทำให้มอเตอร์มี

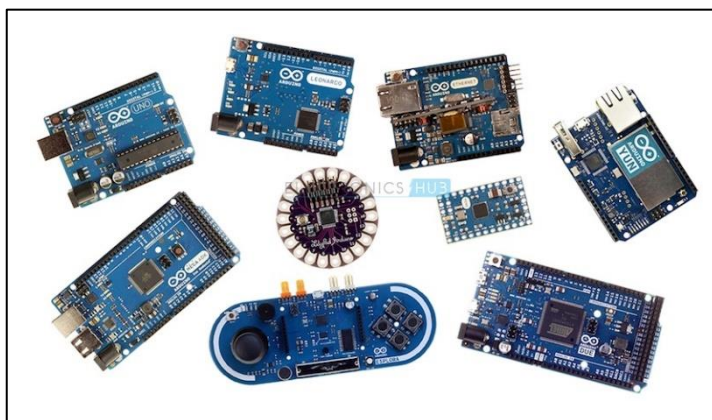
ความละเอียดในการหมุนมากขึ้น โดยสามารถแบ่งเป็นสเต็ปย่อยๆ ได้ถึง 1/256 ส่วน หรือมากกว่า 50,000 สเต็ปต่อรอบ การควบคุมในรูปแบบนี้จะทำให้การเคลื่อนที่ของมอเตอร์มีความต่อเนื่องในการหมุนมากขึ้น ลดเสียงรบกวนจากมอเตอร์ได้ แต่การควบคุมรูปแบบนี้จะทำให้แรงบิดของมอเตอร์ลดลง



รูปที่ 2.16 การควบคุม Stepper motor ไมโครสเต็ป (Micro stepping mode) (Greig RS, 2008)

2.6 อาร์ดูโน้ (Arduino)

อาร์ดูโน้เป็นแพลตฟอร์ม (Platform) สำหรับสร้างต้นแบบทางอิเล็กทรอนิกส์แบบโอเพนซอร์ส (Open source) กล่าวคือ เป็นแพลตฟอร์มที่มีการเปิดเผยหลักการหรือแหล่งที่มาของเทคโนโลยี โดยอาร์ดูโน้ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่ายของซอฟต์แวร์ (Software) และฮาร์ดแวร์ (Hardware) ด้วยเหตุนี้บอร์ดอาร์ดูโน้จึงเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) สำหรับงานการสร้างต้นแบบบอร์ดหนึ่งๆ ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก โดยบอร์ดอาร์ดูโน้สามารถอ่านสัญญาณดิจิทัลที่ป้อนเข้า (Digital inputs) มาเช่น สัญญาณจากการกดสวิตช์, การสัมผัสหน้าจอ, การตรวจจับของเซนเซอร์ได้ และยังสามารถส่งสัญญาณดิจิทัลที่ส่งออกไป (Digital outputs) เพื่อควบคุมการทำงานอุปกรณ์ต่างๆ ได้เช่น การเปิดและปิดไฟ LED, การหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้า, การส่งเสียงดนตรีผ่านลำโพง เป็นต้น



รูปที่ 2.17 บอร์ดอาร์ดูโนชนิดต่าง ๆ (Electronics Hub, 2021)

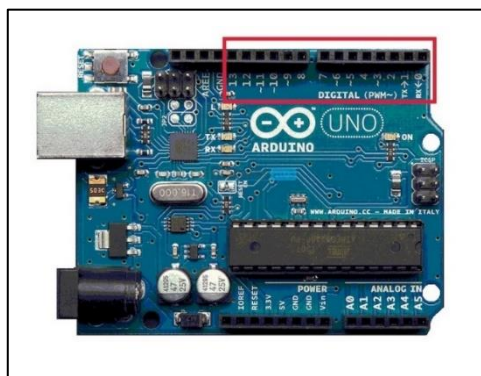
2.6.1 ชนิดของบอร์ดอาร์ดูโน

บอร์ดอาร์ดูโนมีมากมายหลายชนิด โดยแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันในหลาย ๆ ด้าน เช่น ขนาดของบอร์ด, จำนวนขาสำหรับรองรับการต่อเพิ่มรับสัญญาณเข้าและส่งสัญญาณออก (Input/Output หรือ I/O Pins), ขารับสัญญาณหรือส่งสัญญาณที่สามารถทำงานพิเศษได้เช่น Interrupt pins, รวมถึงราคาและคุณสมบัติย่อยต่าง ๆ ของบอร์ดแต่ละชนิด เป็นเหตุผลที่บอร์ดอาร์ดูโนแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมกับงานหลากหลายรูปแบบแตกต่างกันไป โดยชนิดของบอร์ดอาร์ดูโนที่เป็นที่รู้จักและหาซื้อได้ง่าย หลัก ๆ ก็คือ Arduino UNO, Arduino Mega, Arduino Nano, Arduino Micro, และ Arduino Lilypad

2.6.2 Arduino UNO

Arduino UNO เป็นบอร์ดอาร์ดูโนที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายที่สุด โดยมีส่วนแบ่งทางการตลาดจากบอร์ดอาร์ดูโนทั้งหมดถึงร้อยละ 50 เนื่องจากเป็นบอร์ดอาร์ดูโนพื้นฐานที่มีราคาไม่แพง เป็นบอร์ดที่เหมาะสมสำหรับงานสร้างต้นแบบสำหรับผู้เริ่มต้นทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และการเขียนโปรแกรม

Arduino UNO ใช้ microcontroller ชนิด ATmega328P เป็นพื้นฐานของบอร์ด มีจำนวนขารับส่งสัญญาณดิจิทัล (Digital Input/Output) จำนวน 14 ขาร่วมกันดังรูปที่ 2.17 ซึ่งสามารถเขียนโปรแกรมเพิ่มกำหนดให้เป็นขาสำหรับรับหรือส่งสัญญาณได้ โดยใน 14 ขานี้จะมี 6 ขาที่รองรับการส่งสัญญาณแบบ Pulse Width Modulation (PWM) และทุกขาจะทำงานที่แรงดันไฟ 5 โวลต์และสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 20 มิลลิแอมแปร์



รูปที่ 2.18 ขารับสัญญาณอนาล็อกของบอร์ด Arduino UNO (Electronics Hub, 2021)

2.7 Raspberry Pi

Raspberry Pi ถูกพัฒนาขึ้นมาโดย Eben Upton จากมหาวิทยาลัย University of Cambridge ประเทศสหราชอาณาจักร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้สำหรับการสอนและพัฒนาทักษะการเขียนโปรแกรมของนักเรียน, นักศึกษา, และผู้สนใจในประเทศกำลังพัฒนา ในขณะที่บอร์ด Arduino เป็น Microcontroller บอร์ดหนึ่ง Raspberry Pi จัดว่าเป็นบอร์ด Microprocessor ซึ่งสามารถเรียกได้ว่าเป็นคอมพิวเตอร์เครื่องหนึ่งก็ว่าได้ โดยสามารถเชื่อมต่อ Raspberry Pi เข้ากับจอมอนิเตอร์ผ่านพอร์ต HDMI หรือพอร์ต AV ได้, สามารถเชื่อมต่อเข้ากับเมาส์และคีย์บอร์ดได้ผ่านพอร์ต USB, สามารถเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตผ่าน Ethernet หรือ Wi-Fi ได้, และสามารถเชื่อมต่อกับกล้องได้ เหมือนกับคอมพิวเตอร์เครื่องหนึ่ง



รูปที่ 2.19 บอร์ด Raspberry Pi (Electronics Hub, 2021)

Raspberry Pi ถูกเรียกว่า Single Board Computer (SBC) เนื่องจาก Raspberry Pi ถือเป็นคอมพิวเตอร์เครื่องหนึ่งที่สามารถอยู่บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์แผงเดียวได้ โดยคอมพิวเตอร์เครื่องหนึ่งนั้นจะต้องประกอบไปด้วย หน่วยประมวลผล (Processor), หน่วยความจำชั่วคราว (RAM), หน่วยความจำถาวร (Storage), อุปกรณ์ต่างพ่วงต่าง ๆ (Connectors) เป็นต้น

เมื่อ Raspberry Pi คือ คอมพิวเตอร์เครื่องหนึ่ง ดังนั้น Raspberry Pi สามารถรองรับการดำเนินการ (run) ของระบบปฏิบัติการได้ โดยทางผู้ก่อตั้ง Raspberry Pi ซึ่งเป็นองค์กรที่รับผิดชอบการออกแบบและพัฒนา Raspberry Pi SBC ได้ออกแบบระบบปฏิบัติการสำหรับ Raspberry Pi ไว้ด้วย ชื่อว่าระบบปฏิบัติการ Raspberry Pi (Raspberry Pi Operating system) หรือ Raspbian OS โดยเป็นระบบปฏิบัติการ Debian ที่มีพื้นฐานมาจาก Linux

2.8 การติดต่อสื่อสารระหว่าง Raspberry Pi และ Arduino

สำหรับการติดต่อสื่อสารระหว่าง Raspberry Pi และ Arduino มีการสื่อสารรูปแบบหนึ่งที่เป็นที่นิยมอย่างมากคือ การสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Communication) โดยการสื่อสารแบบอนุกรมนี้อธิบายเป็นการถ่ายโอนข้อมูลรูปแบบหนึ่งที่มีความเรียบง่าย ไม่ซับซ้อน ข้อมูลจะถูกส่งอย่างเป็นลำดับ โดยจะถูกส่งไปครั้งละ 1 บิต (bit) ในเวลาหนึ่ง ๆ การสื่อสารแบบอนุกรมระหว่าง Raspberry Pi และ Arduino นั้น โดยมากจะใช้โปรโตคอล UART (UART protocol) หรือ Universal Asynchronous Reception and Transmission ซึ่งเป็น โปรโตคอลที่มี libraries สำหรับจัดการการทำงานในระดับล่างของคอมพิวเตอร์ (Low layers) ให้กับผู้ใช้งาน จึงเป็นที่นิยม เนื่องจากลดความซับซ้อนในการจัดการระบบของผู้ใช้งาน โดยการติดต่อสื่อสารระหว่าง Raspberry Pi และ Arduino ผ่านการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Communication) สามารถเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ได้หลัก ๆ 2 รูปแบบ คือ การสื่อสารแบบอนุกรมผ่านสาย USB และ การสื่อสารแบบอนุกรมผ่าน GPIOs

การสื่อสารแบบอนุกรมผ่านสาย USB เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุดโดยใช้สาย USB เชื่อมต่อระหว่างบอร์ด Raspberry Pi และบอร์ด Arduino เข้าด้วยกันดังรูปที่ 2.20 โดยทางฝั่งบอร์ด Raspberry Pi สามารถเลือกช่องเสียบ USB (USB ports) ที่มีอยู่ 4 ช่องบนบอร์ดได้ ซึ่งจะเป็นช่องเสียบ USB ชนิด A (USB type A port) สำหรับทางฝั่งบอร์ด Arduino สามารถใช้ช่องเสียบ USB ที่เป็นช่องเสียบสำหรับอัปโหลดชุดคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ (จาก Arduino IDE) ได้ ซึ่งชนิดของช่องเสียบจะขึ้นกับชนิดของบอร์ด Arduino เช่นบอร์ด Arduino UNO และบอร์ด Arduino Mega โดยทั่วไปจะเป็นช่องเสียบชนิด B (USB type B port) หรือบอร์ด Arduino Nano ที่จะเป็นช่องเสียบชนิด Mini-B (USB type Mini-B port) เป็นต้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

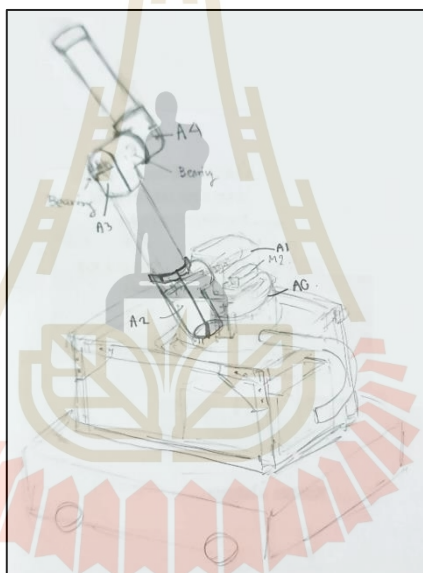
งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ชนิด 3 องศาอิสระ สำหรับติดตั้งบนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ โดยเป็นแขนกลหุ่นยนต์ชนิดอาร์ทิกูเลต ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ที่มีข้อต่อแบบหมุนทั้งหมด อีกทั้งยังเป็นหุ่นยนต์ชนิดหนึ่งที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม โดยทางผู้วิจัยได้มีแนวคิดที่จะออกแบบและสร้างแขนกลหุ่นยนต์นี้ให้มีขนาดเหมาะสมกับการติดตั้งบนหุ่นยนต์เคลื่อนที่และออกแบบให้ผู้ใช้งานสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของข้อต่อหรือแกนแต่ละแกนของหุ่นยนต์ได้อย่างอิสระ และสามารถควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงตามแนวแกน X, Y, และ Z จากการคำนวณจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์

โดยทางผู้วิจัยได้แบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรก การออกแบบและสร้างแขนกลหุ่นยนต์ โดยในส่วนนี้ได้มีการคำนวณและเลือกมอเตอร์ไฟฟ้าที่เหมาะสม การออกแบบต้นแบบ 3 มิติในโปรแกรมช่วยออกแบบ รวมถึงการออกแบบระบบการเดินสายไฟ, อุปกรณ์เชื่อมต่อต่าง ๆ, และการจัดวางอุปกรณ์บนแผงควบคุม และได้มีการขึ้นชิ้นส่วนต่าง ๆ ของหุ่นยนต์โดยใช้การพิมพ์ 3 มิติเป็นหลัก ส่วนที่สอง การวิเคราะห์จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ ในส่วนนี้ได้นำขนาดและทิศทางในการวางแกนข้อต่อของแขนกลมาวิเคราะห์จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์แบบไปข้างหน้า (Forward Kinematics) และ จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์แบบไปย้อนกลับ (Inverse Kinematics) เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ได้ทั้งแบบเคลื่อนที่แยกแต่ละแกน (Joint Coordinate) หรือเคลื่อนที่ทุก ๆ แกนร่วมกัน โดยให้จุดปลายแขนกลเคลื่อนที่ได้เป็นเส้นตรง (Cartesian Coordinate) ส่วนที่สาม การออกแบบและสร้าง Software สำหรับควบคุมแขนกลและสามารถสื่อสารกับผู้ใช้งานได้ผ่าน Graphic User Interface (GUI) โดยในส่วนนี้ทางผู้วิจัยได้มีการออกแบบ Interface ให้ผู้ใช้งานสามารถควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ได้ทั้งแบบเคลื่อนที่แยกแต่ละแกน หรือเคลื่อนที่ทุก ๆ แกนร่วมกัน โดยให้จุดปลายแขนกลเคลื่อนที่ได้เป็นเส้นตรงได้ โดยผู้ใช้งานสามารถกดปุ่มเครื่องหมายบวก, ลบ หรือรอกหมุนหรือพิกัดที่ต้องการให้แขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปได้ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังสามารถกดปุ่มเพื่อให้แขนกลหุ่นยนต์หยุดเคลื่อนที่ หรือให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังท่าทางที่ตั้งไว้ได้อีกด้วย

3.2 การออกแบบแขนกลหุ่นยนต์

3.2.1 การออกแบบแขนกลหุ่นยนต์

ในอุตสาหกรรมนอกจากแขนกลหุ่นยนต์จะมีหลากหลายประเภท เช่น Articulated robot arm, SCARA robot arm, Cartesian robot arm เป็นต้น โดยผู้ใช้งานสามารถเลือกชนิดของแขนกลหุ่นยนต์ให้เหมาะสมกับงานได้ แขนกลหุ่นยนต์ชนิดหนึ่ง ๆ ยังสามารถถูกออกแบบได้ในหลากหลายรูปแบบ สำหรับงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยได้ศึกษาแขนกลหุ่นยนต์ชนิดอาร์ทีคิวเลตในรูปแบบต่าง ๆ และได้ทำการร่างแบบเบื้องต้นของแขนกลหุ่นยนต์ โดยผู้วิจัยได้คำนึงถึงการติดตั้งบนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ จึงได้ออกแบบให้แขนกลหุ่นยนต์มีความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ ใช้พื้นที่สำหรับติดตั้งค่อนข้างน้อย ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบร่างของแขนกลหุ่นยนต์

หลังจากได้แบบร่างเบื้องต้นของแขนกลหุ่นยนต์แล้ว ผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการจัดซื้อวัสดุและชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ต้องใช้สำหรับการประกอบแขนกลหุ่นยนต์ ดังนี้ แขนของแขนกลหุ่นยนต์เป็นท่ออลูมิเนียมตรงกลาง โดยท่อตรงกลางจะเชื่อมต่อเข้ากับส่วนของข้อต่อพลาสติกที่จะขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ, ลูกปืนในส่วนต่าง ๆ, แกนเพลลาเหล็กกล้าคาร์บอนสูง, ชุดสายพานและเฟืองสายพาน, รวมถึงมอเตอร์ไฟฟ้าและชุดเฟืองทดตามข้อมูลจำเพาะที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ 3.2.2

3.2.2 การคำนวณและเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้ามีหลากหลายชนิด, หลากหลายประเภท, และหลากหลายขนาด ในการเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับหลากหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็นลักษณะการใช้งาน, การควบคุมตำแหน่งหรือภาระกรรมที่มอเตอร์ต้องแบกรับ ตัวอย่างเช่น มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ชนิดมีแปรงถ่าน (Brushed DC Motor), มอเตอร์ไฟฟ้าชนิด Stepper Motor, มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นต้น

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้มอเตอร์ชนิด Stepper Motor ที่มี Encoder และ Electromagnetic Brake เพื่อตรวจวัดตำแหน่งในการหมุนของมอเตอร์และหยุดการหมุนของมอเตอร์เมื่อไม่จ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ ตามลำดับ โดยจะใช้ควบคู่กับชุดเฟืองทดเพื่อเพิ่มแรงบิด และลดความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้าและตัวขับมอเตอร์ (Stepper motor driver) เพื่อลดความซับซ้อนในการจ่าย Pulse ให้กับ Stepper Motor

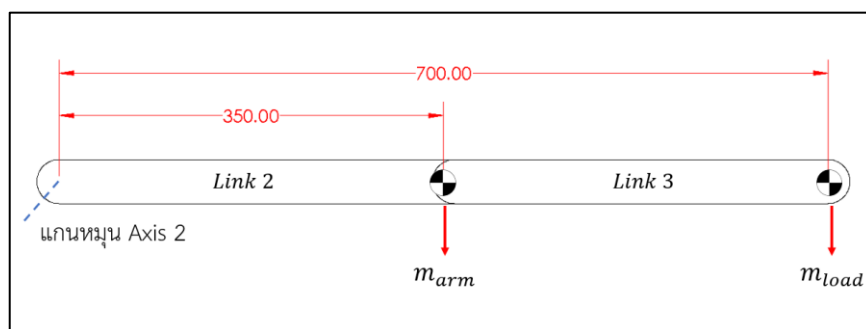
ผู้วิจัยได้เลือกใช้ Stepper motor P Series Nema 17 Closed loop stepper motor with electromagnetic brake ขนาดแรงบิด 48 N.cm และ 72 N.cm ซึ่งมีขนาดไม่ใหญ่จนเกินไปและมีแรงบิดที่เพียงพอสำหรับรับภาระกรรมของแขนกลหุ่นยนต์

การเลือกขนาดของมอเตอร์ทางผู้วิจัยได้ทำการคำนวณภาระกรรมที่มอเตอร์แต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์จะต้องแบกรับ สามารถคำนวณได้จากสมการในการหาแรงบิดดังนี้

$$\tau_{motor} = \sum(r \times F) + I\omega \quad (3.1)$$

จากแบบร่างเบื้องต้นของแขนกลหุ่นยนต์ซึ่งกำหนดให้ความยาวของแขน (Link) ที่ 2 มีขนาดประมาณ 360 mm และความยาวของแขน (Link) ที่ 3 มีขนาดประมาณ 340 mm และสำหรับการคำนวณได้ประมาณให้ Link 2 และ Link 3 เป็นแท่งสี่เหลี่ยมตัน มีน้ำหนักคงที่ตลอดความยาวรวมประมาณ 2 กิโลกรัม และได้กำหนดภาระกรรมให้กับแขนกลที่ 0.1 กิโลกรัม แต่ละแกนสามารถมีความเร็วความเร็วในการหมุนสูงสุดไม่เกิน 120 องศา/วินาที หรือประมาณ 20 RPM และสามารถใช้เวลา 1 วินาที ในการเร่งความเร็วจากหยุดนิ่งไปยังความเร็วสูงสุด

การคำนวณหาขนาดมอเตอร์สำหรับข้อต่อ (Joint) ที่ 2 ได้การกำหนดข้างต้น จะได้ว่าจุดศูนย์กลางมวลของ Link 2 และ Link 3 จะอยู่ที่กึ่งกลางของ Link ทั้งสองคือที่ระยะ 350 มิลลิเมตรจากจุดหมุน ส่วนมวลของโหนดกำหนดให้อยู่ที่ปลายของ Link ที่ 3 ดังรูปที่ 3.2

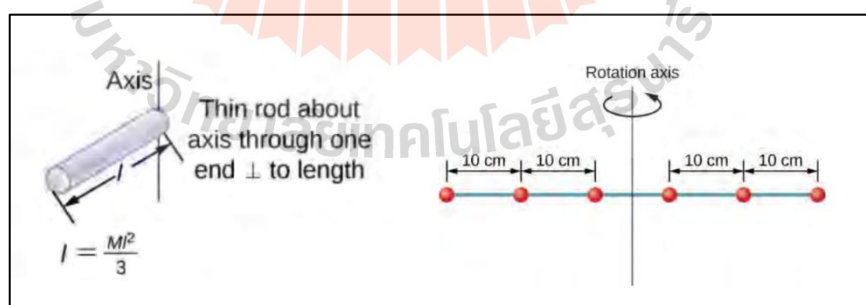


รูปที่ 3.2 แผนภาพอิสระของแขนกลหุ่นยนต์

ในการคำนวณหาแรงบิดที่เป็นไปได้มากที่สุดจะเป็นขณะที่ Link 2 และ Link 3 เหยียดตรงออกมาในระนาบเดียวกันกับพื้นโลกดังรูป ดังนั้นแรงบิดจึงหาได้ดังสมการที่ 3.2

$$\tau_{motor} = m_{arm}g\left(\frac{L_2 + L_3}{2}\right) + m_{load}g(L_2 + L_3) + I\alpha \quad (3.2)$$

โดย I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยในการหมุนของวัตถุแขนเกร็งซึ่ง ผู้วิจัยได้ประมาณให้ Link ของแขนกลเป็นแท่งบางและประมาณให้ภาระกรรมเป็นอนุภาคที่มีมวล ดังรูปที่ 3.3 ดังนั้น โมเมนต์ความเฉื่อยในการหมุนสามารถหาได้จากสมการดังนี้



รูปที่ 3.3 โมเมนต์ความเฉื่อยในการหมุนของแท่งบางและอนุภาค (Samuel J.L., et al., 2018)

$$I_{rod} = \frac{1}{3}ml^2$$

$$I_{particle} = mr^2$$

$$I_{Link2,3} = \frac{1}{3}m_{arm}(L_2 + L_3)^2 + m_{load}(L_2 + L_3)^2$$

$$= \frac{1}{3}(2)(0.7)^2 + (0.1)(0.7)^2 = 0.376kg \cdot m^2$$

ส่วน α คือ ความเร่งเชิงมุม (rad/s) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{20RPM \cdot \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ sec}}\right) \cdot \left(\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}}\right)}{1 \text{ sec}} = 2.09 \text{ rad} / \text{s}^2$$

ดังนั้น แรงบิดขั้นต่ำของมอเตอร์แกนที่ 2 เป็นดังสมการที่ 3.2

$$\tau_{motor} = (2)(9.81)(0.3) + (0.1)(9.81)(0.7) + (0.376)(2.09) = 8.34 \text{ N.m}$$

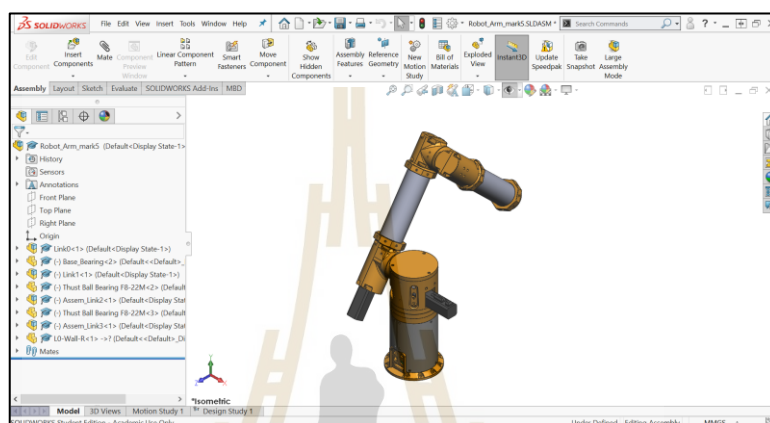
เนื่องจากมอเตอร์ของ Joint ที่ 2 จะต้องรับภาระกรรมมากที่สุด ผู้วิจัยจึงเลือกมอเตอร์ขนาด 72 N.cm จากนั้น ผู้วิจัยได้เลือกชุดเฟืองทดที่สามารถใช้กับมอเตอร์ที่ผู้วิจัยเลือกและสามารถหาซื้อได้ง่าย จากการสำรวจพบว่ามีอัตราทด, แรงบิดหลังจากทดเฟือง และ Safety Factor ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 อัตราทด, แรงบิดหลังจากทดเฟือง และ Safety Factor

อัตราทดเฟือง	แรงบิดหลังจากทดเฟือง (N.m)	Safety Factor
1 : 3.71	2.25	0.32
1 : 13.76	1.61	1.19
1 : 19.2	0.61	1.66
1 : 51	0.43	4.40

3.2.3 การออกแบบแบบจำลอง 3 มิติของแขนกลหุ่นยนต์

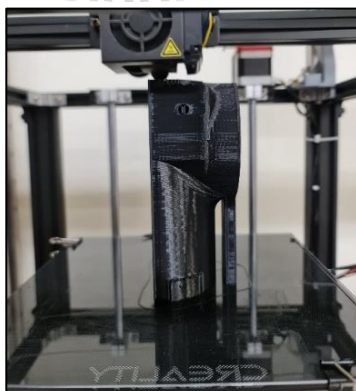
สำหรับการออกแบบแบบจำลอง 3 มิติของแขนกลหุ่นยนต์ ทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบแบบ 3 มิติ ในโปรแกรมช่วยออกแบบบนคอมพิวเตอร์ SolidWorks ดังรูปที่ 3.4 โดยยึดการออกแบบตามแบบร่างเบื้องต้น, ขนาดของวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สามารถจัดหาได้ เช่น ความยาวของสายพาน ขนาดของลูกปืน เพื่อ เป็นต้น



รูปที่ 3.4 การออกแบบแบบจำลอง 3 มิติของแขนกลหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks

3.2.4 การขึ้นรูปชิ้นส่วนและประกอบแขนกลหุ่นยนต์

สำหรับการขึ้นรูปชิ้นส่วนของแขนกลหุ่นยนต์ทางผู้วิจัยได้ออกแบบให้ ส่วนบริเวณข้อต่อซึ่งมีรูปแบบที่ซับซ้อนให้ขึ้นรูปด้วยการพิมพ์ 3 มิติ ดังรูปที่ 3.5 โดยใช้วัสดุในการพิมพ์คือเส้นพลาสติก PLA



รูปที่ 3.5 การขึ้นรูปชิ้นส่วนแขนกลหุ่นยนต์ด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

ส่วนแขนของแขนกลหุ่นยนต์ทางผู้วิจัยเลือกใช้เป็นที่ออลูมิเนียมกวางส่วนแกนเพลาทงผู้วิจัยเลือกใช้เป็นเพลาลูกกลิ้งคาร์บอนสูงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร

3.2.5 การออกแบบการเดินสายไฟ

สำหรับการออกแบบการเดินสายไฟฟ้าเป็นส่วนที่สำคัญมากอีกส่วนหนึ่งในการออกแบบแขนกลหุ่นยนต์ เนื่องจากแขนกลหุ่นยนต์นี้จะต้องถูกติดตั้งบนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ สายไฟต่าง ๆ จึงควรต้องถูกเก็บให้เรียบร้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทางผู้วิจัยได้วางสายไฟภายในที่ออลูมิเนียมและภายในตัวแขนกลหุ่นยนต์ โดยเลือกใช้ Connector รูปแบบต่าง ๆ ตาม Connector ของตัวมอเตอร์และออกแบบในมี Connector ภายในเพื่อให้สามารถถอดประกอบชิ้นส่วนของแขนกลหุ่นยนต์ได้ง่าย ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การเดินสายไฟภายในและ Connector ณ จุดเชื่อมต่อต่าง ๆ

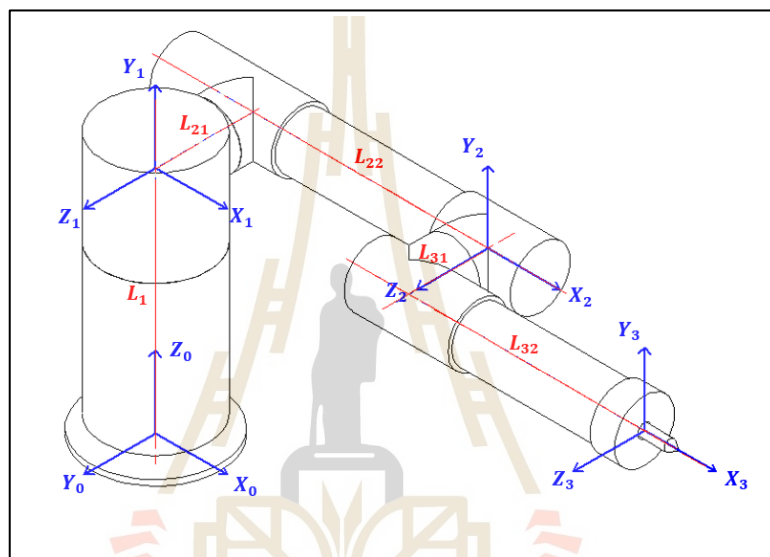


รูปที่ 3.7 Connector ระหว่างตัวแขนกลหุ่นยนต์และมอเตอร์

3.3 การวิเคราะห์วิทยาการหุ่นยนต์ (Robotics) ของแขนกลหุ่นยนต์

3.3.1 การกำหนดกรอบอ้างอิง (Coordinate Frame) และการหาตัวแปรของ DH (DH Parameters)

ในการหาจลศาสตร์ของแขนกลหุ่นยนต์จำเป็นต้องมีการกำหนดกรอบอ้างอิง (Coordinate Frame) และการหาตัวแปรของ DH (DH Parameters) โดยผู้วิจัยได้กำหนดกรอบอ้างอิงของแต่ละแกนดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การกำหนดกรอบอ้างอิงที่แกนต่าง ๆ ของแขนกลหุ่นยนต์

เมื่อกำหนดกรอบอ้างอิงที่ชัดเจนแล้ว สามารถหา DH-Parameters ได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 DH-Parameters

i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$\pi/2$	L_1	θ_1
2	L_{22}	0	$-L_{21}$	θ_2
3	L_{32}	0	$-L_{31}$	θ_3

3.3.2 การคำนวณจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward kinematic)

สำหรับการคำนวณจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าสามารถนำ DH-Parameters จากหัวข้อที่ 3.3.1 มาแทนในรูปแบบทั่วไปของ Transformation matrix ของแต่ละแกน ดังสมการที่ 3.3

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C\alpha_i & S\theta_i S\alpha_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_i S\alpha_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

เมื่อ $C\theta_i = \cos \theta_i$, $S\theta_i = \sin \theta_i$, $C\alpha_i = \cos \alpha_i$, และ $S\alpha_i = \sin \alpha_i$ ดังนั้นเมื่อแทน DH-Parameters จากหัวข้อที่ 3.3.1 ในสมการจะสามารถหา Transformation matrix จาก Frame 3 กลับมายัง Frame 0 ได้ดังสมการที่ 3.4

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & L_{22}C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & L_{22}S_2 \\ 0 & 0 & 1 & -L_{21} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & L_{32}C_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & L_{32}S_3 \\ 0 & 0 & 1 & -L_{31} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} C_1 C_{23} & -C_1 S_{23} & S_1 & C_1(L_{22}C_2 + L_{32}C_3) - S_1(L_{21} - L_{31}) \\ S_1 C_{23} & -S_1 S_{23} & -C_1 & S_1(L_{22}C_2 + L_{32}C_3) - C_1(L_{21} - L_{31}) \\ S_{23} & C_{23} & 0 & L_1 + L_{22}S_2 + L_{32}S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

จาก Transformation matrix ที่ได้สามารถหาพิกัดจุดของ Tool point (P_x, P_y, P_z) ได้จาก Element (1, 4), (2, 4) และ (3, 4) ตามลำดับ ดังสมการที่ 3.5 – 3.7 และหา Rotation matrix ได้ดังสมการที่ 3.8

$$P_z = C_1(L_{22}C_2 + L_{32}C_3) - S_1(L_{21} - L_{31}) \quad (3.5)$$

$$P_y = S_1(L_{22}C_2 + L_{32}C_3) - C_1(L_{21} - L_{31}) \quad (3.6)$$

$$P_z = L_1 + L_2S_2 + L_3S_2S_3 \quad (3.7)$$

$${}^0R_3 = \begin{bmatrix} C_1C_{23} & -C_1S_{23} & S_1 \\ S_1C_{23} & -S_1S_{23} & -C_1 \\ S_{23} & C_{23} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

3.3.3 การคำนวณจลนศาสตร์แบบย้อนกลับ (Inverse kinematic)

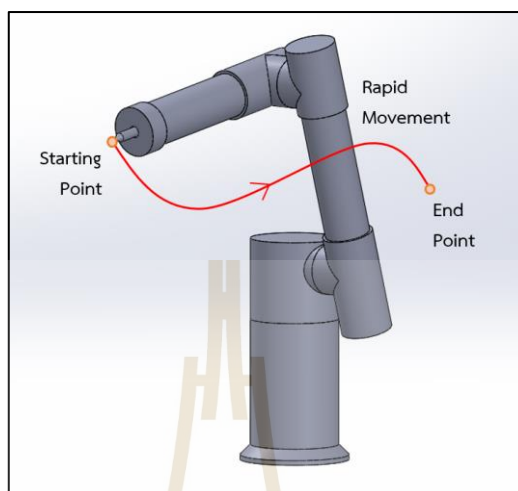
สำหรับการคำนวณจลนศาสตร์แบบย้อนกลับของแขนกลหุ่นยนต์เป็นการคำนวณหาตัวแปรต่าง ๆ ของข้อต่อ (Joint variables) ซึ่ง คือมุมในแขนกลหุ่นยนต์ชนิดอาร์ทิกูเลตที่ข้อต่อทุก ๆ ข้อต่อเป็นแบบ Revolve joint โดยจะคำนวณหาได้จากพิกัดจุด (Position) และทิศทาง (Orientation) ของจุดปลายของแขนกล (Tool plate) ในงานวิจัยนี้เป็นแขนกลหุ่นยนต์ชนิดอาร์ทิกูเลต 3 องศาอิสระ ที่พิกัดจุดใด ๆ ภายในขอบเขตการเคลื่อนที่ (Work envelope) ของแขนกลหุ่นยนต์จะมีผลลัพธ์จากการคำนวณจลนศาสตร์แบบย้อนกลับจำนวน 4 คำตอบ (Solution) และเมื่อแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปเป็นยังตำแหน่งอื่น ๆ จะไม่สามารถกำหนดให้ Orientation คงที่ได้เนื่องจากแขนกลหุ่นยนต์มีจำนวนองศาอิสระไม่มากพอ ดังนั้นการหาผลลัพธ์จากการคำนวณจลนศาสตร์แบบย้อนกลับสำหรับงานวิจัยนี้จึงไม่สามารถใช้ Transformation matrix ที่ได้จากหัวข้อที่ 3.3.2 ได้เนื่องจากการใช้ Transformation matrix จะต้องทราบ Position และ Orientation ที่แน่นอน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ทางภาพ (Graphical method) ในการแก้ปัญหาจลนศาสตร์แบบย้อนกลับ

3.3.4 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ (Path generation)

ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ จะต้องมีการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ (Path) ของจุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ (Tool point หรือ End-effector point) เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทำงานได้ตามผู้ใช้งานต้องการ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ออกแบบให้โปรแกรมสำหรับควบคุมแขนกลหุ่นยนต์สามารถควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ได้ 2 รูปแบบ คือ แบบ Rapid movement และแบบ Linear interpolation path

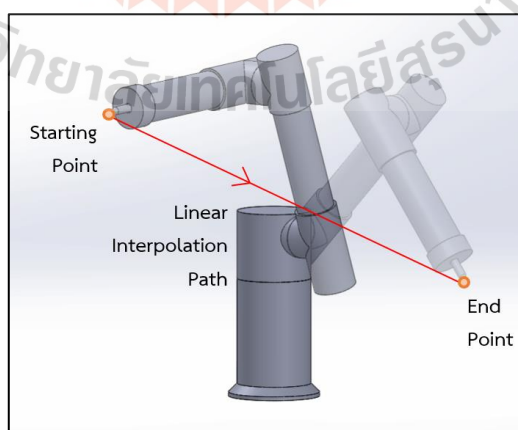
สำหรับการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement ผู้วิจัยได้กำหนดให้แกนแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามที่ผู้ใช้กำหนดและ เมื่อแกนใดแกนหนึ่งเคลื่อนที่ไปยังมุมเป้าหมายที่กำหนดแล้วให้แกนอื่น ๆ หยุดหมุนทันที การเคลื่อนที่ในลักษณะนี้ จะทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ (Path) ที่เกิดขึ้นเป็นไปตามการหมุนของแต่ละแกนของแขนกล

หุ่นยนต์ ดังรูปที่ 3.9 ดังนั้นการเคลื่อนที่แบบนี้จึงเหมาะกับการควบคุมให้แขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังท่าทาง (Post) ที่ต้องการโดยไม่คำนึงถึงเส้นทางในการเคลื่อนที่



รูปที่ 3.9 ลักษณะเส้นทางในการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement

สำหรับการเคลื่อนที่แบบ Linear interpolation path ผู้วิจัยได้กำหนดให้แกนแต่ละแกนแขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปอย่างสัมพันธ์กัน โดยจะต้องเคลื่อนที่ให้จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ (Tool point หรือ End-effector point) มีเส้นทางในการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง (Linear interpolation path) ดังรูปที่ 3.10

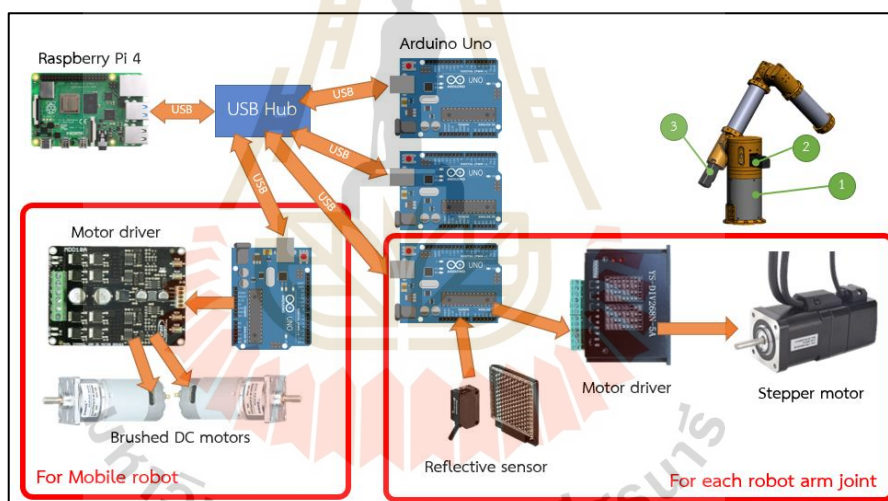


รูปที่ 3.10 ลักษณะเส้นทางในการเคลื่อนที่แบบ Linear interpolation path

3.4 ชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์และการเขียนโปรแกรม

3.4.1 ชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์

สำหรับชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ ผู้วิจัยได้เลือกใช้บอร์ดอาร์ดูโน (Arduino) รุ่น Uno สำหรับควบคุมกับอุปกรณ์ Hardware ต่าง ๆ คือ Stepper motor ผ่าน Stepper motor driver และรับสัญญาณจากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งเพื่อใช้สำหรับตั้งตำแหน่ง Home ของแขนกลหุ่นยนต์ โดยแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์จะใช้ Arduino 1 ตัว เนื่องจาก Arduino เป็น Microcontroller ที่มีเพียง 1 Core ทำให้ไม่สามารถทำงานหลายงาน (Multi-tasking) ในเวลาเดียวกันได้อย่างแท้จริง สำหรับส่วนประมวลผลกลาง ผู้วิจัยได้เลือกใช้ Raspberry Pi 4 เป็นส่วนกลางที่ใช้สำหรับคำนวณงานที่ต้องใช้กำลังในการประมวลผลสูงและยังทำหน้าที่เป็น Master ในการติดต่อสื่อสารกับ Arduino แต่ละตัวที่เป็น Slave ผ่านการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial communication) โดยมีผังการเชื่อมต่อ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แผนผังการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชุดควบคุม

3.4.2 ภาษา Python

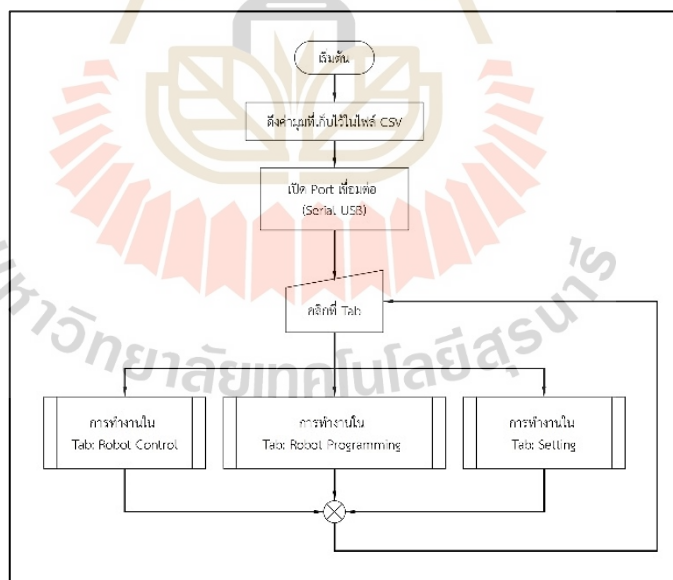
สำหรับการเขียนโปรแกรมบน Raspberry Pi ผู้วิจัยได้เลือกใช้ภาษา Python เนื่องจากเป็นภาษาที่ค่อนข้างนิยมเขียนใน Raspberry Pi อีกทั้งยังเป็นภาษาที่มีแพ็คเกจที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ในหลายด้าน เช่น แพ็คเกจ Numpy ที่สามารถสร้างและคำนวณเมทริกซ์ได้เป็นอย่างดี และสามารถคำนวณคณิตศาสตร์พื้นฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟังก์ชันตรีโกณมิติได้อย่างดีและครบถ้วน ทำให้เหมาะสำหรับการคำนวณจลศาสตร์ของหุ่นยนต์ อีกทั้งยังมีแพ็คเกจ TkInter ที่สามารถสร้าง GUI หรือ Graphic User Interface ได้อย่างดี

3.4.3 Graphic User Interface

สำหรับการออกแบบ GUI หรือ Graphic User Interface ผู้วิจัยได้เลือกใช้แพ็คเกจ TkInter ซึ่งเป็นแพ็คเกจในภาษา Python สำหรับสร้าง Graphic User Interface โดยผู้วิจัยได้ออกแบบให้ GUI มี 3 Tab ดังนี้

1. Tab สำหรับควบคุมการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ (Robot control tab)
2. Tab สำหรับเขียน โปรแกรมกำหนดการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ (Programming tab)
3. Tab สำหรับการตั้งค่าต่าง ๆ ของหุ่นยนต์ (Setting tab)

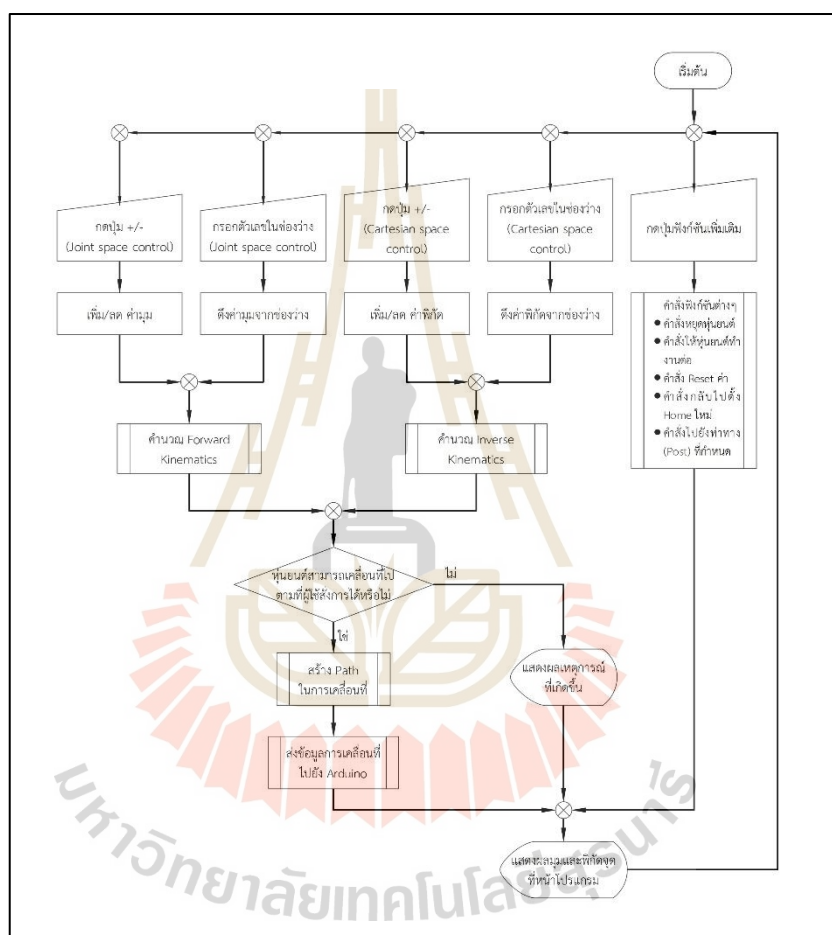
โดยการเขียนโปรแกรมเพื่อสร้าง GUI นี้เป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรม Python ที่จะรันบน Raspberry Pi โดยจะมีการเขียนฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น การคำนวณ Forward Kinematics, การคำนวณ Inverse Kinematics, การคำนวณหาเส้นทางในการเคลื่อนที่, และการคำนวณหาจำนวน Step ที่ต้องสั่งการไปยังมอเตอร์ ในโปรแกรมนี้ด้วย และยังมีโปรแกรมเพื่อทำงานร่วมกับบอร์ด Arduino UNO ผ่านการสื่อสารแบบซีเรียล (Serial communication) โดยใช้แพ็คเกจซีเรียล (Serial) ซึ่งจะมีผังการทำงานดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ผังการทำงานของ GUI

โดย Tab สำหรับควบคุมการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ (Robot control tab) ได้ถูกออกแบบให้ผู้ใช้สามารถควบคุมการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ได้ 3 รูปแบบ คือ ควบคุม

การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์แบบ Joint space หรือแบบแยกทีละแกน, ควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์แบบ Cartesian space หรือแบบให้เส้นทางในการเคลื่อนที่ของจุดปลายแขนกลหุ่นยนต์ (Tool point, End-effector point) เคลื่อนที่ไปตามแนว X-Y-Z, และควบคุมฟังก์ชันเพิ่มเติมโดยการกดปุ่มบนหน้าโปรแกรมเช่น ปุ่มเพื่อให้แขนกลหุ่นยนต์หยุดเคลื่อนที่ เป็นต้น โดยมีผังลำดับการทำงานดังรูปที่ 3.13

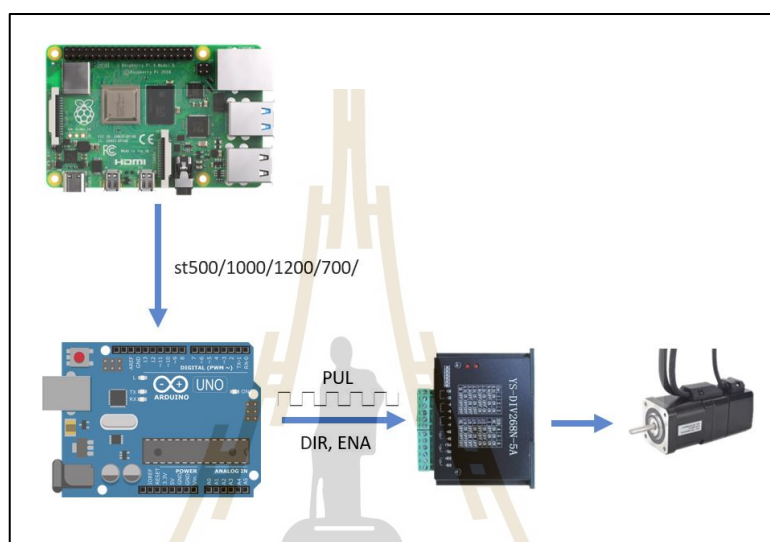


รูปที่ 3.13 ผังการทำงานของ Tab สำหรับควบคุมการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์

3.4.4 การติดต่อสื่อสารระหว่าง Raspberry Pi และ Arduino

สำหรับการติดต่อสื่อสารระหว่าง Raspberry Pi และ Arduino ผู้วิจัยได้เลือกใช้การสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Communication) ผ่านสาย USB โดยผู้ใช้ได้กำหนดชุดตัวอักษรในการสั่งการทำงานระหว่างกัน เช่น หากบอร์ด Raspberry Pi ส่งชุดตัวอักษร “STOP” ให้บอร์ด Arduino สั่งมอเตอร์ที่แกนนั้น ๆ ให้หยุดหมุน เป็นต้น ส่วนคำสั่งในการสั่งให้มอเตอร์เคลื่อนที่

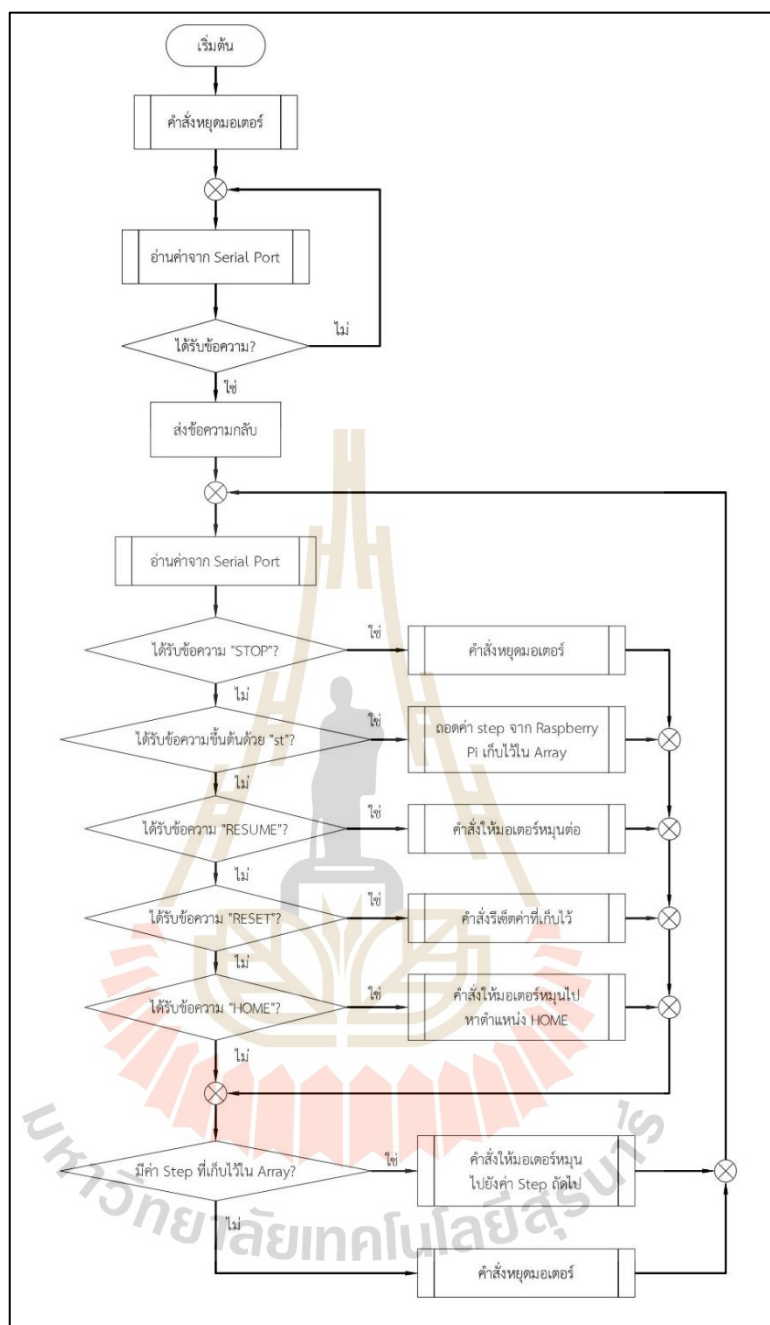
ผู้วิจัยได้กำหนดให้เป็นการส่งชุดตัวอักษรที่ขึ้นต้นด้วย “st” ต่อด้วยค่ามุมในหน่วยของจำนวนสเต็ป (Steps) เรียงต่อกันซึ่งจะคั่นด้วยตัวอักษร ‘/’ ในแต่ละมุม ดังรูปที่ 3.14 โดยกำหนดให้ระยะเวลาที่ใช้เคลื่อนระหว่างค่ามุมหนึ่งไปยังค่ามุมถัดไปมีระยะเวลาที่เท่ากันตลอด ซึ่งโปรแกรมในบอร์ด Arduino กำหนดเวลาที่ต้องใช้ส่ง Pulse แต่ละ Pulse จากระยะเวลาที่คงและจำนวนสเต็ปที่เปลี่ยนไป รวมถึงทิศทางในการเคลื่อนที่ไปยังบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์



รูปที่ 3.14 แผนผังการส่งข้อมูลควบคุมการทำงานของมอเตอร์

3.4.5 บอร์ด Arduino

สำหรับโปรแกรมภายในบอร์ด Arduino ผู้วิจัยได้ออกแบบให้โปรแกรมสามารถรับข้อมูลที่ส่งมาจากบอร์ด Raspberry Pi ผ่าน Serial USB ได้ โดยจะกำหนดชุดตัวอักษรที่ตรงกันสำหรับการทำางานหนึ่ง ๆ โดยโปรแกรมมีผังลำดับการทำงานดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แผนผังการทำงานของบอร์ด Arduino

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

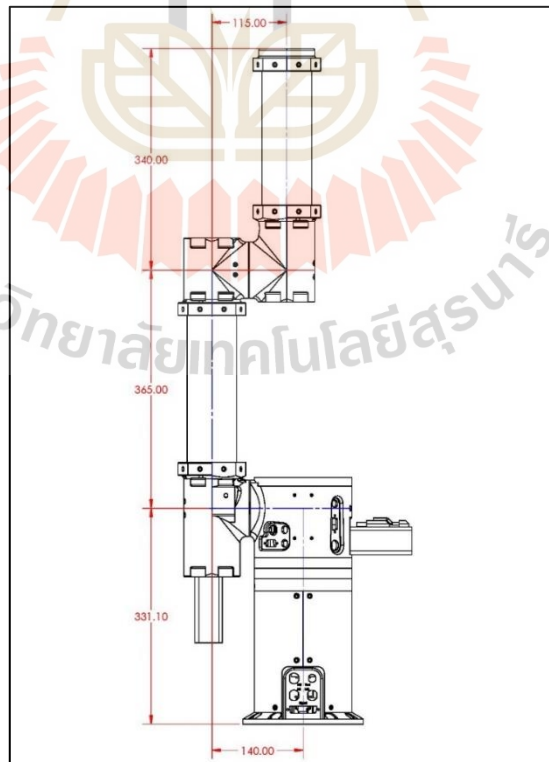
4.1 บทนำ

บทนี้จะนำเสนอผลการออกแบบแขนกลหุ่นยนต์, การวิเคราะห์และสร้างโมเดลการคำนวณ จลศาสตร์ของหุ่นยนต์, การออกแบบ Software สำหรับการควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ และการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์

4.2 การออกแบบและสร้างต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์

4.2.1 ผลการออกแบบแขนกลหุ่นยนต์

จากการออกแบบต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks ได้ต้นแบบ แขนกลหุ่นยนต์ที่มีขนาดของแกนต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 Drawing ของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์พร้อมขนาด

โดยต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์นี้มีความยาว Link ที่ 1 (L_1) = 331.1 mm ความยาว Link ที่ 2 (L_{22}) = 365 mm และความยาว Link ที่ 3 (L_{32}) = 340 mm โดยแกน Link ที่ 1 และ Link ที่ 2 มีระยะเยื้องกันอยู่ (L_{21}) = 140 mm ไปทางแกน +Y และแกน Link ที่ 2 และ Link ที่ 3 มีระยะเยื้องกันอยู่ (L_{31}) = 125 mm ไปทางแกน -Y ทำให้ต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ที่ออกแบบได้นี้มีระยะเข้าถึง (Reach length) ที่ 705 mm

4.2.2 การประกอบแขนกลหุ่นยนต์

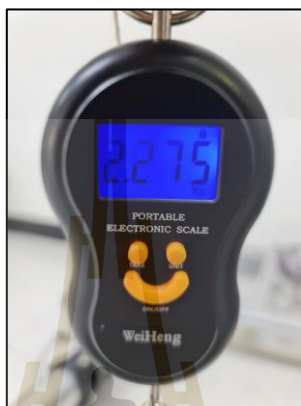
หลังจากทำการออกแบบแขนกลหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks ผู้วิจัยทำการขึ้นรูปชิ้นส่วนต่าง ๆ และประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ขึ้นมาเป็นต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ โดยตลอดกระบวนการต้องมีการปรับปรุงแก้ไขอยู่หลายครั้งเนื่องจากปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูปและประกอบชิ้นส่วน เช่น ปัญหาการพิมพ์ 3 มิติที่ไม่สมบูรณ์ เกิดการขาดหายของเส้นพลาสติกในตัวชิ้นงานเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายในส่วนนั้น, ปัญหาसानพาน ไถลออกจากร่องเฟืองสายพาน โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้สายพานและเฟืองสายพานที่มีขนาดร่องเฟืองลึกขึ้นและได้มีการปรับแก้ไขแบบให้มีจุดตรงสายพานภายในตัวแขนกลหุ่นยนต์, ปัญหาเฟืองสายพานยึดกับแกนเพลลาไม่แข็งแรงมากพอ ผู้วิจัยได้ปรับปรุงแก้ไขโดยการเจาะร่องเล็ก ๆ สำหรับยึดนี้อตตัวหนอน เป็นต้น โดยในท้ายที่สุด ได้เป็นต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ที่ติดตั้งอยู่บนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ที่ติดตั้งอยู่บนหุ่นยนต์เคลื่อนที่

4.2.3 น้ำหนักของแขนกลหุ่นยนต์

ขณะประกอบต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ ก่อนที่ผู้วิจัยจะนำ Link แต่ละ Link ประกอบเข้าด้วยกัน ผู้วิจัยได้ชั่งน้ำหนักของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์แยกแต่ละ Link โดยใช้เครื่องชั่งสปริงดิจิตอลดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เครื่องชั่งสปริงดิจิตอล

พบว่าน้ำหนักของแต่ละ Link ของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์มีน้ำหนักดังตารางที่ 4.1 โดยน้ำหนักรวมของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นนี้มีน้ำหนัก 6.75 กิโลกรัม

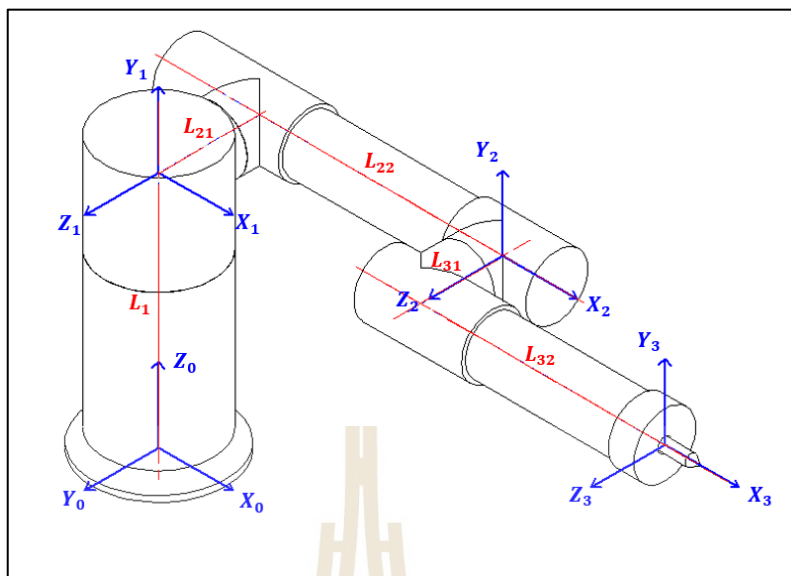
ตารางที่ 4.1 น้ำหนักของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์

Link	น้ำหนัก (กิโลกรัม)
0 และ 1	3.405
2	2.275
3	1.070
น้ำหนักรวม	6.750

4.3 การวิเคราะห์วิทยาการหุ่นยนต์ (Robotics) ของแขนกลหุ่นยนต์

4.3.1 การกำหนดกรอบอ้างอิง (Coordinate frame) และการหาตัวแปรของ DH

สำหรับกรอบอ้างอิง (Coordinate frame) ของแขนกลหุ่นยนต์ ผู้วิจัยได้กำหนดกรอบอ้างอิงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การกำหนดกรอบอ้างอิงที่แกนต่าง ๆ ของแขนกลหุ่นยนต์

จากกรอบอ้างอิง (Coordinate Frame) ของแขนกลหุ่นยนต์นี้ สามารถหา DH-Parameters ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 DH-Parameters

i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	0	$\pi / 2$	L_1	θ_1
2	L_{22}	0	$-L_{21}$	θ_2
3	L_{32}	0	$-L_{31}$	θ_3

4.3.2 การคำนวณจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward kinematics)

สำหรับการคำนวณจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าสามารถนำ DH-Parameters จากหัวข้อที่ 3.3.1 มาแทนในรูปแบบทั่วไปของ Transformation matrix ของแต่ละแกน และเมื่อนำ Transformation matrix ของแต่ละแกนมาคูณกันจะได้ Transformation matrix ของหุ่นยนต์และพิกัดจุดของ Tool point ดังสมการที่ 4.1 - 4.4

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & L_{22}C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & L_{22}S_2 \\ 0 & 0 & 1 & -L_{21} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & L_{32}C_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & L_{32}S_3 \\ 0 & 0 & 1 & -L_{31} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} C_1C_{23} & -C_1S_{23} & S_1 & C_1(L_{22}C_2 + L_{32}C_3) - S_1(L_{21} - L_{31}) \\ S_1C_{23} & -S_1S_{23} & -C_1 & S_1(L_{22}C_2 + L_{32}C_3) - C_1(L_{21} - L_{31}) \\ S_{23} & C_{23} & 0 & L_1 + L_{22}S_2 + L_{32}S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$P_x = C_1(L_{22}C_2 + L_{32}C_3) - S_1(L_{21} - L_{31}) \quad (4.2)$$

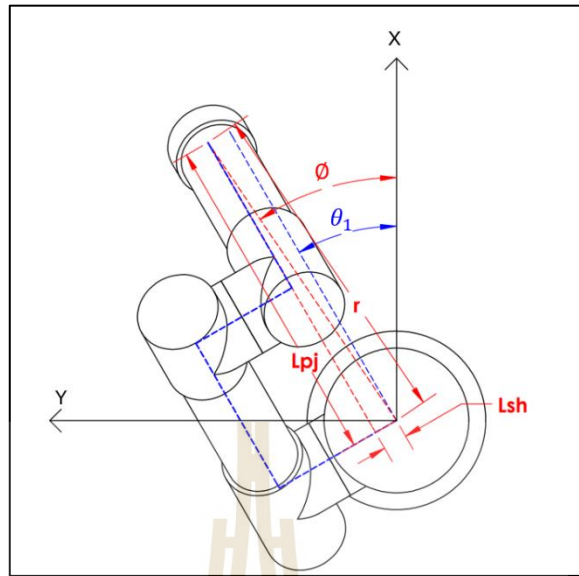
$$P_y = S_1(L_{22}C_2 + L_{32}C_3) - C_1(L_{21} - L_{31}) \quad (4.3)$$

$$P_z = L_1 + L_{22}S_2 + L_{32}S_{23} \quad (4.4)$$

4.3.3 การคำนวณจลนศาสตร์แบบย้อนกลับ (Inverse kinematics)

สำหรับการคำนวณจลนศาสตร์แบบย้อนกลับ ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ทางภาพ (Graphical method) ในการแก้ปัญหา โดยผู้วิจัยได้เสนอวิธีในการแก้ปัญหาดังนี้

เริ่มต้นกำหนดให้แขนกลหุ่นยนต์อยู่ในท่าทาง (Post) หนึ่ง ๆ จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ (Tool point หรือ End-effector point) อยู่ที่พิกัดจุด (P_x, P_y, P_z) ใด ๆ เมื่อมองจากมุมมองด้านบนกำหนดระยะของ Link 2 และ Link 3 ถายลงไปยังพื้นเป็นระยะ L_{pj} หรือ Projection Length และจะเห็นว่าต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้แกนที่ 3 มีการเอียงออกไปจากแกนที่ 1 เล็กน้อย จึงกำหนดให้ระยะเอียงนี้เป็นระยะ L_{sh} หรือ Shift length ส่วนระยะจากจุดกำเนิด (Origin point) ถึงจุดปลายแขนกลหุ่นยนต์ (Tool point หรือ End-effector point) เป็นระยะ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 มุมมอง Top view ของแขนกลหุ่นยนต์

โดยเห็นว่าสามารถหาค่าของตัวแปร r , L_{sh} และค่า L_{pj} ได้โดยตัวแปร r คือ ระยะกระจัดจากจุดกำเนิด (Origin point) ไปจนถึงจุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ (Tool point หรือ End-effector point) เมื่อฉายลงในแนวระนาบ X-Y ดังนั้นจึงสามารถหาค่าได้จากทฤษฎีบทพีทาโกรัสดังสมการที่ 4.5 ส่วนตัวแปร L_{sh} ที่แทนระยะของ Link 1, Link 2 และ Link 3 ที่เอียงไป ดังนั้นจึงมีค่าเท่ากับระยะ L_{21} ลบด้วย L_{31} ดังสมการที่ 4.6 และตัวแปร L_{pj} เมื่อทราบค่า r และ L_{sh} แล้ว จากทฤษฎีบทพีทาโกรัสจะสามารถหาค่า L_{pj} ได้ดังสมการที่ 4.7

$$r = \sqrt{P_x^2 + P_y^2} \quad (4.5)$$

$$L_{sh} = L_{21} - L_{31} \quad (4.6)$$

$$L_{pj} = \pm \sqrt{(r^2 - L_{sh}^2)} \quad (4.7)$$

ส่วนมุม ϕ เป็นมุมระหว่างเส้นตรง r และแกน X โดยจะเห็นว่าจะมีค่ามากกว่า θ_1 เล็กน้อยเนื่องจากระยะ L_{sh} ที่เอียงไป ซึ่งเราสามารถหาค่าของมุม ϕ ได้จากพิกัดจุด (P_x, P_y) ได้จากฟังก์ชัน $\arctan2$ ดังสมการที่ 4.8

$$P_x = \cos \phi, \quad P_y = \sin \phi$$

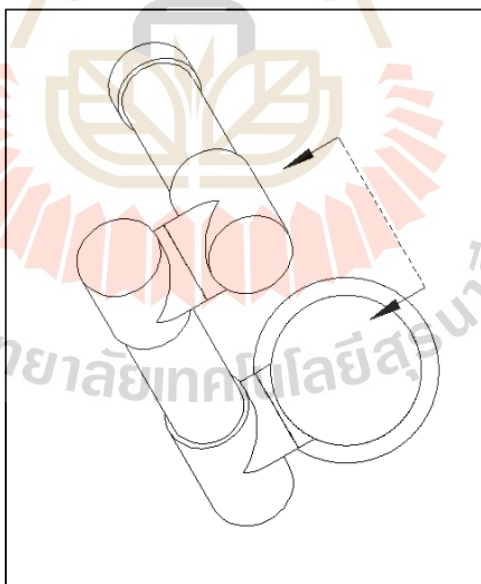
$$\phi = \arctan2(P_y, P_x) \quad (4.8)$$

เมื่อทราบค่า L_{sh} , L_{pj} และมุม ϕ จะสามารถหามุม θ_1 ได้ โดยผลต่างของมุม ϕ และมุม θ_1 จะมีค่าเป็น $\arctan2$ ของค่า L_{sh} และ L_{pj} ดังนั้นมุม θ_1 มีค่าดังสมการที่ 4.9

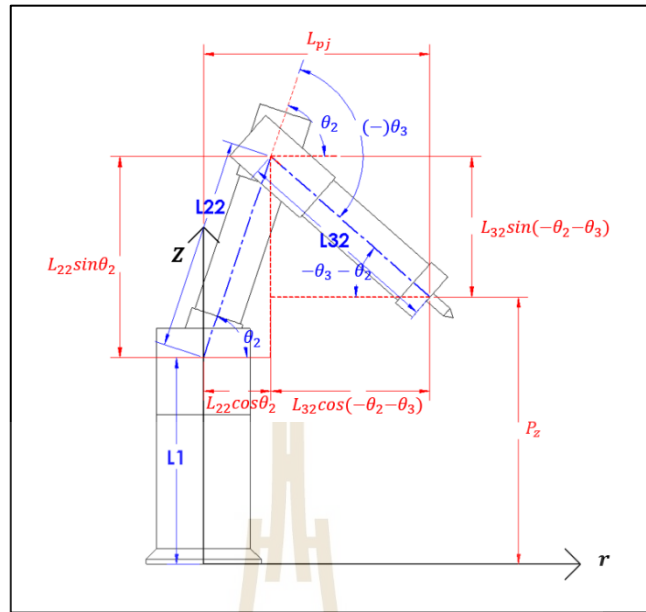
$$\theta_1 = \phi - \arctan2(L_{sh}, L_{pj})$$

$$\theta_1 = \arctan2(P_x, P_y) - \arctan2(L_{sh}, L_{pj}) \quad (4.9)$$

ต่อมาหากมองในมุมมองที่ตรงเข้าไปหาแกน 2 และแกน 3 ดังรูปที่ 4.6 จะเห็นสามารถเห็นภาพแขนกลหุ่นยนต์ได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 มุมมอง Top view ของแขนกลหุ่นยนต์และทิศทางของมุมมองที่ตรงเข้าไปหาแกน 2 และแกน 3



รูปที่ 4.7 มุมมองที่ตรงเข้าไปหาแกน 2 และแกน 3 สำหรับหา θ_3

สำหรับมุมมองดังรูปที่ 4.6 นี้จะเห็นว่าลักษณะการวางตัวของแขนกลหุ่นยนต์คล้ายกับแขนกลหุ่นยนต์ชนิด 2 องศาอิสระในแนวระนาบ (2R Planar Robot arm) ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำแนวทางในการแก้ปัญหาจลนศาสตร์แบบย้อนกลับของแขนกลหุ่นยนต์ชนิด 2 องศาอิสระในแนวระนาบนี้เพื่อหาค่าของมุม θ_2 และมุม θ_3

โดยในมุมมองนี้ขั้นแรก L_{pj} และ P_z จะมีค่าเท่ากับค่า \cos และ \sin ของของมุม θ_2 และมุม $\theta_2 + \theta_3$ คูณกับความยาวของ Link 2 และ Link 3 ดังสมการที่ 4.10 และ 4.11

$$L_{pj} = L_{22} \cos \theta_2 + L_{32} \cos(-\theta_2 - \theta_3) = L_{22} \cos \theta_2 + L_{32} \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$L_{pj} = L_{22}C_2 + L_{32}C_{23} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} P_z &= L_1 + L_{22} \sin \theta_2 - L_{32} \sin(-\theta_2 - \theta_3) \\ &= L_1 + L_{22} \sin \theta_2 - (-L_{32} \sin(\theta_2 + \theta_3)) \\ &= L_1 + L_{22} \sin \theta_2 + L_{32} \sin(\theta_2 + \theta_3) \end{aligned}$$

$$P_z = L_1 + L_{22}S_2 + L_{32}S_{23} \quad (4.11)$$

ต่อมาเมื่อจัดรูป L_{pj} และ P_z หากกำหนดให้ $P'_z = P_z - L_1 = L_{22}S_2 + L_{32}S_{23}$ จากทฤษฎีบทพีทาโกรัส เมื่อนำ L_{pj}^2 มาบวกกับ $P_z'^2$ และกระจายการยกกำลังและจัดรูปสมการใหม่จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 L_{pj}^2 + P_z'^2 &= (L_{22}C_2 + L_{32}C_{23})^2 + (L_{22}S_2 + L_{32}S_{23})^2 \\
 &= (L_{22}^2C_2^2 + 2L_{22}L_{32}C_2C_{23} + L_{32}^2C_{23}^2) + (L_{22}^2S_2^2 + 2L_{22}L_{32}S_2S_{23} + L_{32}^2S_{23}^2) \\
 &= L_{22}^2(C_2^2 + S_2^2) + 2L_{22}L_{32}(C_2C_{23} + S_2S_{23}) + L_{32}^2(C_{23}^2 + S_{23}^2) \\
 &= L_{22}^2 + L_{32}^2 + 2L_{22}L_{32}(C_2C_{23} + S_2S_{23}) \\
 &= L_{22}^2 + L_{32}^2 + 2L_{22}L_{32}(C_2(C_2C_3 - S_2S_3) + S_2(S_2C_3 + C_2S_3)) \\
 &= L_{22}^2 + L_{32}^2 + 2L_{22}L_{32}(C_2^2C_3 - C_2S_2S_3 + S_2^2C_3 + S_2C_2S_3) \\
 &= L_{22}^2 + L_{32}^2 + 2L_{22}L_{32}(C_3(C_2^2 + S_2^2) - C_2S_2S_3 + S_2C_2S_3) \\
 &= L_{22}^2 + L_{32}^2 + 2L_{22}L_{32}C_3
 \end{aligned}$$

โดยสมการจากสมการนี้จะเห็นว่ามุม θ_2 ได้ถูกหักล้างกันในการจัดรูปแบบสมการ โดยเหลือเพียงแต่ค่า $\cos \theta_3$ ทำให้สามารถหาค่า θ_3 ได้จากการใช้สมบัติทางตรีโกณมิติหาค่า $\sin \theta_3$ และใช้ฟังก์ชัน $\arctan 2$ ในการหาค่า θ_3 ดังสมการที่ 4.12

$$L_{pj}^2 + P_z'^2 = L_{22}^2 + L_{32}^2 + 2L_{22}L_{32}C_3$$

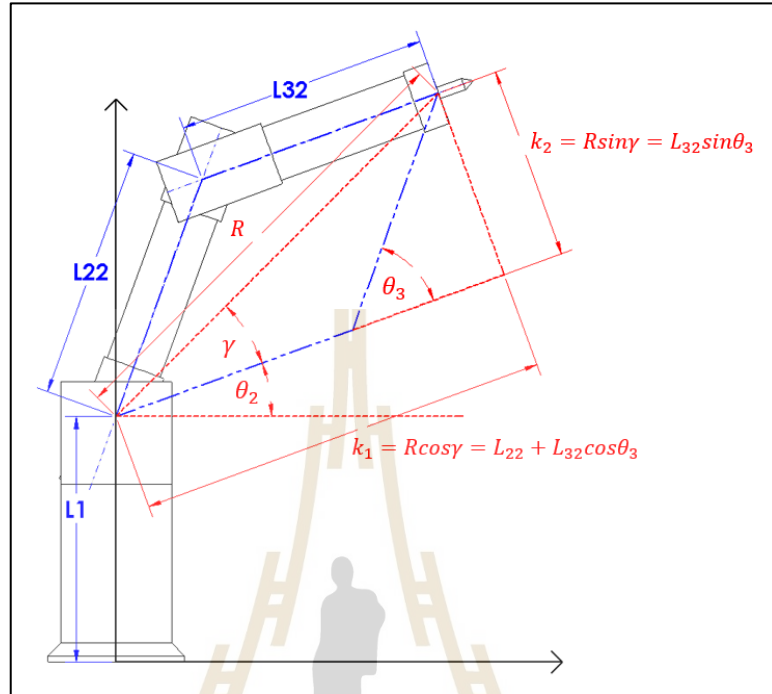
$$C_3 = \frac{L_{pj}^2 + P_z'^2 - L_{22}^2 - L_{32}^2}{2L_{22}L_{32}}$$

$$S_3 = \pm \sqrt{1 - C_3^2}$$

$$\theta_3 = \arctan 2(\pm \sqrt{1 - C_3^2}, C_3)$$

$$\theta_3 = \arctan 2\left(\pm \sqrt{1 - \left(\frac{L_{pj}^2 + P_z'^2 - L_{22}^2 - L_{32}^2}{2L_{22}L_{32}}\right)^2}, \frac{L_{pj}^2 + P_z'^2 - L_{22}^2 - L_{32}^2}{2L_{22}L_{32}}\right) \quad (4.12)$$

ขั้นสุดท้าย ในหา θ_2 จะต้องมีการกำหนดระยะและมุมใหม่ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 มุมมองที่ตรงเข้าไปหาแกน 2 และแกน 3 สำหรับหา θ_2

โดยกำหนดตัวแปร k_1, k_2 และมุม γ จะได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} k_1 &= L_{22} + L_{32} \cos \theta_3 & k_2 &= L_{32} \sin \theta_3 \\ k_1 &= R \cos \gamma & k_2 &= R \sin \gamma \\ \gamma &= \arctan 2(k_2, k_1) = \arctan 2(L_{32} \sin \theta_3, L_{22} + L_{32} \cos \theta_3) \end{aligned}$$

เมื่อทราบค่ามุม γ จะสามารถหาค่า θ_2 ได้ดังสมการที่ 4.13

$$\begin{aligned} L_{pj} &= R \cos(\theta_2 + \gamma) \\ P'_z &= R \sin(\theta_2 + \gamma) \\ \theta_2 + \gamma &= \arctan 2(P'_z, L_{pj}) \\ \theta_2 &= \arctan 2(P'_z, L_{pj}) - \gamma = \arctan 2(P'_z, L_{pj}) - \arctan 2(k_2, k_1) \\ \theta_2 &= \arctan 2(P'_z, L_{pj}) - \arctan 2(L_{32} \sin \theta_3, L_{22} + L_{32} \cos \theta_3) \end{aligned} \quad (4.13)$$

สรุปผลการวิเคราะห์การหาผลลัพท์จลนศาสตร์แบบย้อนกลับ เราสามารถหาค่าได้ θ_1 , θ_3 และ θ_2 ตามลำดับได้ ดังนี้

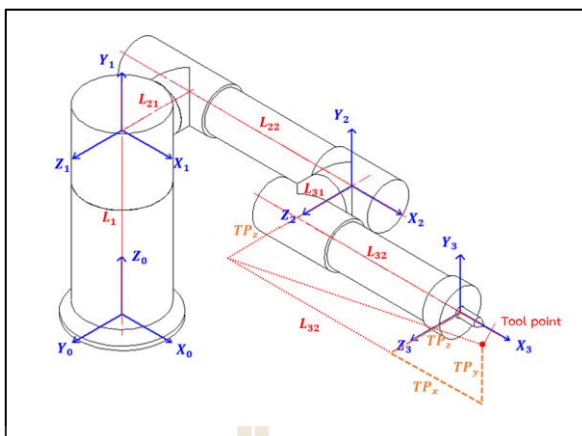
$$\theta_1 = \arctan 2(P_y, P_x) - \arctan 2(L_{21} - L_{31}, \pm \sqrt{((P_x^2 + P_y^2) - (L_{21} - L_{31})^2)})$$

$$\theta_3 = \arctan 2\left(\pm \sqrt{1 - \left(\frac{((P_x^2 + P_y^2) - (L_{21} - L_{31})^2) + (P_z - L_1)^2 - L_{22}^2 - L_{32}^2}{2L_{22}L_{32}}\right)^2}, \frac{((P_x^2 + P_y^2) - (L_{21} - L_{31})^2) + (P_z - L_1)^2 - L_{22}^2 - L_{32}^2}{2L_{22}L_{32}}\right)$$

$$\theta_2 = \arctan 2(P_z - L_1, \sqrt{((P_x^2 + P_y^2) - (L_{21} - L_{31})^2)}) \cdot \frac{P_x}{|P_x|} - \arctan 2(L_{32} \sin \theta_3, L_{22} + L_{32} \cos \theta_3)$$

4.3.4 การชดเชยขนาดของเครื่องมือที่ปลายแขน (Tool point/End-effector point compensation)

ในการวิเคราะห์จลนศาสตร์ของแขนกลหุ่นยนต์ข้างต้นเป็นการวิเคราะห์โดยคำนึงถึงจุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์หรือตำแหน่งกึ่งกลางของ Tool plate เป็นหลักหาผู้นำเครื่องมือหรืออุปกรณ์มาติดตั้งที่ปลายแขนกลหุ่นยนต์ แน่นอนว่าจุดที่ผู้ใช้ต้องการทราบจะต้องเปลี่ยนไปจากเดิมและจุดที่ผู้ใช้ต้องการให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงขณะควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ในระบบ Cartesian space รวมไปถึงขณะเคลื่อนที่ตามโปรแกรมในการเคลื่อนที่แบบ Linear interpolation path จะไม่ใช่จุดกึ่งกลางของ Tool plate ดังเดิม ดังนั้นหากผู้ใช้กำหนดจุดโดยอ้างอิงจากกรอบอ้างอิงที่ 3 (Frame 3) หรือกรอบอ้างอิงของ Tool ไปตามแนวแกน X, Y, และ Z โดยกำหนดให้ระยะดังกล่าวแทนด้วยตัวแปล ตามลำดับดับ จะสามารถทำการคำนวณและชดเชยระยะและมุมเข้ากับแกนที่ 3 ของแขนกลหุ่นยนต์ดังรูปที่ 4.9



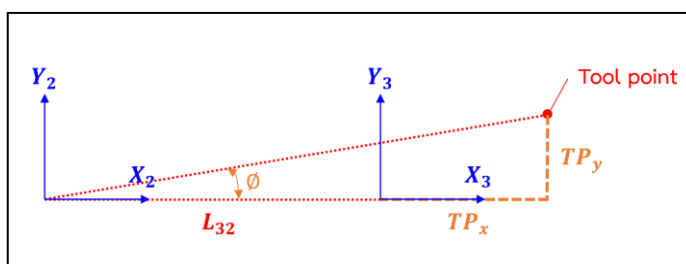
รูปที่ 4.9 การกำหนดระยะของ Tool point

สำหรับระยะ TP_z ซึ่งเป็นระยะที่วางตัวขนานกับแกน Z_2 และระยะ L_{31} ดังนั้นระยะ TP_z สามารถบวกเข้ากับระยะ L_{31} ได้โดยตรงดังสมการที่ 4.13 เช่นเดียวกับกับระยะ TP_x ซึ่งเป็นระยะที่วางตัวขนานกับแกน X_2 และระยะ L_{32} ระยะ TP_x จึงสามารถบวกเข้ากับระยะ L_{32} ได้โดยตรงดังสมการที่ 4.14

$$L'_{31} = L_{31} + TP_z \quad (4.13)$$

$$L'_{32} = L_{32} + TP_x \quad (4.14)$$

ระยะ TP_y จะส่งผลให้มุมในแกนที่ 3 ของหุ่นยนต์เปลี่ยนไปเป็นมุม θ ดังรูปที่ 4.10 ดังนั้นค่าของมุม θ_3 จะต้องถูกชดเชยดังสมการที่ 4.15



รูปที่ 4.10 การกำหนดระยะและการชดเชยของ Tool point

$$\phi = \arctan 2(TP_y, L_{32} + TP_x)$$

$$\theta_3' = \theta_3 + \phi$$

$$\theta_3' = \theta_3 + \arctan 2(TP_y, L_{32} + TP_x) \quad (4.15)$$

4.3.5 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ (Path generation)

เมื่อวิเคราะห์จลศาสตร์ของแขนกลหุ่นยนต์แล้ว ถ้าหากต้องการให้แขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ผู้ใช้ต้องการจะต้องมีการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ขึ้น โดยผู้วิจัยได้กำหนดให้โปรแกรมสำหรับควบคุมหุ่นยนต์สามารถควบคุมได้ 2 รูปแบบ คือ แบบ Rapid movement และแบบ Linear interpolation path

สำหรับการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่โดยให้แกนแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตามที่ผู้ใช้กำหนดและเมื่อแกนใดเคลื่อนที่ไปยังมุมเป้าหมายที่กำหนดแล้ว แกนนั้นจะหยุดหมุนทันที โดยผู้วิจัยได้ทำการเขียนโปรแกรมการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่โดยมีขั้นตอนในการหาเส้นทางการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement ดังนี้

1. หาระยะเวลาทั้งหมดที่ต้องใช้ในการเคลื่อนที่ดังสมการที่ 4.16

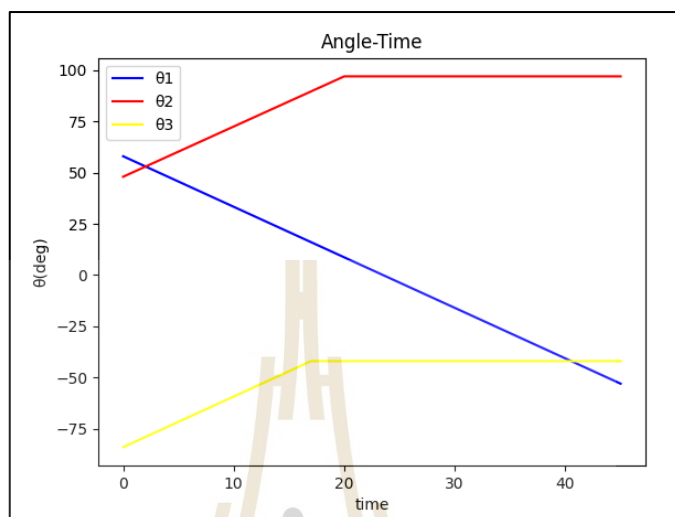
$$t_{total} = (\theta_{i,endpoint} - \theta_{i,startpoint}) / \omega \quad (4.16)$$

เมื่อ θ_i คือ มุมที่แกน i ใด ๆ (องศา), ω คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ (องศา/วินาที) โดยเวลาทั้งหมดที่ต้องใช้ในการเคลื่อนที่จะเป็นเวลาที่มากที่สุดที่หาได้จากแต่ละแกน

2. เมื่อได้เวลาทั้งหมดที่ต้องใช้ในการเคลื่อนที่แล้ว นำเวลาทั้งหมดหารด้วยเวลาที่กำหนดไว้ว่าจะให้ Arduino เคลื่อนที่จากค่าสเต็ปหนึ่งไปยังอีกค่าสเต็ปหนึ่งถัดไปจะได้จำนวนในการแบ่งมุมทั้งหมด และทำการแบ่งมุมจาก $\theta_{startpoint}$ ไปยัง $\theta_{endpoint}$ ให้เปลี่ยนไปเท่า ๆ กัน จะได้เป็นลำดับมุมในการเคลื่อนที่ของแกนแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์

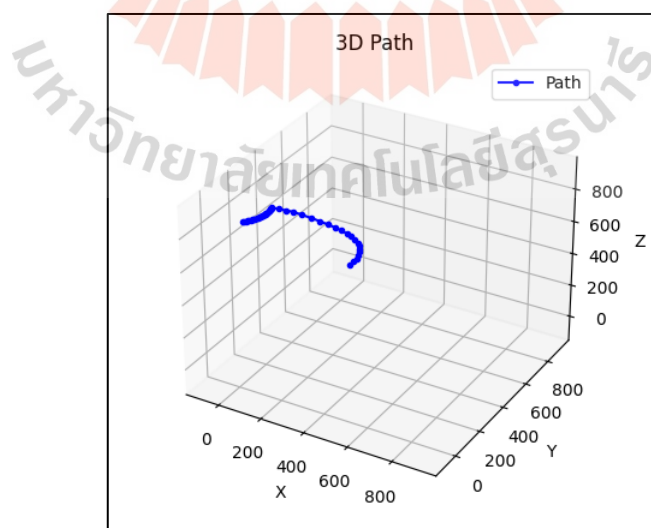
จากขั้นตอนข้างต้น ผู้วิจัยได้ทดสอบการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement โดยการตั้งค่ามุมที่ใช้สำหรับการสั่งการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่มาวาดกราฟความสัมพันธ์ของมุมของแกนแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์เมื่อเปลี่ยนไปตามเวลา โดยได้ทำการสุ่มท่าทางของแขนกล

หุ่นยนต์ตั้งต้นและท่าทางของแขนกลหุ่นยนต์เป้าหมายได้ผลการเปลี่ยนไปของมุมในแต่ละแกนจากท่าทาง $(58^\circ, 48^\circ, -84^\circ)$ ไปยังท่าทาง $(-53^\circ, 97^\circ, -42^\circ)$ ดังรูปที่ 4.11

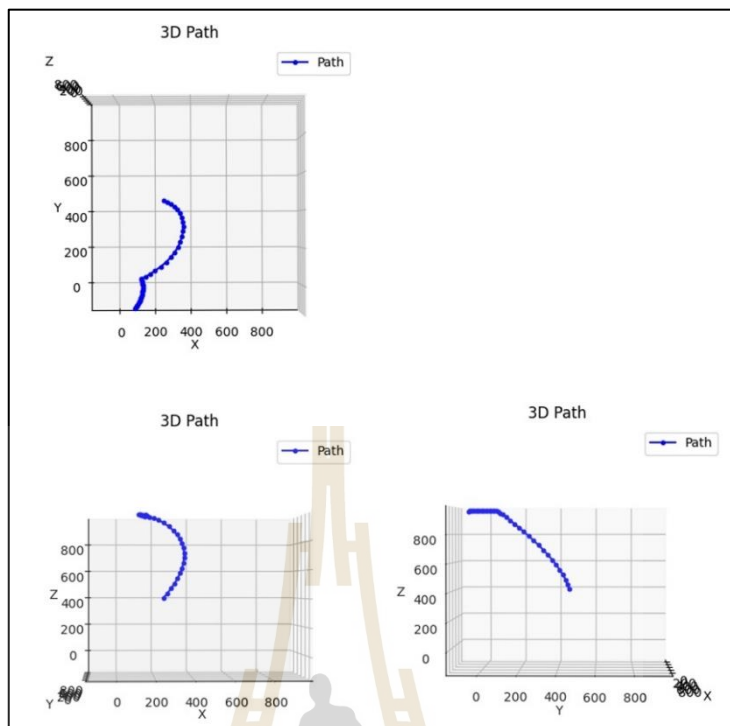


รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนไปของมุมในแต่ละแกนจากการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement

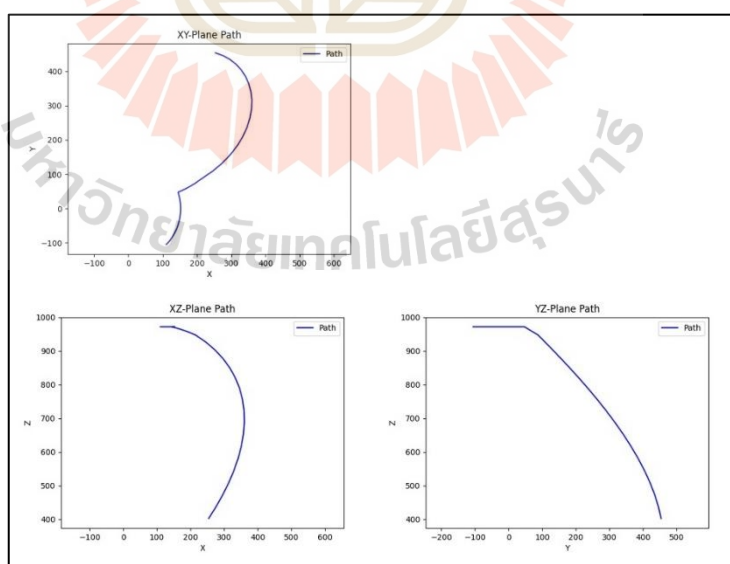
และแขนกลหุ่นยนต์มีเส้นทางในการเคลื่อนที่ใน 3 มิติ ดังรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 และใน 2 มิติตามระนาบ XY, XZ และ YZ ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.12 เส้นทางในการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลหุ่นยนต์ใน 3 มิติ (มุมมอง Isometric) จากการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement



รูปที่ 4.13 เส้นทางในการเคลื่อนที่ของปลายแกนกลหุ่นยนต์ใน 3 มิติ (มุมมองตั้งฉากกับระนาบ XY, XZ และ YZ) จากการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement



รูปที่ 4.14 เส้นทางในการเคลื่อนที่ของปลายแกนกลหุ่นยนต์ใน 2 มิติ (มุมมองตั้งฉากกับระนาบ XY, XZ และ YZ) จากการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement

สำหรับการเคลื่อนที่แบบ Linear interpolation path ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่มีเส้นทางในการเคลื่อนที่ของปลายของแขนกลหุ่นยนต์ (Tool point หรือ End-effector point) เป็นเส้นตรง โดยผู้วิจัยได้ทำการเขียน โปรแกรมการสร้างเส้นทางในการเคลื่อนที่โดยมีขั้นตอนในการหาเส้นทางในการเคลื่อนที่แบบ Linear interpolation path ดังนี้

1. หาระยะการจัดระหว่างจุดทั้งสองดังสมการที่ 4.17

$$d = \sqrt{\Delta P_x^2 + \Delta P_y^2 + \Delta P_z^2} \quad (4.17)$$

เมื่อ d คือ ระยะการจัดระหว่างจุด 2 จุด (มิลลิเมตร)

2. หาระยะเวลาทั้งหมดที่ต้องใช้ในการเคลื่อนที่ดังสมการที่ 4.18

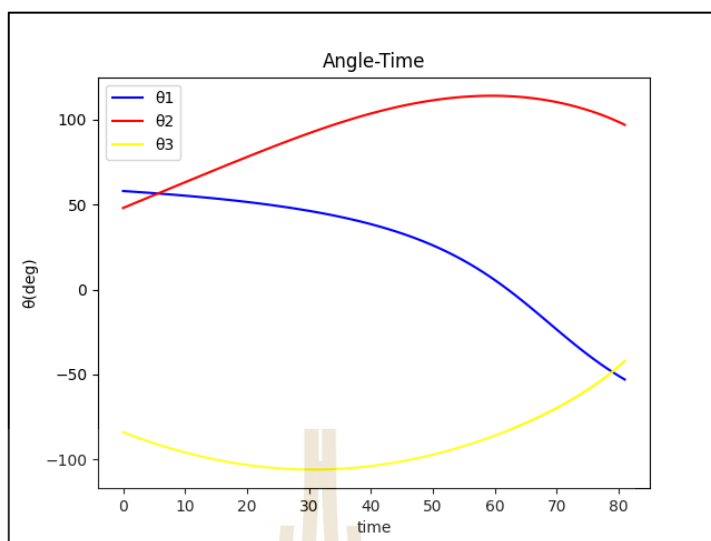
$$t_{total} = d / \omega \quad (4.18)$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ (มิลลิเมตร/วินาที)

3. ทำการแบ่งเส้นทางในการเคลื่อนที่ซึ่งเป็นเส้นตรงเป็นพิกัดจุดย่อย ๆ บนเส้นตรงนั้น

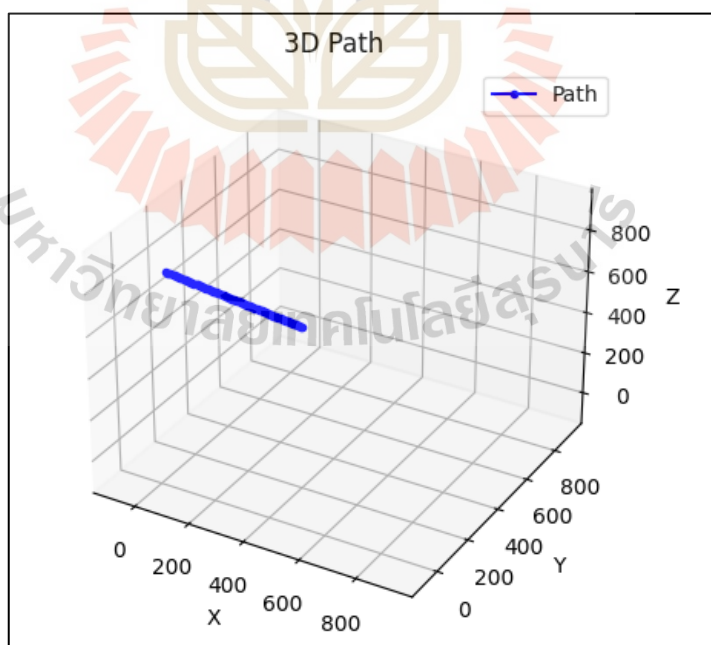
4. นำพิกัดจุดย่อย ๆ ไปคำนวณจลนศาสตร์แบบย้อนกลับเพื่อหามุมของแกนแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์ที่จะต้องเคลื่อนที่ไป

จากขั้นตอนข้างต้น ผู้วิจัยได้ทดสอบการเคลื่อนที่แบบ Linear interpolation path โดยการตั้งค่ามุมที่ใช้สำหรับการสั่งการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่มาวาดกราฟความสัมพันธ์ของมุมของแกนแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์เมื่อเปลี่ยนไปตามเวลา โดยได้ทำการสุ่มท่าทางของแขนกลหุ่นยนต์ตั้งต้นและท่าทางของแขนกลหุ่นยนต์เป้าหมายเช่นเดียวกับผลการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement ได้ผลการเปลี่ยนไปของมุมในแต่ละแกนจาก $(58^\circ, 48^\circ, -84^\circ)$ ไปยังท่าทาง $(-53^\circ, 97^\circ, -42^\circ)$ ดังรูปที่ 4.15

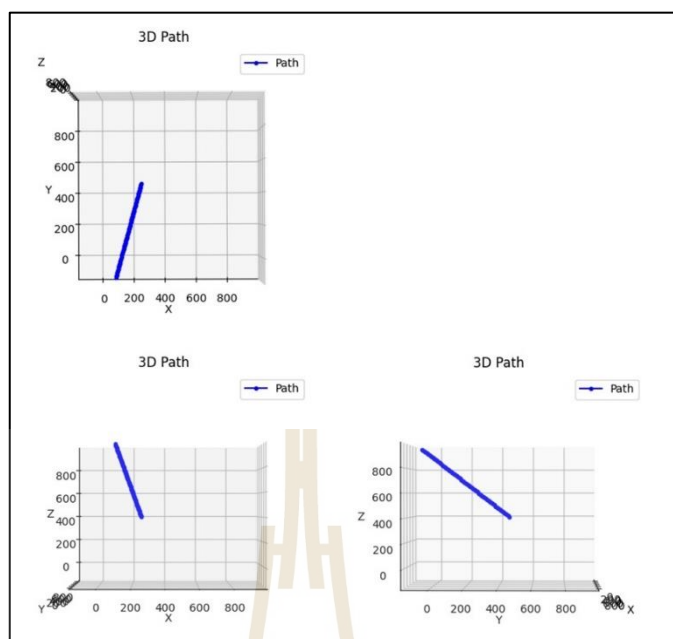


รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนไปของมุมในแต่ละแกนจากการเคลื่อนที่แบบ Linear interpolation path

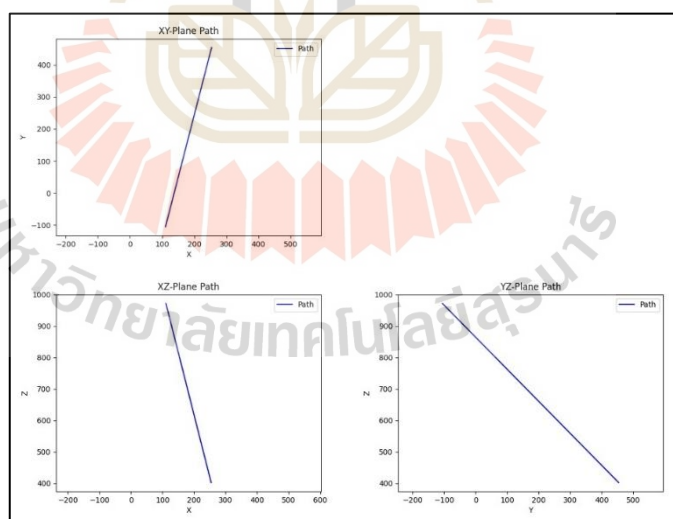
และแกนกลหุ่นยนต์มีเส้นทางในการเคลื่อนที่ใน 3 มิติ ดังรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 และใน 2 มิติตามระนาบ XY, XZ และ YZ ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.16 เส้นทางในการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลหุ่นยนต์ใน 3 มิติ (มุมมอง Isometric) จากการเคลื่อนที่แบบ Linear interpolation path



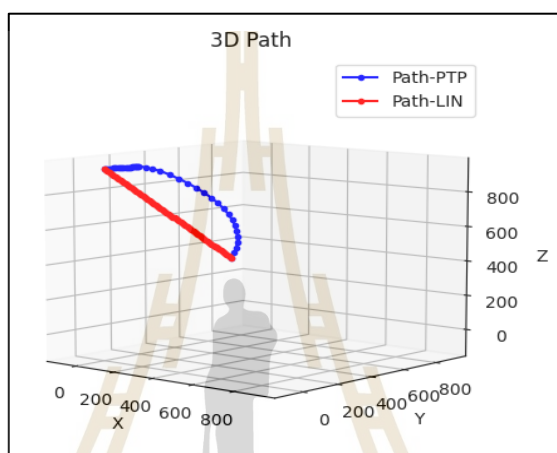
รูปที่ 4.17 เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลหุ่นยนต์ใน 3 มิติ (มุมมองตั้งฉากกับระนาบ XY, XZ และ YZ) จากการเคลื่อนที่แบบ Linear interpolation path



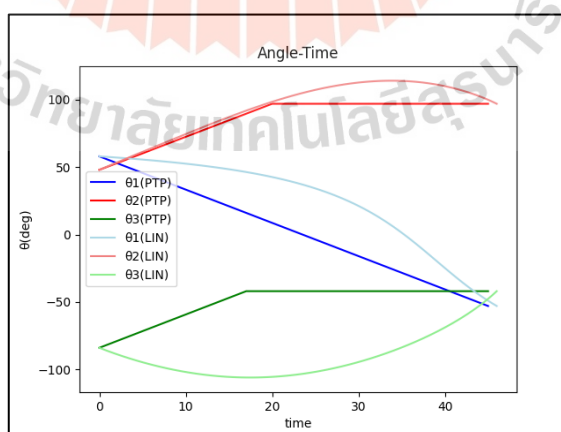
รูปที่ 4.18 เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลหุ่นยนต์ใน 2 มิติ (มุมมองตั้งฉากกับระนาบ XY, XZ, และ YZ) จากการเคลื่อนที่แบบ Linear interpolation path

ซึ่งหากเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ระหว่างรูปแบบ Rapid movement และ Linear interpolation path จะเห็นว่าการเคลื่อนที่รูปแบบ Rapid movement จะมีเส้นทางการเคลื่อนที่

ที่ไม่แน่นอน แต่การเคลื่อนที่ของแกนแต่ละแกนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่จะกระทั่งถึง มุมเป้าหมาย ในขณะที่การเคลื่อนที่แบบ Linear interpolation path จะมีเส้นทางการเคลื่อนที่เป็น เส้นตรง โดยแกนแต่ละแกนจะเคลื่อนที่ไปเพื่อรักษาให้จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์อยู่บนเส้นทางการเคลื่อนที่ที่เป็นเส้นตรงที่กำหนดไว้ นั่น ๆ โดยเส้นทางการเคลื่อนที่ระหว่างรูปแบบ Rapid movement และ Linear interpolation path จะเป็นดังรูปที่ 4.19 และการเปลี่ยนแปลงของมุมในแต่ละแกน จากการเคลื่อนที่รูปแบบ Rapid movement และ Linear interpolation path จะเป็นดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.19 เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลหุ่นยนต์ใน 3 มิติ (มุมมอง Isometric) จากการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement และ Linear interpolation path

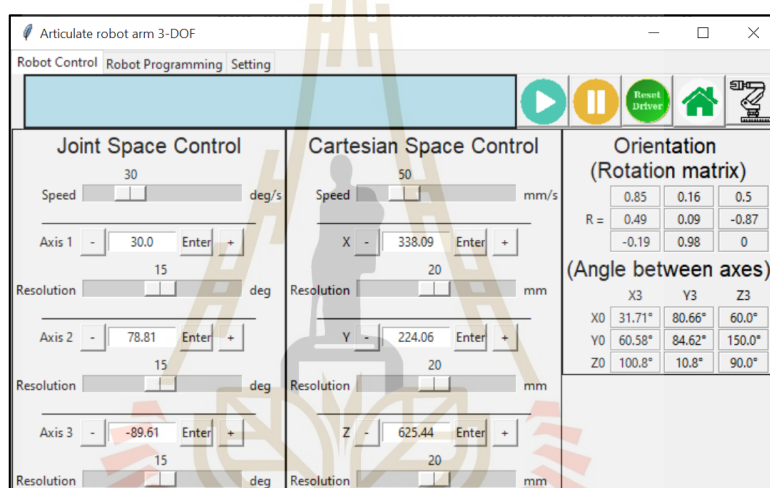


รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงของมุมในแต่ละแกนจากการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement และ Linear interpolation path

4.4 การออกแบบ Graphic User Interface

4.4.1 หน้าโปรแกรมสำหรับการควบคุมแขนกลหุ่นยนต์

สำหรับหน้าโปรแกรมสำหรับการควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ ผู้วิจัยได้ออกแบบหน้าโปรแกรม ดังรูปที่ 4.21 และออกแบบตามผังการทำงานให้ผู้ใช้สามารถแขนกลควบคุมหุ่นยนต์ในได้ทั้งใน Joint space และ Cartesian space สามารถแสดงมุมที่ปลายแขนกระทำกับพิกัดแกนของตัวแขนกลหุ่นยนต์ได้ มีปุ่มสำหรับควบคุมฟังก์ชันการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ และมีแถบสีฟ้าสำหรับแสดงผลการแจ้งเตือนต่าง ๆ เช่น ผู้ใช้กำลังควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ออกนอกพื้นที่ทำงานที่สามารถทำได้ อยู่ เป็นต้น



รูปที่ 4.21 GUI หน้าโปรแกรมสำหรับการควบคุมแขนกลหุ่นยนต์

4.4.2 หน้าโปรแกรมสำหรับการเขียนโปรแกรมควบคุมแขนกลหุ่นยนต์

สำหรับหน้าโปรแกรมสำหรับการเขียนโปรแกรมควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ (Robot programming tab) ผู้วิจัยได้ออกแบบหน้าโปรแกรม ดังรูปที่ 4.22 และออกแบบการทำงานให้ผู้ใช้สามารถสอน (Teach) ท่าทางของแขนกลหุ่นยนต์ (Post) ณ ขณะนั้น ๆ ลงไปในแต่ละบรรทัดของโปรแกรมได้ และสามารถกดเพิ่มบรรทัดของโปรแกรมได้จากการกดปุ่ม Add ผู้ใช้สามารถเลือกรูปแบบในการเคลื่อนที่ว่าจะให้แขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดก่อนหน้ามายังจุดปัจจุบันด้วยรูปแบบในการเคลื่อนที่แบบ Rapid movement หรือแบบ Linear interpolation path เมื่อผู้ใช้ทำการเขียนโปรแกรมเสร็จเรียบร้อยแล้ว ผู้ใช้สามารถกดปุ่ม Run เพื่อให้หุ่นยนต์ทำงานตามโปรแกรมที่ถูกเขียนไว้ได้

Path	Speed	Joint ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$): deg			Position (x,y,z): mm			Add	Clear	Run
P1 HOME	30	0.0	34.03	-114.55	--	358.51	25.0	200.0	Teach	
P2 PTP	30	30.0	79.03	-69.55	--	338.09	224.06	745.44	Teach	
P3 LIN	30	30.0	78.81	-89.61	--	338.09	224.06	625.44	Teach	
P4 PTP	30				--				Teach	

รูปที่ 4.22 GUI หน้าโปรแกรมสำหรับการควบคุมแขนกลหุ่นยนต์

4.4.3 หน้าโปรแกรมสำหรับการตั้งค่าแขนกลหุ่นยนต์

ส่วนหน้าโปรแกรมสำหรับการตั้งค่าแขนกลหุ่นยนต์ (Setting tab) ผู้วิจัยได้ออกแบบหน้าโปรแกรม ดังรูปที่ 4.23 และออกแบบการทำงานให้ผู้ใช้สามารถตั้งค่าตำแหน่งของ Tool point ได้โดยการป้อนตำแหน่งของ Tool point ที่ผู้ใช้นำมาติดกับ Tool plate ของแขนกลหุ่นยนต์ได้ตามแกน X, Y, และ Z ของ Tool plate ซึ่ง โปรแกรมสามารถนำค่าที่ผู้ใช้ป้อนให้กับโปรแกรมไปคำนวณการชดเชยขนาดของ Tool ได้ และตั้งค่าท่าทางของแขนกลหุ่นยนต์ที่เป็น Soft Home Post ที่ผู้ใช้สามารถกดปุ่มลัดในหน้าโปรแกรมสำหรับการควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ (Robot control tab) เพื่อให้แขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังท่าทางนั้น ๆ ทันที

Tool Setting		Soft Home Setting	
X shift:	0	θ_1 :	0
Y shift:	0	θ_2 :	0
Z shift:	0	θ_3 :	0
Enter		Enter	

รูปที่ 4.23 GUI หน้าโปรแกรมสำหรับการตั้งค่าแขนกลหุ่นยนต์

4.5 ประสิทธิภาพการทำงาน (Performance) ของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์

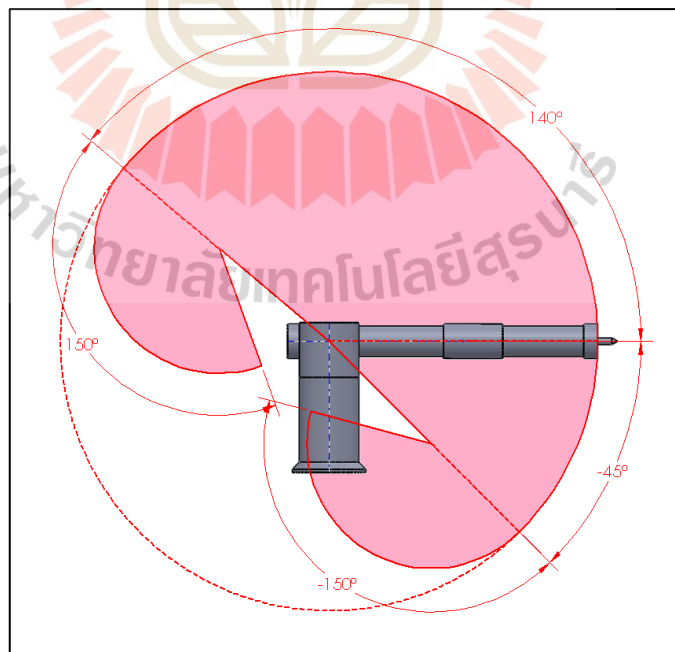
4.5.1 พื้นที่ในการทำงานของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ (Working space)

สำหรับพื้นที่การทำงานของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตให้แกแต่ละแกนของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์นี้ สามารถเคลื่อนที่ได้ภายในขอบเขตดังตารางที่ 4.3

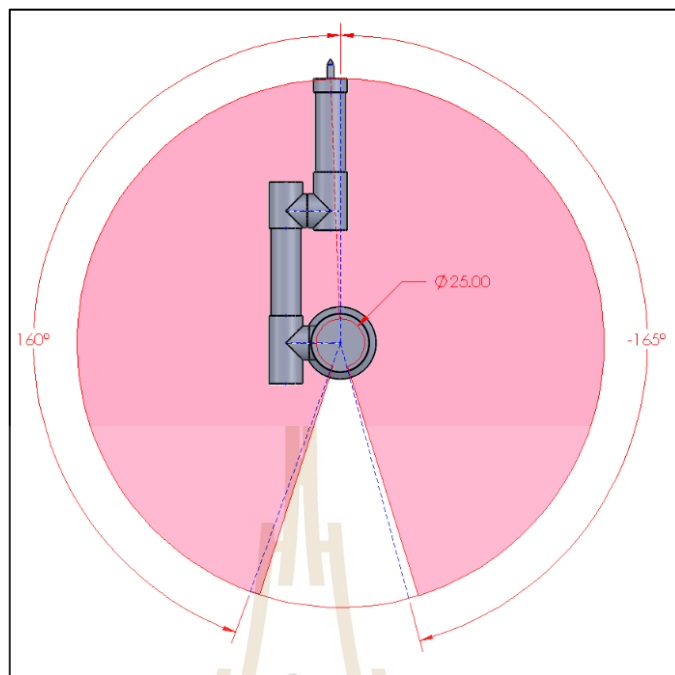
ตารางที่ 4.3 ขอบเขตในการเคลื่อนที่ของแกแต่ละแกนของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์

แกนที่	θ_{\min} (องศา)	θ_{\max} (องศา)
θ_1	-165	160
θ_2	-45	140
θ_3	-150	150

ผู้วิจัยได้นำขอบเขตของแกแต่ละแกนมาวาดพื้นที่ในการทำงาน (Working space) ในแบบของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ ซึ่งหากมองในมุมมองทางด้านข้างขวา (Right side view) ขอบเขตของแกที่จะมีผลต่อพื้นที่ในการทำงานคือ θ_2 และ θ_3 โดยจะมีพื้นที่ในการทำงาน ดังรูปที่ 4.24

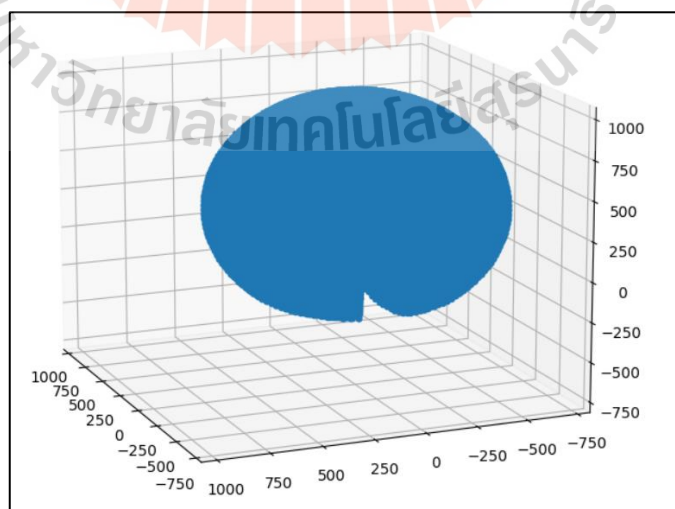


รูปที่ 4.24 Working space ของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์จากมุมมอง Right side view



รูปที่ 4.25 Working space ของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์จากมุมมอง Top view

สำหรับพื้นที่ในการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ใน 3 มิติ สามารถสร้างขึ้นได้ใช้โปรแกรม Python คำนวณจลศาสตร์แบบไปข้างหน้าจากขอบเขตของแกนแต่ละแกนดังตารางที่ 4.2 และวาดกราฟได้ดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 Working space ของแขนกลหุ่นยนต์

4.5.2 ความถูกต้องของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ (Positioning accuracy)

ผู้วิจัยได้ทดสอบความถูกต้องของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ (Accuracy) ของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ โดยได้ใช้เครื่อง Coordinate Measuring Machine (CMM) ในการวัดพิกัดจุดของจุดปลายของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์จำนวน 20 จุด โดยวัดซ้ำจุดละ 5 ครั้ง ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 การวัดพิกัดจุดโดยใช้เครื่อง CMM

จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่า ได้ทำการคำนวณหาค่าความถูกต้องของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ (AP_p) ได้ดังสมการที่ 4.19

$$AP_p = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (4.19)$$

โดย $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ คือ ค่าเฉลี่ยของพิกัดจุด x, y, z ที่วัดได้ x_c, y_c, z_c และคือ ค่าพิกัดจุด x, y, z ที่กำหนดให้เคลื่อนที่ไป จากการทดสอบพบว่ามีความคลาดเคลื่อนจากพิกัดจุดที่กำหนดอยู่ในช่วง 13.28 – 72.83 มิลลิเมตร

4.5.3 ความสามารถในการทำซ้ำ (Positioning repeatability)

ผู้วิจัยได้ทดสอบความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) ของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ โดยได้ใช้เครื่อง Coordinate Measuring Machine (CMM) ในการวัดพิกัดจุดของจุดปลายของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์จำนวน 20 จุด โดยวัดซ้ำจุดละ 5 ครั้ง ดังรูปที่ 4.27 โดยสามารถหาค่า Repeatability (RP) ได้ดังสมการที่ 4.20

$$RP_1 = \bar{l} + 3S_l \quad (4.20)$$

โดย \bar{l} คือ ค่าเฉลี่ยของ l_j เมื่อ l_j คือ ความคลาดเคลื่อนระหว่างจุดที่วัดแต่ละจุด เมื่อเท่ากับค่าเฉลี่ยของทุก ๆ จุด ซึ่งสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 4.21 และสมการที่ 4.22 ตามลำดับ และ S_l คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานดังสมการที่ 4.23

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_j \quad (4.21)$$

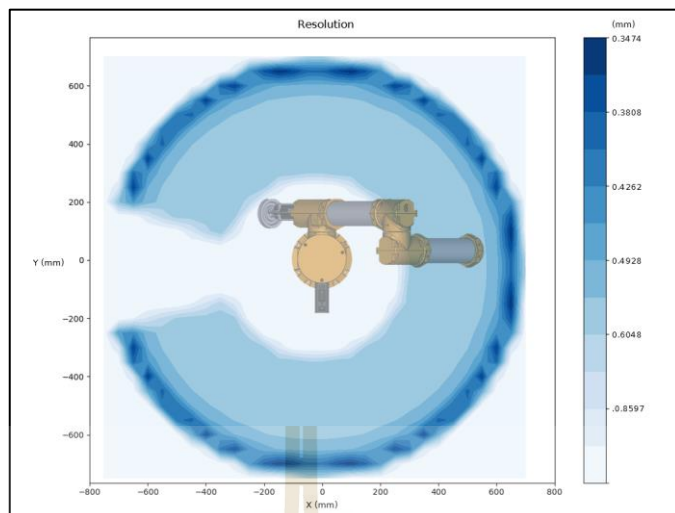
$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (4.22)$$

$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{l} - l_j)^2}{n-1}} \quad (4.23)$$

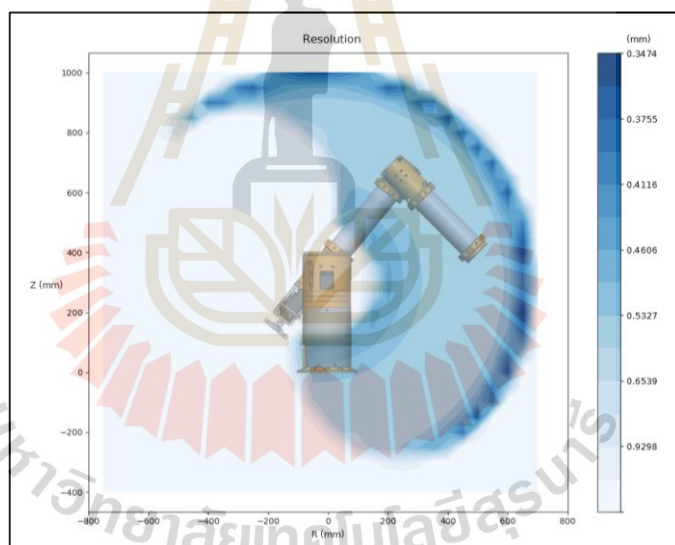
จากการทดสอบพบว่า ค่าความสามารถในการทำซ้ำของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ มีค่า 35.48 มิลลิเมตร ที่ความเชื่อมั่น 99.7%

4.5.4 ความละเอียดในการเคลื่อนที่ (Resolution)

สำหรับต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์นี้ที่ใช้สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper motor) เป็นตัวกำลังในการเคลื่อนที่ เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่เคลื่อนที่เป็นขั้น ๆ โดยรุ่นที่นำมาประกอบต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์นี้มีความละเอียดในการเคลื่อนที่แต่ละขั้นที่ 1.8 องศา/สเต็ป เมื่อต่อเข้ากับชุดเฟืองทดขนาด 1:19.2 และใช้ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ (Motor driver) ที่อัตราทด 1:1 เนื่องจากแขนกลหุ่นยนต์ชนิด Articulated ไม่สามารถหาค่า Resolution ในเชิงเส้นได้ จึงแสดงด้วยกราฟและแถบสีของค่าความละเอียดในการเคลื่อนที่ (Resolution) ในระนาบแกน X-Y ดังรูปที่ 4.28 และในระนาบแกน R-Z ดังรูปที่ 4.29 เมื่อแกน R คือแกนรัศมีของแขนกลหุ่นยนต์



รูปที่ 4.28 ความละเอียดในการเคลื่อนที่ (Resolution) ในระนาบแกน X-Y



รูปที่ 4.29 ความละเอียดในการเคลื่อนที่ (Resolution) ในระนาบแกน R-Z

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์อาร์ทีคิวเลต (Articulate robot arm) ชนิด 3 องศาอิสระ (3-DOF) สำหรับติดตั้งบนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (Mobile robot) มีวัตถุประสงค์ออกแบบและสร้างต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์อาร์ทีคิวเลตชนิดสามองศาอิสระ และเพื่อศึกษาการวิเคราะห์ทางวิทยาการหุ่นยนต์ (Robotics) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การคำนวณหาจลนศาสตร์ทั้งแบบไปข้างหน้าและแบบย้อนกลับ รวมถึงการออกแบบการควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ในระบบฟีดแบคและระบบฟีดฟอร์เวิร์ดที่เขียน โดยสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ผลการออกแบบแขนกลหุ่นยนต์

ต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ถูกออกแบบ, ขึ้นรูปขึ้นชิ้นส่วนต่าง ๆ และประกอบ โดยใช้โปรแกรม SolidWorks ในการออกแบบหุ่นยนต์ และใช้การขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์ 3 มิติเป็นส่วนใหญ่ โดยวัสดุในการพิมพ์ 3 มิติเป็นพลาสติก PLA และในส่วน Link ที่ 2 และ Link ที่ 3 ของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ใช้วัสดุเป็นอลูมิเนียม ต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ที่ออกแบบและขึ้นรูปได้มีความยาว Link ที่ 1 (L_1) = 331.1 มิลลิเมตร ความยาว Link ที่ 2 (L_2) = 365 มิลลิเมตร และความยาว Link ที่ 3 (L_3) = 340 มิลลิเมตร โดยแกน Link ที่ 1 และ Link ที่ 2 มีระยะเยื้องกันอยู่ (L_{21}) = 140 มิลลิเมตร มีระยะเข้าถึง (Reach length) ที่ 705 มิลลิเมตร โดยจุดปลายแขนกลหุ่นยนต์ (Tool point หรือ End-effector point) มีการเยื้องไปทางแกน Y เป็นระยะ 25 มิลลิเมตร

5.1.2 ผลการวิเคราะห์วิทยาการหุ่นยนต์ (Robotics) ของแขนกลหุ่นยนต์

จากการวิเคราะห์จลนศาสตร์ (Kinematics) ของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ โดยการกำหนดกรอบอ้างอิง (Coordinate frame) และหาตัวแปร DH (DH Parameters) ได้ผลการวิเคราะห์จลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward kinematic) ดังสมการที่ 5.1

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} C_1 C_{23} & -C_1 S_{23} & S_1 & C_1(L_{22}C_2 + L_{32}C_3) - S_1(L_{21} - L_{31}) \\ S_1 C_{23} & -S_1 S_{23} & -C_1 & S_1(L_{22}C_2 + L_{32}C_3) - C_1(L_{21} - L_{31}) \\ S_{23} & C_{23} & 0 & L_1 + L_{22}S_2 + L_{32}S_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

และได้ผลการวิเคราะห์จลนศาสตร์แบบย้อนกลับ (Inverse kinematic) ดังสมการที่ 5.2

$$\theta_1 = \arctan 2(P_y, P_x) - \arctan 2(L_{21} - L_{31}, \pm \sqrt{((P_x^2 + P_y^2) - (L_{21} - L_{31})^2)})$$

$$\theta_3 = \arctan 2\left(\pm \sqrt{1 - \left(\frac{((P_x^2 + P_y^2) - (L_{21} - L_{31})^2) + (P_z - L_1)^2 - L_{22}^2 - L_{32}^2}{2L_{22}L_{32}}\right)^2}, \frac{((P_x^2 + P_y^2) - (L_{21} - L_{31})^2) + (P_z - L_1)^2 - L_{22}^2 - L_{32}^2}{2L_{22}L_{32}}\right)$$

$$\theta_2 = \arctan 2(P_z - L_1, \sqrt{((P_x^2 + P_y^2) - (L_{21} - L_{31})^2)}) - \arctan 2(L_{32} \sin \theta_3, L_{22} + L_{32} \cos \theta_3) \quad (5.2)$$

และได้มีการคำนวณและสร้างเส้นทางในการเคลื่อนที่ (Path Generation) ผลการคำนวณมีความถูกต้อง สามารถสั่งการให้มอเตอร์แต่ละแกนหมุนได้

5.1.3 ผลการออกแบบ Graphic User Interface

สำหรับการออกแบบ Graphic User Interface หรือ GUI ผลที่ได้คือได้หน้าต่างโปรแกรมสำหรับควบคุมหุ่นยนต์ได้ในหลากหลายรูปแบบตั้งแต่การควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ทีละแกนหรือทีละ Joint (Joint space control) โดยสามารถกดปุ่ม (Button) ที่มีเครื่องหมายบวกหรือลบของแต่ละแกนโดยสามารถเลือกความละเอียด (Resolution) ในการกดปุ่มแต่ละครั้ง และสามารถกรอกตัวเลขมุมที่ต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปจากนั้นกดปุ่ม Enter ได้ โดยสามารถเลือกความเร็วในการเคลื่อนที่ของแกนได้โดยการเลื่อนตัวเลื่อน (Scale) ปรับความเร็วบนหน้าโปรแกรมได้ และเมื่อทำการควบคุมแบบ Joint space control ทุกคำสั่งการ โปรแกรมจะคำนวณจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward Kinematic) และแสดงผลพิกัด X, Y, Z ของจุดปลายแขนกลหุ่นยนต์ (Tool point หรือ End-effector point) ได้ ในส่วนของการควบคุมให้ Tool point เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงไปตามแนวแกนต่าง ๆ ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian space control) หน้าโปรแกรมสามารถรับคำสั่งได้ทั้งการกดปุ่มและการกรอกตัวเลขเช่นเดียวกับการควบคุมแบบ Joint space control และได้มีการคำนวณจลนศาสตร์แบบย้อนกลับ (Inverse Kinematic) เพื่อให้ได้ค่ามุมของแกนต่าง ๆ ของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ เพื่อนำไปแสดงผลและสั่งการให้ต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ต่อไป

5.1.4 ประสิทธิภาพการทำงาน (Performance) ของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์

ต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์มีขอบเขตในการทำงานแต่ละแกนดังนี้ Joint ที่ 1 อยู่ระหว่าง -165 องศาถึง 160 องศา, Joint ที่ 2 อยู่ระหว่าง -45 องศาถึง 140 องศา, Joint ที่ 3 อยู่ระหว่าง -150 องศาถึง 150 องศา

โดยต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์มีค่าความคลาดเคลื่อนจากพิกัดจุดที่กำหนด (Accuracy) อยู่ในช่วง 13.28 ถึง 72.83 มิลลิเมตร, ค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) มีค่า 35.48 มิลลิเมตร ที่ความเชื่อมั่น 99.7% และมีค่าความละเอียดในการเคลื่อนที่ (Resolution) อยู่ในช่วง 0.3474 ถึง 0.8597 มิลลิเมตร ขึ้นกับตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลหุ่นยนต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้วัสดุของ Link 2 และ Link 3 เป็นอลูมิเนียม แม้ว่าจะเป็นโลหะที่ค่อนข้างเบา แต่เมื่อเทียบกับความแข็งแรงของโครงสร้างต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ที่ถูกขึ้นรูปด้วยวิธีการพิมพ์ 3 มิติ ถือว่าค่อนข้างหนักเกินไปสำหรับต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์นี้ หากเลือกใช้วัสดุที่มีน้ำหนักน้อยลงแต่ยังคงมีความแข็งแรงที่เพียงพออยู่ เช่น วัสดุไมโครไฟเบอร์ (Micro-fiber) จะทำให้ต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. ต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ที่ได้ถูกออกแบบขึ้นในงานวิจัยนี้มีระยะคลอน (Backlash) ที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากหลายปัจจัยทั้งการใช้ชุดสายพานเป็นตัวส่งกำลัง การดึงสายพานด้วยชุดดึงสายพานเข้ากับชิ้นส่วนที่ทำด้วยพลาสติก PLA จากขึ้นรูป 3 มิติที่สายพานให้ตัวได้ในระดับหนึ่ง หากสามารถเปลี่ยนรูปแบบการส่งกำลังได้อาจลดระยะคลอน, ลดการสั่นขณะเคลื่อนที่ และเพิ่มความสามารถในการทำซ้ำได้ดียิ่ง

3. ในการออกแบบต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์นี้มีการเลือกใช้ลูกปืนชนิด Ball bearing ธรรมดา ซึ่งสามารถรับภาระกรรมได้เพียงแคในแนวรัศมี (Radial load) ควบคู่กับลูกปืนชนิด Thrust ball bearing ที่สามารถรับภาระกรรมได้เพียงในแนวแกน (Axial load) เท่านั้น จึงจำเป็นต้องใช้ลูกปืนจำนวนมากในแต่ละแกน หากเปลี่ยนไปใช้ลูกปืนชนิด Cross roller bearing จะมีความเหมาะสมในกับการใช้งานของแขนกลหุ่นยนต์มากยิ่งขึ้น ทั้งยังเป็นลูกปืนที่มีรูขนาดใหญ่ตรงกลาง ซึ่งทำให้การเดินสายไฟมีความง่ายและเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- กองบริหารงานวิจัยและประกันคุณภาพการศึกษา. (2559). **พิมพ์เขียว Thailand 4.0 โมเดลขับเคลื่อนประเทศไทยสู่ความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน**. ม.ป.ท.
- Ayush G., et al. (2018). A Geometric Approach to Inverse Kinematics of 3 DOF Robotics Arm. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology**. 6(1), 3524–3530.
- Chen, H., et al. (2013). Semiautonomous Industrial Mobile Manipulation for Industrial Applications. **Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems**. China. 361–366.
- Craig J.J. (2005). **Introduction to Robotics Mechanics and Control**. 3rd ed. Pearson Education, Inc., USA.
- Donald R. Dentler II. (2008). **Design, Control, and Implementation of a Three Link Articulated Robot Arm**. Master' Thesis, The Graduate Faculty of The University of Akron.
- Electronics Hub. (2021). **Arduino Introduction (Online)**. <https://www.electronicshub.org/arduino-introduction/>, June 11, 2021.
- GreigRS (pseud.). (2015). **Stepper motors and drives, what is full step, half step and microstepping (Online)**. <https://www.rs-online.com/designspark/stepper-motors-and-drives-what-is-full-step-half-step-and-microstepping.>, June 3, 2021.
- Lee, J., et al. (2018). Development of mobile robot with vision inspection system and three-axis robot. **2018 3rd International Conference on Control and Robotics Engineering**, Japan, 6–10.
- Mittal, R.K. and Nagrath, I.J. (2003). **Robotics and control**. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited., New Delhi.
- Saixuan, C., Minzhou, L., Omar, A., and Guanwu, J. (2017). A General Analytical Algorithm for Collaborative Robot (cobot) with 6 Degree of Freedom (DOF). **Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Applied System Innovation**. 698–701.

- Samuel J.L., Jeff S., William M. (2018). **University Physics Volume 1**. OpenStax., Houston, Texas.
- Singh, T. P., Suresh, P., Chandan, S. (2017). Forward and Inverse Kinematic Analysis of Robotic Manipulators. **International Research Journal of Engineering and Technology**. 4(2), 1459–1469.
- The Robotics Back-End. (n.d.). **Raspberry Pi Arduino Serial Communication (Online)**. <https://roboticsbackend.com/raspberry-pi-arduino-serial-communication/>, June 21, 2021.
- Zhao, T., and Yuan, J. (2006). Research on the Kinematics and Dynamics of a 7-DOF Arm of Humanoid Robot. **Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics**, China. 155 –1558.

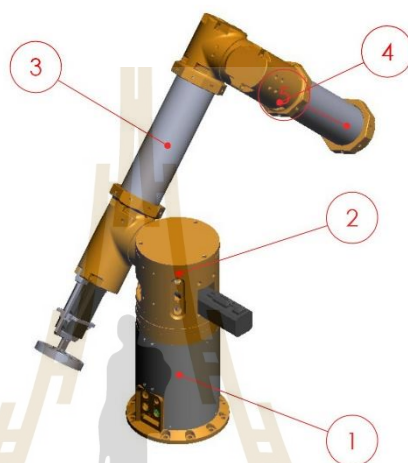




ภาคผนวก ก

แบบทางกลและส่วนประกอบของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์

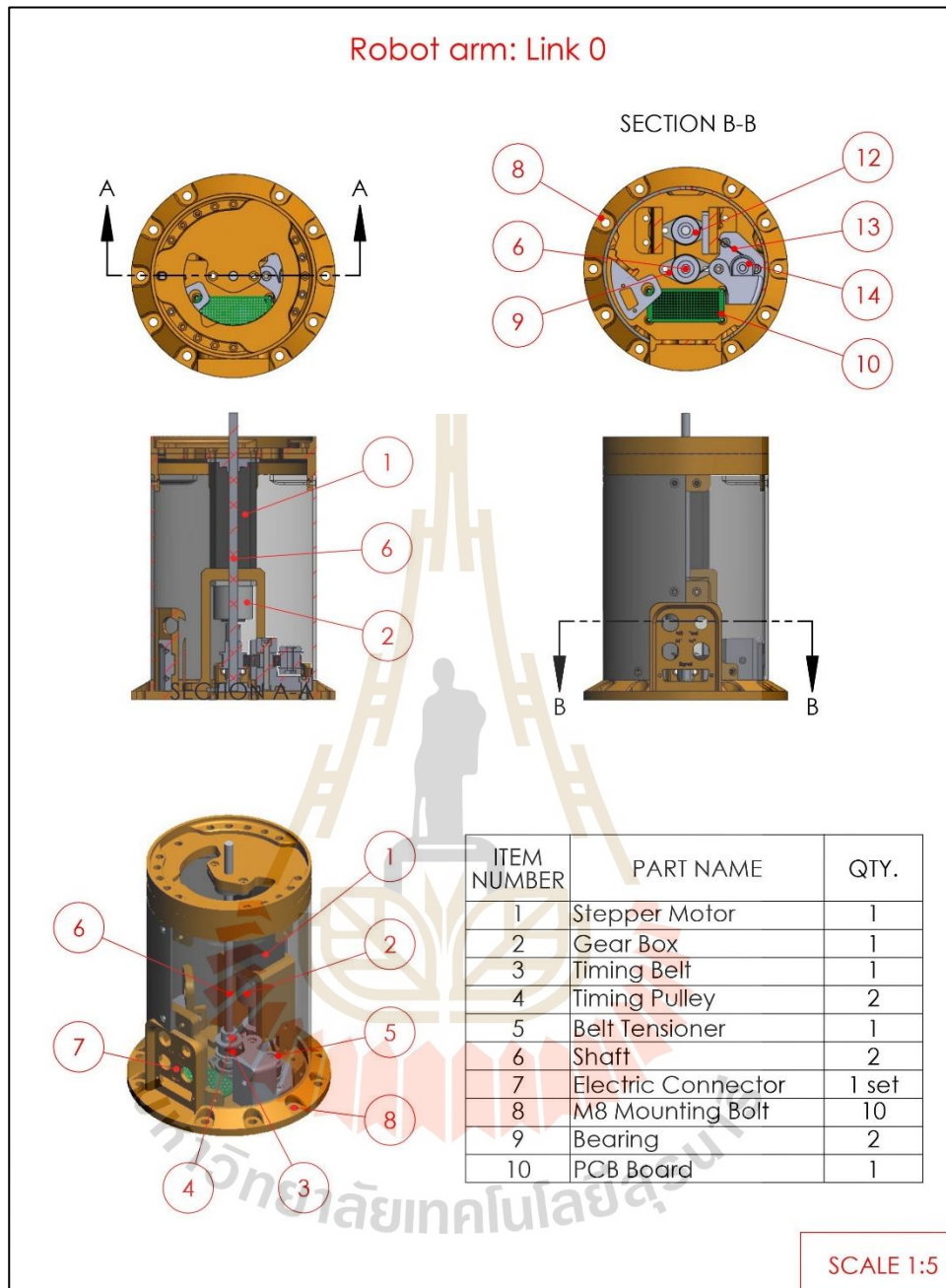
3DOF Articulated Robot arm



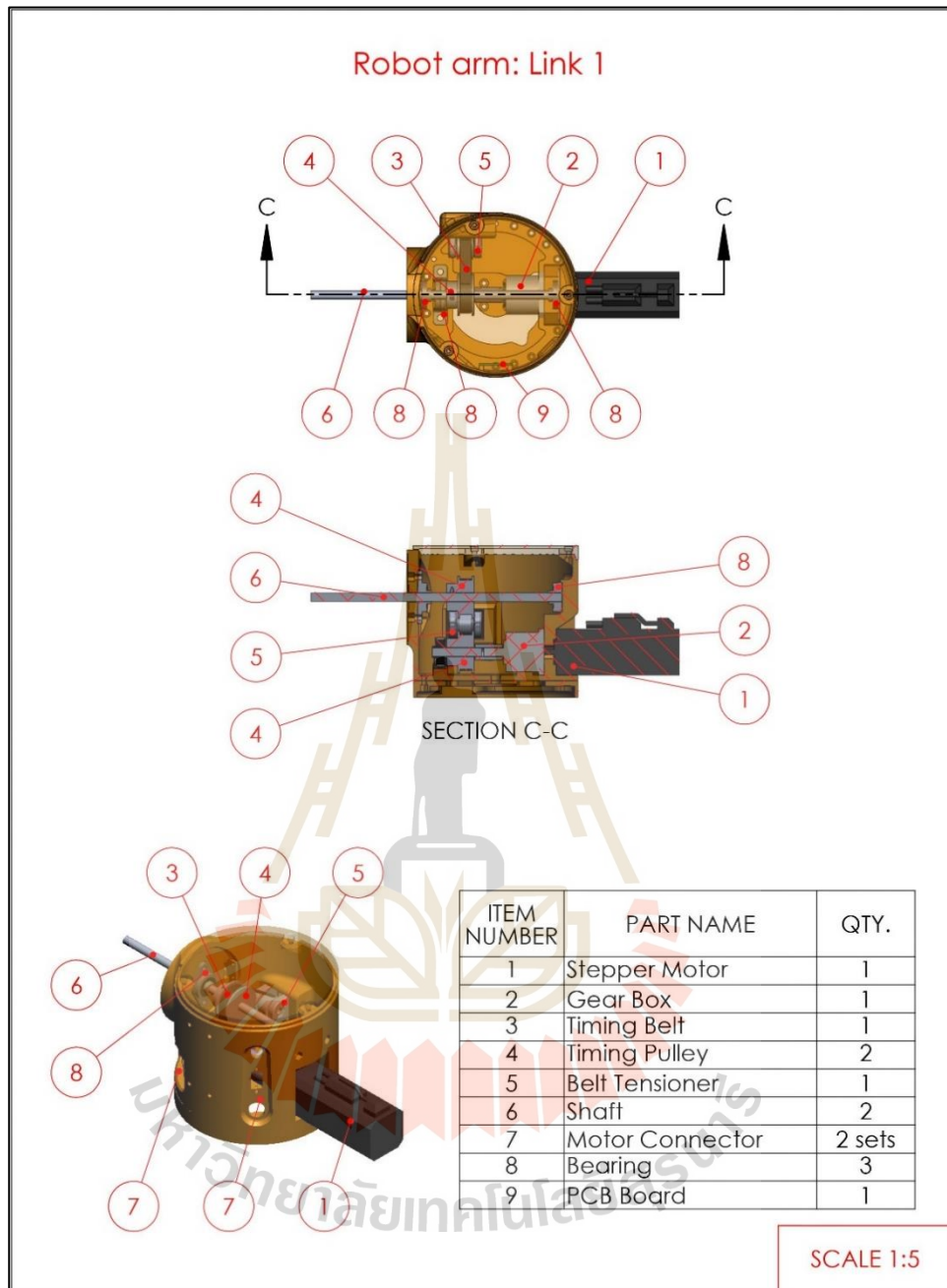
ITEM NUMBER	PART NAME	QTY.
1	Link 0	1
2	Link 1	1
3	Link 2	1
4	Link 3	1
5	Tool Plate	

SCALE 1:10

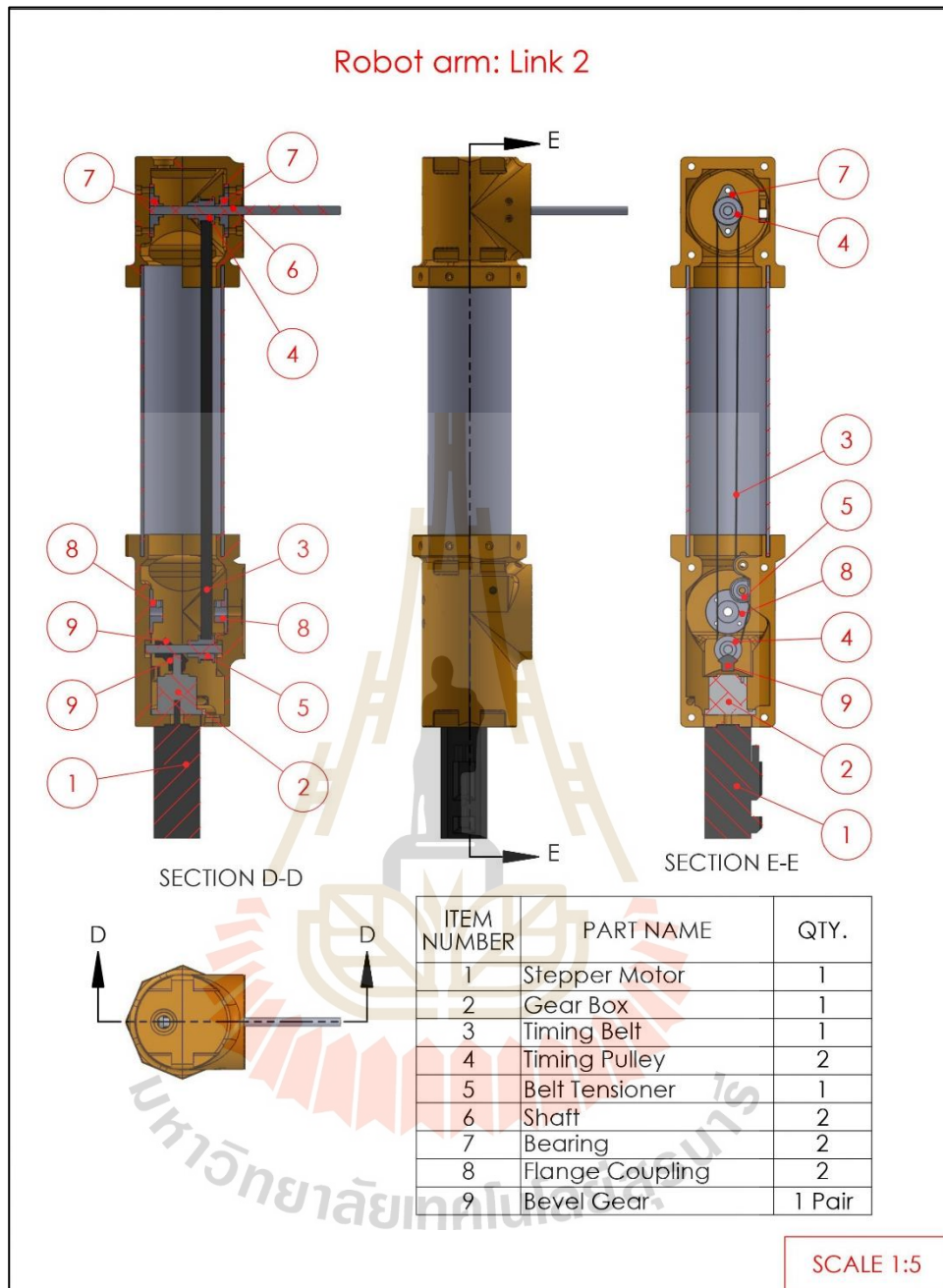
รูปที่ ก.1 แบบทางกลของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์



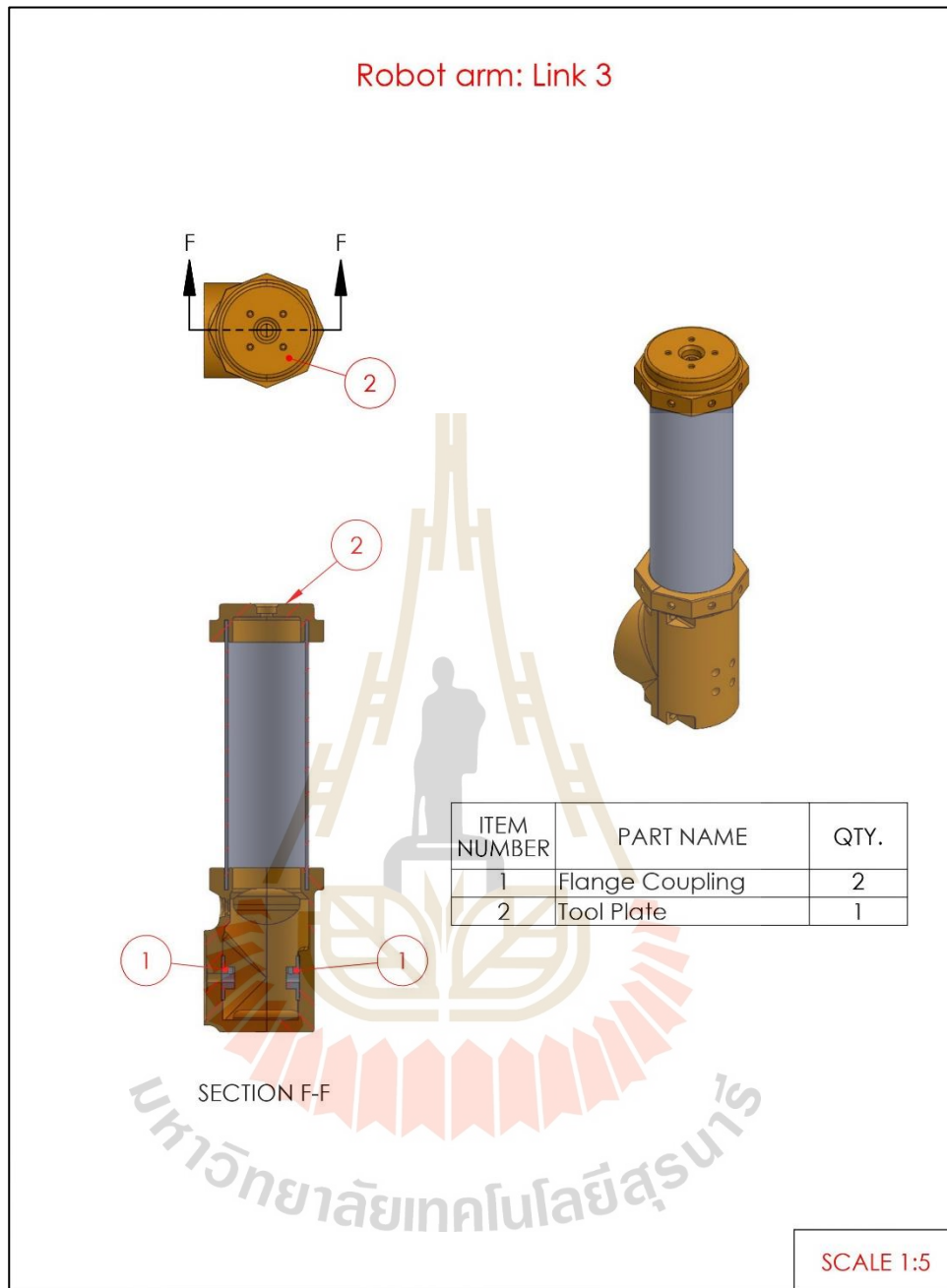
รูปที่ ก.2 แบบทางกลของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ Link ที่ 0



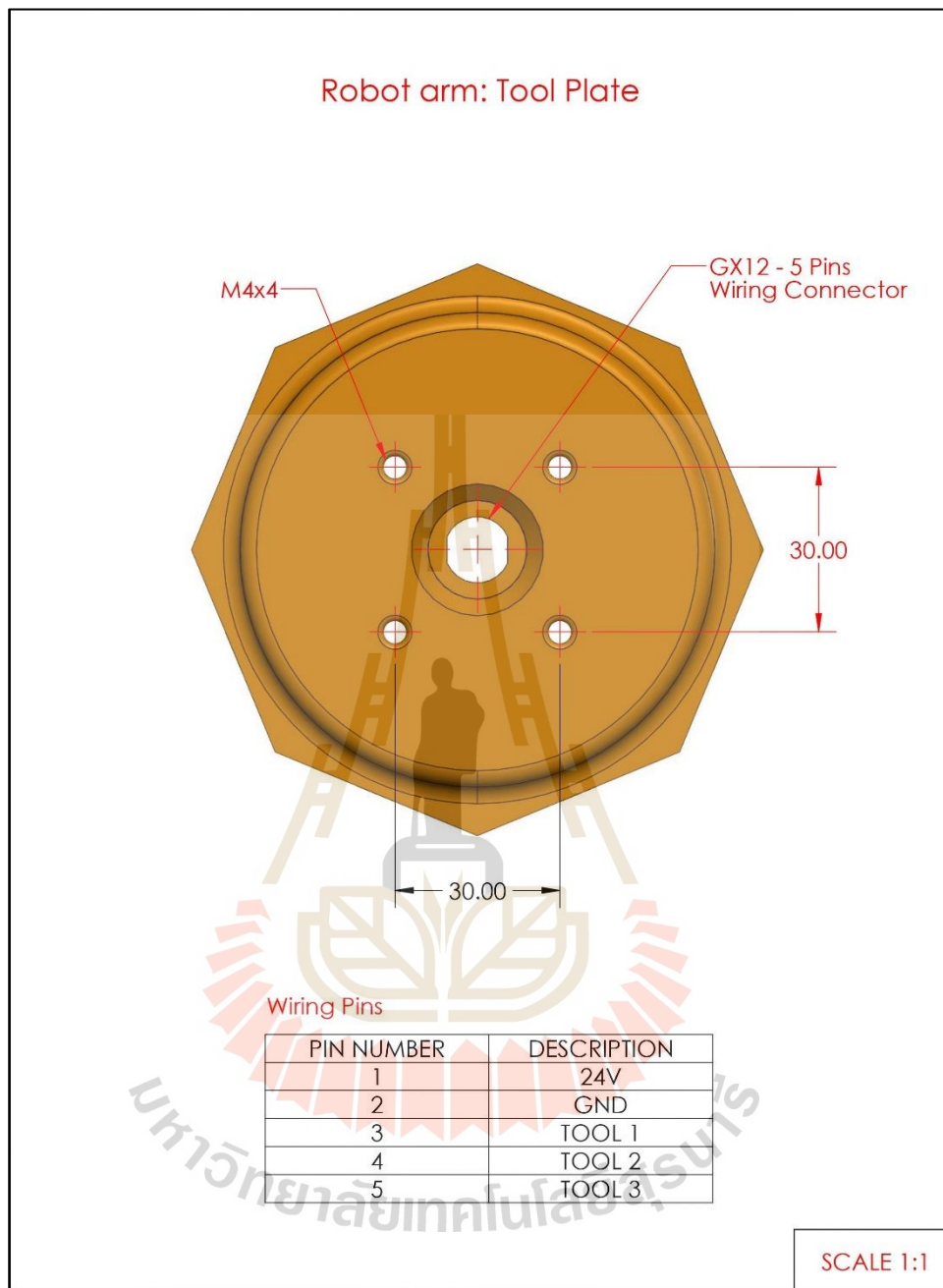
รูปที่ ก.3 แบบทางกลของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ Link ที่ 1



รูปที่ ก.4 แบบทางกลของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ Link ที่ 2



รูปที่ ก.5 แบบทางกลของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์ Link ที่ 3



รูปที่ ก.6 แบบทางกลของแผ่นติดตั้งอุปกรณ์ที่ปลายแขนของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์



ภาคผนวก ข

ผลการวัดค่าพิกัดจุดของต้นแบบแขนกลหุ่นยนต์จากเครื่อง Coordinate
Measuring Machine (CMM)

ตารางที่ ข.1 พิกัดจุดที่กำหนดบนแกนกลหุ่นยนต์และพิกัดจุดที่แปลงมายังระบบพิกัดจุดของเครื่อง CMM โดยคำนวณจากจุดอ้างอิง

Point	Set point (Robot arm coordinate)			Set point (CMM coordinate)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
จุดอ้างอิง	510	0	40	301.366	-182.628	-374.31
1	400	0	120	301.366	-72.628	-294.31
2	-330	205	155	506.366	657.372	-259.31
3	100	495	25	796.366	227.372	-389.31
4	205	110	430	411.366	122.372	15.69
5	500	410	55	711.366	-172.628	-359.31
6	5	245	90	546.366	322.372	-324.31
7	560	0	85	301.366	-232.628	-329.31
8	185	250	590	551.366	142.372	175.69
9	445	405	260	706.366	-117.628	-154.31
10	80	130	50	431.366	247.372	-364.31
11	300	85	210	386.366	27.372	-204.31
12	465	265	230	566.366	-137.628	-184.31
13	440	15	65	316.366	-112.628	-349.31
14	80	230	95	531.366	247.372	-319.31
15	-150	15	570	316.366	477.372	155.69
16	-285	215	85	516.366	612.372	-329.31
17	515	305	80	606.366	-187.628	-334.31
18	-595	130	120	431.366	922.372	-294.31
19	-90	520	370	821.366	417.372	-44.31
20	175	570	10	871.366	152.372	-404.31

ตารางที่ ข.2 ผลการวัดพิกัดจุดของปลายแขนกลหุ่นยนต์จำนวน 20 จุด วัดซ้ำจุดละ 5 ครั้ง

Point	CMM - Measure 1			CMM - Measure 2			CMM - Measure 3			CMM - Measure 4			CMM - Measure 5		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	280.054	-130.426	-342.910	263.838	-131.937	-322.687	266.522	-120.250	-313.781	270.711	-138.191	-308.544	260.305	-137.208	-318.948
2	477.886	619.167	-294.149	493.902	628.365	-298.765	490.211	625.036	-297.932	475.694	621.467	-288.420	494.340	621.758	-293.708
3	767.352	212.871	-370.811	762.825	219.389	-370.231	755.421	211.791	-381.056	763.396	214.275	-376.766	759.366	215.009	-384.576
4	389.170	148.539	-21.642	392.140	142.569	-12.209	379.411	138.620	-18.173	390.163	142.949	-15.248	384.615	145.250	-6.062
5	736.230	-170.696	-357.249	727.952	-170.393	-355.681	727.268	-162.927	-370.221	731.679	-177.621	-370.058	723.961	-172.389	-367.632
6	519.346	330.927	-301.103	521.079	314.718	-301.271	523.090	320.379	-318.703	517.366	322.897	-300.400	524.184	319.448	-314.378
7	316.470	-239.457	-342.892	303.121	-245.471	-343.326	318.163	-240.284	-344.092	307.590	-242.753	-352.327	318.153	-238.585	-346.483
8	554.959	127.116	150.512	542.695	108.135	146.271	548.843	120.515	135.991	554.378	111.989	135.473	551.917	109.855	150.966
9	725.898	-82.072	-141.957	712.299	-87.583	-135.066	717.206	-88.479	-125.545	720.739	-91.047	-135.902	718.743	-89.220	-139.463
10	422.836	251.610	-330.665	425.419	247.330	-339.148	409.426	243.220	-323.198	415.455	253.588	-329.998	414.644	251.383	-337.965
11	362.328	17.536	-204.471	358.239	21.327	-204.618	367.449	19.019	-205.567	366.009	21.746	-208.397	357.856	24.208	-204.058
12	575.484	-143.061	-156.530	575.164	-135.380	-153.642	560.321	-128.526	-149.110	563.462	-127.888	-165.965	572.490	-128.410	-154.581
13	291.589	-97.423	-330.634	294.574	-97.535	-319.090	289.875	-110.453	-325.863	298.698	-109.904	-318.070	296.428	-112.375	-326.322
14	510.628	230.713	-301.070	521.677	234.311	-298.804	518.957	235.040	-307.092	521.048	231.171	-294.562	506.530	237.307	-293.014
15	313.416	490.398	196.297	309.594	494.351	198.064	294.701	504.128	192.349	305.093	489.977	193.668	299.029	500.242	193.190
16	498.888	640.260	-339.782	495.421	622.101	-338.842	486.711	639.905	-342.191	493.512	634.148	-339.392	492.255	632.039	-328.619
17	590.336	-149.635	-348.911	605.988	-156.309	-350.743	607.361	-163.722	-346.140	590.317	-163.225	-362.854	594.355	-165.623	-352.631
18	454.620	922.917	-335.986	456.126	923.389	-318.900	458.537	916.959	-329.841	466.212	911.120	-321.033	454.419	925.690	-321.644
19	821.019	419.223	-47.577	820.796	411.716	-47.585	824.810	417.487	-61.870	826.204	402.897	-59.412	835.622	402.971	-58.807
20	888.000	158.650	-396.303	884.814	153.368	-410.562	898.397	151.699	-397.619	885.323	144.650	-408.413	889.863	152.299	-412.713

ตารางที่ ข.3 การคำนวณค่าความถูกต้องของตำแหน่งในการเคลื่อนที่ (Positioning accuracy)

Point	Mean			Apx ²	Apy ²	Apz ²	AP
	X	Y	Z				
1	268.286	-131.602	-321.374	1094.3	3478.0	732.5	72.83
2	486.407	623.159	-294.595	398.4	1170.5	1245.0	53.05
3	761.672	214.667	-376.688	1203.7	161.4	159.3	39.04
4	387.100	143.586	-14.667	588.9	450.0	921.5	44.28
5	729.418	-170.805	-364.168	325.9	3.3	23.6	18.78
6	521.013	321.674	-307.171	642.8	0.5	293.7	30.61
7	312.699	-241.310	-345.824	128.4	75.4	272.7	21.83
8	550.558	115.522	143.842	0.7	720.9	1014.3	41.66
9	718.977	-87.680	-135.587	159.0	896.9	350.6	37.50
10	417.556	249.426	-332.195	190.7	4.2	1031.4	35.02
11	362.376	20.767	-205.422	575.5	43.6	1.2	24.91
12	569.384	-132.653	-155.966	9.1	24.7	803.4	28.94
13	294.233	-105.538	-323.996	489.9	50.3	640.8	34.37
14	515.768	233.709	-298.908	243.3	186.7	416.2	29.09
15	304.366	495.819	194.714	144.0	340.3	1522.8	44.80
16	493.358	633.690	-337.765	529.4	454.5	71.5	32.49
17	597.671	-159.703	-352.256	75.6	779.8	322.0	34.31
18	457.983	920.015	-325.481	708.5	5.6	971.6	41.06
19	825.690	410.859	-55.050	18.7	42.4	115.4	13.28
20	889.279	152.133	-405.122	320.9	0.1	0.7	17.93
						Max	72.83
						Mean	34.79
						Min	13.28

ตารางที่ ข.4 การคำนวณค่าความสามารถในการทำซ้ำ (Positioning repeatability)

I1				I2				I3				I4				I5				I bar	SI	RP
X	Y	Z	Ij	X	Y	Z	Ij	X	Y	Z	Ij	X	Y	Z	Ij	X	Y	Z	Ij			
138.5	1.4	463.8	24.6	19.8	0.1	1.7	4.6	3.1	128.9	57.7	13.8	5.9	43.4	164.6	14.6	63.7	31.4	5.9	10.1	13.5	7.316	35.48
72.6	15.9	0.2	9.4	56.2	27.1	17.4	10.0	14.5	3.5	11.1	5.4	114.8	2.9	38.1	12.5	62.9	2.0	0.8	8.1	9.1	2.603	16.90
32.3	3.2	34.5	8.4	1.3	22.3	41.7	8.1	39.1	8.3	19.1	8.2	3.0	0.2	0.0	1.8	5.3	0.1	62.2	8.2	6.9	2.880	15.56
4.3	24.5	48.6	8.8	25.4	1.0	6.0	5.7	59.1	24.7	12.3	9.8	9.4	0.4	0.3	3.2	6.2	2.8	74.0	9.1	7.3	2.798	15.71
46.4	0.0	47.9	9.7	2.1	0.2	72.0	8.6	4.6	62.1	36.6	10.2	5.1	46.5	34.7	9.3	29.8	2.5	12.0	6.7	8.9	1.371	13.00
2.8	85.6	36.8	11.2	0.0	48.4	34.8	9.1	4.3	1.7	133.0	11.8	13.3	1.5	45.8	7.8	10.1	5.0	51.9	8.2	9.6	1.792	14.99
14.2	3.4	8.6	5.1	91.7	17.3	6.2	10.7	29.9	1.1	3.0	5.8	26.1	2.1	42.3	8.4	29.7	7.4	0.4	6.1	7.2	2.307	14.16
19.4	134.4	44.5	14.1	61.8	54.6	5.9	11.1	2.9	24.9	61.6	9.5	14.6	12.5	70.1	9.9	1.8	32.1	50.7	9.2	10.7	2.003	16.74
47.9	31.5	40.6	11.0	44.6	0.0	0.3	6.7	3.1	0.6	100.8	10.2	3.1	11.3	0.1	3.8	0.1	2.4	15.0	4.2	7.2	3.320	17.13
27.9	4.8	2.3	5.9	61.8	4.4	48.3	10.7	66.1	38.5	80.9	13.6	4.4	17.3	4.8	5.2	8.5	3.8	33.3	6.8	8.4	3.605	19.25
0.0	10.4	0.9	3.4	17.1	0.3	0.6	4.3	25.7	3.1	0.0	5.4	13.2	1.0	8.8	4.8	20.4	11.8	1.9	5.8	4.7	0.966	7.62
37.2	108.3	0.3	12.1	33.4	7.4	5.4	6.8	82.1	17.0	47.0	12.1	35.1	22.7	100.0	12.6	9.6	18.0	1.9	5.4	9.8	3.394	19.98
7.0	65.9	44.1	10.8	0.1	64.1	24.1	9.4	19.0	24.2	3.5	6.8	19.9	19.1	35.1	8.6	4.8	46.7	5.4	7.5	8.6	1.562	13.32
26.4	9.0	4.7	6.3	34.9	0.4	0.0	5.9	10.2	1.8	67.0	8.9	27.9	6.4	18.9	7.3	85.3	13.0	34.7	11.5	8.0	2.280	14.84
81.9	29.4	2.5	10.7	27.3	2.2	11.2	6.4	93.4	69.0	5.6	13.0	0.5	34.1	1.1	6.0	28.5	19.6	2.3	7.1	8.6	3.057	17.79
30.6	43.2	4.1	8.8	4.3	134.3	1.2	11.8	44.2	38.6	19.6	10.1	0.0	0.2	2.6	1.7	1.2	2.7	83.7	9.4	8.4	3.895	20.05
53.8	101.4	11.2	12.9	69.2	11.5	2.3	9.1	93.9	16.2	37.4	12.1	54.1	12.4	112.3	13.4	11.0	35.0	0.1	6.8	10.9	2.815	19.31
11.3	8.4	110.4	11.4	3.4	11.4	43.3	7.6	0.3	9.3	19.0	5.4	67.7	79.1	19.8	12.9	12.7	32.2	14.7	7.7	9.0	3.078	18.24
21.8	70.0	55.9	12.2	24.0	0.7	55.7	9.0	0.8	43.9	46.5	9.6	0.3	63.4	19.0	9.1	98.6	62.2	14.1	13.2	10.6	1.959	16.47
1.6	42.5	77.8	11.0	19.9	1.5	29.6	7.1	83.1	0.2	56.3	11.8	15.7	56.0	10.8	9.1	0.3	0.0	57.6	7.6	9.3	2.054	15.50
																					Max	35.48
																					Mean	17.10
																					Min	7.62



ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Nopphawan Nurnuansuwan Aphilak Lonklang Kontorn Chamniprasart (2019). A Prototyping of 2-DOF Robot Arm Using Feedback Control System. **In 2019 The 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR 2019)**. China 19-22 April 2019



ประวัติผู้เขียน

นางสาวนพวรรณ เนื่อนवलสุวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 13 มกราคม พ.ศ. 2539 ณ จังหวัด กรุงเทพมหานครฯ สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนสุนารีวิทยา อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2553 จากนั้น ในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ได้เข้าเรียนในโครงการสนับสนุนการจัดตั้งห้องเรียนวิทยาศาสตร์ในโรงเรียน โดยการกำกับดูแลของมหาวิทยาลัย (โครงการ วมว.) ศูนย์โรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย โดยการกำกับดูแลของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ในปีการศึกษา 2556 ต่อมาได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โดยได้รับทุนเรียนดี สำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรีในทุกภาคการศึกษา และในปีการศึกษา 2560 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง) จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยมีคะแนนเฉลี่ยสะสมตลอดหลักสูตร 3.94 และในปี พ.ศ. 2561 ได้รับคัดเลือกให้เป็นผู้ได้รับทุนการศึกษาสำหรับผู้มีผลการเรียนดีเด่นเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ณ สถาบันการศึกษาเดิม

โดยขณะศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาได้รับมอบหมายให้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 13 รายวิชา ได้แก่

- 1) ระบบอัตโนมัติอุตสาหกรรม
- 2) ปฏิบัติการระบบควบคุมและอัตโนมัติ
- 3) การวัดและเครื่องมือวัด
- 4) ปฏิบัติการวิศวกรรมอากาศยาน 2
- 5) ปฏิบัติการวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ 1
- 6) ปฏิบัติการวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ 3
- 7) เครื่องจักรอัตโนมัติอุตสาหกรรม
- 8) อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
- 9) การออกแบบเครื่องจักรอัตโนมัติ
- 10) หุ่นยนต์เบื้องต้น
- 11) เขียนแบบวิศวกรรม 2 (หลักสูตรนานาชาติ)
- 12) ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 2 (หลักสูตรนานาชาติ)
- 13) ระบบอัตโนมัติอุตสาหกรรม (หลักสูตรนานาชาติ)

อีกทั้งได้นำเสนอผลงานทางวิชาการ เรื่อง “A Prototyping of 2-DOF Robot Arm Using Feedback Control System” ในการประชุมวิชาการ 2019 The 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR 2019) ระหว่างวันที่ 19 - 22 เมษายน พ.ศ. 2562 ณ จังหวัดปักกิ่ง ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน

