

การควบคุมอิมพีแดนซ์ด้วยแรงสำหรับแขนหุ่นยนต์คู่

FORCE-IMPEDANCE CONTROL FOR DUAL ROBOT ARMS



วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2566

KMITL-2023-EN-M-217-127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FORCE-IMPEDANCE CONTROL FOR DUAL ROBOT ARMS



A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023

KMITL-2023-EN-M-217-127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมอิมพีแดนซ์ด้วยแรงสำหรับแขนหุ่นยนต์คู่
นักศึกษา	ภัทรวัต ชัยคุณสมบัติ
รหัสประจำตัว	61601157
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.พลชัย โขติปรายนกุล

บทคัดย่อ

การใช้งานหุ่นยนต์บริการเริ่มมีการนำมาทำงานแทนแรงงานจึงมีความจำเป็นและเพื่อเป็นการบริการอำนวยความสะดวกสบายให้ผู้ใช้งานแต่เนื่องจากระบบหุ่นยนต์บริการปัจจุบันเป็นหุ่นเคลื่อนที่ระบบล้อหมุนติดตั้งแขนกลสำหรับการหยิบส่งสิ่งของให้ผู้ใช้บริการยังมีข้อจำกัดในด้านการควบคุมที่ปรับเปลี่ยนตามสภาวะแวดล้อมถ้าหุ่นเคลื่อนที่บนพื้นเอียงแขนกลที่ถือของแบบตายตัว (Fixed Pose) อาจทำให้สิ่งของที่หิ้วถล่มมาด้วยน้ำหนักหรือตกหล่นได้ หุ่นยนต์บริการระบบล้อเคลื่อนที่ติดตั้งแขนกล การควบคุมของระบบการเคลื่อนที่และแขนกลจะที่จะแยกส่วนการควบคุมอิสระออกจากกัน การควบคุมแขนกลจะทำงานในลักษณะของการควบคุมตำแหน่งของแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์ (Joint Position Impedance Control) ซึ่งเป็นการควบคุมพื้นฐานของแขนกล โดยแขนกลยังไม่สามารถปรับเปลี่ยนท่าทางเพื่อตอบสนองสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงอย่างการรักษาตำแหน่งการวางมือให้มีระยะห่างระหว่างมือซ้ายขวาคงที่และอยู่ในแนวระนาบตลอดเวลา การชดเชยตำแหน่งจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ หรือ การปรับองศาแขนตามสภาพพื้นผิวที่เอียงที่เป็นสิ่งจำเป็นที่จะทำให้หุ่นบริการสามารถปฏิบัติงานในการถือสิ่งของไม่ให้ตกหล่นได้

จากปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้นำเสนอกระบวนการคำนวณเชิงตัวเลขของการเคลื่อนที่เพื่อรักษาระดับและระนาบของมือหุ่นยนต์ตลอดเวลา การพัฒนาระบบควบคุมแขนกลแบบอิมพีแดนซ์ด้วยแรง (Impedance Force Control) ให้ทำงานร่วมกับเซนเซอร์อ่านค่าองศาการทำมุมของฐานหุ่นยนต์กับสภาพพื้นผิวของทางเดินที่ผ่านการกรองสัญญาณ มาป้อนเข้าเป็นตัวแปรในระบบควบคุมแขนกลที่มีกระบวนการรักษาระยะมือคงที่ รักษาระดับการถือของและองศาของที่ถือ โดยใช้แปลงแรงกระทำจากภายนอกที่ใช้หลักการของสปริงคสมมุติ (Virtual Spring) แรงโน้มถ่วง มาใส่ในระบบจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์มาคำนวณหาแรงบิดในข้อต่อควบคุมแขนกลตามเวลาจริง จากผลการทดสอบระบบการควบคุมที่นำเสนอทำให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพในการตอบสนองการรักษาระยะห่างได้คงที่

และรักษาระดับองศาของสิ่งของที่ถือไว้ให้ตั้งขึ้นได้ตลอดเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	FORCE-IMPEDANCE CONTROL FOR DUAL ROBOT ARMS
Student	Mr. Phatarawat Chaikhunsombat
Student ID.	61601157
Degree	Master of Engineering
Program	Industrial Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Dr.Pholchai Chotiprayanakul

ABSTRACT

Service robots recently become a part of our daily life. Service robot is a mobile robot with manipulators or robot arms that is assigned for household tasks to response user's need. Serving food and drink, sending object, and etc. are common task for service robot, however there are many algorithms and method purpose to solve an imbalance or unstable of two hands holding beverage container's tray. When the service robot has to explore on uneven level of floor, it may not make the robot tumble but a glass of water on holding tray might not be.

Two robot arms on a mobile platform are controlled by the joint position impedance control, independently. To develop the ordinary impedance control, there are many topics need to be solved and develop. Researcher has developed impedance control with force control. Acceleration sensor in robot control system is for environment or work field surface awareness reading tilt of robot base and compensate the holding object position to keep it balancing. The research showed Kinematics and Dynamics Model of the robot arm and it is implemented with force impedance control algorithm. Torque in every robot arm's joint is calculated with force/torque control technique associated with 3 DOF acceleration sensors smoothen with Kalman Filter. Experiments aim to test the response of the force impedance control algorithm on simulation and scaled robot arms. Testing field is mockup to mimic the real uneven floor for robot to walk through. The simulation test shows the force impedance control with position compensation and TCP orientation control is efficient to make both hands up-rising and leveling. Although the test on scaled robot shows delay in the system that courses some position error.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจาก ดร.พลชัย โชติปราชญกุล อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำทั้งเสียสละเวลาอันมีค่าในการถ่ายทอดความรู้ ช่วย ฝึกฝน ต่อยอดทักษะการเรียนรู้การได้มาของงานวิจัยและการแก้ไขปัญหา รวมถึงให้ความกรุณาใน จัดเตรียมอุปกรณ์ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ เพื่อน พี่ น้อง นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรมที่คอยชี้แนะให้ คำแนะนำ และคอยให้กำลังใจในงานวิจัยที่ตีเสมอมา

สุดท้ายที่ต้องขอบคุณ ผู้ให้ความรู้และผู้สนับสนุน ขอมอบคุณงามความดีให้กับ บิดา มารดา และครอบครัว ซึ่งเป็นผู้มีพระคุณให้งานวิจัยสำเร็จลงได้ ตลอดจนขอบคุณ ครู อาจารย์ ผู้ประสิทธิ์ ประสาทวิชาพื้นฐานที่จำเป็นใช้ประกอบงานวิจัยทั้งทางตรงและทางอ้อม

ภัทรวัต ชัยคุณสมบัติ*



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.2. ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.4. ประโยชน์ที่ได้รับของงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1. ประเภทของหุ่นยนต์บริการ	4
2.1.1. หุ่นยนต์บริการลูกค้า.....	4
2.1.2. หุ่นยนต์บริการทางการแพทย์.....	5
2.1.3. หุ่นยนต์แบบโครงร่างแข็ง	6
2.2. การควบคุมระบบแขนกลบนหุ่นยนต์บริการ	7
2.2.1. ระบบพิกัดจลนศาสตร์แบบก้ำวหน้า	8
2.2.2. ระบบเมตริกซ์เปลี่ยนรูป	8
2.2.3. ระบบจลนศาสตร์แบบผันกลับของหุ่นยนต์.....	11
2.2.4. ระบบพลศาสตร์แขนกล.....	12
2.2.5. การควบคุมพิกัดที่ปลายแขนกลด้วยจาโคเบียน	14
2.3. พฤติกรรมทางกลศาสตร์ของแขนกล.....	14
2.3.1. แรงขับ.....	14
2.3.2. การควบคุมทางพลวัตของแขนกล.....	15
2.4. ผลกระทบของแรงต่อการควบคุมตำแหน่ง.....	16
2.4.1. ระบบควบคุมปลายแขนกล.....	17
2.4.2. การควบคุมปลายแขนกลด้วยสมมุติสปริงค์ (Virtual Spring).....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3. การปรับตั้งค่าจุดกึ่งกลางอุปกรณ์	21
2.5. การตรวจจับความเอียงของฐานเคลื่อนที่	22
2.5.1. เซนเซอร์ ADXL346	22
2.5.2. ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter)	22
2.6. การสอบเทียบตำแหน่งแกนกลและความแม่นยำ	25
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	26
3.1. แกนกลแบบจำลองและแกนกลประกอบ	26
3.1.1. แบบจำลองแกนกล.....	26
3.1.2. แกนกลประกอบ.....	27
3.2. ระบบพิกัดของหุ่นยนต์.....	27
3.2.1. กลศาสตร์ไปข้างหน้าของแกนกล (Forward Kinematics)	28
3.2.2. การออกแบบปรับตั้งค่าจุดกึ่งกลางอุปกรณ์.....	29
3.2.3. จาโคเบียนของแกนกล (Jacobian)	30
3.2.4. เมตริกซ์เทียม	31
3.3. การอ้างอิงระบบพิกัดพื้นผิว.....	31
3.3.1. ข้อมูลเซนเซอร์	32
3.3.2. การอ้างอิงระบบพิกัดสภาพพื้นผิวของทางเดิน	33
3.3.3. การทดลองเพื่อหาสภาพพื้นผิวของทางเดินแบบจำลองแกนกล	33
3.4. การควบคุมอิมพีเดนซ์.....	35
3.4.1. การกำหนดเป้าหมายสำหรับแกนกลที่ระยะห่างของแขนทั้ง 2 คงที่.....	37
3.4.2. การชดเชยตำแหน่งเพื่อรักษาระนาบของแกนกล.....	38
3.4.3. การทดลองระบบควบคุมอิมพีเดนซ์สำหรับแกนกล.....	39
3.5. การสอบเทียบตำแหน่งของแกนกลและการทดลองความแม่นยำ	40
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	41
4.1. การทดลองการควบคุมอิมพีเดนซ์.....	41
4.2. การออกแบบและทดลองเพื่อหาสภาพพื้นผิวของทางเดิน	42
4.2.1. การติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่ง	42
4.2.2. ผลของอ่านค่าเซนเซอร์และการกรอง	42
4.2.3. การออกแบบสนามทดสอบ	43
4.3. ผลการทดลองการควบคุมระยะ TCP คงที่.....	46
4.3.1. ผลการทดลองด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์.....	47

4.3.2. ผลการจำลองด้วยแกนกลประกอบ.....	48
4.3.3. การหาความคลาดเคลื่อนด้วยการเปรียบเทียบผลการทดลอง.....	49
บทที่ 5 สรุปงานวิจัย	50
5.1. สรุปผลการทดลอง.....	50
5.2. ข้อเสนอแนะ.....	50
5.3. สรุปงานวิจัย.....	51
เอกสารอ้างอิง	52
ภาพผนวก.....	56
ภาคผนวก.ก วงจรเซนเซอร์ความเร่ง	57
ภาคผนวก.ข เซอร์โวมอเตอร์ DYNAMIXEL.....	60
ภาคผนวก.ง บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	64
ประวัติผู้เขียน.....	71



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 เมตริกซ์ส่วนกลับเทียม.....	14
ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์หน้าที่ของข้อต่อแขนกลทั้งซ้ายขวาของหุ่นยนต์บริการ	28
ตารางที่ ก.1 รายละเอียดของเซอร์โวมอเตอร์ Dynamixel Ax12	60
ตารางที่ ข.2 เทียบความละเอียดของเซอร์โวมอเตอร์.....	62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์บริการลูกค้า	5
รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์ผ่าตัด	5
รูปที่ 2.3 Exoskeleton Robot	6
รูปที่ 2.4 Rehabilitation Robot [5]	6
รูปที่ 2.5 รายละเอียดระบบพิกัดหุ่นยนต์บริการติดแขนกล	7
รูปที่ 2.6 แสดงการเคลื่อนพิกัดตามแนวแกน	9
รูปที่ 2.7 แสดงการหมุนรอบแนวแกนที่ $x y z$	10
รูปที่ 2.8 แสดงท่าซ็อนจากการทำจลศาสตร์แบบย้อนกลับ [19]	12
รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงปัจจัยในการควบคุมแขนกล [27].....	16
รูปที่ 2.10 แผนการกำหนดปัจจัยเฉพาะตัวทางในหุ่นยนต์แบบขา [25].....	17
รูปที่ 2.11 แผนภาพการควบคุมอิมพีเดนซ์ของแขนกลแบบอิมพีซิส	18
รูปที่ 2.12 ภาพแสดงการควบคุมปลายแขนกลด้วยสมมุติสปริงค์	19
รูปที่ 2.13 6DOF Manipulator [17]และ Stanford Manipulator[16].....	21
รูปที่ 2.14 ภาพแสดงการต่อเซ็นเซอร์ความเร่งเข้ากับโปรแกรมประมวลผล	22
รูปที่ 2.15 รายละเอียดแผนภาพตัวกรองคาลมาน	24
รูปที่ 3.14 ความแม่นยำของแขนกลในรูปแบบต่างๆ	25
รูปที่ 3.1 แบบจำลองใน Matlab.....	26
รูปที่ 3.2 แสดงรายละเอียดแขนกล แขนหมุนของข้อต่อ	27
รูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งบนระบบพิกัด	29
รูปที่ 3.4 แสดงรูปแบบการระบุตำแหน่งส่งค่าความสัมพันธ์ TCP	30
รูปที่ 3.5 ควบคุมปลายแขนกลทางตรง และการวางปลายแขนช่วงข้อมือ	31
รูปที่ 3.6 ผลลัพธ์ของตัวกรองคาลมานในงานวิจัย	32
รูปที่ 3.7 วิธีการทดลองหุ่นยนต์บริการจำลอง	34
รูปที่ 3.8 สนามทดสอบสภาพพื้นผิว	34
รูปที่ 3.9 แผนภาพระบบพิกัดในแนวเชิงเส้นวิ่งเข้าเป้าหมายที่กำหนด.....	36
รูปที่ 3.10 แผนภาพการควบคุมอิมพีเดนซ์ของแขนกล แขนทั้ง 2	37
รูปที่ 3.11 การชดเชยตำแหน่งแขนกลเมื่อหุ่นยนต์เกิดการเอียง	38
รูปที่ 3.12 แสดงเส้นแนวหัวไหล่และจุด TCP ของแขนกล	39
รูปที่ 3.13 การชดเชยตำแหน่งในระบบควบคุมแขนกล	39
รูปที่ 3.14 การชดเชยตำแหน่งในระบบควบคุมแขนกล	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.1 แสดงการควบคุมอิมพีแดนซ์ด้วยแรง.....	41
รูปที่ 4.2 แสดงจุดติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับความเร่ง	42
รูปที่ 4.3 ข้อมูลเซนเซอร์ตรวจจับความเร่งที่ยังไม่ได้ผ่านการกรอง (ซ้าย) และผ่านการกรอง (ขวา). 42	
รูปที่ 4.4 สภาพพื้นทางวิ่ง การทดลองที่ 1.....	44
รูปที่ 4.5 การทดลองนำเก็บสภาพพื้นทางวิ่งแบบเอียงขวาภายหลัง การทดลองที่ 1.....	44
รูปที่ 4.6 สภาพการเอียงออกที่วัดออกมาได้จากสภาพพื้นผิวทางเดิน การทดลองที่ 1.....	44
รูปที่ 4.6 การทดลองเก็บสภาพพื้นทางวิ่งแบบเอียงขวา การทดลองที่ 2	45
รูปที่ 4.7 การทดลองเก็บสภาพพื้นทางวิ่งแบบเอียงซ้าย การทดลองที่ 3	45
รูปที่ 4.8 การทดลองการควบคุมอิมพีแดนซ์ด้วยแรง	46
รูปที่ 4.9 ตัวอย่างข้อมูลเซนเซอร์ตรวจจับความเร่งที่วัดได้จากการทดสอบบนแขนกลประกอบ.....	46
รูปที่ 4.11 ระยะห่างแขนและการเปลี่ยนแปลงองศาของปลายมือทั้งสอง	47
รูปที่ 4.10 ระยะห่างแขนและการเปลี่ยนแปลงองศาของปลายมือทั้งสอง	48
รูปที่ 4.12 แสดงโครงร่างของหุ่นยนต์ในการรักษาตำแหน่งของ TCP.....	49
รูปที่ ก.5.1 การต่อวงจรของการรับรู้ค่าการเอียงไปมาของหุ่นยนต์.....	57
รูปที่ ข.5.2 AX12 Dynamixel.....	61
รูปที่ ข.5.3 วงจร Potentiometer	62

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมบริการในประเทศไทยยังพึ่งพาการใช้งานแรงงานคนงาน ที่เริ่มมีค่าใช้จ่ายสูงมากขึ้นจากค่าครองชีพ และ ด้วยสถานการณ์โควิด 19 ที่เกิดขึ้น ทำให้ผู้ใช้บริการมีความกังวลเรื่องการแพร่ระบาดผ่านช่องทางของบริการภายในร้านอาหาร หรือการแพร่ผ่านการส่งอาหาร และยาให้กับผู้ป่วยภายในสถานพยาบาล เป็นต้น จึงได้มีการนำหุ่นยนต์บริการมาช่วยเหลือในการทำงาน เพื่อทำให้เกิดความสะดวกสบายและลดความเสี่ยง หรือจะประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์กู้ระเบิดในการหิบบกวัตถุให้มันคงมากขึ้น หุ่นยนต์บริการเริ่มเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง โดยสามารถทำงานในที่ ๆ มีความสกปรกหรืออันตราย หุ่นสามารถงานที่ทำซ้ำ ๆ โดยไม่มีความอ่อนล้า หุ่นยนต์บริการยังถูกใช้งานในด้านการอำนวยความสะดวกและเพิ่มความปลอดภัยในการทำงานให้กับมนุษย์ สำหรับงานบริการด้านการดูแลผู้ป่วยผู้สูงอายุหรือบริการตามบ้านทั่วไปที่จำเป็นต้องตอบสนองความต้องการและมีปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้บริการ โดยเฉพาะงานบริการในการหิบบกของที่เป็นภาชนะใส่ของ เนื่องจากระบบของแขนกลมีระบบพลศาสตร์เข้ามาเกี่ยวข้อง ข้อมือจึงต้องควบคุมแรงบิดตามแนวแกนและการควบคุมการตำแหน่งของหุ่นยนต์จึงมีความสำคัญ ทำให้ต้องมีการพัฒนาระบบควบคุมเพื่อไม่ให้สิ่งของที่มีมือของหุ่นยนต์บริการถืออยู่ ไม่ว่าจะ เป็น ภาชนะ ถ้วย หรือขวดน้ำ หก ตก หรือหล่น

แขนกล 5 แกน เคลื่อนที่ที่มีแขนนั้นสามารถปรับท่าทางคล้ายคนมากที่สุดจึงเป็นที่นิยมนำมาติดตั้งเคลื่อนที่บนระบบล้อให้กับหุ่นยนต์บริการ ประสบปัญหา ทำให้สิ่งของนั้นหกออกจากกันได้เมื่อเดินบนพื้นผิวที่ต่างกัน เช่น พื้นเอียง หรือพื้นผิวที่ไม่แน่นอน เนื่องจากการใช้เซนเซอร์รับค่าความเร่ง (ADXL346) ทำให้เซนเซอร์อ่านค่าองศาการหมุนของฐานหุ่นยนต์ มาป้อนเข้าเป็นตัวแปรในระบบเมตริกซ์ให้คำนวณออกมาเป็นแรงบิดสามแนวแกนนำมาใช้ควบคุมการหมุนของข้อมือ และใช้ตัวกรองสัญญาณแบบ Kalman เพื่อลดการสั่นกระเพื่อมของสัญญาณจากสิ่งรบกวนออกจากการเคลื่อนที่บนพื้นเอียงทำให้ค่าความเร่งที่อ่านได้ราบขึ้น การผสมผสานความสามารถการควบคุมด้านต่างๆ โดยการออกแบบท่าทางหุ่นยนต์ อาศัยวิธีการระบุตำแหน่งเชิงเส้นที่ปลายแขนกลหรือการควบคุมแบบอิมพีเดนซ์ที่มีการควบคุมแรงเฉพาะตัวตามลักษณะการใช้งาน [1]–[3] สามารถใช้งานบนหุ่นยนต์แบบ 2 แกน และตอบสนองที่ดี การใช้การควบคุมแบบอิมพีเดนซ์ [4]–[6] สามารถรองรับแรงต้านทานซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มความสามารถในการตอบสนองต่อพื้นเอียง โดยการจัดระบบค่าตัวแปรควบคุมแรง แรงต้าน และ ความหน่วง ที่เหมาะสม

แขนกลในงานวิจัยที่ [3], [7]–[9] เป็นการควบคุมแบบอิมพีเดนซ์ที่ใช้กับแขนกลสองแกน หรือ ทำงานโต้ตอบกับผู้ใช้งาน [10]–[13] โดยอาศัยการตอบสนองสมบัติจลศาสตร์ทั้งแนวเชิงมุมกับเชิงเส้นตามเวลาจริง จากนั้นเพิ่มความสามารถในการทวนซ้ำ (Repeatability) เพื่อเพิ่มความแม่นยำ

ในการรับรู้ตำแหน่ง ซึ่งจำเป็นในควบคุมแบบอิมพีเดนซ์ [14] ใช้วิธีการปรับตั้งค่าจุดกึ่งกลางอุปกรณ์ ซึ่งเป็นการใช้วิธีควบคุมปลายแขนกลส่งผ่านการควบคุมค่าตำแหน่งและมุมไปยังจุดอื่น (Tool Center Point) ใช้การออกแบบพิกัดจาโคเปียนใหม่ ผลที่ได้นี้นั้นทำให้แบ่งหน้าที่การรักษามุมและรักษาตำแหน่ง และเพิ่มความแม่นยำ [15]–[17] โดยหุ่นสามารถตอบสนองหรือรักษาสมดุลการถือของไม้ให้ของตกหล่นได้เมื่อแขนหุ่นชนสิ่งแวดล้อมหรือถูกชนจากคน แต่การทำงานยังเป็นการยึดฐานของหุ่นให้มั่นคงเพื่อลดความผิดพลาดในการควบคุมตำแหน่งของแขนกลหรือรักษาสมดุลที่ตอบสนองจากจุดที่ออกแบบไว้ การนำมาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์บนฐานล้อเคลื่อนที่ที่มีการเอียงตัว ให้หุ่นสามารถรักษาสมดุลการถือของในงานบริการ จำเป็นต้องขยายความสามารถให้ระบบควบคุมหุ่นให้ตอบสนองสภาพแวดล้อมที่ไม่แน่นอน และวิธีการยกของบนภาดาอาหารได้ด้วยตัวเอง

1.1. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ประยุกต์ใช้ระบบควบคุมอิมพีเดนซ์ด้วยแรงกับแขนกลของหุ่นยนต์ 2 แขน
2. นำเสนอกระบวนการรักษาระยะห่างของปลายแขน
3. นำเสนอกระบวนการรักษามุมระดับระนาบของศูนย์กลางสิ่งของที่ถือด้วย 2 มือ

1.2. ขอบเขตของงานวิจัย

1. พัฒนาหลักการระบบควบคุมด้วยแรงแบบอิมพีเดนซ์
2. ประยุกต์ระบบควบคุมกับแขนกลของหุ่นยนต์บริการในงานรักษาสมดุลย์ของสิ่งของที่ถือ
3. ระบบควบคุมแรงด้วยแรงแบบอิมพีเดนซ์ปรับค่าตามแรงกระตุ้นภายนอกและแรงโน้มถ่วง
4. ระบบควบคุมด้วยแรงแบบอิมพีเดนซ์ที่ควบคุมระยะมือสองข้างในการถือให้คงที่
5. ทำการทดสอบระบบควบคุมด้วยแรงแบบอิมพีเดนซ์กับหุ่นยนต์เสมือนจริง
6. ทำการทดสอบกับหุ่นยนต์จริงภายใต้สภาวะควบคุม

1.3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาการควบคุมตำแหน่งแบบอิมพีเดนซ์สำหรับการควบคุมหุ่นยนต์แบบ 2 แขน
2. ออกแบบและพัฒนาการควบคุมด้วยแรงแบบอิมพีเดนซ์
3. ทดสอบการทำงานระบบควบคุมด้วยแรงแบบอิมพีเดนซ์กับหุ่นยนต์บริการแขนกล 2 แขนผ่านแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์
4. ทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนของแขนกลที่ใช้ระบบควบคุมด้วยแรงแบบอิมพีเดนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทดลองระบบควบคุมด้วยแรงแบบอิมพีเดนซ์กับแขนกลประกอบจาก Dynamixel Servo Motor รุ่น AX12
6. ประยุกต์ระบบตรวจจับสัญญาณค่าแรงมาป้องกันกับระบบควบคุมด้วยแรงแบบอิมพีเดนซ์
7. วิเคราะห์ผลการทดลองจากแบบจำลองคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์จริงเพื่อปรับค่าอิมพีเดนซ์ของระบบ

1.4. ประโยชน์ที่ได้รับของงานวิจัย

งานวิจัยเป็นการพัฒนาการควบคุมตำแหน่งของแขนกลแบบอิมพีเดนซ์ที่ใช้กันทั่วไปมาเป็นการใช้แรงในการปรับตำแหน่งทำให้แขนกลเคลื่อนที่ไปตามแรงที่ป้อนเข้าระบบควบคุม และ การใช้เซนเซอร์ในการอ่านค่าแรงที่เกิดจากสภาวะแวดล้อมและพิกัดของหุ่นยนต์มาเป็นอินพุทของแรงสำหรับปรับให้หุ่นยนต์เคลื่อนไหวตอบสนองสภาพแวดล้อม

การทดลองของงานวิจัยจะให้ค่าการตอบสนองและค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของระบบควบคุมด้วยแรงแบบอิมพีเดนซ์ที่พัฒนาขึ้น และ ค่าพารามิเตอร์ของระบบอิมพีเดนซ์ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ตอบสนองต่องานการถือสิ่งของด้วยสองมือของแขนกล 2 แขนที่ทำงานร่วมกัน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันแนวคิดของยุคอุตสาหกรรม 5.0 (Industry 5.0) และการทำงานคู่กับหุ่นยนต์ (Human-Robot Cooperation) มีการนำมาใช้มากขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากสถานการณ์โควิด 19 ที่เกิดขึ้น พัฒนาการด้านหุ่นยนต์บริการในรูปแบบต่าง ๆ ทำให้ผู้ใช้บริการลดความกังวลเรื่องการแพร่ระบาดผ่านช่องทางของผู้ให้บริการในร้านอาหาร พยาบาลผู้ป่วยภายในสถานพยาบาลลดการแพร่ผ่านการส่งอาหารและยา เป็นต้น จึงได้มีการนำหุ่นยนต์บริการมาช่วยเหลือในการทำงานรวมทั้งมีการนำหุ่นยนต์บริการที่มีแขนกลมาใช้มากขึ้น

ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษางานวิจัยระบบควบคุมแขนกล 2 แขนบนหุ่นยนต์บริการติดชุดล้อเลื่อน จากงานที่มอบหมายหุ่นยนต์ที่ต้องนำส่งสิ่งของโดยชุดล้อเลื่อนของหุ่นต้องทำการเคลื่อนที่บนพื้นผิวเอียงทำให้ให้ปลายแขนทั้งสองข้างต้องมีระบบการขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ทำให้แขนกลมีคุณสมบัติไม่ให้เกิดการเสียดสีสมดุลหรือล้มไป

2.1. ประเภทของหุ่นยนต์บริการ

ในปัจจุบันหุ่นยนต์บริการถูกนำมาใช้เพื่ออำนวยความสะดวกมากขึ้นมีทั้งแบบอัตโนมัติที่ทำงานตามที่ป้อนคำสั่งไว้โดยมีเซนเซอร์ตรวจจับสัญญาณจากสิ่งแวดล้อมเพื่อปรับการทำงานอย่างอัตโนมัติ หรือ แบบกึ่งอัตโนมัติที่ทำงานตามคำสั่งโดยยังอาศัยคำสั่งของคนขณะปฏิบัติงานเพื่อตัดสินใจในสถานะที่เซนเซอร์ไม่สามารถตัดสินใจได้ หรือ ระบบหุ่นยนต์ที่ใช้ขยายความสามารถของคนปฏิบัติงานที่ทำให้เคลื่อนที่แม่นยำขึ้นหรือแข็งแรงขึ้น เป็นต้น ซึ่งทุกระบบควบคุมของหุ่นยนต์จะมีวัตถุประสงค์เฉพาะอย่างตามการทำงานของหุ่นยนต์บริการที่แตกต่างกัน รวมทั้งการใช้งานร่วมกับปัญญาประดิษฐ์ การเรียนรู้ของเครื่องจักรกล และระบบการมองเห็น และการจดจำ เพื่อให้เหมาะสมในใช้งานในแต่ละประเภท ซึ่งสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท ดังตัวอย่างต่อไปนี้

2.1.1. หุ่นยนต์บริการลูกค้า

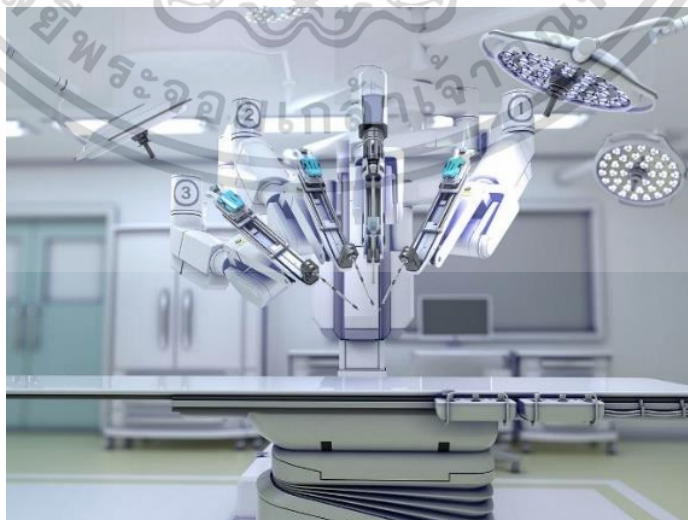
หุ่นยนต์บริการเป็นหุ่นยนต์ที่ทำงานเพื่อตอบสนองความสะดวกสบายของลูกค้า โดยมากหุ่นยนต์ใช้ช่วยเหลือลูกค้า ทั้งการให้ข้อมูลประชาสัมพันธ์, รักษาความปลอดภัย, วัตถุประสงค์ของผู้นำมาติดต่อและเป็นผู้นำทางในห้างสรรพสินค้าหรือในโรงพยาบาล ดังรูปที่ 2.1 ยังสามารถเก็บข้อมูลคุณลักษณะของลูกค้าผ่านทางใบหน้าและพฤติกรรมการซื้อของ



รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์บริการลูกค้า

2.1.2. หุ่นยนต์บริการทางการแพทย์

หุ่นยนต์บริการการแพทย์ เป็นหุ่นยนต์บริการชนิดหนึ่งที่ใช้ในงานรักษาพยาบาลและการผ่าตัดรักษาผู้ป่วย เป็นหุ่นยนต์เชิงแขนกลควบคุมด้วยมนุษย์เป็นการลดขนาดการเคลื่อนที่ของมือหมอให้ละเอียดขึ้นและเป็นการเพื่อความแม่นยำของการเคลื่อนที่ลดการสั่นไหวของมือด้วยการใช้ฟิวเตอร์สัญญาณไฟฟ้า ลดภาระในการทำงานของบุคลากรทางการแพทย์ เนื่องจากหุ่นยนต์ผ่าตัดนั้นใช้การเปิดปากแผล ในการทำงานน้อยกว่าการใช้มือคนผ่าตัด ส่งผลให้การรักษาดีขึ้นและ โดยมีหน้าที่หลักคือช่วยในการผ่าตัดดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์ผ่าตัด

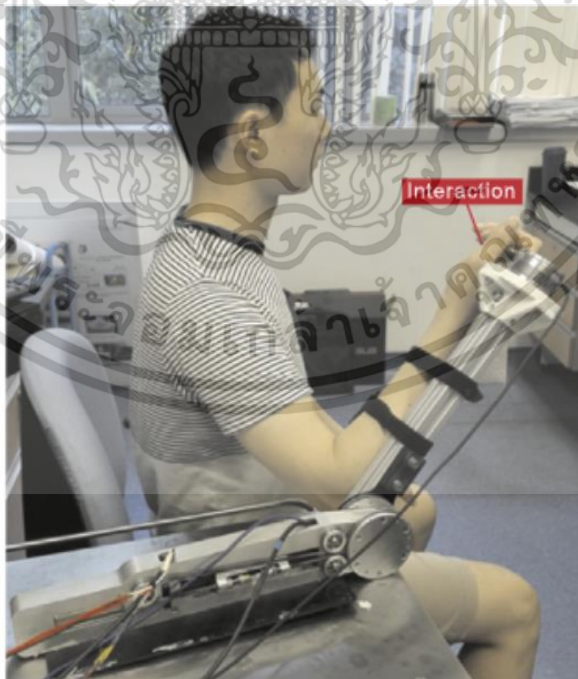
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3. หุ่นยนต์แบบโครงร่างแข็ง

หุ่นยนต์แบบโครงร่างแข็ง เป็นหุ่นยนต์บริการชนิดสวมใส่ ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพหรือขยายกำลัง ศักยภาพในการเคลื่อนไหวของผู้สวมใส่ ด้วยวิธีการควบคุมแบบเสริมแรง ทำให้ออกแรงได้เกินขีดจำกัดของมนุษย์ดังรูปที่ 2.3 หรือใช้สำหรับผู้มีร่างกายอ่อนแรง [5][11][12]



รูปที่ 2.3 Exoskeleton Robot

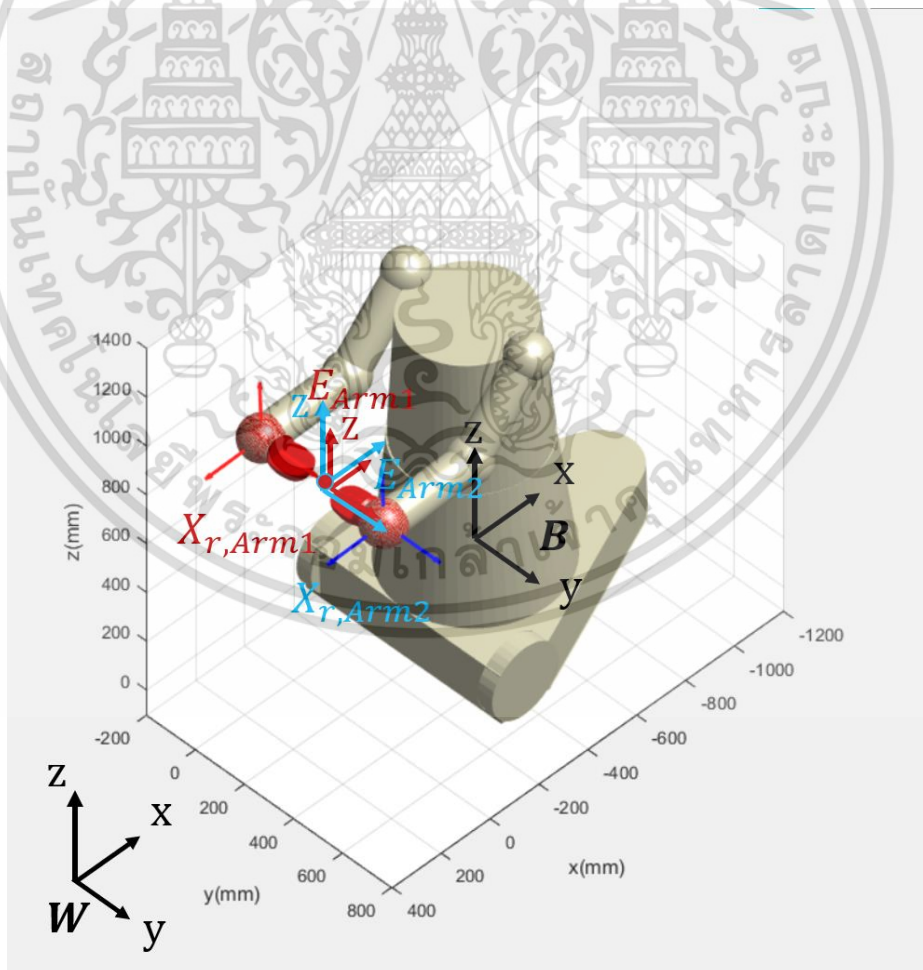


รูปที่ 2.4 Rehabilitation Robot [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2. การควบคุมระบบแขนกลบนหุ่นยนต์บริการ

ระบบควบคุมแขนกลที่ได้มีการออกแบบบนพื้นที่ปฏิบัติการ (Operational Space) จากอิทธิพลแรงภายนอกจาก แรงดึงสู่เป้าหมาย ผลักหลบสิ่งกีดขวาง และแรงโน้มถ่วง มาประมวลผลให้ได้พิกัดของแขนกลสำหรับการเคลื่อนไหว สำหรับหุ่นยนต์บริการที่มีการเคลื่อนที่ไปด้วยการรับรู้การเอียงของหุ่นที่ได้จากการเซนเซอร์ความเร่งที่ติดตั้งภายในตัวหุ่นยนต์บริการจะเป็นอีกกระบวนการที่เพิ่มเติมเข้าไปให้ระบบควบคุมแขนกลคู่สามารถระบอการถือสิ่งของไม่ให้ตกหล่นได้ โตรระบบจะต้องมีการได้มีการแยกระบบพิกัดฉากของแขนกลออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ จลศาสตร์ของหุ่นยนต์บริการติดแขนกล และระบบพิกัดของหุ่นยนต์ ในส่วนนี้เป็นการแสดงรายละเอียดระบบพิกัดที่ได้ดังรูปที่ 2.4 โดยวิธีที่ง่ายและสะดวกในการควบคุมจะทำการแบ่ง ระบบพิกัดแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ $\{W\}$ แทนด้วยระบบพิกัดของสิ่งแวดล้อมที่ตั้งฉากกับแนวระนาบโลก $\{B\}$ แทนด้วยระบบพิกัดของตัวชุดล้อเลื่อนที่มีการรับรู้จากตัวเซนเซอร์วัดการเอียง $\{E_1\}$ แทนด้วยระบบพิกัดของปลายแขนกลข้างซ้าย และ $\{E_2\}$ แทนด้วยระบบพิกัดของปลายแขนกลข้างขวา



รูปที่ 2.5 รายละเอียดระบบพิกัดหุ่นยนต์บริการติดแขนกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1. ระบบพิกัดจลนศาสตร์แบบก้ำวหน้า

ระบบพิกัดจลนศาสตร์แบบก้ำวหน้าของหุ่นยนต์ (Forward Kinematics) คือ การประมวลระบบพิกัดของหุ่นยนต์รูปแบบฟังก์ชัน จากตัวแปร θ_d เป็นชุดเวกเตอร์มุมของข้อต่อหุ่นยนต์อยู่ในรูปของ Joint Space เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของการอ้างอิงบน Operational Space แบบต่อจุดต่อ ๆ โดยเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์โฮโมจีเนียสทรานส์ฟอร์มเมชันเมตริกซ์ขนาด 4×4 ที่แสดงข้อมูลของข้อต่อแต่ละส่วน ประกอบด้วยเวกเตอร์ของตำแหน่ง (Position Vector) $\vec{p} = [p_x \ p_y \ p_z]^T$ และ เมตริกซ์ของการหมุน (Rotation Matrix) $R = [n \ o \ a]_{3 \times 3}$ รวมเข้าไว้ด้วยกัน โดยแบ่งออกเป็น แขนซ้ายและขวา (Arm) นิยามไว้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 X_{r,Arm} &= f(\vec{\theta}_d) \\
 &= \prod_B^E T_{Arm} \\
 &= \begin{bmatrix} R_B^{1,Arm} & \vec{p}_B^{1,Arm} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1^{2,Arm} & \vec{p}_B^{2,Arm} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} R_6^{E,Arm} & \vec{p}_6^{E,Arm} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

เมื่อ

f คือ ระบบพิกัดจลนศาสตร์แบบก้ำวหน้า (Forward Kinematics)

$\vec{\theta}_d$ คือ มุมของข้อต่อหุ่นยนต์ บน Joint Space

$\prod_B^E T_{Arm}$ คือ ระบบตำแหน่งพิกัดแขนกล (Robot Arm Coordinate System)

T_{Arm} คือ เมตริกซ์เปลี่ยนรูป (Transformation Matrix)

2.2.2. ระบบเมตริกซ์เปลี่ยนรูป

การเปลี่ยนจากมุมของข้อต่อ (Joint Space) ของแขนกลไปเป็นระบบพิกัดเชิงเส้น (Cartesian Space) จากระบบพิกัดจากฐานไปสู่ปลายแขนโดยนับข้อต่อที่ $i - 1$ ไปยังข้อต่อ i ส่วน

ถ้าไปเป็นแบบอนุกรม สามารถแสดงระบบสมการได้ในรูปแบบของระบบเมตริกซ์เปลี่ยนแปลง (Transformation Matrix) จากได้ดังนี้

$$T_{i-1}^i = Tran(x, y, z) \cdot Rot(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$$

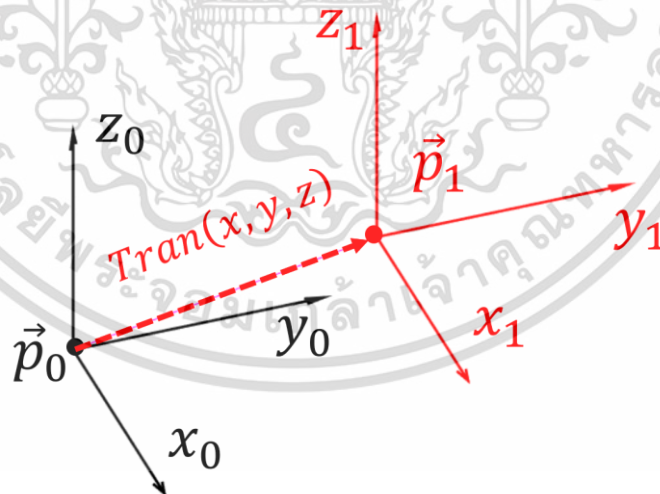
โดยที่ $Tran(x, y, z)$ คือ เมตริกซ์การเลื่อนพิกัดตามแนวแกน (Translation Matrix)

$Rot(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ คือ เมตริกซ์การหมุน (Rotation Matrix)

$Tran(x, y, z)$ คือ เมตริกซ์ที่แทนสมบัติของการเลื่อนพิกัดตามแนวแกน 3 มิติ ดังรูปที่ 2.6 แสดงการเลื่อนพิกัดตามแนวแกนแทนด้วยเวกเตอร์ $\vec{p} = [p_x \ p_y \ p_z]^T$ เรียกว่าเวกเตอร์ตำแหน่ง (Position Vector) และค่าความแตกต่างของเวกเตอร์ตำแหน่ง $\Delta\vec{p}$ จะเป็นเวกเตอร์ระยะขจัด (Displacement)

การเคลื่อนที่จากตำแหน่งอ้างอิงเริ่มต้น \vec{p}_0 ไปยังตำแหน่งอ้างอิงต่อไปบนปริภูมิ \vec{p}_1 โดยแสดงความสัมพันธ์ โดยสมการการเลื่อนพิกัดตามแนวแกนได้ดังนี้

$$Tran(x, y, z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



รูปที่ 2.6 แสดงการเลื่อนพิกัดตามแนวแกน

เมตริกซ์การหมุน (Rotation Matrix) เขียนแทนด้วย $Rot(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ เป็นเมตริกซ์ที่เรียงเวกเตอร์ที่มีความยาว 1 หน่วยของแกน x y z ไว้ด้วยกันและทำการหมุนเมตริกซ์แกนทั้ง 3 รอบแกนใดแกนหนึ่ง ดังรูปที่ 2.7 แทนด้วย จากการหมุนรอบแนวแกนอ้างอิงเริ่มต้นใด ๆ เมื่อมีการหมุน ส่งผลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

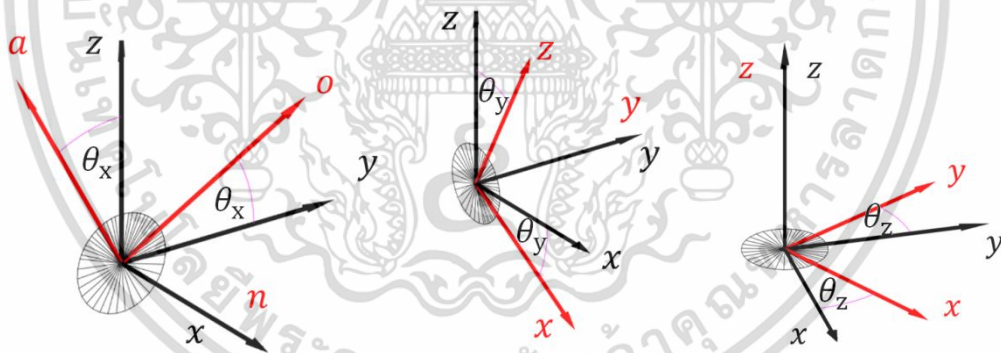
ให้แกนอ้างอิงเปลี่ยนไปเป็นอีกแกน เมื่อมีจุดกำเนิดร่วมกัน ให้เวกเตอร์ที่จุดใด ๆ บนพิกัดเริ่มต้นและต่อไป R_{i-1}, R_i ตามลำดับ โดย $R \in SO(3)$ คือ Special Orthogonal Group สมการการหมุนรอบแนวแกนที่ x, y, z สามารถแสดงได้ ดังนี้

$$Rot(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) & 0 \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot(\theta_y) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \sin(\theta_y) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot(\theta_z) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & \sin(\theta_z) & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

โดยสมการการหมุน



รูปที่ 2.7 แสดงการหมุนรอบแนวแกนที่ x, y, z

จากสมการข้างต้นจะแสดงระบบพิกัดของแขนกลหลายแกนองศาอิสระเขียนได้เป็น

$$T_0^1 = Tran(x, y, z)$$

$$T_0^i = T_0^1 T_1^2 T_2^3 \dots T_{i-1}^i$$

ถ้ากำหนดให้ฐานของแขนกลเป็น B (Base) และ ปลายแขนกลเป็น E (End-Effector)

สามารถเขียนสมการกลศาสตร์ไปข้างหน้าได้เป็น

$$T_B^{E,Arm} = T_B^1 T_1^2 \dots T_n^{E,Arm}$$

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

$$T_B^{E,Arm} = \begin{bmatrix} \vec{n} & \vec{o} & \vec{a} & \vec{p}_B^E \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

เมื่อ

- T_{i-1}^i คือ เมตริกซ์การเปลี่ยนแปลง ระบบพิกัดข้อต่อที่ $i - 1$ ไปยังข้อต่อ i ส่วน
- \vec{p}_{i-1}^i คือ ระยะขจัดของพิกัดข้อต่อที่ $i - 1$ ไปยังข้อต่อ i ส่วน
- \vec{p}_B^i คือ ระยะขจัดของพิกัดฐานหุ่นยนต์บริการที่ B ไปยังข้อต่อ i ส่วน

2.2.3. ระบบจลนศาสตร์แบบผังกลับของหุ่นยนต์

ระบบพิกัดจลนศาสตร์แบบผังกลับของหุ่นยนต์ (Reverse Kinematics) [18]–[20] ตำแหน่งเชิงเส้นของแขนกล (Cartesian Space) จะถูกคำนวณกลับไปเป็นตำแหน่งมุมในแต่ละข้อต่อในรูปของเชิงมุม θ_d (Joint Space) โดยใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ ตรีโกณมิติ เป็นพื้นฐานผนวกกับการควบคุมเชิงคำนวณอย่างฟuzzyโลจิก โครงประสาทเทียม ปัญญาประดิษฐ์ เป็นต้น แต่ปัญหาของระบบพิกัดจลนศาสตร์แบบผังกลับคือคำตอบที่ไม่เป็นเอกฐาน (Non-Singular) ทำให้คำตอบของมุมที่เกิดขึ้นบนข้อต่อสามารถมีได้หลายท่าทาง (Kinematic Redundancy) ตัวอย่างแขนกลแบบ 4 ข้อต่อ ดังรูปที่ 2.8 นักวิจัยหลาย ๆ ท่านแก้ไขโดยลดท่าทาง หรือกำหนดขอบเขตค่าเปลี่ยนแปลงมุม (Joint Jurk Limit) ของแต่ละข้อต่อ เพื่อให้ได้ท่าทางตามที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมหุ่นยนต์



รูปที่ 2.8 แสดงทำซ้อนจากการทำจลศาสตร์แบบย้อนกลับ [19]

2.2.4. ระบบพลศาสตร์แขนกล

ระบบพลศาสตร์แขนกล (Dynamics of Manipulator) จากความสัมพันธ์ความเร็วเชิงมุมของแต่ละข้อต่อ θ บน Joint Space เปลี่ยนอยู่ในรูปของความเร็วที่ปลายแขนกล v อยู่บน Cartesian Space หรือทางกลับกัน โดยความเร็วเชิงเส้นประกอบไปด้วย ความเร็วเชิงเส้นและเชิงมุมของมุมบิดของข้อมือ โดยสามารถเขียนได้เป็น

$$v = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \begin{bmatrix} \dot{p}_x \\ \dot{p}_y \\ \dot{p}_z \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix}$$

โดยเป็นอนุพันธ์ของตำแหน่งของแขนกลต่อเวลาโดยแบ่งเป็น Position บนแกน $x y z$ และ Orientation ของปลายแขนรอบแกน $x y z$ เรียก pitch roll และ yaw โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุมของข้อต่อได้จากการใช้ $J(\theta)$ เมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian Matrix) ขนาด $(m \times n)$ โดยที่ m คือจำนวนข้อต่อของแขนกล และ n คือจำนวนแกนองศาอิสระของระบบแขนกล สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$v = J(\theta)\dot{\theta}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_x \\ \dot{p}_y \\ \dot{p}_z \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = J(\theta)\dot{\theta}$$

โดยที่

- θ_i คือ ตำแหน่งมุมข้อต่อลำดับที่ i
- $\dot{\theta}_i$ คือ ความเร็วเชิงมุมข้อต่อลำดับที่ i
- p_i คือ ตำแหน่งเชิงเส้น ลำดับที่ i
- v คือ ความเร็วปลายแขนกล
- γ คือ มุมที่ปลายแขนกล ในแนวแกน x (Pitch)
- β คือ มุมที่ปลายแขนกล ในแนวแกน y (Roll)
- α คือ มุมที่ปลายแขนกล ในแนวแกน z (Yaw)

เมตริกซ์จาโคเบียน คือ สามารถจัดระเบียบการคำนวณของปลายแขนหุ่นยนต์ที่ใช้ทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 แบบ ดังตารางความสัมพันธ์เชิงความเร็วของข้อต่อนี้

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} \vec{z}_1 \times \vec{r}_1^E & \vec{z}_2 \times \vec{r}_2^E & \vec{z}_3 \times \vec{r}_3^E & \vec{z}_4 \times \vec{r}_4^E & \dots & \vec{z}_m \times \vec{r}_m^E \\ \vec{z}_1 & \vec{z}_2 & \vec{z}_3 & \vec{z}_4 & \dots & \vec{z}_m \end{bmatrix}$$

\vec{z}_i คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector) เลือกแกนอ้างอิงหมุน ลำดับที่ i

$$\vec{z}_i = \begin{cases} \vec{n}_i ; \text{rotation around } x \text{ axis} \\ \vec{o}_i ; \text{rotation around } y \text{ axis} \\ \vec{a}_i ; \text{rotation around } z \text{ axis} \end{cases}$$

และ \vec{r}_i^E เป็นเวกเตอร์ระยะขจัดจากข้อต่อที่ i ซึ่งไปยังปลายแขนของแขนกลซึ่งได้จากผลต่างของเวกเตอร์กำหนดตำแหน่งข้อต่อ

$$\vec{r}_i^E = \vec{p}_B^E - \vec{p}_B^i$$

สำหรับเมตริกซ์จาโคเบียนแบบไม่สมมาตร หรือ ($m \neq n$) มีการใช้เมตริกซ์ส่วนกลับตรงจะไม่สามารถควบคุมบนปลายแขนกลได้ ทำส่วนกลับของสมการได้ ดังนั้นการหาเมตริกซ์จาโคเบียนจะต้องใช้ เมตริกซ์ส่วนกลับเทียม (Pseudo Inverse Matrix) เพื่อที่จะทำให้การควบคุมบนปลายแขน

กลยังสามารถทำได้ โดยรายละเอียดของเมตริกซ์ส่วนกลับสามารถใช้ความสัมพันธ์แบบ Moore–Penrose Inverse [12], [21] ดังนี้

ตารางที่ 2.1 เมตริกซ์ส่วนกลับเทียม

Moore–Penrose inverse	สมการ
Over-Determined Problem ($m > n$)	$J^+ = (J^T J)^{-1} J^T$
Square ($m = n$)	$J^+ = J^{-1}$
Under-Determined Problem ($m < n$)	$J^+ = J^T (J J^T)^{-1}$

2.2.5. การควบคุมพิกัดที่ปลายแขนกลด้วยจาโคเบียน

ระบบพิกัดและจาโคเบียนข้างต้นเป็นวิธีควบคุมแขนกล เพื่อลดความซับซ้อนบนระบบควบคุมแขนกล [15]–[17] การควบคุมตำแหน่งจากงานที่ต้องการไปเป็นแผนการควบคุมมุมในแต่ละข้อต่อของแขนกลสามารถใช้สมการจาโคเบียน

$$v = J(\theta)\dot{\theta}$$

จากนั้นนำมาจัดให้อยู่ในรูปของ Inverse Linear Transformation

$$\dot{\theta} = J^{-1}(\theta) \cdot v$$

จากสมการส่งข้อต่อสำหรับการควบคุมตำแหน่งปลายแขนกล v จากปัจจัยภายนอกให้สามารถหาการเคลื่อนที่ความเร็วเชิงมุมของข้อต่อแขนกล $\dot{\theta}$ ได้และสามารถอินทิเกรทกลับไปเป็นตำแหน่งมุมของข้อต่อได้จาก

$$\theta = \int \dot{\theta} dt$$

หรือ เมื่อใช้เป็นคอมพิวเตอร์เช่นเนลอินทิเกรท

$$\theta = \theta_0 + \dot{\theta}\Delta t$$

2.3. พลวัตกรรมทางกลศาสตร์ของแขนกล

2.3.1. แรงขับ

แรงขับ (Driving Force) ที่เกิดขึ้นใน Joint Space เป็นแรงบิด τ_{dis} ที่มีข้อจำกัดทางกลของแขนกล [22]–[24] แสดงให้เห็นว่ามีผลต่อความแม่นยำของปลายแขนกลเมื่อควบคุมด้วยแรง เนื่อง

ด้วยปัจจัยของแรงเสียดทานข้อต่อ [23] แรงกระทำภายนอก ซึ่งทำให้ระบบควบคุมจะทำให้ปลายแขนเคลื่อนไปยังตำแหน่งและมุมที่ต้องการและมีความแม่นยำได้

$$\vec{\tau}_{dis} = [\tau_{dis,1} \quad \tau_{dis,2} \quad \tau_{dis,3} \quad \tau_{dis,4} \quad \tau_{dis,5} \quad \tau_{dis,6}]^T$$

การกำหนดรูปแบบแรงขับแบบดึงปลายแขนกลโดยกำหนดเป็นเวกเตอร์แรงภายนอกสำหรับปลายแขนกล $\vec{F}_e = [f_{e,x} \quad f_{e,y} \quad f_{e,z} \quad \tau_{e,\gamma} \quad \tau_{e,\beta} \quad \tau_{e,\alpha}]^T$ โดยแรงภายนอกที่กระทำจากสิ่งแวดล้อม $\vec{F}_r = [f_{r,x} \quad f_{r,y} \quad f_{r,z} \quad \tau_{r,\gamma} \quad \tau_{r,\beta} \quad \tau_{r,\alpha}]^T$ โดยนำไปคิดกับจลศาสตร์ของแขนที่มีท่าทางการบิดงอบนระบบพิกัดแขนกลในรูปของ J (Jacobian Matrix) และให้ผลลัพธ์เป็นแรงบิดกระทำต่อข้อต่อ $\vec{\tau}_{dis}$ ดังสมการ

$$\vec{\tau}_{dis} = J^{-1}(\vec{F}_e + \vec{F}_r)$$

เมื่อ

- $\vec{\tau}_{dis}$ คือ แรงที่เกิดขึ้นบนข้อต่อ
- \vec{F}_e คือ แรงกระทำที่ปลายแขนกลเพื่อขับเคลื่อนแขนกล
- \vec{F}_r คือ แรงกระทำจากภายนอกบน Operation Space

2.3.2. การควบคุมทางพลวัตของแขนกล

ในการควบคุมทางพลวัตของแขนกล เป็นการอธิบายการเคลื่อนไหวของแขนกล ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมหุ่นยนต์ เป็นความสัมพันธ์ของการออกแรงบิดในข้อต่อแต่ละข้อจากแรงบน Operational Space ผ่านการเคลื่อนที่ของมวลแขนกลบนแรงโน้มถ่วงและแรงเหวี่ยง ซึ่งสมการทางพลวัตที่ใช้ในแขนกลทั้งระบบสามารถเขียนสมการในรูปของ State Space Dynamic Equation ได้เป็น

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \vec{\tau}$$

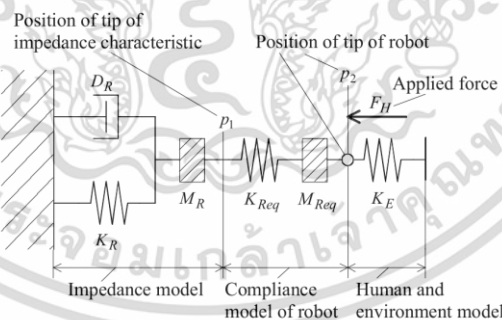
เมื่อ

- $M(\theta)$ คือ เมตริกซ์ของมวลแขนกลบน Joint Space
- $C(\theta, \dot{\theta})$ คือ เมตริกซ์ของแรงเข้าสู่ (Centripetal) ศูนย์กลางและแรงโคริออริส (Coriolis Force) บน Joint Space
- $G(\theta)$ คือ เมตริกซ์ของแรงโน้มถ่วงของโลก Joint Space (Gravitational)

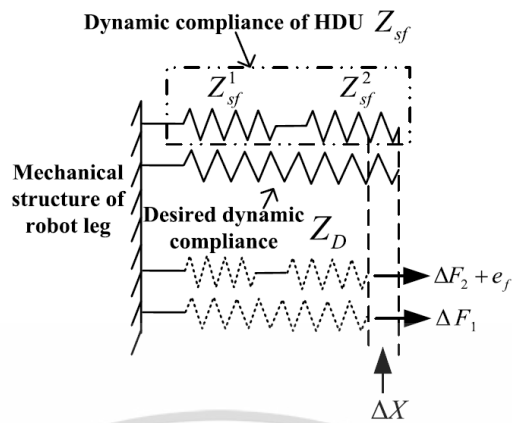
- θ คือ ตำแหน่งเชิงมุม
- $\dot{\theta}$ คือ ความเร็วเชิงมุมของแขนกล

2.4. ผลกระทบของแรงต่อการควบคุมตำแหน่ง

ระบบการควบคุมตำแหน่งของแขนกลเป็นการกำหนดตำแหน่งมุมของข้อต่อทุกข้อต่อให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ในท่าทางที่กำหนด การควบคุมผ่านชุดควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ภายในข้อต่อของแขนกลได้มีการช้อนการควบคุมด้วยรูปแบบของอิมพีแดนซ์และระบบแรงกระทำกับหุ่นยนต์เช่นใน [25] ได้ออกแบบการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์แผนภาพดังรูปที่ 2.10 สำหรับขาหุ่นยนต์ให้มีความแม่นยำเพิ่มขึ้นในการควบคุมตำแหน่งโดยใช้การปรับค่า z_d เพื่อปรับพฤติกรรมปัจจัยจาก Mechanical Compliance ที่ประกอบด้วยมวลแขนกลและแรงเสียดทานจากของจริงที่มีค่าเฉพาะตัว z_{sf} ในแขนกลทำให้ระบบควบคุมแบบอิมพีแดนซ์นั้นไม่เกิดความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่ง เวลาการประมวลผลนั้นมีผลต่อความแม่นยำในพฤติกรรมทางกลของแขนกลดังแสดงใน [26] และได้มีการวิจัยในปัจจัยของมวล สปริง ความหน่วง ของแรงที่เกิดขึ้นในแขนกลที่ทำงานร่วมกับมนุษย์สามารถแสดงดังรูปที่ 2.9 เพื่อศึกษาและจัดการปัจจัย ในส่วนของน้ำหนักตัวหุ่นยนต์และแรงเสียดทาน ส่วนใน [27] ได้สรุปไว้ว่าแรงปัจจัยรบกวนจาก $M(\theta), C(\theta, \dot{\theta}), \bar{F}_e, \bar{F}_r$ ซึ่งเป็นปัจจัย 3 ส่วนหลักคือ ส่วนของอิมพีแดนซ์ ส่วนของคอมไพลแอนท์ มวลและสปริงในระบบควบคุม และ ส่วนของคอนและสิ่งแวดล้อมที่เป็นปัจจัยภายนอกที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์



รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงปัจจัยในการควบคุมแขนกล [27]



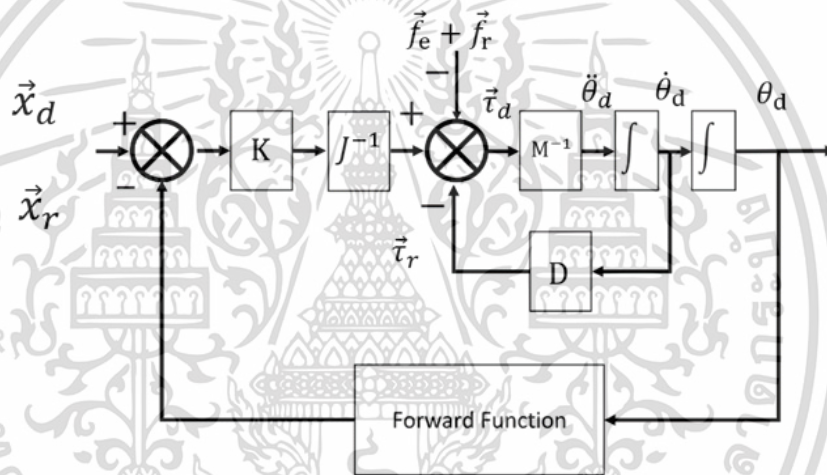
รูปที่ 2.10 แผนการกำหนดปัจจัยเฉพาะตัวทางในหุ่นยนต์แบบขา [25]

2.4.1. ระบบควบคุมปลายแขนกล

โดยทั่วไปในงานวิจัยระบบควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ที่เป็นวิธีการควบคุมด้วยแรงให้มีการออกแรงอย่างเหมาะสมกับปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมหรือการชนกับสิ่งกีดขวาง หรือปัจจัยที่มาจากผู้ใช้งานที่ต้องทำงานร่วมกัน [10] (Human-Robot Cooperation) หรือ แขนกลกับแขนกลที่ทำงานร่วมกันเอง [4] (Robot-Robot Cooperation) และการควบคุมด้วยแรงช่วยขยายความสามารถของมนุษย์ [11] [12] หุ่นยนต์แบบสวมใส่ (Exoskeleton Robots) หรือใช้หุ่นยนต์ในการฟื้นฟูสมรรถภาพ (Rehabilitation Robots) [5] ทำงานแทนมนุษย์งานขัดชิ้นงาน [2] หรือติดตั้งผนัง [3] และงานสำหรับการรับส่งสิ่งของ [13] ก็มีการนำเอาระบบแรงเข้ามาประยุกต์ใช้

การควบคุมตำแหน่งปลายแขนกลภายใต้พื้นที่การปฏิบัติงาน (Operational Space) มีหลากหลายกระบวนการตั้งแต่การกำหนดเส้นทางแบบ c-space ที่แปลงสภาพแวดล้อมให้อยู่ในรูปของพื้นที่ทำงานของข้อต่อ (Joint-Space) หรือ การวางแผนการเคลื่อนที่ด้วยสนามพลังงานศักย์ (Potential Field) หรือ การวางแผนการเคลื่อนที่ด้วยการอพติไมซ์ ในงานวิจัยนี้นำเอากระบวนการควบคุมอิมพีแดนซ์ของแขนกลด้วยแรงมาใช้ผนวกเข้ากับระบบสมมุติสปริงค์ ให้กับแขนกลทั้งสองโดยกำหนดระยะขจัดระหว่างของตำแหน่งปลายแขนให้เป็นเวกเตอร์ระยะขจัดคงที่ที่ทำให้มุมและระยะไม่เปลี่ยนแปลง มากำหนดตำแหน่งและมุมปลายแขนปัจจุบันกับเป้าหมายที่ต้องการไปถึงคูณเข้ากับค่าเกรน K ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าความแข็งของตัวสปริงค์สมมุติจะให้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าแรงใน Operation Space ก่อนที่จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแรงบิดของข้อต่อใน Joint Space ด้วยการคูณกับส่วนกลับของเมตริกซ์จาโคเบียน ดังนั้นการใช้ $K(\hat{x}_d - \hat{x}_r)$ จึงทำให้เกิดเป็นหลักการของสมมุติสปริงค์ (Virtual Spring)

ในกระบวนการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ด้วยแรงและสมมุติสปริงค์ ได้ถูกนำมาใช้ในการควบคุมพฤติกรรมทางไดนามิกของแขนกลคู่ โดยกำหนดแรงภายใน \vec{r} กับแรงเสียดทานข้อต่อแขนกล \vec{f}_r และเวกเตอร์แรงภายนอกจากสิ่งแวดล้อม \vec{f}_e สำหรับการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ของแขนกล โดยการควบคุมแบบอิมพีซิซึมอิมพีแดนซ์ (Implicit Impedance Control) เป็นวิธีการควบคุมปลายแขนกลคู่ โดยใช้แรงภายนอกแบบเปิดลูป ที่ ข้อต่อต้องมีแรงและความแม่นยำสูง จำเป็นต้องนึกถึงประสิทธิภาพการส่งผ่านแรงให้ตัวข้อต่อแขนกล โดยจะสามารถทำให้ระบบมีความแม่นยำสามารถละลายการคำนวณแรงเสียดทานบนข้อต่อได้จะต้องมีระบบประมวลผลกลางที่รวดเร็ว (Backdrivability) โดยมีแรงเสียดทาน (Friction) ได้ [26], [28] สามารถแสดงแผนภาพไดอะแกรมได้ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภาพการควบคุมอิมพีแดนซ์ของแขนกลแบบอิมพีซิซึม

กระบวนการควบคุมอิมพีแดนซ์ เมื่อแขนกลมีการทำงานประสานกันและมีแรงกระทำจากภายนอกจากสิ่งแวดล้อม \vec{f}_e จะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = J^{-1}K(\vec{x}_d - \vec{x}_r) - M\ddot{\theta}_d - D\dot{\theta}_d - \vec{f}_r - \vec{f}_e$$

โดยในส่วนของซ้ายของสมการคือสมการพลวัตของแขนกล (Robot Arm Dynamics Equation)

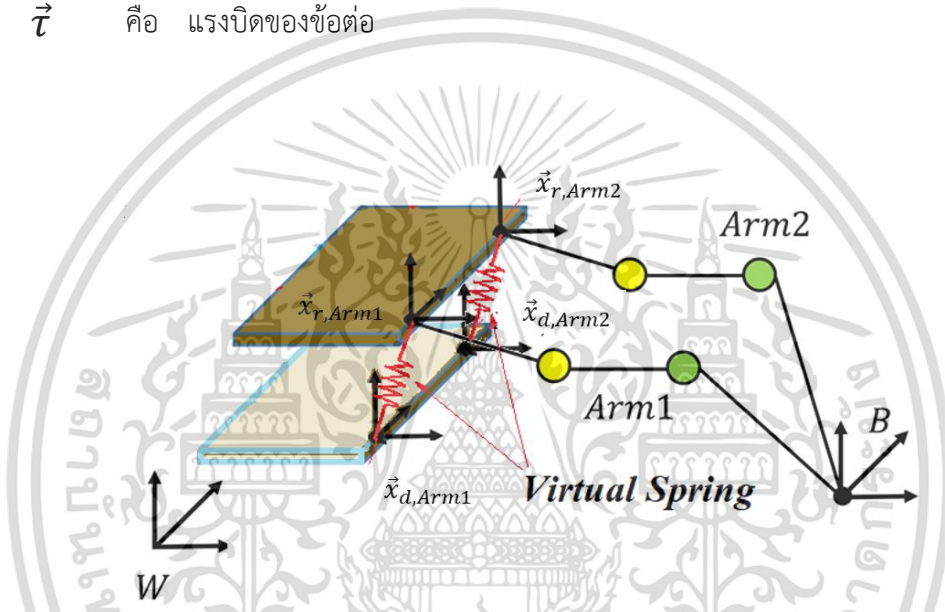
$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \vec{\tau}$$

และทางขวาของสมการคือแรงควบคุมและแรงทั่วไปที่เป็นปัจจัยในระบบ

$$\vec{\tau} = J^{-1}K(\vec{x}_d - \vec{x}_r) - M\ddot{\theta}_d - D\dot{\theta}_d - \vec{f}_r - \vec{f}_e$$

โดยที่ $\vec{x}_{r,Arm}$ ที่เป็นตัวตำแหน่งพิกัดปัจจุบันของปลายแขนกล (End-Effector's Current Position) ที่ได้จากฟังก์ชันเดินหน้าของ (Forward Function) ของแขนกล โดยเมื่อ

- M** คือ เมตริกซ์ของมวลของแขนกล
- K** คือ ค่าความแข็งของสมมุติสปริงค์ (Virtual Spring Stiffness)
- D** คือ ค่าความหนืด บน Joint Space
- \vec{f}_r คือ แรงเสียดทานรบกวนของเซอร์โวมอเตอร์
- \vec{f}_e คือ แรงรบกวนของข้อต่อจากสิ่งแวดล้อม
- $\vec{\tau}$ คือ แรงบิดของข้อต่อ



รูปที่ 2.12 ภาพแสดงการควบคุมปลายแขนกลด้วยสมมุติสปริงค์

2.4.2. การควบคุมปลายแขนกลด้วยสมมุติสปริงค์ (Virtual Spring)

$\vec{x}_d - \vec{x}_r$ เป็นการกำหนดระยะกระจัดบนพื้นที่ปฏิบัติการทั้ง 6 แกนอิสระ (6DOF Operational Space) ระหว่างตำแหน่งเป้าหมายของปลายแขนกล \vec{x}_d และตำแหน่งปัจจุบันของแขนกล \vec{x}_r และแปลงไปเป็นตำแหน่งภายใต้ Joint Space ด้วยเมตริกจาร์โคเบียนผกผัน หลังจากกำหนดค่าแรงขับแปรผันกับระยะขจัดแบบเชิงเส้นด้วยค่า K ทำให้ได้แรงบิดให้กับข้อต่อแต่ละตัว โดยแรงบิดจะก่อให้เกิดการหมุนของข้อต่อไปยังตำแหน่งส่งผลทำให้ปลายแขนขยับเข้าหาจุดเป้าหมายที่กำหนดโดยสมการพลวัตบน Joint Space

โดยกำหนดนิยามให้กับระยะขจัดระหว่างตำแหน่งปลายแขนที่เป้าหมายและตำแหน่งปัจจุบันของแขนกลได้เป็น

$$\vec{x}_{d,Arm} - \vec{x}_{r,Arm} = \begin{bmatrix} \Delta p_x \\ \Delta p_y \\ \Delta p_z \\ \Delta \alpha \\ \Delta \rho \\ \Delta \varphi \end{bmatrix}$$

ให้สามองค์ประกอบบนเป็นระยะขจัดบนตำรที่เขียน

$$\begin{bmatrix} \Delta p_x \\ \Delta p_y \\ \Delta p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{x,d} - p_{x,r} \\ p_{y,d} - p_{y,r} \\ p_{z,d} - p_{z,r} \end{bmatrix}$$

และสามองค์ประกอบล่างเป็นผลการครอสเวกเตอร์ขององศาหมุนบิดเป้าหมายกับองศาหมุนบิดปัจจุบันของปลายแขน

$$\begin{bmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta \rho \\ \Delta \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{x,d} \times \mathbf{a}_{x,r} \\ \mathbf{a}_{y,d} \times \mathbf{a}_{y,r} \\ \mathbf{a}_{z,d} \times \mathbf{a}_{z,r} \end{bmatrix}$$

โดยที่ เวกเตอร์ \vec{a}_d คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวแกน Z ซี่ขึ้นของระบบพิกัดปลายแขนที่ต้องการให้ชี้ขึ้นตลอดเวลาเพื่อรักษาระดับสิ่งของที่ถือให้อยู่ในแนวราบเสมอ จากนั้นสมการที่ได้มาเขียนให้อยู่ในรูปของจลศาสตร์ของการควบคุมที่ปลายแขน ทั้งในแนวเชิงเส้นและเชิงมุมแสดงในรูปของสปริงจำลองได้ดังนี้

$$\mathbf{K}(\vec{x}_{d,Arm} - \vec{x}_{r,Arm}) = \begin{bmatrix} K_p \\ K_o \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (\vec{p}_{d,Arm} - \vec{p}_{r,Arm}) \\ (\vec{a}_{d,Arm} \times \vec{a}_{r,Arm}) \end{bmatrix}$$

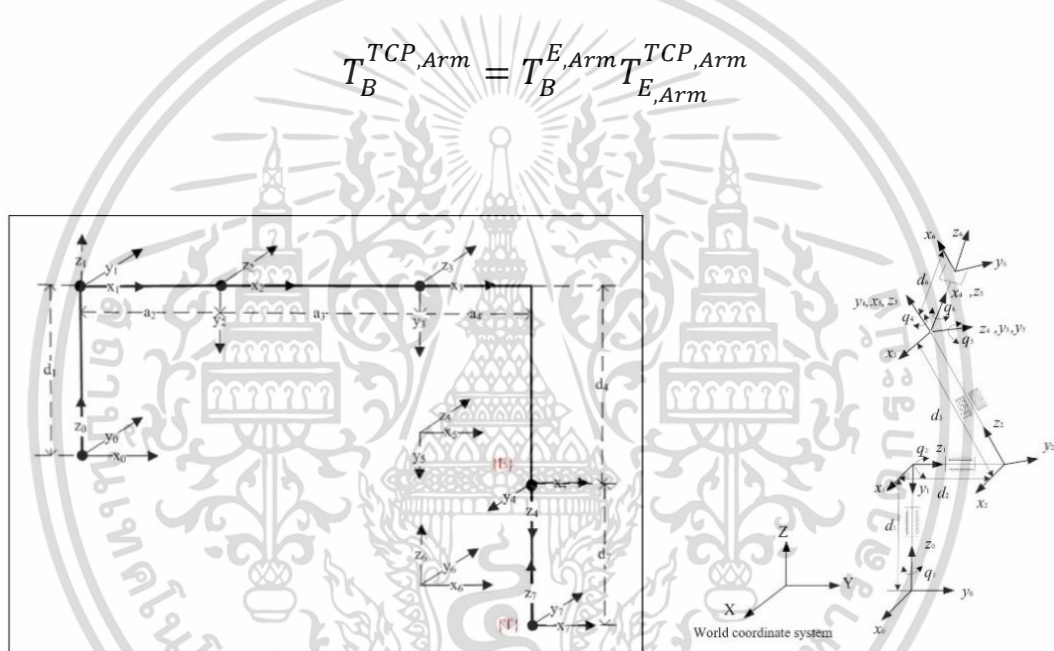
$$\mathbf{K}(\vec{x}_{d,Arm} - \vec{x}_{r,Arm}) = \begin{bmatrix} K_p (\vec{p}_{d,Arm} - \vec{p}_{r,Arm}) \\ K_o (\vec{a}_{d,Arm} \times \vec{a}_{r,Arm}) \end{bmatrix}$$

เมื่อกำหนดให้ K_p คือค่าความแข็งของสปริงคสมมุติแรงดึง และ K_o คือค่าความแข็งของสปริงคสมมุติแรงบิด

2.4.3. การปรับตั้งค่าจุดกึ่งกลางอุปกรณ์

ปรับตั้งค่าจุดกึ่งกลางอุปกรณ์ (Tool Center Point หรือ TCP) [15] เป็นการปรับตั้งค่าของระบบควบคุมปลายแขน วิธีการปรับตั้งค่าจุดกึ่งกลางอุปกรณ์ ในการใช้กับเมตริกซ์จาโคเบียน ที่กล่าวมาข้างต้นมีการควบคุมที่ข้อมือ $T_B^{E,Arm}$ ส่งผ่านการควบคุมค่าตำแหน่งและมุมไปยังจุด $T_{E,Arm}^{TCP,Arm}$ เพื่อเพิ่มความความแม่นยำของแขนกล

งานวิจัยที่ผ่านมาอย่าง [17] [16] ได้ให้ความสำคัญกับปรับตั้งค่าจุดกึ่งกลางอุปกรณ์ ต่อการวิเคราะห์ความแม่นยำสำหรับแขนกลในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม และในระบบพิกัดสำหรับการควบคุมสำหรับตัวอย่างงานวิจัยในตัวอย่าง ดังรูปที่ 2.13 แสดงสมการได้ดังนี้



รูปที่ 2.13 6DOF Manipulator [17]และ Stanford Manipulator[16]

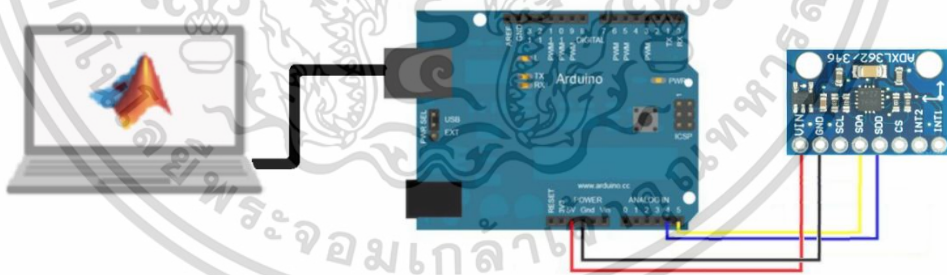
การนำแขนกลไปประยุกต์ใช้งานได้ดี จำเป็นต้องรู้พฤติกรรมทางไดนามิกของแขนกล เพื่อควบคุมการเคลื่อนไหวของปลายแขนกล ใน Operational Space เกิดจากการออกแรงบิดของข้อต่อแบบจุดต่อจุด (Torque) การวิเคราะห์รูปแบบของแรงที่เกิดในระบบแขนกล โดยในงานวิจัยนี้กำหนดกึ่งกลางของอวกาศที่ถือเป็นตำแหน่งของจุดกึ่งกลางอุปกรณ์ของแขนทั้งสองข้าง การรักษาระดับของระบบพิกัดปลายแขนณจุดกึ่งกลางเป็นเป้าหมายของงานวิจัยนี้

2.5. การตรวจจับความเอียงของฐานเคลื่อนที่

ในหุ่นยนต์บริการที่เป็นแขนกลติดตั้งบนฐานเคลื่อนที่ เมื่อตัวหุ่นเคลื่อนที่ไปตามทางที่มีความลาดเอียงหรือระดับไม่เท่ากันทำให้ตัวหุ่นเอียงไปมา การวัดค่าความเอียงของฐานเพื่อเป็นปัจจัยที่ใช้ชดเชยตำแหน่งให้ปลายแขนกลรักษาองศาระดับปลายแขนเพื่อไม่ให้สิ่งของที่ถืออยู่ยังคงระดับและองศาไว้ การใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง (Acceleration Sensor) ถูกนำมาใช้วัดค่าแรงโน้มถ่วง ในงานวิจัยนี้ใช้เซนเซอร์ ADXL346 วัดความเร่ง 3 แกน ให้อยู่ในรูปของข้อมูลเชิงตัวเลขได้ โดยสัญญาณรบกวนนั้นเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบการควบคุม การกรองสัญญาณรบกวนจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อระบบเพื่อที่จะทำให้อุปกรณ์ควบคุมมีประสิทธิภาพดีและมีความราบรื่น โดยตัวกรองที่จะนำมาใช้ในการกรองสัญญาณรบกวน คือ ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) [29]–[31] ตัวกรองในรูปแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ให้อยู่ในรูปแบบที่ตัดสัญญาณรบกวนทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความราบเรียบมากขึ้นจากเดิมจากสมการมีความหมาย

2.5.1. เซนเซอร์ ADXL346

เซนเซอร์ ADXL346 เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดความเร่ง 3 แกน ที่ให้ความละเอียดของค่าการวัดที่ 13 บิต โดยสามารถเทียบเป็นความเร่งในช่วง ± 16 g โดยสามารถเชื่อมโยงผ่านระบบ SPI หรือ I2C โดยจะใช้วัดความเร่งจากการเคลื่อนที่และแรงโน้มถ่วงจากการเอียงตัวของหุ่นยนต์



รูปที่ 2.14 ภาพแสดงการต่อเซ็นเซอร์ความเร่งเข้ากับโปรแกรมประมวลผล

2.5.2. ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter)

ตัวกรองคาลมานเป็นกระบวนการทางปรับปรุงชุดข้อมูลชนิดหนึ่งที่สามารถใช้กับข้อมูลที่มีสัญญาณรบกวนสูง ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวกรอง Kalman ที่จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ การทำนาย (Predict) คือการทำนายค่าของข้อมูลที่ควรจะเป็นจากสถานะที่จดจำไว้ และการแก้ไขสถานะ (Update) คือ ฟังก์ชันในการแก้ไขค่าเมื่อมีข้อมูลวัดมาได้ใหม่จะทำการนำไปเทียบกับค่าที่ทำนายได้และปรับปรุงสถานะภายในโมเดล

โดยในงานวิจัยอื่นที่ใช้ตัวกรองคาลมาน กับเซนเซอร์ INS/GPS [30] และในเซนเซอร์ตรวจจับความเร่ง ในการกรองสัญญาณรบกวนให้มีความราบรื่น [29] โดยทั้งสองงานวิจัยได้เสนอว่าการรับค่าตัวข้อมูลและการเตรียมข้อมูลเซนเซอร์เป็นสิ่งที่สำคัญมาก ถ้ารับค่าไม่มีความเสถียรภาพ จะทำให้ตัวชุดควบคุมแขนกลนั้นไม่มีเสถียรภาพตามไปด้วย โดยในงานวิจัยที่สอง [29] ได้มีการนำตัวกรองคาลมาน มาใช้ในเซนเซอร์ MPU6050 ในการรบกวนสัญญาณให้มีความราบรื่น ผลที่ได้ตามมาจกตัวกรองคาลมาน ให้มีความแม่นยำของข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์มากขึ้น และสามารถนำไปใช้กับการอ้างอิงระบบพิกัดของหุ่นยนต์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้การกรองสัญญาณความเร่งมาคำนวณด้วยการทำนายค่าประมาณ (Predict State) จากข้อมูลย้อนหลังสมการด้วย

$$\hat{X}_{t|t-1} = F_t \hat{X}_{t-1|t-1} + B_t U_t$$

โดยให้ เนื่องจากไม่ได้เปลี่ยนแปลงการรับเซนเซอร์ จึงให้เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ $F_t = I$ และ เมตริกซ์ตัวแปรควบคุมเป็น $B_t = 0$ จะได้

$$\hat{X}_{t|t-1} = \hat{X}_{t-1|t-1}$$

ทำนายค่าความผิดพลาด (Error Prediction)

$$P_{t|t-1} = F_t P_{t-1|t-1} F_t^T + Q_t$$

โดยให้ เนื่องจากไม่ได้เปลี่ยนแปลงการรับเซนเซอร์ จึงให้เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ $F_t = I$ จะได้

$$P_{t|t-1} = P_{t-1|t-1} + Q_t$$

การคำนวณค่า Kalman Gain

$$K_t = P_{t|t-1} H_t^T (H_t P_{t|t-1} H_t^T + R_t)^{-1}$$

โดยให้ ให้ทุกตัวรับค่าสเตรตทั้งเมตริกซ์ จึงให้เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ $H_t = I$

$$K_t = P_{t|t-1} (P_{t|t-1} + R_t)^{-1}$$

ปรับปรุงค่าสเตรต โดยขึ้นอยู่กับค่าจากเซนเซอร์จริงของสเตรต

$$\hat{X}_{t|t} = \hat{X}_{t|t-1} + K_t (y_t - H_t \hat{X}_{t|t-1})$$

ปรับปรุงค่าสเตรตผิดพลาด

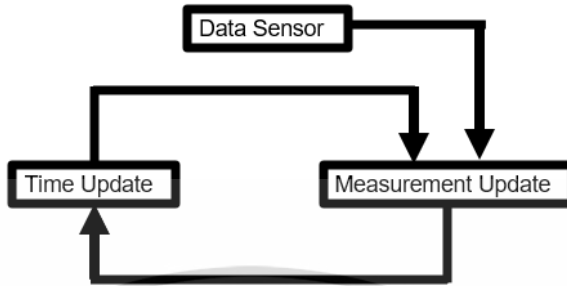
$$P_{t|t} = (I - K_t H_t) P_{t|t-1}$$

โดยให้ ให้ทุกตัวรับค่าสเตรตทั้งเมตริกซ์ จึงให้เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ $H_t = I$

$$\hat{X}_{t|t} = \hat{X}_{t|t-1} + K_t (Y_t - \hat{X}_{t|t-1})$$

$$P_{t|t} = (I - K_t) P_{t|t-1}$$

$$P_{t|t} = \hat{X}_{t|t}$$



รูปที่ 2.15 รายละเอียดแผนภาพตัวกรองคาลมาน

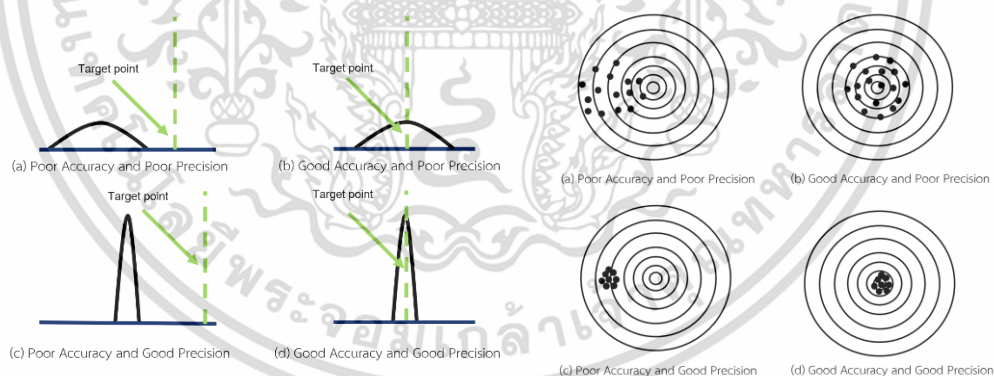
เมื่อ

\hat{X}	คือ	เมตริกซ์ค่าประมาณสเตต
K	คือ	เมตริกซ์ค่าเกนต์
Y_t	คือ	เมตริกซ์ค่าจริง
R_t	คือ	เมตริกซ์ความผิดพลาดจากการวัด
H_t	คือ	เมตริกซ์การวัด
F_t	คือ	เมตริกซ์ค่าการเปลี่ยนผ่านสเตตมีค่าได้ตั้งแต่ (0-100%) โดยทั่วไป 100%
B_t	คือ	เมตริกซ์ควบคุม
U_t	คือ	เมตริกซ์ตัวแปรควบคุม
Q	คือ	เมตริกซ์ค่าความแปรปรวน
$t t-1$	คือ	เวลาที่ช่วงของตัวแปรทำนาย

2.6. การสอบเทียบตำแหน่งแกนกลและความแม่นยำ

ในแกนกลประกอบที่ใช้ เซอร์โวมอเตอร์ที่ประกอบเป็นแกนกล ปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมหุ่นยนต์ คือ ความแม่นยำ (Accuracy) ค่าความละเอียด (Resolution) ที่ส่งผลต่อค่าความสามารถในการทำซ้ำของปลายแกนกล (Repeatability) [32] และการคำนวณพิกัดที่ไม่แม่นยำตามไปด้วย ในทางกายภาพของตัวหุ่นยนต์ปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำของหุ่นคือเซนเซอร์อ่านตำแหน่งหมุนของข้อต่อที่มีทั้งแบบอนาล็อกและดิจิทัล วงจรควบคุมมอเตอร์ และ ช่องว่างระหว่างเกียร์ในชุดเซอร์โวมอเตอร์ (Gear backlash) เช่นในงานวิจัย [33] การหาค่าเซอร์โวมอเตอร์ที่ใช้ในหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั่วไป ให้ค่าความแม่นยำ ความละเอียด และ ค่าการทำซ้ำ ดังรูปที่ 3.14 โดยค่าการทำซ้ำ (Repeatability) อยู่ที่ 0.023 mm

โดยใช้วิธีการสอบเทียบ (Calibration) เป็นการปรับตั้งเพื่อหาจุดอ้างอิงของตำแหน่งของปลายแกนกล เพื่อใช้กำหนดค่าความแม่นยำ การสอบเทียบทำในระดับการวัดมุมของเซอร์โวมอเตอร์เทียบกับเครื่องมือวัดจากของจริง และ สอบเทียบตำแหน่งของปลายแกนเมื่อควบคุมตามตำแหน่งที่กำหนด โดยผลที่คาดหวังของการสอบเทียบแสดงได้ดังรูปที่ 2.16 ที่ความแม่นยำที่จะให้ตำแหน่งการเคลื่อนที่ไปเป้าหมายเกาะกลุ่มอยู่ด้วยกัน ซึ่งหมายรวมถึงการทำซ้ำ ส่วนความเที่ยงตรงคือการให้ควบคุมให้ไปยังตำแหน่งที่อ้างอิงจากระบบพิกัดได้ถูกต้อง



รูปที่ 2.16 ความแม่นยำของแกนกลในรูปแบบต่างๆ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แกนกลที่มีเป้าหมายให้สำหรับในงานรักษามุมระดับระนาบและมีระยะห่างระหว่าง 2 แขนงที่ ประกอบจากเซอร์โวมอเตอร์ ระบบของ Dynamixel ที่เป็นชิ้นส่วนพลาสติก มอเตอร์มีชุดเกียร์ที่มีระยะคลอน (Gear Backlash) และ ความละเอียดที่ 10 Bits เท่ากับ 0.29 องศา เวลาการตอบสนองขึ้นกับการสื่อสารและความเร็วของมอเตอร์ ซึ่งทำให้มีความจำเป็นที่ต้องหาความแม่นยำและการตอบสนองการทำงานของระบบ

บทที่ 3

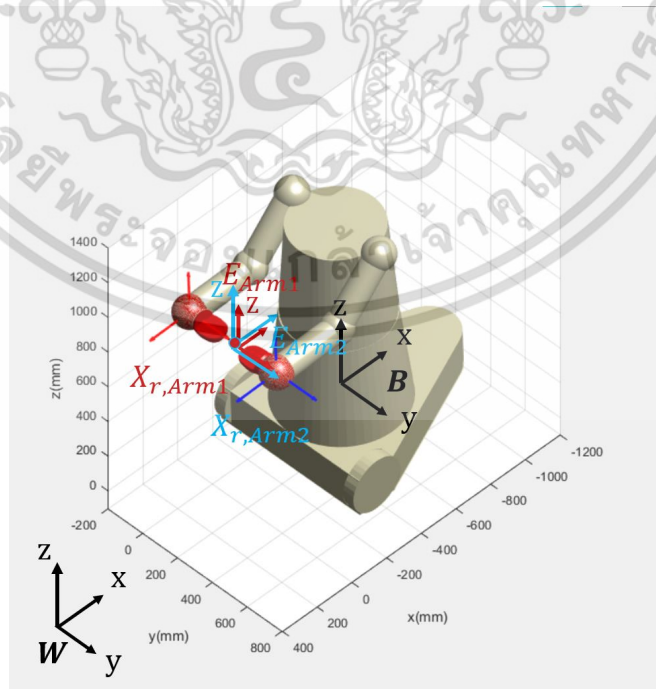
การดำเนินการวิจัย

3.1. แขนกลแบบจำลองและแขนกลประกอบ

สำหรับการทดลองกับหุ่นยนต์บริการจะแบ่งส่วนออกเป็นส่วนของแบบจำลองและส่วนของแขนกลที่ประกอบขึ้นจากเซอร์โวมอเตอร์ Dynamixel เป็นแขนกล 5 DOF มีการปรับตั้งค่าข้อต่อส่งไปยังจุดกึ่งกลางอุปกรณ์ (TCP) ได้ทำการออกแบบระบบพิกัดของหุ่นยนต์ (Forward Kinematics) ทำการอ้างอิงพิกัดพื้นผิวโดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับความเร่งที่มีสัญญาณรบกวน และออกแบบระบบควบคุมแบบอิมพีเดนซ์แบบแรงที่ใช้ค่าผลต่างของตำแหน่งเชิงเส้นและเชิงมุมเป็นตัวกำหนดให้หุ่นยนต์รักษาระดับการถือสิ่งของให้อยู่ในแนวระดับคงที่

3.1.1. แบบจำลองแขนกล

แบบจำลองแขนกลและตัวหุ่นยนต์บริการเป็นการสร้างแบบจำลองกราฟฟิกในโปรแกรม CAD แบบแยกชิ้นส่วน แล้วทำการนำเข้าแบบจำลองมาลงในโปรแกรม Matlab เพื่อใส่ระบบการควบคุมเข้าไปในตัวโปรแกรม ทำให้แบบจำลองสามารถเคลื่อนที่ไปตามความค่าแรงที่กำหนด จากรูปที่ 3.1 เป็นแบบจำลองใน Matlab เขียนโดยโปรแกรม Solidworks®



รูปที่ 3.1 แบบจำลองใน Matlab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2. แขนกลประกอบ

แขนกลประกอบเป็นการนำเอาเซอร์โวมอเตอร์ Dynamixel รุ่น AX12 มาประกอบเป็นแขนกล 5 แขนหุ้ม โดยรายละเอียดของแขนหุ้มของแขนกลสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นการจำลองท่าทางของแขนกลตามแบบจำลองกราฟฟิกที่ติดตั้งที่ตัวหุ่นยนต์บริการ โดยแขนกลวางห่างกัน 100 มิลลิเมตร ติดตั้งบนแผ่นอะคริลิกที่ติดอยู่บนขาตั้งสูงจากพื้น 200 มิลลิเมตร ที่ทำให้แขนกลลอยจากพื้นและสามารถขยับไปหน้าหลังได้ แขนกลที่ประกอบขึ้นสามารถยกของได้ในน้ำหนักที่จำกัดเพียงประมาณ 100 กรัม ตามการคำนวณความสามารถของหัวไหล่ที่ต้องยกมอเตอร์ของทั้งแขนและภาระยกที่ปลายแขน ซึ่งพอเพียงที่ใช้ในการทำการทดสอบการควบคุมจากโปรแกรมและติดตั้งมือถือของที่ทำจากโฟมได้



รูปที่ 3.2 แสดงรายละเอียดแขนกล แขนหุ้มของข้อต่อ

3.2. ระบบพิกัดของหุ่นยนต์

ในระบบพิกัดแขนกล กำหนดด้วยระบบกฎมือขวาโดยรายละเอียดแขนหุ้มของข้อต่อ โดยลักษณะการหมุน ดังรูปที่ 3.2 สมการที่กำหนดตำแหน่งและมุมบนข้อต่อแขนกลต่อกัน การกำหนดพิกัดทั้งในแบบจำลองแขนกลและแขนกลที่ประกอบขึ้นพร้อมปรับตั้งค่าตำแหน่งให้ใช้ระบบพิกัดเดียวกัน เนื่องจากเซอร์โวมอเตอร์ที่เลือกใช้มีช่องว่างของการอ่านค่าตำแหน่ง (Dead Zone) อยู่ระหว่าง ± 170 ถึง 180 องศา ทำให้การวางจุดเริ่มต้นของมอเตอร์เป็นไปตามรูปที่ 3.3 โดยตั้งให้ตำแหน่งแขนกลห่างจากกัน 100 มิลลิเมตร โดยมอเตอร์มีค่าความละเอียด 0.29 องศา ซึ่งกำหนดระบบพิกัดในรูปแบบแขนหุ้ม (Joint Configuration) เป็นแบบ ZXXX \bar{Y} ทั้งสองแขนทำให้การควบคุมสามารถทำได้ดี โดยใช้แนวคิดแสดงการตั้งระบบพิกัดตั้ง

ตารางที่ 3.1 เพื่อนำไปสร้างระบบพิกัดอ้างอิงจากตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างฐานของแขนกล
ซ้ายขวา โดยตำแหน่งของฐานล้อเคลื่อนที่จะถูกนำมาคำนวณเพิ่มเติมในระบบพิกัดพื้นผิว T_W^B

ตารางที่ 3.1 ความสัมพันธ์หน้าที่ของข้อต่อแขนกลทั้งซ้ายขวาของหุ่นยนต์บริการ

ข้อต่อ แขนกล	ตัวควบคุม	แกนหมุน	แขนซ้าย		แขนขวา	
			ระยะแขน (mm)	ค่ามุมเริ่มต้น (องศา)	ระยะแขน (mm)	ค่ามุมเริ่มต้น (องศา)
1	q_1	z	50,0,0	150	-50,0,0	150
2	q_2	x	22,0,-18	17	22,0,-18	17
3	q_3	x	0,70.51,-63	51	0,70.51,-63	51
4	q_4	x	0,4.1,-54.1	204	0,4.1,-54.1	204
5	q_5	y	0,56,0	150	0,56,0	150
e	-	-	50,56,0	-	-50,56,0	-

3.2.1. กลศาสตร์ไปข้างหน้าของแขนกล (Forward Kinematics)

จากตารางที่ 3.1 สามารถกำหนดระบบพิกัดได้จากสมการ DH Parameter สามารถแสดง
พิกัดแบบก้าวหน้าของแขนกลทั้งซ้ายและขวาได้ดังนี้

$$T_W^E = T_W^B T_B^1 T_1^2 T_2^3 T_3^4 T_4^5 T_5^E$$

โดยที่ T_W^B เป็นระบบพิกัดพื้นผิวที่จะอธิบายในหัวข้อที่ 3.3

$$\text{แขนซ้าย } T_B^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 50 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \text{Tran}(50, 0, 0)$$

$$\text{แขนขวา } T_B^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -50 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \text{Tran}(-50, 0, 0)$$

$$T_1^2 = \text{Tran}(22, 0, -18). \text{Rot}_z(q_1)$$

$$T_2^3 = \text{Tran}(0, 70.51, -63). \text{Rot}_x(q_2)$$

$$T_3^4 = \text{Tran}(0, 4.1, -54.1). \text{Rot}_x(q_3)$$

$$T_4^5 = \text{Tran}(0, 56, 0). \text{Rot}_x(q_4)$$

$$\text{แขนซ้าย } T_5^E = \text{Tran}(50, 56, 0). \text{Rot}_y(q_5)$$

$$\text{แขนขวา } T_5^E = \text{Tran}(-50, 56, 0). \text{Rot}_y(q_5)$$

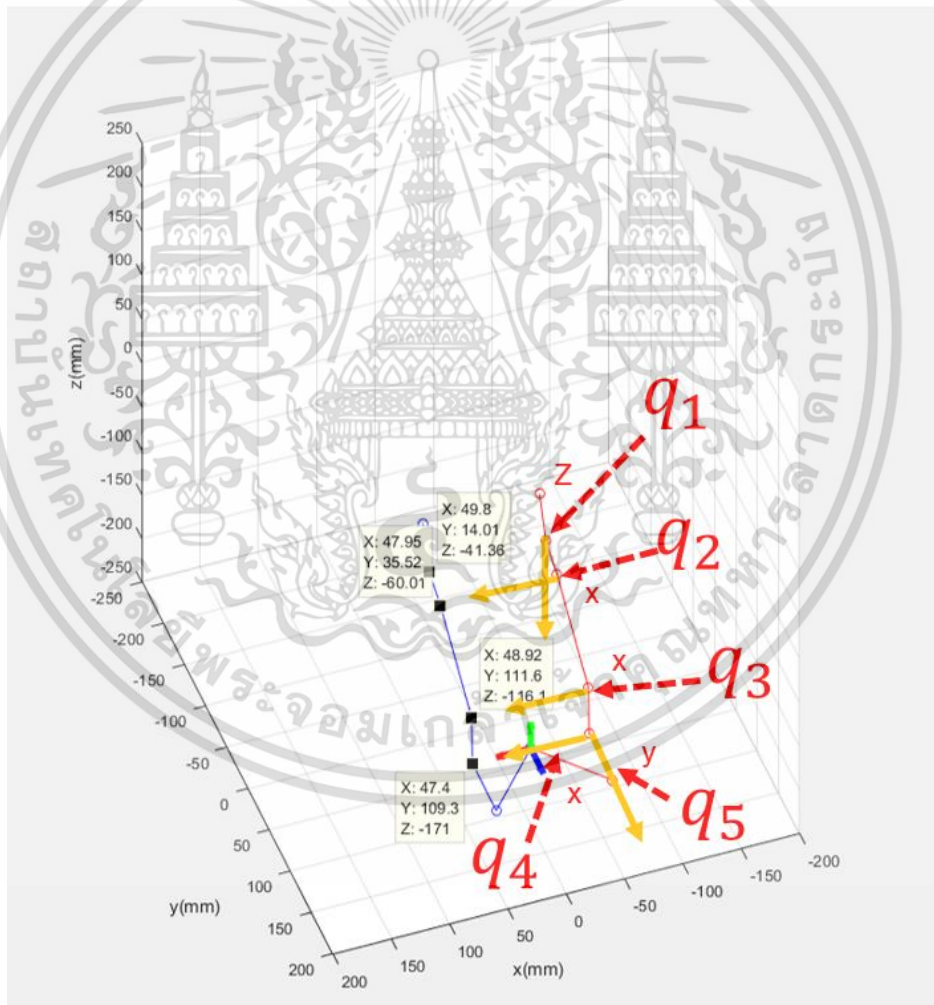
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

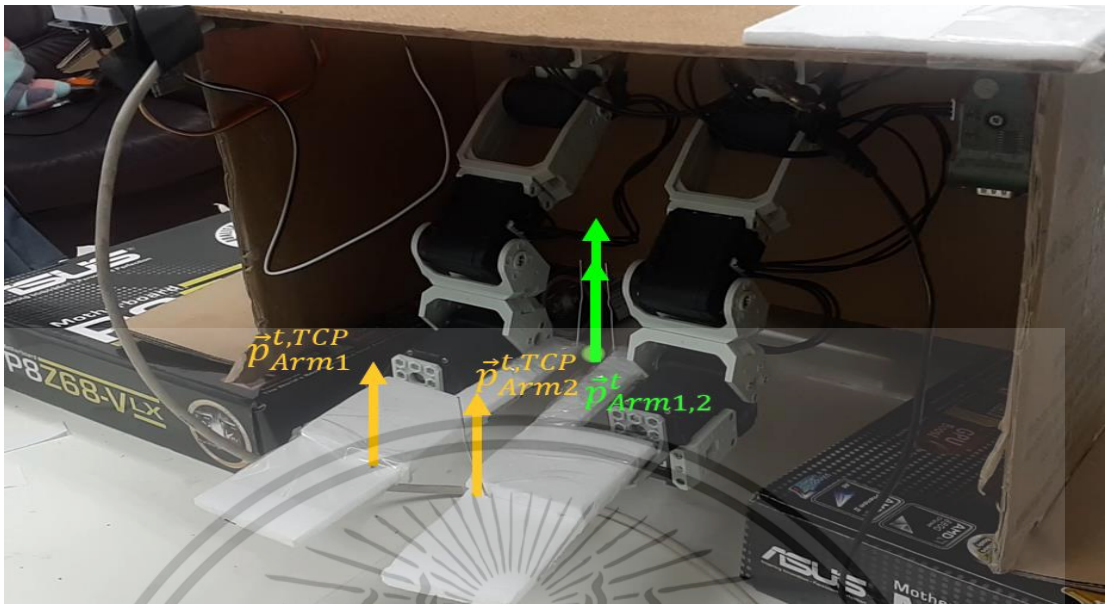
3.2.2. การออกแบบปรับตั้งค่าจุดกึ่งกลางอุปกรณ์

สำหรับงานวิจัยนี้ 0.29 deg หรือ $5.1 \times 10^{-3} \text{ rad}$ ส่งผลให้การควบคุมแบบอิมพีเดนซ์ เป็นการควบคุมด้วยแรงแบบระบุตำแหน่งของปลายแขนกล จึงทำให้ความแม่นยำของข้อต่อมีอยู่อย่างจำกัด โดยจะแบ่งเทคนิคการแก้ปัญหาที่ ดังนี้สามารถอ้างอิงจากพิกัด E ได้เป็น TCP แสดงรูปแบบการระบุตำแหน่งโดยสีเขียวคือตำแหน่งที่ใช้ควบคุมจริงส่งค่าสีส้มคือตำแหน่งที่ปรับค่าโดยให้เป็นจุด TCP ดังรูปที่ 3.4 โดยแสดงสมการดังนี้

$$T_W^{tcp} = T_W^E T_E^{tcp}$$



รูปที่ 3.3 แสดงตำแหน่งบนระบบพิกัด



รูปที่ 3.4 แสดงรูปแบบการระบุตำแหน่งส่งค่าความสัมพันธ์ TCP

3.2.3. จาคอบีเยนของแขนกล (Jacobian)

จาคอบีเยนเป็นการแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเส้นของปลายแขนกลและความเร็วเชิงมุมของแต่ละข้อต่อ โดยในจุดเริ่มต้นของท่าทางของแขนกลหุ่นยนต์ทั้งสองข้างมีค่าเป็น $\vec{q}_{Arm1,2} = [150 \ 17 \ 51 \ 204 \ 150]^T$ องศา และแกนหมุนเป็นแกน ZXXXZ ตามลำดับ จากเมตริกซ์จาคอบีเยนสำหรับการควบคุมจากความเร็วเชิงเส้นมาแปลงมาเป็นความเร็วเชิงมุมของแขนกลที่มี 5 ข้อต่อไปเป็นระบบพิกัด 6 แกนของศาอิสระ สมการความสัมพันธ์เชิงความเร็วจะอยู่ในรูปไม่สมมาตรที่แสดงและการแก้ไขเมตริกซ์ไม่สมมาตรจะแสดงในหัวข้อที่ 3.2.4

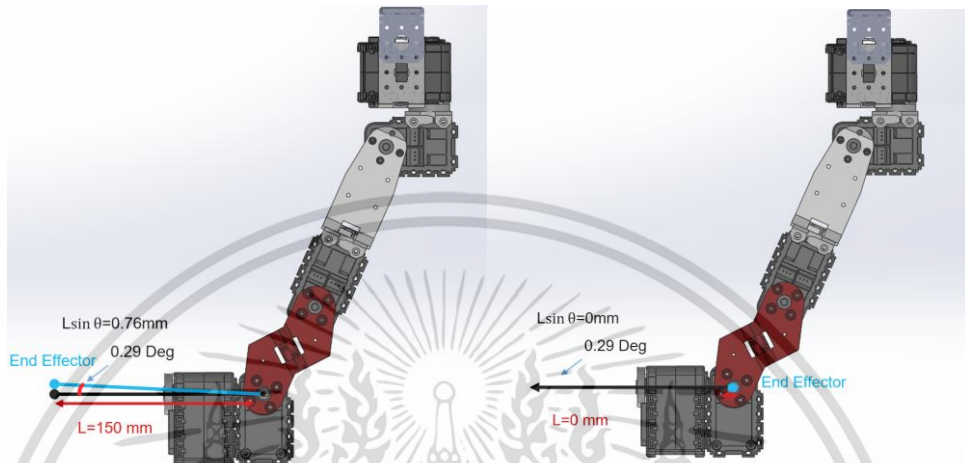
$$J(\vec{q}_{Arm1,2}) = \begin{bmatrix} \vec{z}_1 \times \vec{r}_1^E & \vec{z}_2 \times \vec{r}_2^E & \vec{z}_3 \times \vec{r}_3^E & \vec{z}_4 \times \vec{r}_4^E & \vec{z}_5 \times \vec{r}_5^E \\ \vec{z}_1 & \vec{z}_2 & \vec{z}_3 & \vec{z}_4 & \vec{z}_5 \end{bmatrix}_{6 \times 5}$$

โดยที่ \vec{z}_i มาจากแกนหมุนตามแกนหมุนของข้อต่อ i ที่ใช้จากเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector) ของแกนหมุนจากเมตริกซ์พิกัด T_B^i

และ \vec{r}_i^E คือ เวกเตอร์ตำแหน่ง (Position Vector) ที่อ้างอิงจากฐานของแขนกลไปยังตำแหน่งของข้อต่อที่ i

เนื่องจาก jacobian ต้องใช้การพิจารณาต่อเนื่องในระยะขจัดสั้น ๆ (Small Displacement) ที่จำกัดเข้าสู่ศูนย์ ดังนั้นในการควบคุมปลายแขนกลที่ประกอบจากเซอร์โวมอเตอร์ที่มีค่าความละเอียดต่ำจะส่งผลให้เมตริกซ์จาคอบีเยนผกผันที่ใช้คำนวณค่าความเร็วเชิงมุมของข้อต่อจากปลายแขนกลไม่แม่นยำ เช่นปลายแขนกลอยู่ช่วงข้อมือถึงกลางศอกทำให้ปลายแขนกลมีความยาวมาก เมื่อ

ความละเอียดที่ 0.29 องศา ทำให้ปลายแขนไปอยู่ในจุด TCP หรือ จุด $P_{Arm}^{t, tcp}$ ทำให้ข้อต่อที่ 1 ถึง 3 ทำให้การควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกลมีค่าผิดพลาดสูงกว่าข้อต่อที่ 4 และ 5 ที่ควบคุมช่วงข้อมือ ดังรูปที่ 3.5 ดังนั้นการเพิ่มความแม่นยำของแขนกลด้วยการคำนวณจากแรงดึงดูดจึงนำมาใช้แก้ปัญหา



รูปที่ 3.5 ควบคุมปลายแขนกลทางตรง และการวางปลายแขนช่วงข้อมือ

3.2.4. เมตริกซ์เทียม

เนื่องจากแขนกลที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแขนกล 5 แกนองศาอิสระทำให้มีตัวแปรควบคุมข้อต่อ 5 ตัว ส่วนระบบพิกัดปลายแขนที่มี 6 องศาอิสระ จึงมีจำนวนไม่เท่ากัน ทำให้ต้องใช้เมตริกซ์ส่วนกลับเทียม (Pseudo Inverse Matrix) ใช้ความสัมพันธ์แบบ Moore–Penrose Inverse เมื่อ $m > n$ โดยที่ $m = 6$ และ $n = 5$ เลือกความสัมพันธ์ดังสมการ $J^+ = (J^T J)^{-1} J^T$ Column Full Rank (Over-Determined Problem) ($m > n$) ทำให้ผลของ Pseudo Inverse Matrix คือ $J_{5 \times 6}^+$

3.3. การอ้างอิงระบบพิกัดพื้นผิว

พื้นผิวของบริเวณทำงานของหุ่นยนต์บริการที่เคลื่อนที่ผ่านมีทั้งพื้นที่ไม่ได้ระดับหรือเอียงไปมาทำให้หุ่นที่เคลื่อนที่ผ่านเอียงไปมาเช่นกัน โดยทั่วไปองศาของการเอียงทางลาดในสภาพแวดล้อมของมนุษย์จะอยู่ที่ 15 องศา ของหุ่นยนต์ใช้การระบบพิกัดของสภาพแวดล้อม $\{W\}$ ที่อ้างอิงไปยังระบบพิกัดของชุดฐานล้อ $\{B\}$ โดยเพื่อให้ตัวหุ่นยนต์รับรู้การเอียงด้วยตัวเองจะใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง วัดแรงโน้มถ่วงพร้อมวัดมุมบิด (6-DOF Acceleration And Gyro-Meter Sensor) เป็นตัววัดสภาพการเอียงของฐานล้อหุ่นยนต์ที่เป็นตัวแทนสภาพของเส้นทางเดิน โดยให้ Rot_{sensor} คือเมตริกซ์การหมุนจากเซนเซอร์ตรวจจับความเร่ง

3.3.1. ข้อมูลเซนเซอร์

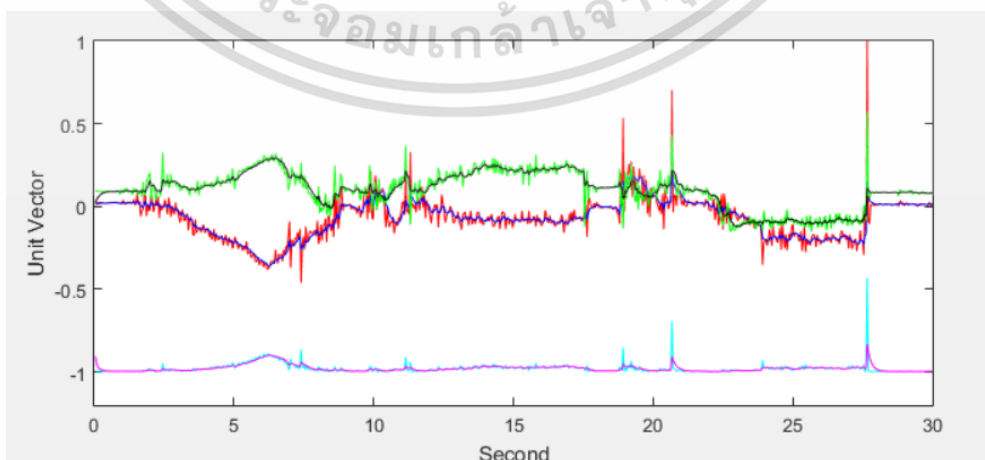
เซนเซอร์การวัดความเร่งเป็นสิ่งสำคัญต่อการควบคุมปลายแขนกล หุ่นยนต์จะรับรู้สภาพการเอียงของฐานล้อหุ่นยนต์ การกรองข้อมูลจากข้อมูลดิบเป็นสิ่งจำเป็นทำให้การควบคุมปลายแขนกลในการระบุตำแหน่งนั้นดีขึ้นจากสัญญาณรบกวนที่ไม่ราบเรียบในระบบลดลง โดยระบบควบคุมอิมพิเดนซ์ จะนำเอาสัญญาณความเร่งที่วัดค่าแรงโน้มถ่วงและความเร่งจากการเคลื่อนที่ไปใช้ในการคำนวณตำแหน่งของปลายแขนกลที่ต้องชดเชย ดังนั้นถ้าตำแหน่งการรับรู้ไม่มีความแม่นยำ ทำให้ระบบควบคุมแบบอิมพิเดนซ์ ซึ่งเป็นการควบคุมปลายแขนกลไม่ดีขึ้นไปด้วย โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเอาตัวกรองคาลมานโดยกำหนดให้เป็นฟังก์ชัน K และอินพุตและเอาต์พุตเป็นข้อมูลดิบและข้อมูลที่กรองจากเซนเซอร์ซึ่งเป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแรงโน้มถ่วง

$$\hat{A} = K(A)$$

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \hat{a}_x \\ \hat{a}_y \\ \hat{a}_z \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}$$

ผลของการออกแบบตัวกรองแบบคาลมานในงานวิจัย ดังรูปที่ 3.6 ผลลัพธ์ของตัวกรองคาลมาน เส้นสีแดง สีเขียว สีฟ้า คือข้อมูลดิบของเซนเซอร์ก่อนกรอง a_x a_y และ a_z ตามลำดับ และเส้นสีเขียว ดำ น้ำเงิน ม่วง ที่คาดกลางเส้นข้อมูลดิบเป็นข้อมูลที่ผ่านการกรองแล้วของ \hat{a}_x \hat{a}_y และ \hat{a}_z ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 ผลลัพธ์ของตัวกรองคาลมานในงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
32
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2. การอ้างอิงระบบพิกัดสภาพพื้นผิวของทางเดิน

สำหรับสภาพเส้นทางเดินของหุ่นยนต์ใช้การระบบพิกัดของสภาพแวดล้อม $\{W\}$ ที่อ้างอิงไปยังระบบพิกัดของชุดฐานล้อ $\{B\}$ โดยเพื่อให้ตัวหุ่นยนต์รับรู้การเอียงด้วยตัวเองจะใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่งวัดแรงโน้มถ่วงพร้อมวัดมุมบิด (6DOF Acceleration and Gyro-meter Sensor) เป็นตัววัดสภาพการเอียงของฐานล้อหุ่นยนต์ที่เป็นตัวแทนสภาพของเส้นทางเดิน แต่เนื่องด้วยระบบวัดความเร่งให้ค่าออกมาเป็นเวกเตอร์ของแนวเอียงของตัวหุ่นยนต์ \hat{a} การนำเอาไปใส่ในกลศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Function) ในส่วนของ T_W^B ที่จะต้องเป็นค่ามุมบิดใส่ในเมตริกซ์การหมุน Rot_{sensor} จึงจำเป็นต้องแปลงโดเมนของตัวแปรด้วยการคูณสเกลระหว่างเวกเตอร์ความเอียงหุ่นกับเวกเตอร์แรงโน้มถ่วง

$$T_W^B = Rot_{sensor}(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$$

$$\vec{\theta} = \hat{a} \times g$$

เมื่อ

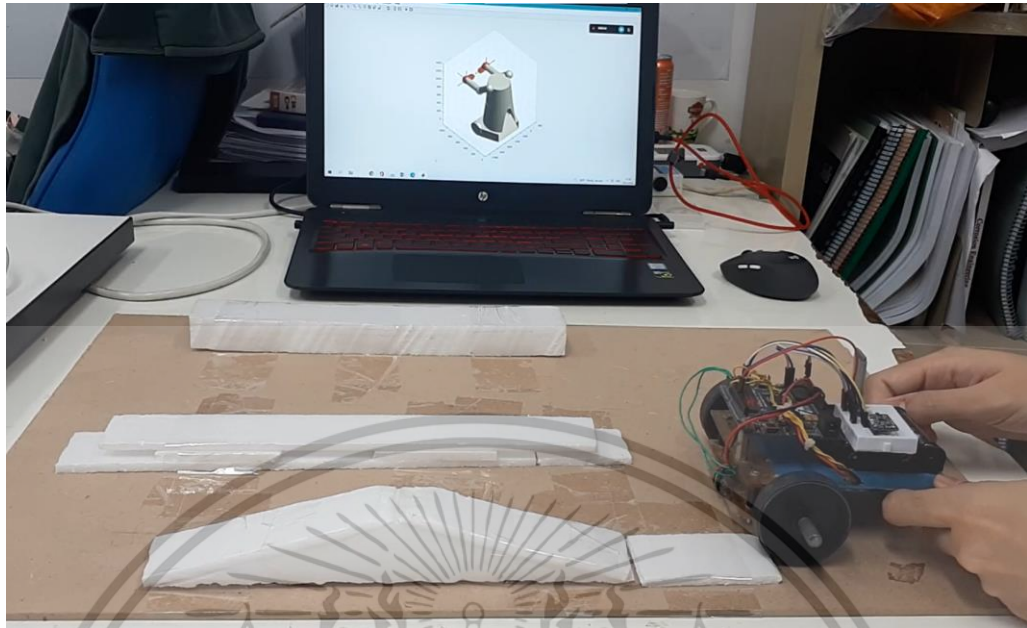
g	คือ	ทิศทางสนามแรงโน้มถ่วง เท่ากับ $[0 \ 0 \ 1]^T$
θ_x	คือ	ค่ามุมหมุนรอบแนวแกน x
θ_y	คือ	ค่ามุมหมุนรอบแนวแกน y
θ_z	คือ	ค่ามุมหมุนรอบแนวแกน z

สามารถปรับปรุงกลศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Function) ได้เป็น

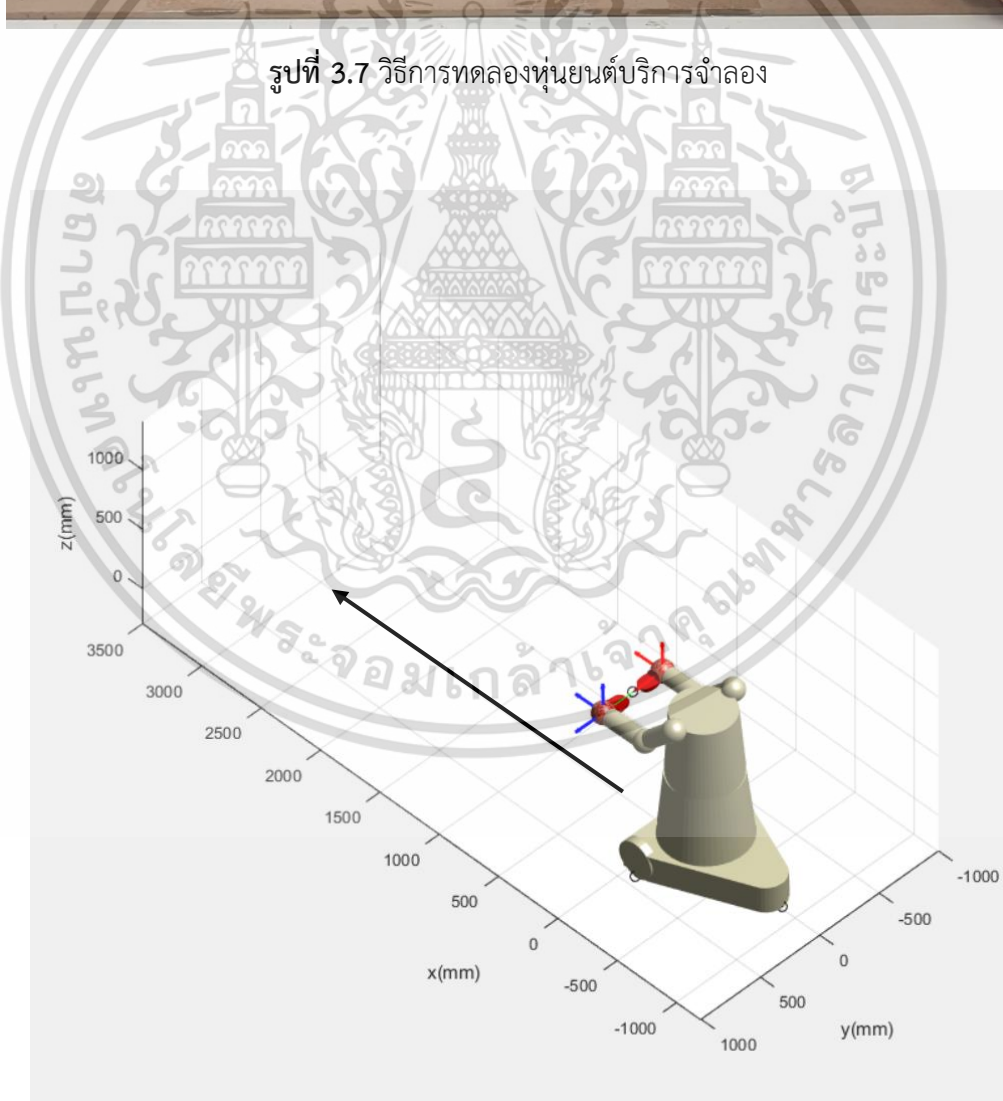
$$X_{r,Arm} = T_W^E = T_W^B T_B^E$$

3.3.3. การทดลองเพื่อหาสภาพพื้นผิวของทางเดินแบบจำลองแขนกล

การทดสอบการหาสภาพพื้นผิว ซึ่งมีการรับรู้ ความเอียงที่เกิดขึ้นจากสิ่งแวดล้อมที่ไม่แน่นอน ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำให้สิ่งของที่ถืออยู่นั้นเสียสมดุล โดยนำข้อมูลการรับรู้การเอียงที่ได้นำมาใช้กับร่วมกับการควบคุมแขนกล ทั้ง 2 แขน ให้เจอสิ่งแวดล้อมทำให้สามารถควบคุมปลายแขนได้กับแกนสิ่งแวดล้อมให้ขนานกับสิ่งแวดล้อมและสามารถ รักษาแนวระดับได้ดั้งเดิม การทดสอบเป็นการสมมุติสิ่งแวดล้อมความเอียง แบ่งตามหัวข้อดังรูปที่ 3.7 และ รูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 วิธีการทดลองหุ่นยนต์บริการจำลอง



รูปที่ 3.8 สนามทดสอบสภาพพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 34
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4. การควบคุมอิมพีเดนซ์

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการควบคุมความสัมพันธ์แรงปลายแขนกลในรูปของพื้นที่ปฏิบัติการ (Operational Space) ให้กลายมาอยู่ในรูปของพื้นที่เชิงมุมของข้อต่อ (Joint Space) และปัจจัยจากแรงทั่วไปซึ่งแสดงให้อยู่ในการเคลื่อนที่ของแขนกลให้อยู่ในรูปของสมการเดียว สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ทั้งหมดได้ ดังนี้

$$(M(q) + M)\ddot{q} + (C(q, \dot{q}) + D) + G(q) = J^{-1}K(\vec{x}_d - f(\vec{\theta}_d)) - \vec{\tau}_{dis}$$

และ

$$\vec{\tau}_{dis} = J^{-1}\vec{F}_e + \vec{f}_r$$

แต่เนื่องจากการควบคุมทั้งตำแหน่งของปลายแขนและมุมบิดของข้อมือไปพร้อมกันการใช้ผลต่างของตำแหน่งเป็นระยะขจัดเชิงเส้นสามารถใช้ได้ แต่ไม่สามารถใช้กับผลต่างเชิงมุมที่ได้จากความต่างของทิศทางของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแนวแกนของข้อต่อทำให้ต้องสร้างนิยามใหม่ให้การหาระยะขจัดของมุมบิดเป็นการคลอสเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแนวแกนบิดของข้อต่อ โดยทำการเปลี่ยนระบบพิกัดผลต่างของ

$$\vec{x}_{d,Arm} - \vec{x}_{r,Arm} = \begin{bmatrix} \Delta p_x \\ \Delta p_y \\ \Delta p_z \\ \Delta \alpha \\ \Delta \rho \\ \Delta \varphi \end{bmatrix}$$

โดยให้

$$\begin{bmatrix} \Delta p_x \\ \Delta p_y \\ \Delta p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{x,d} - p_{x,r} \\ p_{y,d} - p_{y,r} \\ p_{z,d} - p_{z,r} \end{bmatrix}$$

และ

$$\begin{bmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta \rho \\ \Delta \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{x,d} \times \mathbf{a}_{x,r} \\ \mathbf{a}_{y,d} \times \mathbf{a}_{y,r} \\ \mathbf{a}_{z,d} \times \mathbf{a}_{z,r} \end{bmatrix}$$

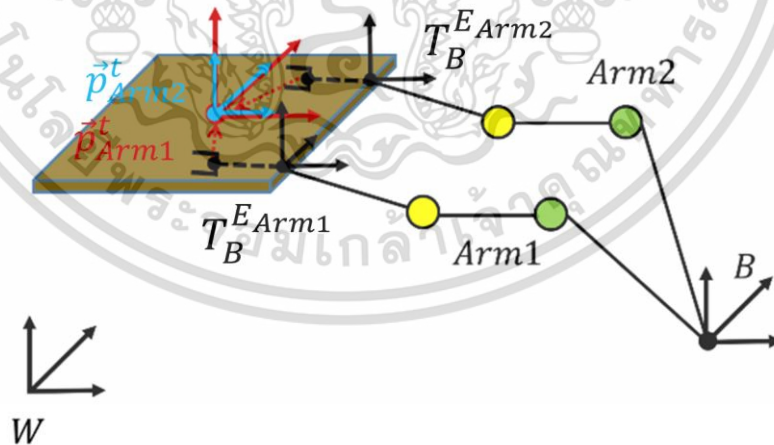
โดยที่ เวกเตอร์ \vec{a}_d คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวแกน Z ของระบบพิกัดปลายแขนที่ต้องการให้ชี้ขึ้นตลอดเวลา จากนั้นสมการที่ได้มาเขียนให้อยู่ในรูปของจลศาสตร์ของการควบคุมที่ปลายแขนทั้งในแนวเชิงเส้น และเชิงมุมแสดงในรูปของสปริงจำลองได้ดังนี้

$$K(\vec{x}_{d,Arm} - \vec{x}_{r,Arm}) = \begin{bmatrix} K_p \\ K_o \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (\vec{p}_{d,Arm} - \vec{p}_{r,Arm}) \\ (\vec{a}_{d,Arm} \times \vec{a}_{r,Arm}) \end{bmatrix}$$

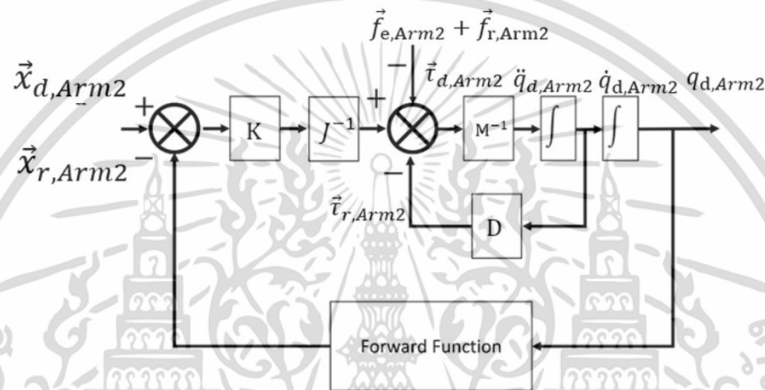
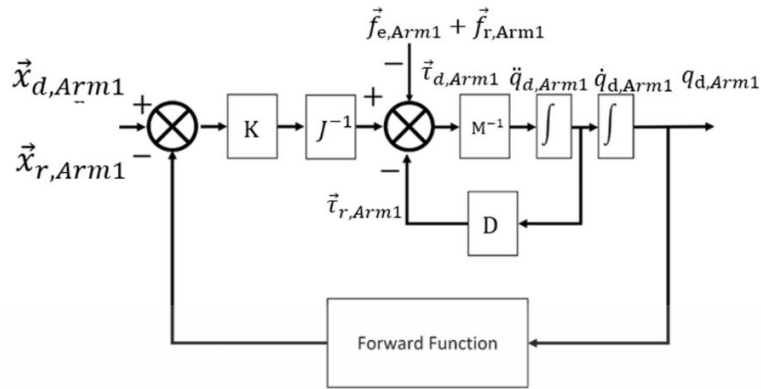
$$K(\vec{x}_{d,Arm} - \vec{x}_{r,Arm}) = \begin{bmatrix} K_p (\vec{p}_{d,Arm} - \vec{p}_{r,Arm}) \\ K_o (\vec{a}_{d,Arm} \times \vec{a}_{r,Arm}) \end{bmatrix}$$

เมื่อ

K_p	คือ	ค่าความแข็งของสปริงคสมมุติแรงดึง
K_o	คือ	ค่าความแข็งของสปริงคสมมุติแรงบิด
$\vec{a}_{d,Arm}$	คือ	ค่าเป้าหมายตามแนวแกนในรูปเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector)
$\vec{a}_{r,Arm}$	คือ	ค่าปัจจุบันตามแนวแกนในรูปเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector)
$\vec{p}_{d,Arm}$	คือ	ตำแหน่งเป้าหมายเชิงเส้นของแขนกล
$\vec{p}_{r,Arm}$	คือ	ตำแหน่งปัจจุบันเชิงเส้นของแขนกล



รูปที่ 3.9 แผนภาพระบบพิกัดในแนวเชิงเส้นวงเข้าเป้าหมายที่กำหนด



รูปที่ 3.10 แผนภาพการควบคุมอิมพิเดนซ์ของแขนกล แขนทั้ง 2

3.4.1. การกำหนดเป้าหมายสำหรับแขนกลที่ระยะห่างของแขนทั้ง 2 คงที่

การกำหนดงานการถือของด้วยสองมือของหุ่นยนต์ที่เป็นแบบการควบคุมอิมพิเดนซ์ด้วยแรง จะเป็นการกำหนดตำแหน่งเป้าหมาย $X_{d,Arm}$ ให้กับปลายแขนของหุ่นยนต์โดยมีเงื่อนไขของระยะห่างของปลายแขนที่ต้องคงที่ ปลายแขนต้องอยู่ในแนวระดับ และ แนวตั้งของปลายแขน (แนวตั้งกับระนาบภาค) จะต้องอยู่ในแนวตั้งหรือเอียงเล็กน้อยเพื่อชดเชยการเคลื่อนที่ของของตัวหุ่นยนต์ โดยผลต่างของระบบพิกัดแขนกลซ้าย $X_{d,Arm1}$ และ ระบบพิกัดแขนกลขวา $X_{d,Arm2}$ จะเป็นค่าคงที่ ที่ทิศของเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector) ของแต่ละแนวแกน XYZ ให้ชี้ไปในทิศทางเดียวกัน แกน Z ชี้ขึ้นตลอดเวลา และระยะห่างของมือคงที่ ดังนั้นจะได้ว่า

$$X_{d,Arm1} - X_{d,Arm2} = C$$

โดยที่

$$X_{d,Arm} = \begin{bmatrix} n_{xd} & o_{xd} & 0 & p_{xd} \\ n_{yd} & o_{yd} & 0 & p_{yd} \\ n_{zd} & o_{zd} & 1 & p_{zd} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

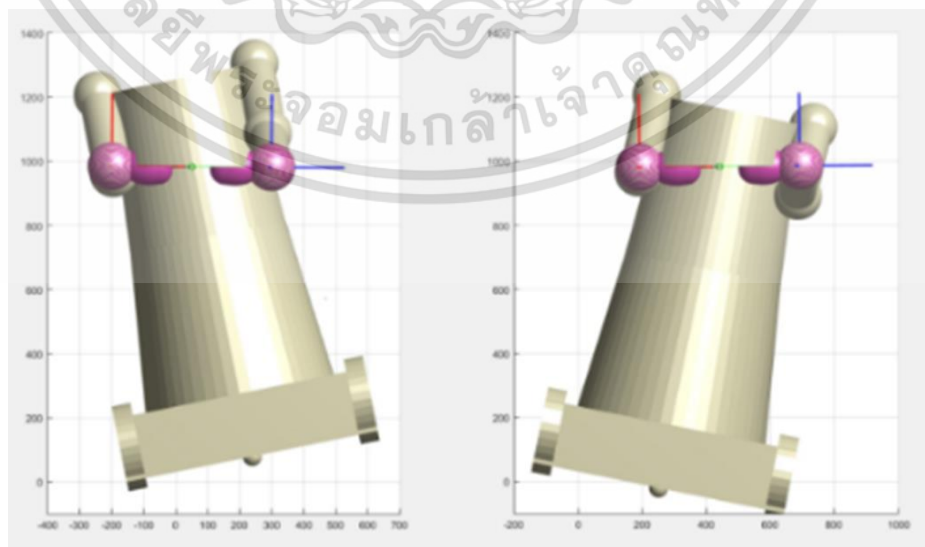
3.4.2. การชดเชยตำแหน่งเพื่อรักษาระนาบของแขนกล

การควบคุมเมื่อหุ่นยนต์เอียงนอกจากระบบจะทำการคำนวณเพื่อให้ระยะของแขนกลคงที่ตามหัวข้อก่อน หุ่นยนต์ยังต้องรักษาสภาพการเอียงของ TCP ให้อยู่ในแนวระนาบดังรูปที่ 3.11 บนแบบจำลองแขนกลรูปที่ 3.12 และรูปที่ 3.13 บนแขนกลประกอบ เมื่อแขนกลสองข้างถือของสิ่งเดียวกัน TCP ที่อยู่กึ่งกลางระหว่างมือ (ถาดที่ถือ) จะเกิดการเอียงได้จากมุมของข้อมือ และ ระดับของข้อมือทั้งสองข้างที่ขยับขึ้นลงไม่เท่ากันจากการควบคุมแขนกลไม่เป็นระนาบ จึงจำเป็นต้องแก้ปัญหาด้วยการชดเชยตำแหน่งที่ แกน z ใหม่สำหรับการรักษาระนาบ โดย $\Delta \vec{p}_{d,Arm}$ คือ ค่าชดเชยตำแหน่งของแขนกลซ้ายและหรือขวา และมีสมการชดเชยเขียนได้เป็น

$$\Delta \vec{p}_{d,l} = K_c(\vec{p}_{d,r} - \vec{p}_{d,l})$$

สำหรับแขนขวา

$$\Delta \vec{p}_{d,r} = K_c(\vec{p}_{d,l} - \vec{p}_{d,r})$$



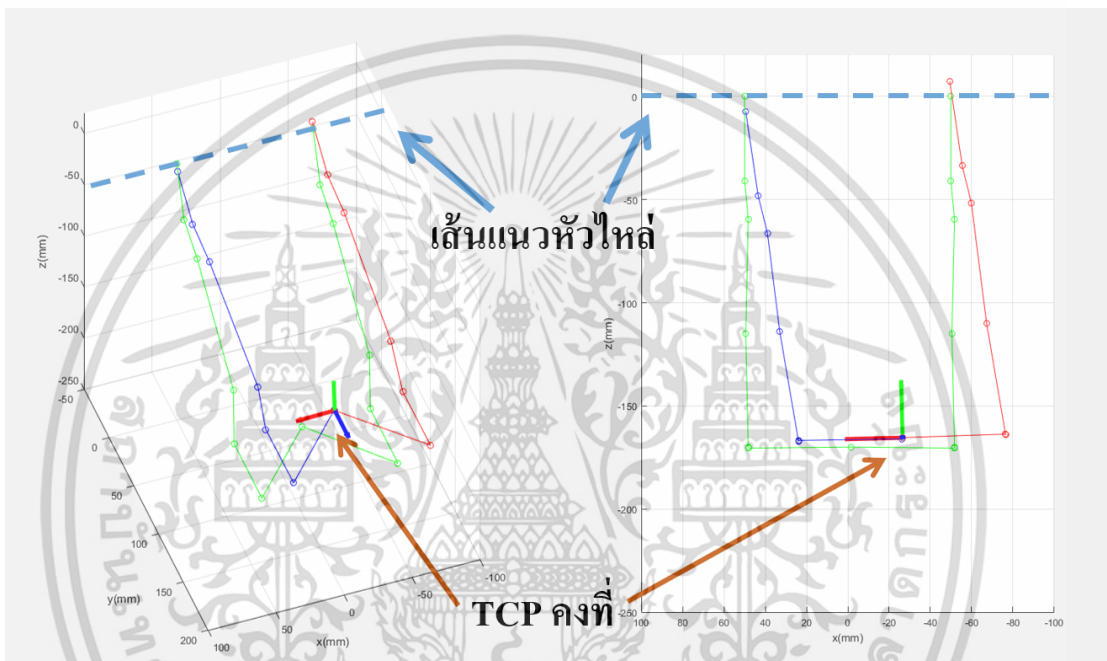
รูปที่ 3.11 การชดเชยตำแหน่งแขนกลเมื่อหุ่นยนต์เกิดการเอียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
38

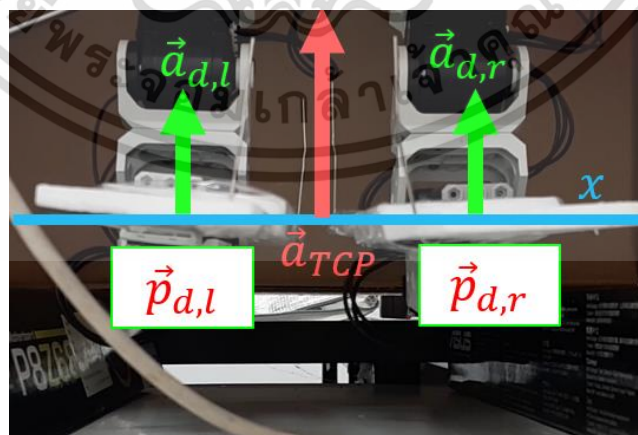
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3. การทดลองระบบควบคุมอิมพีเดนซ์สำหรับแขนกล

การทดลองระบบควบคุมอิมพีเดนซ์สำหรับแขนกลเป็นทดสอบเพื่อตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมควบคุมที่สร้างขึ้นว่ามีความสามารถในการรักษาระยะห่างของแขนกลและระนาบของปลายแขนกล ที่ทำทั้งบนแบบจำลองและแขนกลประกอบที่จัดทำขึ้นด้วยเซอร์โวมอเตอร์ Dynamixel ให้ทำการถือของให้ระยะห่างระหว่าง 2 แขนคองที่ ปลายแขนจะต้องอยู่ในแนวระดับกับพื้นตลอดเวลา โดยใช้ข้อมูลของสภาพพื้นผิวต่างระดับในแนวต่าง ๆ มาทดสอบ



รูปที่ 3.12 แสดงเส้นแนวหัวไหล่และจุด TCP ของแขนกล



รูปที่ 3.13 การชดเชยตำแหน่งในระบบควบคุมแขนกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 39
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5. การสอบเทียบตำแหน่งของแขนกลและการทดลองความแม่นยำ

แขนกลประกอบที่ต่อกันแบบอนุกรม ที่ประกอบขึ้นทั้ง 2 แขนที่มีระยะห่าง 100 มิลลิเมตร จากหัวไหล่ซ้ายขวาเป็นจุดอ้างอิง (Reference Point) ไปยังปลายแขน หุ่นยนต์ประกอบที่มีความยาวแขนสูงสุดเมื่อเหยียดตรง 150 มิลลิเมตร โดยค่าความละเอียดของเซอร์โวมอเตอร์ 0.29 องศา ประมาณการความละเอียดเชิงเส้นจะอยู่ที่ 0.76 มิลลิเมตรต่อข้อต่อ เมื่อต่อเซอร์โวมอเตอร์แบบอนุกรม ทำให้ความละเอียดและคาดเคลื่อนจากการควบคุมนั้นสูงตามไปด้วย รวมทั้งการมีช่องระยะคลอนของเฟืองซึ่งอาจส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งผิดไปจากความเป็นจริง

ในงานวิจัยจึงนำเสนอกระบวนการพิจารณาการสอบเทียบตำแหน่งและแทรกการหาค่าความแม่นยำในการควบคุมปลายรูปที่ 3.5 การสอบเทียบตำแหน่งโดยใช้เครื่องมือวัด สามารถวัดได้โดยตรงจากอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากเวอร์เนียร์ไฮเกจ แต่เนื่องจากหุ่นมีขนาดและพื้นที่การเคลื่อนไหวที่เล็กการวัดจะทำจากตารางกริดตำแหน่งที่ตั้งชุดเวอร์เนียร์ดังรูป



รูปที่ 3.14 การชดเชยตำแหน่งในระบบควบคุมแขนกล

ส่วนการหาความคลาดเคลื่อนจะใช้กระบวนการการอ่านองศาป้อนกลับของเซอร์โวมอเตอร์ ซึ่ง AX12S เป็นดิจิทัลเซอร์โวมอเตอร์ที่มีโปรโตคอลในการอ่านค่ามุมของมอเตอร์ มาป้อนกลับการควบคุมอยู่แล้ว นำมาเข้าสู่กระบวนการทางกลศาสตร์ไปข้างหน้า (Robot Arm Forward Kinematics) และเทียบกับหุ่นยนต์จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ที่ถือว่าไม่มีค่าความคลาดเคลื่อน เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ใช้คณิตศาสตร์คำนวณด้วยความละเอียดทศนิยมที่สูง มาเปรียบเทียบกับทำให้ทราบค่าความแม่นยำและความคลาดเคลื่อนไปพร้อมกัน ผลการทดลองที่ได้จะแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.3.3

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1. การทดลองการควบคุมอิมพีเดนซ์

ในการควบคุมอิมพีเดนซ์ในเบื้องต้นนี้มีเป้าหมายในการทดลองควบคุมแขนกลทั้งสองข้างแบบอิสระต่อกัน ให้แขนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำและหาความเร็วในการตอบสนองปลายแขนกล สำหรับการควบคุมในรูปแบบของสปริงจำลอง การควบคุมตำแหน่งและมุมข้อปลายแขนกลทั้งสอง ผลที่ได้สามารถทำงานได้ดีมีการตอบสนองได้ตามเวลาจริง



รูปที่ 4.1 แสดงการการควบคุมอิมพีเดนซ์ด้วยแรง

จากภาพเป็นการกำหนดจุดเป้าหมายให้กับมือทั้งสองข้างและให้แรงจากสปริงสมมุติตั้งมือไปยังเป้าหมายของมือแต่ละข้างทำให้แขนขยับไปตามการควบคุมแบบอิมพีเดนซ์

4.2. การออกแบบและทดลองเพื่อหาสภาพพื้นผิวของทางเดิน

การทดสอบการรักษาสภาพระนาบของปลายแขนกล ได้ออกแบบการทดลองด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ โดยมีการรับค่าข้อมูลความเร่งจากเซนเซอร์ที่ติดตั้งบนฐานล้อของหุ่นยนต์ส่งข้อมูลผ่านสัญญาณไร้สาย ส่งไปยังคอมพิวเตอร์นำข้อมูลหุ่นฐานล้อจำลอง จากนั้นทำการป้อนกลับการควบคุมปลายแขนกล ให้มีการปรับระดับมือของหุ่นยนต์ทั้ง 2 ข้าง ทำให้ระยะระหว่างข้อมือทั้งสองข้างที่และการรักษาทิศทางการถือของตั้งฉากกับพื้นตลอดเวลา

4.2.1. การติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่ง

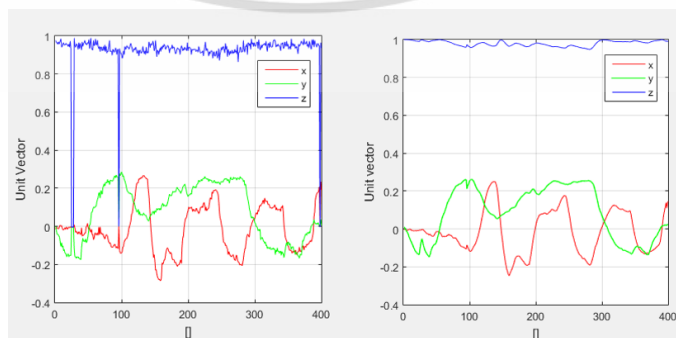
ในการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับความเร่งได้ทำการติดตั้งไว้บนฐานกึ่งกลางลำตัว เพื่อลดแรงเหวี่ยงเมื่อหุ่นยนต์ไปมา และให้เซนเซอร์ตรวจจับค่าแรงโน้มถ่วงและความเร่งตามพื้นผิว XY เท่านั้น



รูปที่ 4.2 แสดงจุดติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับความเร่ง

4.2.2. ผลของอ่านค่าเซนเซอร์และการกรอง

การอ่านค่าเซนเซอร์ตรวจจับความเร่งแรงโน้มถ่วงจะถูกนำมากรองด้วยตัวกรองคาร์มาล เพื่อให้ข้อมูลในส่วนของการกระเพื่อมของสัญญาณหรือสัญญาณรบกวนจากสัญญาณไฟฟ้าลดลงให้เหมาะสมกับการนำมาคำนวณ ซึ่งจะทำให้หุ่นยนต์ตอบสนองการเคลื่อนไหวของแขนกลนิ่มนวลขึ้น



รูปที่ 4.3 ข้อมูลเซนเซอร์ตรวจจับความเร่งที่ยังไม่ได้ผ่านการกรอง (ซ้าย) และผ่านการกรอง (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
42

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3. การออกแบบสนามทดสอบ

การออกแบบสนามทดสอบเป็นกำหนดสภาพของเส้นทางที่เป็นอุปสรรคของหุ่นยนต์ โดยการเอียงของทางลาด ทางที่มีความสูงที่แตกต่างกัน ที่จะทำให้หุ่นยนต์เกิดการเอียงซ้ายขวาหงายคว่ำ โดยโครงการใช้แบบจำลองในการทดสอบจึงได้ออกแบบให้เหมาะสมกับแบบจำลองและสภาวะการณ์ที่เทียบได้กับหุ่นยนต์จริง

4.2.3.1. การกำหนดความเร็วของฐานหุ่นยนต์เคลื่อนที่

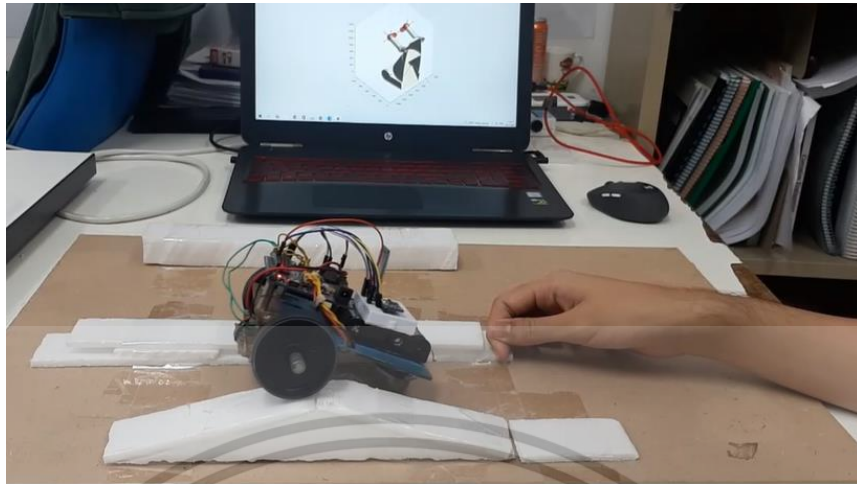
เนื่องจากหุ่นยนต์ที่ทำการทดลองยังต้องใช้หุ่นจำลองขนาดย่อส่วนแทนหุ่นยนต์ขนาดจริงทำให้ต้องลดอัตราส่วนของหุ่นยนต์ให้เล็กลงด้วยอัตราส่วน 1:8 และจากหุ่นยนต์ในอุตสาหกรรมจะมีความเร็วบังคับที่ต่ำกว่า 20 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วที่มนุษย์สามารถหลบได้ ดังนั้นความเร็วหุ่นจำลองย่อขนาดจะมีความเร็วที่ 2.5 เมตรต่อวินาที

4.2.3.2. ความสูงของอุปสรรคและองศาการเอียงของฐานหุ่นยนต์

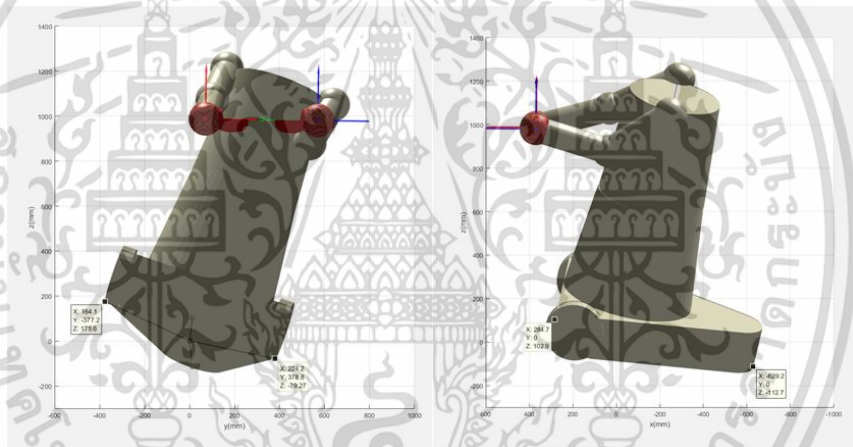
การทดลองเพื่อให้ได้ค่าการเอียงไปมาของหุ่นยนต์จะได้ค่าการเอียงไปมาจากการรับค่าข้อมูลความเร่งจากเซนเซอร์ที่ได้ มาทำให้อยู่ในรูปของพื้นต่างระดับหรือพื้นเอียงในแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ที่มีข้อกำหนดของหุ่นยนต์ ที่มีขนาดความสูงประมาณ 1.2 เมตร ฐานกว้างประมาณ 0.80 เมตร การเอียงที่ไม่ทำให้หุ่นยนต์ล้มได้มากที่สุด 15 องศา ดังนั้นการออกแบบอุปสรรคที่ทำให้หุ่นยนต์ย่อส่วนที่ย่อลงมา 1:8 ทำให้มีความกว้าง 10 เซนติเมตร และหุ่นยนต์สามารถเดินผ่านสภาพพื้นเอียงไม่เกิน 15 องศาทำให้สามารถกำหนดระดับความต่างได้ที่ 2.5 เซนติเมตร

โดยในสนามนี้ มีความยาวรวมอยู่ที่ 30 เซนติเมตร หรือเทียบเท่ากับระยะ 2.4 เมตร การทดลองเป็นแบบสุ่มเดิน ได้ข้อมูลสภาพพื้นผิวทางเดินดังรูปที่ 4.6 โดยให้หุ่นยนต์ เหยขึ้น ก้มลง เอียงซ้ายขวาไปมาดังรูปที่ 4.5 เอียงขวาหงายหลัง ทำให้ล้อขวาของหุ่นยนต์บนแบบจำลอง

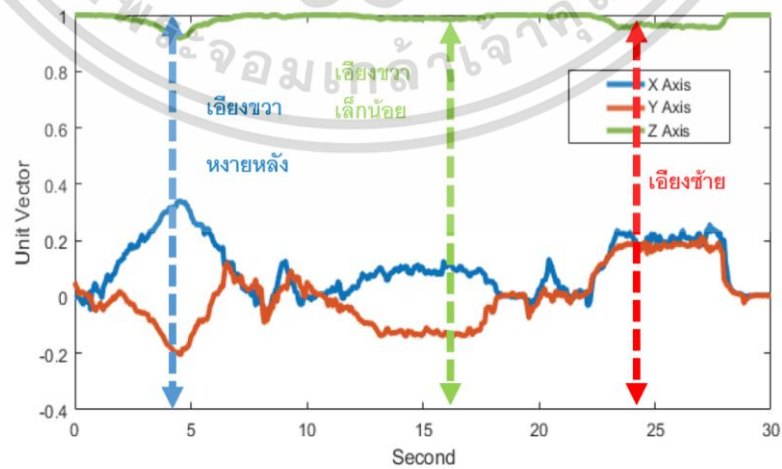
ระบบจะทำการอ่านค่าจากเซนเซอร์วัดความเร่งที่วัดค่าแรงโน้มถ่วงออกมาเป็นเวกเตอร์ โดยจะได้นำข้อมูลของเวกเตอร์หนึ่งหน่วย 3 DOF และส่งค่าการเอียงผ่านไมโครโปรเซสเซอร์ด้วยสัญญาณบลูทูธไปยังภาครับของคอมพิวเตอร์ Matlab ไปผ่านการกรองก่อนใช้ควบคุมแขนกลตามเวลาจริง รวมทั้งได้เก็บบันทึกข้อมูลทั้งที่ผ่านการกรองและไม่ผ่านการกรองไว้สำหรับใช้งานในการทดลองควบคุมแขนกลที่ประกอบขึ้น



รูปที่ 4.4 สภาพพื้นทางวิ่ง การทดลองที่ 1

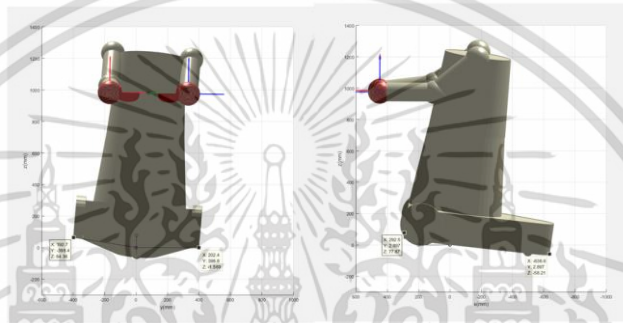
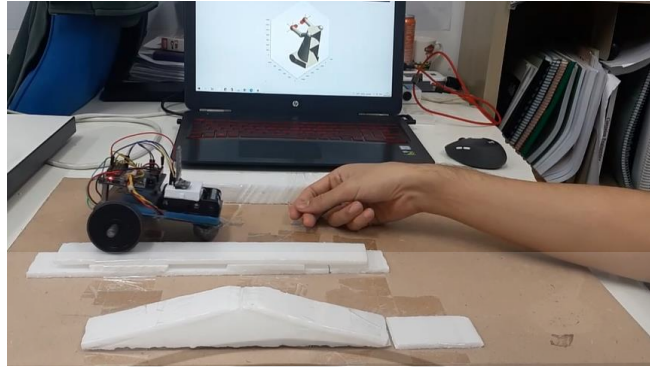


รูปที่ 4.5 การทดลองนำเก็บสภาพพื้นทางวิ่งแบบเอียงขวาหางยหลัง การทดลองที่ 1

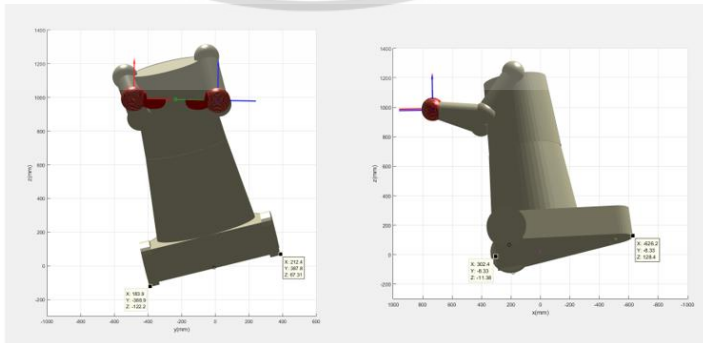
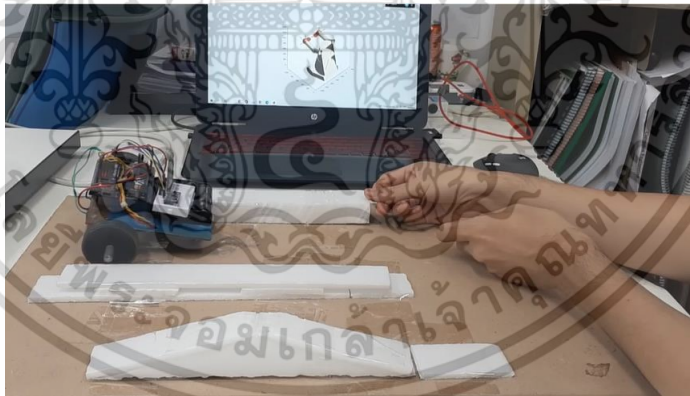


รูปที่ 4.6 สภาพการเอียงออกที่วัดออกมาได้จากสภาพพื้นผิวทางเดิน การทดลองที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 44
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การทดลองเก็บสภาพพื้นทางวิ่งแบบเอียงขวา การทดลองที่ 2

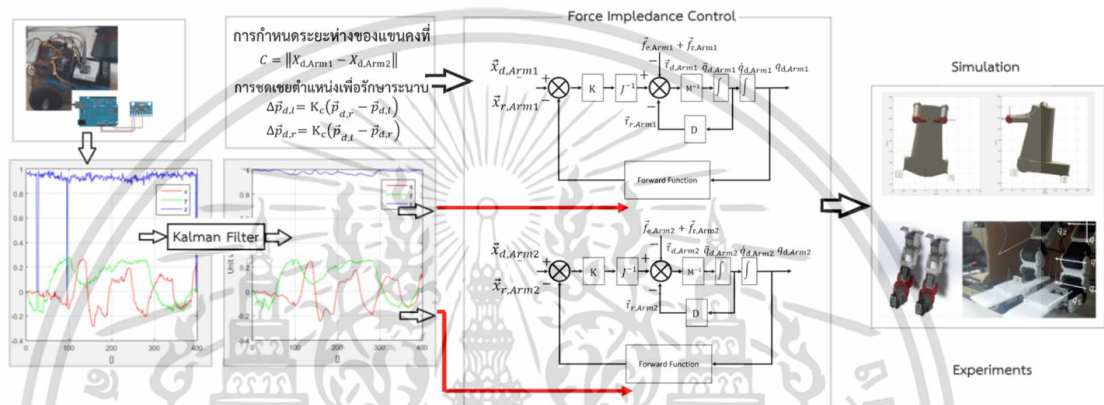


รูปที่ 4.8 การทดลองเก็บสภาพพื้นทางวิ่งแบบเอียงซ้าย การทดลองที่ 3

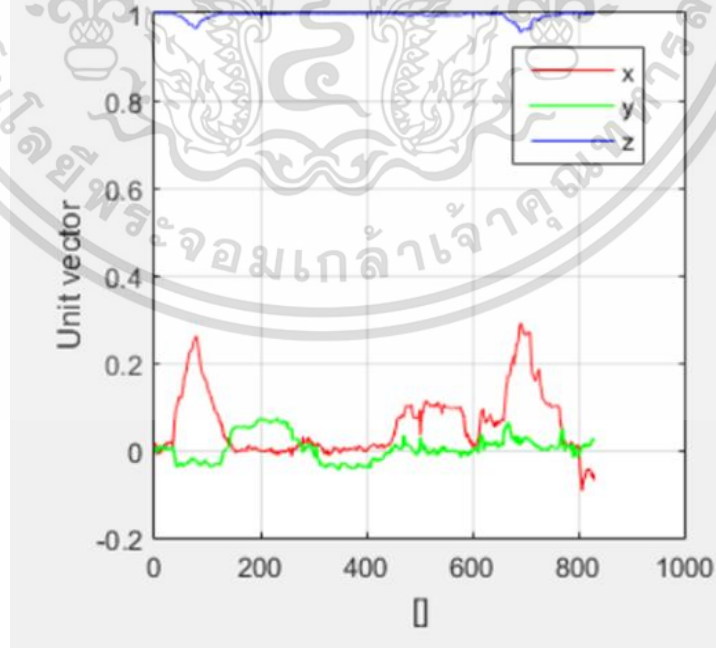
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 45
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3. ผลการทดลองการควบคุมระยะ TCP คงที่

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการควบคุมโดยผนวกเอาเงื่อนไขของการรักษาระยะมือคงที่ รักษา ระดับ และ การชดเชยตำแหน่งของ TCP ให้คงที่ โดยใช้การควบคุมแบบตามเวลาจริงและสามารถ ทำซ้ำได้โดยใช้ข้อมูลของการเอียงสภาพพื้นผิวที่ผ่านการกรองคาร์มาน (Kalman) มาใช้ในการจำลอง สถานการณ์ ทั้งจากแขนกลประกอบจากเซอร์โวมอเตอร์ และแบบจำลองคอมพิวเตอร์ของหุ่นยนต์ โดยใช้ ข้อมูลเซนเซอร์ตรวจจับความเร่งที่วัดได้จากการทดสอบบนแขนกลประกอบ ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 การทดลองการควบคุมอิมพีแดนซ์ด้วยแรง

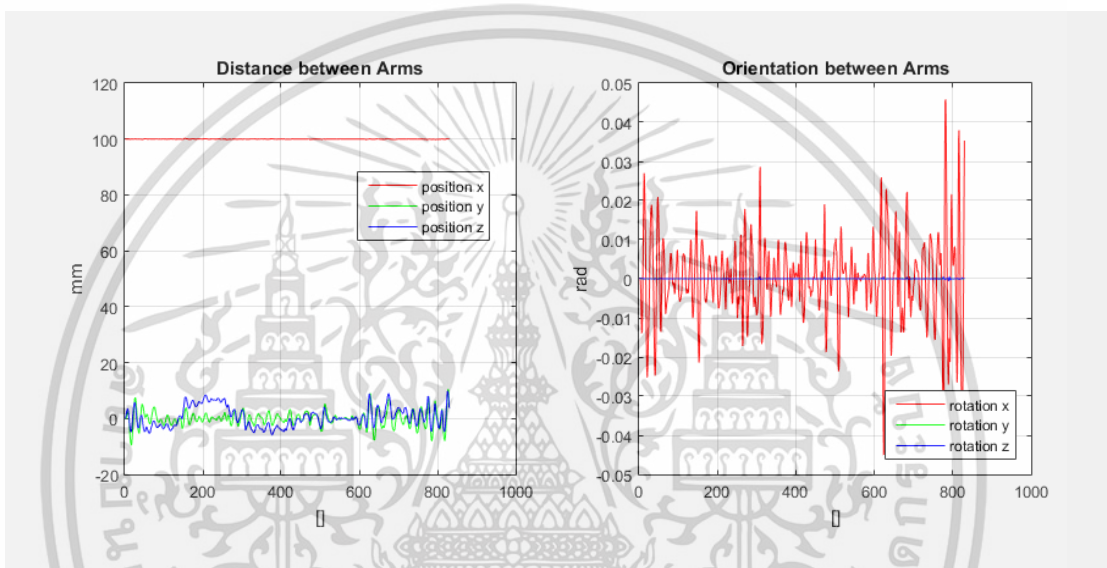


รูปที่ 4.10 ตัวอย่างข้อมูลเซนเซอร์ตรวจจับความเร่งที่วัดได้จากการทดสอบบนแขนกลประกอบ

4.3.1. ผลการทดลองด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์

ในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นผลของการรักษาระยะห่างระหว่าง 2 แขน (มือ) ของหุ่นยนต์ โดยที่ระยะห่าง C ที่ตั้งค่าไว้มีค่า 100 มิลลิเมตร จากการทดลองได้ผลการควบคุมระยะและการเปลี่ยนแปลงองศาของปลายมือทั้งสองดังรูปที่ 4.11

$$C = \|X_{d,Arm1} - X_{d,Arm2}\|$$

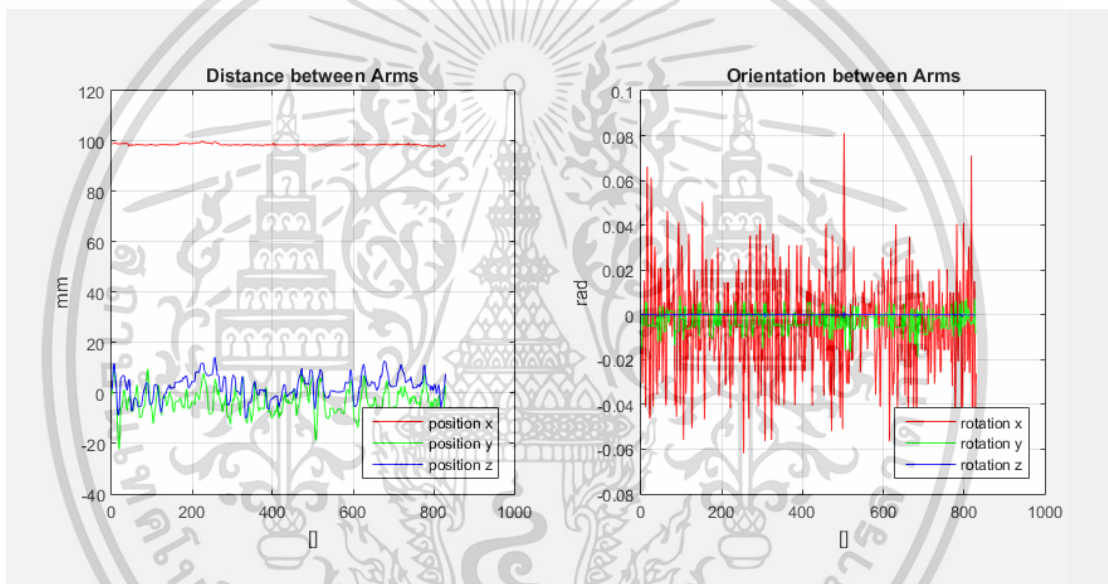


รูปที่ 4.11 ระยะห่างแขนและการเปลี่ยนแปลงองศาของปลายมือทั้งสอง
ทดสอบจากแบบจำลองบนคอมพิวเตอร์

การควบคุมที่สร้างขึ้นให้ผลการรักษาระยะห่างและองศาปลายมือได้เป็นอย่างดีในภาพจะเห็นว่าระยะในแนวแกน X เกือบจะรักษาได้ 100 คงที่ส่วนในแนวแกน Y และ Z มีการเสียตำแหน่งไปในระยะไม่เกิน 10 มิลลิเมตร ซึ่งการเสียระยะของแกน Y และ Z เนื่องจากการกำหนดแกนหมุนของข้อต่อ (Joint Configuration) ส่วนใหญ่ที่อยู่บนแนวแกน X ทำให้สามารถรักษาระยะบนแนวแกน X ได้ดีเพราะเคลื่อนไหวแนวแกนอื่นน้อยกว่า แต่จากข้อกำหนดแกนข้อต่อนี้กลับส่งผลให้การรักษาองศาของมือจะกลับกันที่มีการเปลี่ยนแปลงองศาปลายแขนรอบแกน X ที่สูงกว่าแกน Y และ Z และ ค่าความต่างมุมสูงสุดอยู่ที่ 0.05 Rad หรือเท่ากับ 2.86 องศา

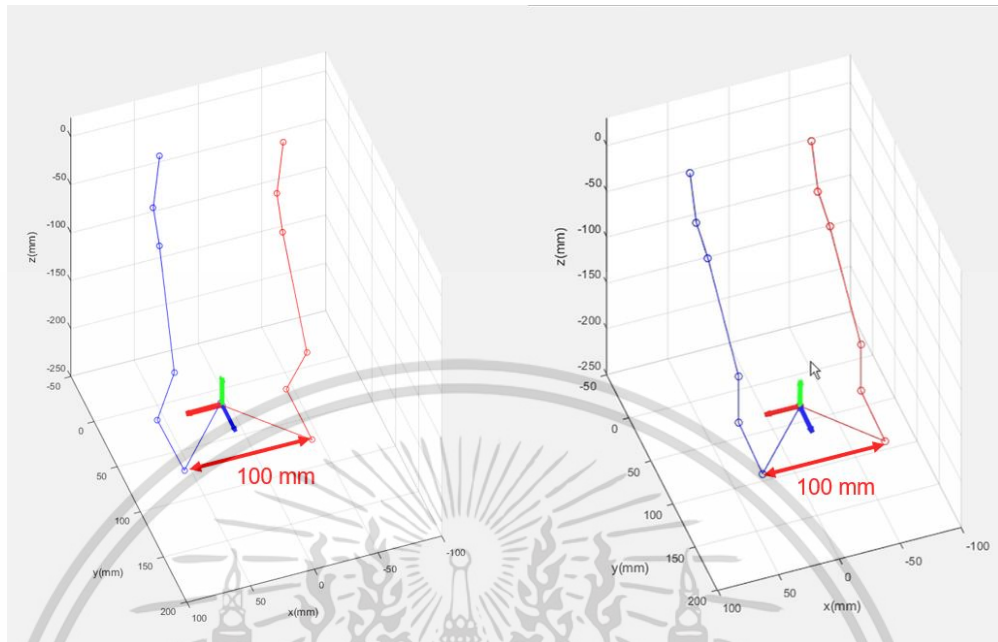
4.3.2. ผลการจำลองด้วยแขนกลประกอบ

แขนกลประกอบเป็นการสร้างแขนกลขนาดเล็กโดยใช้เซอร์โวมอเตอร์ Dynamixel AX12 จำนวนแขนละ 5 ตัว ต่อกันแบบอนุกรมควบคุมด้วยสัญญาณ RS232 Serial Dynamixel Protocol ที่ส่งค่ามุมของข้อต่อไปยังมอเตอร์แต่ละตัวและสั่งกระตุ้นการทำงานพร้อมกัน โดยตัวแปรแต่ละครั้งส่งไปเป็นจำนวน 12 Byte ต่อมอเตอร์ รวมชุดแพ็คเกจต่อคำสั่ง 156 Byte และ ป้อนกลับค่าตำแหน่งอีก 156 Byte การเชื่อมต่อที่ 1Mbps ดังนั้นต่อชุดคำสั่งจะใช้เวลา 3.2 มิลลิวินาที รวมการเคลื่อนที่จริงที่ตั้งค่าไว้ที่ 180 องศาต่อวินาที ที่ความละเอียด 0.29 องศา ดังนั้นทำให้ต่อการเคลื่อนที่ 1 รอบการคำนวณ (Computational Cycle) ใช้เวลาประมาณ 5 มิลลิวินาที



รูปที่ 4.12 ระยะห่างแขนและการเปลี่ยนแปลงองศาของปลายมือทั้งสอง ทดสอบด้วยแขนกลประกอบ

จากผลการทดลองพบการเคลื่อนไหวของแขนกลที่ช้าและกระตุกเนื่องจากความละเอียดของเซอร์โวมอเตอร์ที่ 0.29 องศา ทำให้การรักษาระยะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าที่ทดสอบบนแบบจำลองคอมพิวเตอร์ การควบคุมระยะห่างมือเฉลี่ยแกน X ที่ 98 มิลลิเมตร แกน Y มีระยะห่างมากที่สุด 18 มิลลิเมตร และ แกน Z มีระยะห่างมากที่สุด 21 มิลลิเมตร จากผลการทดลองการขดเชยความคลาดเคลื่อนของระยะห่างมือสองข้างจำเป็นต้องมีข้อต่อแบบคอมพลายแอนซ์เพื่อช่วยทำให้ปลายแขนสองข้างสามารถมีระยะยืดหยุ่นได้ ความต่างมุมสูงสุดอยู่ที่ 0.08 Rad หรือเท่ากับ 4.58 องศา



รูปที่ 4.13 แสดงโครงร่างของหุ่นยนต์ในการรักษาตำแหน่งของ TCP

4.3.3. การหาความคลาดเคลื่อนด้วยการเปรียบเทียบผลการทดลอง

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.3.1 ที่เป็นผลจากการควบคุมทั้งระบบที่มีการรักษาสมดุกระดับและระยะห่าง TCP โดยเป็นการคำนวณทางคณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียวและแสดงผลการทำงานผ่านคอมพิวเตอร์กราฟฟิกเท่านั้น ซึ่งจะเป็นผลการทำงานของกระบวนการทางการคำนวณ ให้เป็นค่าอ้างอิงของความแม่นยำของกระบวนการทางการคำนวณ เมื่อเพิ่มเติมการควบคุมหุ่นยนต์ประกอบที่เป็นเซอร์โวมอเตอร์ Dynamixel AX12S ทำให้เกิดเวลาในการประมวลผลเพิ่มเติมจากการรับส่งสัญญาณสั่งงานมอเตอร์และระยะเวลาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และความละเอียดของการเคลื่อนที่ที่ลดลงเหลือ 0.29 องศา ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนมากขึ้น จากการใช้ข้อมูลสภาพสนามทดสอบชุดเดียวกันมาประมวลผลโดยไม่คำนึงถึงความเร็วจริง พิจารณาตามรอบการทำงานเพียงอย่างเดียว

โดยผลการทดลองจาก 4.3.1 ความคลาดเคลื่อนจากระบบควบคุมโดยเฉลี่ย 10 มิลลิเมตร ส่วนผลการทดลองจาก 4.3.2 ความคลาดเคลื่อนจากระบบควบคุมโดยเฉลี่ย 18 มิลลิเมตร ทำให้พอสรุปได้ว่าค่าคลาดเคลื่อนที่มาจากชุดหุ่นยนต์ประกอบเพียงอย่างเดียวที่เกิดจากความละเอียดของมอเตอร์ การควบคุมของเซอร์โวและการสื่อสารสัญญาณสั่งงาน มีค่าความคลาดเคลื่อนโดยรวมเท่ากับ 8 มิลลิเมตร ซึ่ง ใกล้เคียงกับค่าคาดหวังที่แสดงไว้ใน 3.5. ที่ 0.79 มิลลิเมตรต่อข้อต่อแต่ละระยะการวัดเทียบจากสองแขนที่มาจากมอเตอร์ทั้งหมด 10 ตัว (5 ตัวต่อแขน) ซึ่งคาดว่าจะคลาดเคลื่อนได้ถึง 7.9 มิลลิเมตร และ ความคลาดเคลื่อนจริงที่ 8 มิลลิเมตร ซึ่งไม่แตกต่างกันโดยมีนัยสำคัญ

บทที่ 5

สรุปงานวิจัย

5.1. สรุปผลการทดลอง

การทดลองทั้งหมดในบทที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบอิมพีเดนซ์แบบแรงที่เพิ่มเติม การควบคุมระยะห่างและองศาของมือทั้งสองของหุ่นยนต์ โดยใช้ทั้งแบบจำลองและหุ่นยนต์ประกอบ โดยแขนกลยังมีการชดเชยตำแหน่งของแขนกล และมีการปรับตั้งกำหนดค่าสปริงสมมุติและค่าความหนืดของแขนกลบนแบบจำลอง แล้วใช้ข้อมูลการเอียงมาป้อนให้กับระบบทั้งรูปแบบตามเวลาจริง (Real-Time Online Control) และแบบใช้ข้อมูลบันทึกมาทำซ้ำ (Recorded Data Re-Run)

การกำหนดปัจจัยรบกวนจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไปตามทางที่มีอุปสรรคและพื้นระดับที่ไม่เท่ากัน ที่ส่งผลต่อการควบคุมแขนกล จากผลการทดลองทำให้เห็นว่า การกรองสัญญาณเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากที่จะลดปัญหาของการเคลื่อนไหวของแขนกลราบรื่นไม่มีการกระตุกของแขน กระบวนการควบคุมระยะห่างระหว่างปลายแขน (มือ) ในระบบควบคุมอิมพีเดนซ์ของหุ่นยนต์ (ไม่ได้ปิดรูปการควบคุมเพื่อให้ทั้ง 2 แขนกลายเป็นระบบเดียว) ทำได้ดีมีระยะความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร ในการทดลองด้วยแบบจำลองเพียงอย่างเดียว และ น้อยกว่า 21 มิลลิเมตรในการทดลองด้วยแบบจำลองควบคุมแขนกลประกอบพร้อมกัน ซึ่งสามารถทำให้ยืดหยุ่นได้จากการใช้ข้อต่อคอมพลายแอนท์ การตอบสนองของระบบทำได้ต่ำกว่า 5 มิลลิวินาที (Cycle Time ที่ 200 Hz) ถึงแม้จะดูน้อยแต่น่าจะยังสามารถลดลงได้จากการใช้คอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ส่วนการรักษา ระดับของสิ่งของที่ถือด้วยสองมือ (TCP) ระบบควบคุมอิมพีเดนซ์ของหุ่นยนต์ให้การตอบสนองได้ดีมีความต่างขององศาการควบคุมเพียง 2.86 องศา ในการทดลองด้วยแบบจำลองเพียงอย่างเดียว และ 5.48 องศา ในการทดลองด้วยแบบจำลองควบคุมแขนกลประกอบพร้อมกัน

5.2. ข้อเสนอแนะ

ระบบการควบคุมแบบอิมพีเดนซ์เป็นการควบคุมการเคลื่อนที่แบบพลวัตที่มีข้อจำกัดของการดำเนินการหลายด้าน การคำนวณที่มีความซับซ้อน และมีภาระในการประมวลผลการคำนวณสูง รวมทั้งการเชื่อมต่อกับฮาร์ดแวร์อย่างเซนเซอร์ที่ต้องใช้ตัวกรองสัญญาณ ตัวแขนกลที่ต้องมีการสื่อสารสองทาง ระบบฐานล้อเคลื่อนที่ ในการนำไปใช้จริงนั้นจำเป็นต้องมีตัวประมวลผลกลางที่มีประสิทธิภาพสูงและตัวแผงวงจรควบคุมที่เร็วเพื่อให้ทันกับการประมวลผลแบบตามเวลาจริง

การกำหนดค่าตัวแปรบางอย่างอย่างแรงเสียดทานในข้อต่อ มวลของแขน การกำหนดข้อจำกัดของข้อต่อความเร็ว ลิมิตตำแหน่งมุม จะสามารถเร่งให้ระบบนั้นมีความเร็วในการประมวลผลมากขึ้น แต่อาจเป็นผลให้การเคลื่อนที่อาจจะขาดความแม่นยำด้านแรงไป แต่ในงานวิจัยนี้ใช้แขนกลขนาดเล็กมาเป็นตัวแทนในการทดสอบจึงส่งผลน้อยแต่กลับมีข้อจำกัดด้านความละเอียดแทนซึ่งไม่เหมาะกับการนำทำเป็นแขนกลของหุ่นยนต์บริการจริง ที่ต้องเปลี่ยนเซอร์โวมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นทั้งกำลังและความละเอียด

5.3. สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบควบคุมแขนกลสำหรับหุ่นยนต์บริการ โดยใช้ระบบควบคุมอิมพีเดนซ์ด้วยแรง ที่เป็นการใช้ระบบพิกัดฉากที่อ้างอิงจากสิ่งแวดล้อมไปยังตัวหุ่นยนต์ถึงปลายแขนทั้งสองข้าง ทำให้ปลายแขนกลทั้งสองรักษาระยะห่างให้คงที่และรักษามุมพิกัดปลายแขนที่ต้องทำให้มีมือถือสิ่งของอยู่ในแนวตั้งที่ชี้ขึ้นตลอดเวลาและรักษาแนวระดับคงที่ การควบคุมอิมพีเดนซ์ด้วยแรงขับเคลื่อนจะสร้างสปริงเสมือนหรือสปริงค์สมมุติเป็นเป้าหมายนำไปปลายแขนของหุ่นยนต์ให้รักษาสมดุลของงานการถือของ หุ่นยนต์จะรับรู้สภาพการเอียงของฐานหุ่นยนต์เลียนแบบสะท้อนสภาพของเส้นทางเดินด้วยเซนเซอร์วัดความเร่งที่ได้รับการกรองจากตัวกรองคาลมาน เพื่อนำไปปรับตำแหน่งเป้าหมายที่ปลายแขนจุดตั้งอุปกรณ์ (TCP) ที่อย่างเหมาะสม

โดยกระบวนการใหม่ที่น่าสนใจเป็นการนำเอาระบบควบคุมอิมพีเดนซ์ด้วยแรงที่กล่าวข้างต้นมาประยุกต์ใช้กับแขนกล 2 แขนที่ต้องทำงานสัมพันธ์กัน (Synchronizing) ที่เป้าหมายของปลายแขนทั้งสองต้องชดเชยการเสียตำแหน่งจากการเอียงของฐาน โดยนำเสนอการควบคุมเพิ่มเติมเป็นกระบวนการชดเชยตำแหน่งและการควบคุมระยะคงที่เข้ามาใช้เพื่อเชื่อมโยงแขนทั้งสอง

จากการทดลองหลาย ๆ อันที่จัดทำขึ้นพบว่าระบบการควบคุมอิมพีเดนซ์ด้วยแรง สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ทำให้แกน Z ของปลายแขนทั้งสองชี้ขึ้นตลอดเวลาได้ และ รักษาระนาบได้ดีในแขนกลบนแบบจำลอง แต่อาจมีข้อจำกัดในการทดลองกับแขนกลที่ประกอบขึ้นเนื่องจากสเปคของเซอร์โวมอเตอร์ และ คอมพิวเตอร์สำหรับระบบประมวลผลที่ช้าที่อาจให้เห็นมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างแต่ยังอยู่ระยะที่ยังไม่ทำให้ของที่ถือเสียสมดุลไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. M. Braun, G. P. Starr, J. E. Wood, and R. Lumia, "A framework for implementing cooperative motion on industrial controllers," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 20, no. 3, pp. 583–589, 2004, doi: 10.1109/TRA.2004.824941.
- [2] M. Suomalainen, Y. Karayiannidis, and V. Kyrki, "A survey of robot manipulation in contact," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 156, 2022, doi: 10.1016/j.robot.2022.104224.
- [3] H. Hu and J. Cao, "Adaptive variable impedance control of dual-arm robots for slabstone installation," *ISA Trans.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.isatra.2021.10.020.
- [4] F. Caccavale, P. Chiacchio, A. Marino, and L. Villani, "Six-DOF impedance control of dual-arm cooperative manipulators," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 13, no. 5, pp. 576–586, 2008, doi: 10.1109/TMECH.2008.2002816.
- [5] X. Li, Y. H. Liu, and H. Yu, "Iterative learning impedance control for rehabilitation robots driven by series elastic actuators," *Automatica*, vol. 90, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1016/j.automatica.2017.12.031.
- [6] Lorenzo Sciavicco and Bruno Siciliano, *Modelling and Control of Robot Manipulators*, Second. McGraw Hill, 1996.
- [7] F. Ficuciello, L. Villani, and B. Siciliano, "Variable Impedance Control of Redundant Manipulators for Intuitive Human-Robot Physical Interaction," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 31, no. 4, pp. 850–863, 2015, doi: 10.1109/TRO.2015.2430053.
- [8] J. Duan, Y. Gan, M. Chen, and X. Dai, "Adaptive variable impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environment," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 102, pp. 54–65, 2018, doi: 10.1016/j.robot.2018.01.009.
- [9] Y. Dong and B. Ren, "UDE-Based Variable Impedance Control of Uncertain Robot Systems," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.*, vol. 49, no. 12, pp. 2487–2498, 2019, doi: 10.1109/TSMC.2017.2767566.
- [10] S. El Zaatari, M. Marei, W. Li, and Z. Usman, "Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 116, pp. 162–180, 2019, doi: 10.1016/j.robot.2019.03.003.
- [11] C. Lagoda, A. C. Schouten, A. H. A. Stienen, E. E. G. Hekman, and H. Van Der

- Kooij, "Design of an electric series elastic actuated joint for robotic gait rehabilitation training," *2010 3rd IEEE RAS EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics, BioRob 2010*, pp. 21–26, 2010, doi: 10.1109/BIOROB.2010.5626010.
- [12] D. Ito, Y. Funabara, S. Doki, and K. Doki, "Impedance Control System Based on Contact Force Distribution for Wearable Robot with Tactile Sensor," *Proc. 2019 IEEE/SICE Int. Symp. Syst. Integr. SII 2019*, pp. 259–263, 2019, doi: 10.1109/SII.2019.8700383.
- [13] L. Peternel, W. Kim, J. Babic, and A. Ajoudani, "Towards ergonomic control of human-robot co-manipulation and handover," *IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robot.*, pp. 55–60, 2017, doi: 10.1109/HUMANOIDS.2017.8239537.
- [14] A. Calanca and P. Fiorini, "Impedance control of series elastic actuators based on well-defined force dynamics," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 96, pp. 81–92, 2017, doi: 10.1016/j.robot.2017.06.013.
- [15] K. Kreutz-Delgado, M. Long, and H. Seraji, "Kinematic Analysis of 7-DOF Manipulators," *Int. J. Rob. Res.*, vol. 11, no. 5, pp. 469–481, 1992, doi: 10.1177/027836499201100504.
- [16] X. Zhang, B. Fan, C. Wang, and X. Cheng, "Analysis of singular configuration of robotic manipulators," *Electron.*, vol. 10, no. 18, 2021, doi: 10.3390/electronics10182189.
- [17] T. Yu, D. Wang, and L. Gao, "Singularity avoidance for manipulators with spherical wrists using the approximate damped reciprocal algorithm," *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, vol. 18, no. 2, 2021, doi: 10.1177/1729881421995681.
- [18] B. Farooq, O. Hasan, and S. Iqbal, "Formal kinematic analysis of the two-link planar manipulator," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 8144 LNCS, pp. 347–362, 2013, doi: 10.1007/978-3-642-41202-8_23.
- [19] H. Girgin and S. Calinon, "Nullspace Structure in Model Predictive Control," 2019, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1905.09679>.
- [20] H. Kris, "Robotic Systems," *Duke University*, 2018. <http://motion.pratt.duke.edu/RoboticSystems/InverseKinematics.html>.

- [21] J. Yuan, Y. Qian, L. Gao, Z. Yuan, and W. Wan, "Position-based impedance force controller with sensorless force estimation," *Assem. Autom.*, vol. 39, no. 3, pp. 489–496, 2019, doi: 10.1108/AA-09-2018-0124.
- [22] W. M. Silver, "On the Equivalence of Lagrangian and Newton-Euler Dynamics for Manipulators," *Int. J. Rob. Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 60–70, 1982, doi: 10.1177/027836498200100204.
- [23] L. Tsai, "Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators," *Mech. Ser. Parallel Manip.*, p. 520, 1999, [Online]. Available: http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Robot+Analysis#2%5Cnhttp://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=PK_N9aFZ3ccC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Robot+Analysis:+The+Mechanics+of+Serial+and+Parallel+Manipulators&ots=acRJIeF57G&sig=MXyiO77O7H09ox.
- [24] B. Siciliano and O. Khatib, "Springer handbook of robotics," *Springer Handb. Robot.*, pp. 1–2227, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-32552-1.
- [25] K. Ba, B. Yu, Z. Gao, Q. Zhu, G. Ma, and X. Kong, "An improved force-based impedance control method for the HDU of legged robots," *ISA Trans.*, vol. 84, pp. 187–205, 2019, doi: 10.1016/j.isatra.2018.09.002.
- [26] A. Calanca, R. Muradore, and P. Fiorini, "A review of algorithms for compliant control of stiff and fixed-compliance robots," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 21, no. 2, pp. 613–624, 2016, doi: 10.1109/TMECH.2015.2465849.
- [27] T. Tsumugiwa, R. Yokogawa, and K. Yoshida, "Stability analysis for impedance control of robot for human-robot cooperative task system," *2004 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, vol. 4, no. 1, pp. 3883–3888, 2004, doi: 10.1299/jamdsm.1.113.
- [28] M. Schumacher, J. Wojtusich, P. Beckerle, and O. von Stryk, "An introductory review of active compliant control," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 119, pp. 185–200, 2019, doi: 10.1016/j.robot.2019.06.009.
- [29] R. I. Alfian, A. Ma'Arif, and S. Sunardi, "Noise reduction in the accelerometer and gyroscope sensor with the Kalman filter algorithm," *J. Robot. Control*, vol. 2, no. 3, pp. 180–189, 2021, doi: 10.18196/jrc.2375.
- [30] C. Hide, T. Moore, and M. Smith, "Adaptive Kalman filtering for low-cost

- INS/GPS,” *J. Navig.*, vol. 56, no. 1, pp. 143–152, 2003, doi: 10.1017/S0373463302002151.
- [31] Y. Liu, N. Noguchi, and K. Ishii, “Development of a Low-cost IMU by using sensor fusion for attitude angle estimation,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 19, pp. 4435–4440, 2014, doi: 10.3182/20140824-6-za-1003.00610.
- [32] G.W.A.D., *Fundamentals of manipulator calibration*, vol. 32, no. 1–2. 1992.
- [33] R. Kluz and T. Trzepieciński, “The repeatability positioning analysis of the industrial robot arm,” *Assem. Autom.*, vol. 34, no. 3, pp. 285–295, 2014, doi: 10.1108/AA-07-2013-070.
- [34] M. R. Pac, M. Rakotondrabe, S. Khadraoui, D. O. Popa, and P. Lutz, “Guaranteed manipulator precision via interval analysis of inverse kinematics,” *Proc. ASME Des. Eng. Tech. Conf.*, vol. 1, 2013, doi: 10.1115/DETC2013-13033.
- [35] S. H. Yen, P. C. Tang, Y. C. Lin, and C. Y. Lin, “Development of a virtual force sensor for a lowcost collaborative robot and applications to safety control,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 11, 2019, doi: 10.3390/s19112603.
- [36] RBR Staff, “Differences Between Encoder Resolution, Accuracy, and Precision,” *Roboticsbusinessreview*, 2019.
- [37] H. Austerlitz, “Data Acquisition Techniques Using PCs,” *Data Acquis. Tech. Using PCs*, pp. 1–416, 2003, doi: 10.1016/B978-0-12-068377-2.X5000-1.



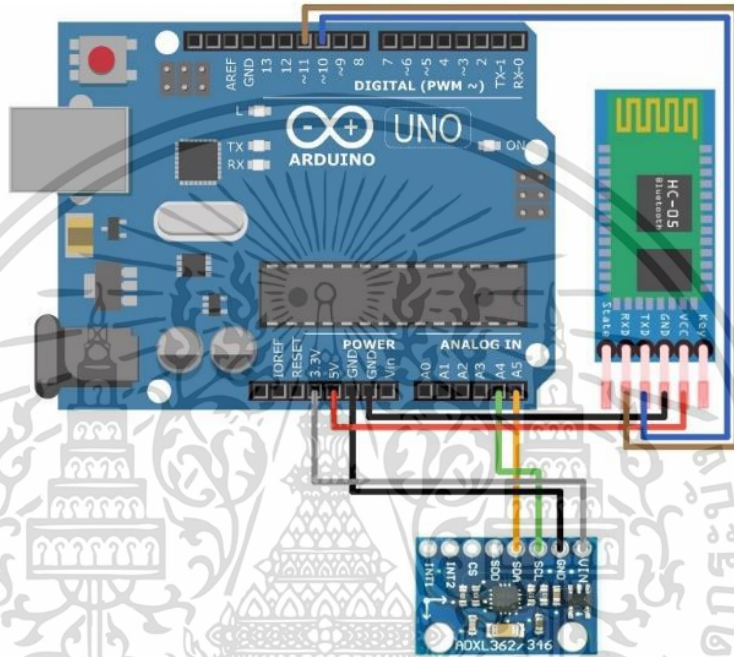
ภาพผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก.ก

วงจรเซนเซอร์ความเร่ง

ในการรับรู้ การส่งข้อมูลจากตัวรับส่งสัญญาณบลูทูธ 115200 Baud rate



รูปที่ ก.5.1 การต่อวงจรของการรับรู้ค่าการเอียงไปมาของหุ่นยนต์

*/

```
#include <Wire.h> // Wire library - used for I2C communication
int ADXL345 = 0x53; // The ADXL345 sensor I2C address
float X_out, Y_out, Z_out; // Outputs
#include <SoftwareSerial.h>
#define rxPin 10
#define txPin 11
SoftwareSerial bt = SoftwareSerial(rxPin, txPin);
void setup() {
  pinMode(rxPin, INPUT);
  pinMode(txPin, OUTPUT);
  bt.begin(115200);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Serial.begin(115200); // Initiate serial communication for printing the results on the
Serial monitor

Wire.begin(); // Initiate the Wire library
// Set ADXL345 in measuring mode
Wire.beginTransmission(ADXL345); // Start communicating with the device
Wire.write(0x2D); // Access/ talk to POWER_CTL Register - 0x2D
// Enable measurement
Wire.write(8); // (8dec -> 0000 1000 binary) Bit D3 High for measuring enable
Wire.endTransmission();
delay(1);
}

void loop() {
  if(bt.read()>0)
  {
    // === Read accelerometer data === //
    Wire.beginTransmission(ADXL345);
    Wire.write(0x32); // Start with register 0x32 (ACCEL_XOUT_H)
    Wire.endTransmission(false);
    Wire.requestFrom(ADXL345, 6, true); // Read 6 registers total, each axis value is
    stored in 2 registers
    X_out = ( Wire.read() | Wire.read() << 8); // X-axis value
    X_out = X_out/256; //For a range of +2g, we need to divide the raw values by 256,
    according to the datasheet
    Y_out = ( Wire.read() | Wire.read() << 8); // Y-axis value
    Y_out = Y_out/256;
    Z_out = ( Wire.read() | Wire.read() << 8); // Z-axis value
    Z_out = Z_out/256;
    if(X_out>=0){Serial.print("X0");}
    if(X_out<0){Serial.print("X");}
    Serial.print(X_out,4);
    if(Y_out>=0){Serial.print("Y0");}

```

```
if(Y_out<0){Serial.print("Y");}  
Serial.print(Y_out,4);  
if(Z_out>=0){Serial.print("Z0");}  
if(Z_out<0){Serial.print("Z");}  
Serial.println(Z_out,4);  
delay(1);  
}}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

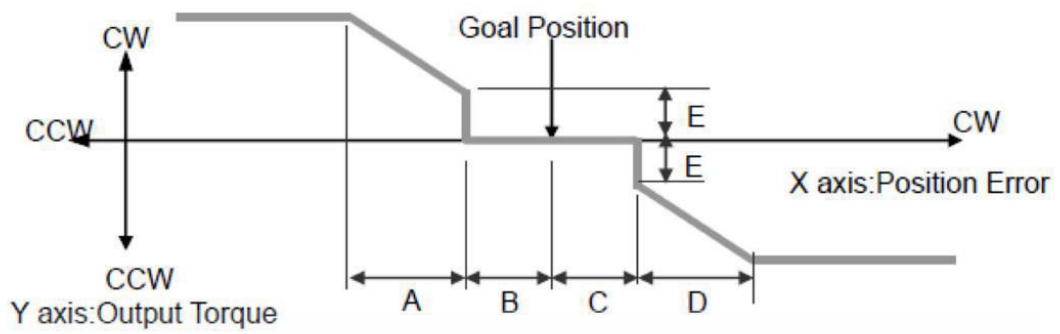
ภาคผนวก.ข

เซอร์โวมอเตอร์ Dynamixel

ในระบบควบคุมความแม่นยำที่สำคัญมาก ในงานควบคุมแขนกลปลายแขนกล [18-20] [11], [34], [35] ในเซอร์โวมอเตอร์ Ax12 Dynamixel ดังError! Reference source not found. มีการใช้อุปกรณ์การรับรู้แบบ Potentiometer [36], [37] ดังError! Reference source not found. ซึ่งใช้ตัวความต้านทานปรับค่าได้ ไฟฟ้าแบบกระแสตรง ให้การรับรู้ตำแหน่งเชิงมุมของเซอร์โวมอเตอร์ ให้ค่าความแม่นยำต่ำ เมื่อเปรียบเทียบค่าการรับรู้ระหว่าง 10 bit และ 12 bit ดังError! Reference source not found. ก.1 สังเกตว่ามีค่าการรับรู้ที่หายไปในการรับรู้ที่ 10 bit ซึ่งทำให้ข้อมูลนั้นไม่แม่นยำเท่า 12 bit และสามารถสรุปได้เป็นค่าความแม่นยำ ดัง โดยอีกปัจจัยในการควบคุมแขนกล สิ่งที่สำคัญเหมือนกันคือต้องศึกษาพฤติกรรมของแรงที่เกิดขึ้นในเซอร์โวมอเตอร์ แสดงแผนภาพของแรงบนข้อต่อใกล้กับตำแหน่งซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ระบบควบคุมนั้นไม่แม่นยำ

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดของเซอร์โวมอเตอร์ Dynamixel Ax12

Item	Specification
Baud Rate	7,843[bps]~1[Mbps]
Weight	54.6 g
Physical Connection	TTL Level Multi Drop Bus Half Duplex Asynchronous Serial Communication (8 bit,1stop,No Parity)
Dimension (W x H x D)	32x50x40 [mm] 1.26x1.97x1.57[inch]
Resolution	0.29[°]
Running Degree	0~300[°] Endless Turn
Motor	Cored
Gear Ratio	254:1
Stall Torque	1.5[N.m](at 12 [V],1.5[A])
Input Voltage	9.0 ~12.0[V]
Command signal	Digital Packet
ID	254 ID (0~253)
Feedback	Position, Temperature, Load, Input Voltage, etc
Gear Material	Engineering Plastic(Full)
Case Material	Engineering Plastic(Front, Middle, Back)

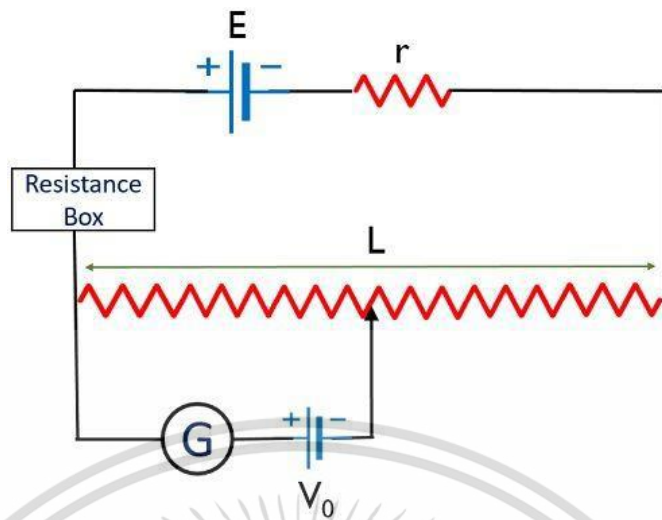


- A : CCW Compliance Slope(Address0x1D)
- B : CCW Compliance Margin(Address0x1B)
- C : CW Compliance Margin(Address0x1A)
- D : CW Compliance Slope (Address0x1C)
- E : Punch(Address0x30,31)

รูปที่ ข.1 แผนภาพแรงบนข้อต่อใกล้กับตำแหน่งเป้าหมาย



รูปที่ ข.5.2 AX12 Dynamixel



Circuit of Potentiometer

Electronics Coach

รูปที่ ข.5.3 วงจร Potentiometer

ตารางที่ ข.1 เทียบความละเอียด ระหว่าง 10Bit และ 12Bit

12 bit	10 bit
0.000000	0.000000
0.09	...
0.18	...
0.27	...
0.351562	0.351562
0.45	...
0.54	...
0.63	...
0.703125	0.703125

ตารางที่ ข.2 เทียบความละเอียดของโซโวมอเตอร์

Resolution in bit	Positions per Revolution	Degrees of Rotation
8-bit resolution	256 positions	1.41° of rotation per positions
10-bit resolution	1024 positions	0.35° of rotation per positions
12-bit resolution	4096 positions	0.09° of rotation per positions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก.ง

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

ภัทรวัต ชัยคุณสมบัติ, พลชัย โชติปรายนกุล (2565) “กระบวนการควบคุมด้วยแรงสำหรับหุ่นยนต์บริการ” การประชุมวิชาการข่ายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ปีที่ 2565 ครั้งที่ 40 หน้าที่ 141 – 146 (ได้รับบทความวิจัยดีเด่น)





กระบวนการควบคุมด้วยแรงสำหรับหุ่นยนต์บริการ
Force Control Scheme for Service Robot Arm

ภัทรวดี ชัยคุณสมบัติ^{1*}, พลชัย ไชติปรายนกุล¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail: 61601157@kmitl.ac.th*

Phatarawat Chaikhunsombat^{1,*}, Pholchai Chotiprayanakul¹

¹Department of Industrial Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
E-mail: 61601157@kmitl.ac.th*

บทคัดย่อ

หุ่นยนต์บริการที่มีแขนกลติดตั้งบนฐานเคลื่อนที่ในงานการส่งของแบบถือสิ่งถึงมือแบบบังคับทางหรือถือด้วยมือ กระบวนการควบคุมแขนกลเป็นส่วนสำคัญในการที่จะทำให้เกิดการรักษาสถิตของสิ่งของที่วางถาดหรือสิ่งของที่พื้นถือไว้เมื่อเกิดสภาวะที่ทำให้ฐานเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เสียสมดุล โดยงานวิจัยนี้เป็นงานนำเสนอกระบวนการควบคุมแขนกลและมือของหุ่นยนต์โดยใช้ระบบการควบคุมด้วยแรงและระบบควบคุมอิมพีแดนซ์ ภายใต้การนำเสนองานวิจัยนี้จะได้แสดงกระบวนการการควบคุมหุ่นยนต์บริการ ด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ที่ประกอบด้วย ชุดล้อเลื่อนและแขนกลแบบ 6 แกนองศาอิสระ 2 แขน ทำงานร่วมกับเซนเซอร์ตรวจจับความเร่งซึ่งรวมทั้งแรงโน้มถ่วง สามารถอ่านค่าการเอียงของหุ่นยนต์และความเร่งในการเคลื่อนที่ ค่าความเร่งจะถูกนำไปใช้ในการควบคุมแขนกลทั้งสองเพื่อรักษาสถิตของที่ถือ การทดสอบด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ทำงานร่วมกับเซนเซอร์แสดงให้เห็นถึงความสามารถของระบบการควบคุมที่สร้างขึ้นว่ามีความสามารถในการตอบสนองการรักษาระดับของสิ่งของที่ถือไว้ได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์, แขนกลคู่, หุ่นยนต์บริการ

Abstract

A service robot which is a mobile robot with manipulators is used for serving objects (food and beverages) hand to hand or object on tray holding. To achieve this service task, the controlling technique is the most important part for robot arms to hold and balance objects on its hands when the robot is running into rough or slope surface area. This paper proposes a technique to control the position and orientation of robot arm's end-effector with force-impedance algorithm. This research focuses on a service robot with two arms and hands. The experiments are conducted in computer simulation to confirm the control technique. The gravity signal comes from a 3DOF acceleration sensor attaching on a model mobile platform running on scale model of uneven testing field to simulate real-life working environment. Result of experiments show the performance and capability of force-impedance control technique can hold and leveling the both robot arm's end-effectors and the distance between end-effector of two arms can be maintained in certain range. The testing result also shows the robot's hands can make efficient orientation of both hands up-rising through all the testing period.

Keywords: Impedance control, Cooperative manipulator, Service Robot



1. บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมบริการในประเทศไทยยังพึ่งพาการใช้แรงงานคนงาน ที่เริ่มมีค่าใช้จ่ายสูงมากขึ้นจากค่าครองชีพ และ ด้วยสถานการณ์โควิด 19 ที่เกิดขึ้น ทำให้ผู้ใช้บริการมีความกังวลเรื่องการแพร่ระบาดผ่านช่องทางของบริการภายในร้านอาหาร หรือการแพร่ผ่านการส่งอาหารและยาให้กับผู้ป่วยภายในสถานพยาบาล เป็นต้น จึงได้มีการนำหุ่นยนต์บริการมาช่วยเหลือในการทำงาน เพื่อทำให้เกิดความสะดวกสบายและลดความเสี่ยง หรือจะประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์ที่กระตุ้นให้เกิดการขยายตัวสู่พื้นที่คนมากขึ้น

แขนกลแบบ 6 แกนของคอปิลิโระ จะมีการเคลื่อนไหวคล้ายแขนคน จึงเป็นที่นิยมนำมาติดตั้งเคลื่อนที่บนระบบล้อให้กับหุ่นยนต์บริการ โดยหุ่นจะทำงานภายใต้สถานะแวดล้อมที่ถูกปรับด้วยวิศวกรรมมาก่อนเช่น ช่องทางบังคับ ระดับทางเดินเรียบ ไม่มีการขึ้นลงเนิน เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้จะเน้นที่จะนำเอาหุ่นยนต์บริการเข้าไปสู่สิ่งแวดล้อมที่ยังไม่ได้ถูกปรับโดยที่ยังทำให้สิ่งของที่หุ่นยนต์ถืออยู่ไม่หก ล้ม ตก หรือหลุด ออกจากการถือเมื่อเดินบนพื้นผิวที่ต่างระดับ พื้นเอียง หรือพื้นผิวที่มีความไม่แน่นอน

การผสมผสานความสามารถการควบคุมค่าต่าง ๆ โดยการออกแบบทางหุ่นยนต์ อาศัยวิธีการระบุตำแหน่งเชิงเส้นที่ปลายแขนกลหรือการควบคุมแบบอิมพีเด้นซ์ที่มีการควบคุมแรงเฉพาะตัวตามลักษณะการใช้งาน (1) สามารถใช้งานบนหุ่นยนต์แบบ 2 แขน และคอปิลิโระที่ดี การใช้การควบคุมแบบอิมพีเด้นซ์ (2) (3) และ (4) สามารถรองรับแรงต้านทานซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มความสามารถในการตอบสนองต่อพื้นเอียง โดยการจัดระบบค่าตัวแปรควบคุมแรงต้านทาน และ ความหวัง ที่เหมาะสม

แขนกลในงานวิจัยที่ (5) ถึง (8) เป็นการควบคุมแบบอิมพีเด้นซ์ที่ใช้กับแขนกลสองแขน หรือ ทำงานโต้ตอบกับผู้ใช้งาน โดยอาศัยการตอบสนองลบบิตังการศาสตร์ที่วิ่งเร็วเริ่มกับวิ่งช้าตามเวลาจริง โดยหุ่นสามารถตอบสนองหรือรักษาสถิตการถือของไม้ให้ของตกหล่นได้ เมื่อแขนชนสิ่งแวดลอมหรือถูกชนจากคน แต่การทำงานยังเป็นการยึดฐานของหุ่นให้มั่นคงเพื่อลดความผิดพลาดในการควบคุมตำแหน่งของแขนกลหรือรักษาสถิตการถือของไม้ที่ออกแบบไว้ การนำมาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์บนฐานล้อเคลื่อนที่ที่มีการเอียงตัว ให้หุ่นสามารถรักษาสถิตการถือของในงานบริการ จำเป็นต้องขยายความสามารถให้ระบบควบคุมหุ่นให้ตอบสนองสภาพแวดล้อมที่ไม่แน่นอน และวิธีการยกของบนถาดอาหารได้ด้วยตัวเอง

ในงานวิจัยการควบคุมด้วยแรงและอิมพีเด้นซ์ เพื่อใช้กับหุ่นยนต์บริการติดแขนกลให้มีการรักษาระนาบที่ปลายแขนกลตั้งฉากกับแนวระนาบโลกและมีระยะห่างระหว่างแขนกลทั้งสองคงที่ทำให้หุ่นยนต์รักษาสถิตการถือของไม้ให้ของตกหล่นได้ โดยงานวิจัยนี้ได้แสดงผลการทำงานของระบบควบคุมแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของระบบควบคุมที่สร้างขึ้น

2. แผนการควบคุมระบบหุ่นยนต์บริการติดแขนกล

ระบบควบคุมหุ่นยนต์ที่ได้มีการออกแบบบน Operational Space จากอิทธิพลแรงโน้มถ่วง ทำให้สามารถรู้ได้ถึงแนวแกนระบบพิกัดของสิ่งแวดล้อมที่ไม่เปลี่ยนแปลง โดยสิ่งที่เกิดขึ้นนั้นสามารถรับรู้การเอียงนั้นได้จากการใช้เซนเซอร์ความเร่งติดภายในตัวชุดล้อเลื่อนและให้หุ่นยนต์บริการที่ติดแขนกลมีระบบควบคุมได้นั้นโดยใช่วิธีอย่างง่าย และที่นำมาใช้ในการออกแบบระบบ จะต้องมีการได้มีการแยกระบบพิกัดจากของแขนกลออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ 1.จุดศูนย์กลางของหุ่นยนต์บริการติดแขนกล 2.พลาตฟอรม์ของการออกแบบควบคุม

2.1 จลศาสตร์ของหุ่นยนต์บริการติดแขนกล

ในส่วนนี้เป็นการแสดงรายละเอียดระบบพิกัดที่ได้ดังรูปที่ 1 โดยวิธีที่ง่ายและสะดวกในการควบคุมจะทำการแบ่ง ระบบพิกัดแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ $\{W\}$ ระบบพิกัดของสิ่งแวดล้อม, $\{B\}$ ระบบพิกัดของตัวชุดล้อเลื่อน, $\{E\}$ ระบบพิกัดของปลายแขนกล



รูปที่ 1 รายละเอียดระบบพิกัดหุ่นยนต์บริการติดแขนกล

2.2 ระบบพิกัดของหุ่นยนต์ (Forward Kinematics)

ในหุ่นยนต์บริการจะมีการติดตั้งแขนกลทั้งหมด 2 แขน โดยระบบพิกัดของแขนกลแต่ละแขนจะมี 6 แกนอิสระ (6 Degree of Freedom) สามารถแสดงได้ในรูปแบบของระบบเมทริกซ์เปลี่ยนแปลง (Transformation Matrix) จากระบบพิกัดหนึ่งผ่านกันข้อต่อไปอีกข้อต่อถัดไปได้ดังนี้

$$T_{n-1}^n = \text{Tran}(x, y, z) * \text{Rot}(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$$

เมื่อ T_{n-1}^n คือเมทริกซ์เปลี่ยนแปลง (Transformation Matrix) ระบบพิกัดข้อต่อที่ n-1 ไปยังข้อต่อ n ส่วน $\text{Tran}(x, y, z)$ คือเมทริกซ์การเลื่อนพิกัดตามแนวแกน และ $\text{Rot}(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ คือ เมทริกซ์การ



หมุนที่ก๊อครอบแนวแกน จากสมการข้างต้นจะได้แสดงระบบที่ก๊อครอบ
 แนวแกน 6 องศาอิสระของแขนกล ได้ดังนี้

$$T_B^{E,Arm} = T_B^1 T_1^2 \dots T_6^{E,Arm} \begin{bmatrix} p_x & o_x & a_x & p_x \\ p_y & o_y & a_y & p_y \\ p_z & o_z & a_z & p_z \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

จากระบบที่ก๊อครอบแนวแกน 6 องศาอิสระและ $T_B^{E,Arm}$ คือ เมทริกซ์การ
 เปลี่ยนที่ก๊อครอบหุ่นยนต์ (Transformation Matrix) ที่อ้างอิงจากฐานล้อ
 เลื่อนที่อธิบายถึงจลนศาสตร์เรดิหน้าแสดงในรูปฟังก์ชัน (Forward
 Function) และกำหนดให้ที่ก๊อครอบปัจจุบันของปลายแขนเขียนได้เป็น
 $x_{r,Arm}$ โดยที่

$$x_{r,Arm} = F\theta_d = T_B^{E,Arm}$$

3. การกำหนดเป้าหมายสำหรับแขนกล

การกำหนดงานการถือของค้ำยสองมือของหุ่นยนต์ที่เป็นแบบการ
 ควบคุมอิมพีแดนซ์ด้วยแรงจะเป็นการกำหนดตำแหน่งเป้าหมาย
 $x_{d,Arm1}$ และ $x_{d,Arm2}$ ให้กับปลายแขนของหุ่นยนต์โดยมีเงื่อนไขของ
 ระยะห่างของปลายแขนที่ต้องคงที่ ปลายแขนต้องอยู่ในแนวระดับ และ
 แนวตั้งของปลายแขน (แนวตั้งกับระนาบภาค) จะต้องอยู่ในแนวตั้งหรือ
 เอียงเล็กน้อยเพื่อชดเชยการเคลื่อนที่ของตัวหุ่นยนต์ โดยผลต่าง
 ของระบบที่ก๊อครอบ $x_{d,Arm1}$ และ $x_{d,Arm2}$ จะเป็นค่าคงที่ ที่ทิศทางของ
 เวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit Vector) ของแต่ละแนวแกน XYZ ให้ชี้ไปใน
 ทิศทางเดียวกัน แกน Z ชี้นิ่งตลอดเวลา และระยะห่างของมือค้ำยที่
 คงนี้จะได้ว่า

$$x_{d,Arm1} - x_{d,Arm2} = C$$

โดยที่

$$x_{d,Arm} = \begin{bmatrix} p_{xd} & o_{xd} & 0 & p_{xd} \\ p_{yd} & o_{yd} & 0 & p_{yd} \\ p_{zd} & o_{zd} & 1 & p_{zd} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

และ

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & L \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4. กระบวนการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์

ในกระบวนการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์คือวิธีการควบคุมพฤติกรรม
 ทางไดนามิคของระบบทั่วไปในรูปแบบหนึ่งประเภทแบบแรงภายใน
 สำหรับการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ของแขนกลดังรูปที่ 3 เป็นการ

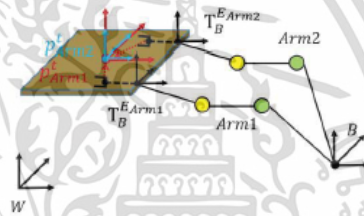
กำหนดเป้าหมายของปลายแขนกลในรูปของระยะกระจัดบน
 Operational Space และแปลงไปเป็นตำแหน่งภายใต้ Joint Space และ
 กำหนดให้เป็นแรงบิดให้กับข้อต่อแต่ละตัว โดยแรงบิดจะก่อให้เกิดการ
 หมุนของข้อต่อไปยังตำแหน่งส่งผลทำให้ปลายแขนขยับเข้าหา
 จุดเป้าหมายที่กำหนด

$$M\ddot{\theta}_d + D\dot{\theta}_d = J^{-1}K(x_d - F\theta_d)$$

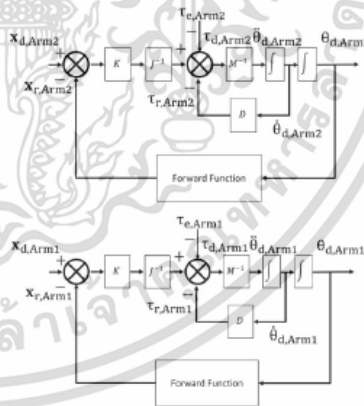
กระบวนการควบคุมเมื่อแขนกลมีการทำงานประสานกันและมีแรง
 กระทำจากภายนอก τ_e จะสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$M\ddot{\theta}_d + D\dot{\theta}_d = J^{-1}K(x_d - F\theta_d) - \tau_e$$

โดยที่ $x_{r,Arm} = F\theta_d$ เป็นตำแหน่งที่ก๊อครอบปัจจุบันของปลายแขนกล
 (End-Effector's Current Position) เมื่อ F คือ ฟังก์ชันเรดิหน้าของ
 (Forward Function) ของแขนกล M คือเมตริกของมวล D คือเมตริก
 ของตัวหน่วง K คือเมตริกของสปริงจำลอง และ J คือเมตริกจาโคเบียน



รูปที่ 2 แผนภาพระบบพิกัดในแนวเชิงเส้นจึงเข้าเป้าหมายที่กำหนด



รูปที่ 3 แผนภาพการควบคุมอิมพีแดนซ์ของแขนกล แขนทั้ง 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 67
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



5. การควบคุมปลายแขนกลด้วยสปริงเสมือน (Virtual Spring)

เนื่องจากระบบพิกัดของปลายแขนกลแสดงในแผนภาพการควบคุมมีพิกัดของแขนกลทั้งสองผลต่างของตำแหน่งปลายแขนซึ่งเป็นระยะขจัดระหว่างปลายแขนปัจจุบันกับเป้าหมายที่ต้องการไปถึงจุดเข้ากับค่าคงที่ K ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าความแข็งของตัวสปริงเสมือนจะให้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าแรงใน Operation Space ก่อนที่จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบพิกัดของข้อต่อใน Joint Space ด้วยการใช้การคูณกลับของเมทริกซ์จาโคเบียน ดังนั้นการใช้ $K(x_d - x_r)$ จึงทำให้เกิดเป็นหลักการของสปริงเสมือน (Virtual Spring)

แต่เนื่องจากเป็นการควบคุมทั้งตำแหน่งของปลายแขนและมุมบิดของข้อต่อไปพร้อมกันการใช้ผลต่างของตำแหน่งเป็นระยะขจัดเชิงเส้นสามารถใช้ได้ แต่ไม่สามารถใช้ได้กับผลต่างเชิงมุมที่ได้จากความต่างของทิศทางของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแนวแกนของข้อต่อทำให้ต้องสร้างนิยามใหม่ให้กับการหาระยะขจัดของมุมบิดเป็นการคูณเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแนวแกนบิดของข้อต่อ โดยทำการเปลี่ยนระบบพิกัดผลต่างของ

$$x_{d,Arm} - x_{r,Arm} = \begin{bmatrix} \Delta p_x \\ \Delta p_y \\ \Delta p_z \\ \Delta \alpha \\ \Delta \rho \\ \Delta \varphi \end{bmatrix}$$

โดยให้

$$\begin{bmatrix} \Delta p_x \\ \Delta p_y \\ \Delta p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{x,d} - p_{x,r} \\ p_{y,d} - p_{y,r} \\ p_{z,d} - p_{z,r} \end{bmatrix}$$

และ

$$\begin{bmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta \rho \\ \Delta \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x,d} \times a_{x,r} \\ a_{y,d} \times a_{y,r} \\ a_{z,d} \times a_{z,r} \end{bmatrix}$$

โดยที่ เวกเตอร์ $[a]$ คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในแนวแกน 2 ของระบบพิกัดปลายแขนที่ต้องการให้ชี้ขึ้นตลอดเวลา จากนั้นสมการที่ได้มาเขียนให้อยู่ในรูปแบบของผลคูณของการควบคุมที่ปลายแขน ทั้งในแนวเชิงเส้นและเชิงมุมแสดงในรูปของสปริงจำลองได้ดังนี้

$$K(x_{d,Arm} - x_{r,Arm}) = \begin{bmatrix} K_p \\ K_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (p_{d,Arm} - p_{r,Arm}) \\ (a_{d,Arm} \times a_{r,Arm}) \end{bmatrix}$$

$$K(x_{d,Arm} - x_{r,Arm}) = \begin{bmatrix} K_p (p_{d,Arm} - p_{r,Arm}) \\ K_0 (a_{d,Arm} \times a_{r,Arm}) \end{bmatrix}$$

เมื่อกำหนดให้ K_p คือค่าความแข็งของสปริงเสมือนเชิงตั้ง และ K_0 คือค่าความแข็งของสปริงเสมือนเชิงบิด

6. การอ้างอิงระบบพิกัดสภาพพื้นผิวของทางเดิน

สำหรับสภาพเส้นทางเดินของหุ่นยนต์ใช้การระบบพิกัดของสภาพแวดล้อม $\{W\}$ ที่อ้างอิงไปยังระบบพิกัดของชุดฐานล้อ $\{B\}$ โดยเพื่อให้ตัวหุ่นยนต์รับรู้การเอียงด้วยตัวเองจะใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่งโน้มถ่วงพร้อมวัดมุมบิด (6DOF Acceleration and Gyro-meter Sensor) เป็นตัววัดสภาพการเอียงของฐานล้อหุ่นยนต์ที่เป็นตัวแทนสภาพของเส้นทางเดิน โดยให้ Rot_{sensor} คือเมตริกการหมุนจากเซ็นเซอร์ตรวจจับความเร่ง

$$T_W^B = Rot_{sensor}(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$$

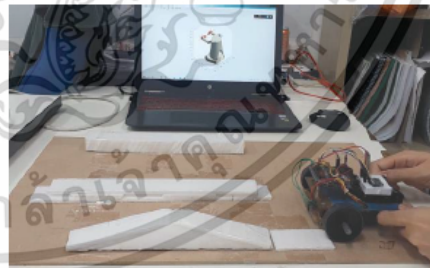
และสามารถอ้างอิงได้เป็น

$$x_{r,Arm} = T_W^E = T_W^B T_B^E$$

7. ผลการทดลองการควบคุมการรักษาระดับการถือของ

การทดลองการรักษาสภาพระนาบของปลายแขนกล ได้ออกแบบการทดลองด้วยแบบจำลองคอมพิวเตอร์ของหุ่นยนต์ โดยจะทำการรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ตรวจจับความเร่งที่ติดตั้งบนหุ่นยนต์จำนวน 6 ชิ้นส่วน 1:8 จากขนาดจริง โดยแบบจำลองจะเดินด้วยความเร็ว 2.7 เมตร/นาที เมื่อเทียบเป็นหุ่นขนาดจริงจะเดินด้วยความเร็ว 20.8 เมตร/นาที ซึ่งเป็นความเร็วปลอดภัยที่หุ่นยนต์หรือคนสามารถหลบหลีกการชนได้ การทดลองเพื่อให้ได้ค่าการเอียงไปมาของหุ่นยนต์จะได้ให้หุ่นจำลองขนาดจริงไปบนพื้นเอียง 20 องศาขึ้นลง และ ตั้งระดับระหว่างล้อซ้ายขวา ในรูปแบบต่าง ๆ และนำเอาสัญญาณของเซ็นเซอร์ตรวจจับความเร่ง ทำการป้อนให้กับแบบจำลองหุ่นยนต์บริการที่สร้างขึ้นบน Matlab ตามเวลาจริง (Real-Time Control) ผ่านสัญญาณบลูทูธไปยังคอมพิวเตอร์ที่ปรับระดับของมือหุ่นยนต์ทั้งสองข้างทำให้ ระยะห่างระหว่างมือคงที่และรักษาทิศทางการถือให้ถนัดสบายได้ระดับกับพื้นตลอดเวลา

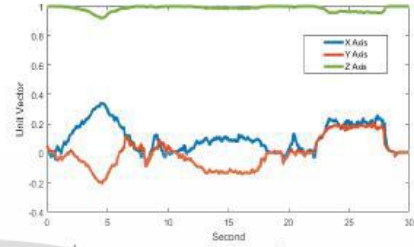
การทดลองการทดสอบรักษาสถิตหุ่นยนต์บริการคิดแบบกลจะทำในหลาย ๆ รูปแบบการเดินของหุ่นยนต์



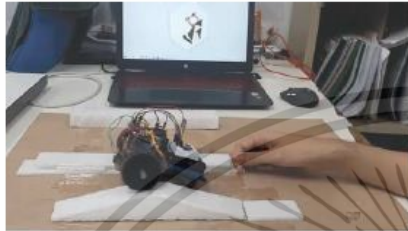
รูปที่ 4 วิธีการทดลองหุ่นยนต์บริการจำลอง



แขนกลที่จำลองใน Matlab เมื่อรับค่าจากเซนเซอร์จากฐานล้อจะปรับค่ามุมเอียงฐาน และทำการคำนวณจุดเป้าหมายของแขนใหม่ในระบบควบคุมพีดีเพื่อการรักษาระดับของแขนทั้งคู่โดยดูจากเวกเตอร์ของปลายแขนแนวแกน Z ที่ตั้งขึ้นในทิศ $[0 \ 0 \ 1]$ และระยะห่างที่ตั้งไว้ที่ 350 มิลลิเมตร



รูปที่ 6 ตัวอย่างสัญญาณของเซนเซอร์ตรวจจับความเร็ว



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5 การทดลองรับหุ่นยนต์บริการในแบบที่นิ้วเอียงตั้งระดับในแบบต่าง ๆ กันแต่จะการทดสอบ

จากการทดลองสัญญาณของเซนเซอร์ตรวจจับความเร็วจะส่งค่าออกมาได้เป็นเวกเตอร์ 3 แนวแกน XYZ ดังรูปที่ 6 แสดงค่าทั้ง 3 แนวแกนตามระยะเวลาของการทดลอง โดยหุ่นยนต์วิ่งผ่านทางลาดเอียงทำให้ทิศแนวของลำตัวหุ่นยนต์ที่เอียงทำมุมกับแนวระนาบโลก

โดยการตอบสนองต่อการเอียงของหุ่นยนต์ด้วยกระบวนการควบคุมแบบอิมพีเด้นซ์แบบแรง และสปริงคัสตมูติสามารถปรับตำแหน่งและมุมบิดข้อมือของทั้งสองมือให้คงระดับของการยกสิ่งของ และระนาบของมือถือภาคให้อยู่ในแนวตั้งได้

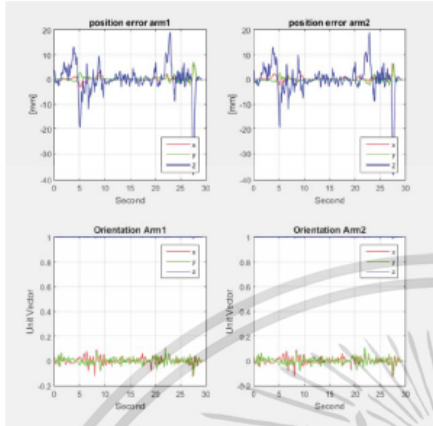


รูปที่ 7 ตัวอย่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อเอียงและการรักษาตำแหน่งและแนวระดับของแขนกลทั้ง 2 ข้าง

ในรูปที่ 8 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเป้าหมาย จากการทดสอบ จากรูปกราฟแกน z ตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนสูงมากขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่นิ้วเอียงต่างระดับอย่างรวดเร็วเกินความเร็วการประมวลผลรักษาระดับของแขนกล เมื่อเทียบกับรูปที่ 6

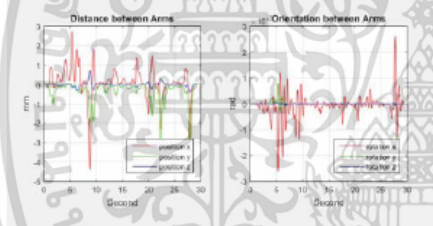
แสดงค่าการบิดมุมของข้อมือ จากค่ามุมบิดที่เกิดขึ้นมีความสามารถควบคุมข้อมือได้ดี ในทุกสภาพพื้นผิว แกน z มีสภาพตั้งขนานใกล้เคียงกับแกนของสิ่งแวดล้อมในแนวตั้งหรือมุมอ้างอิงที่กำหนดไว้ในรูปของเวกเตอร์ 1 หน่วย $[0 \ 0 \ 1]$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8 ตัวอย่างตำแหน่งและมุมบิดแขนกลทั้ง 2 ข้าง

ในรูปที่ 9 แสดงระยะห่างระหว่างของแขนกลซึ่ง มีระยะห่าง
 คลาดเคลื่อนประมาณ 4.5 mm และการมุมระหว่างของแขนกลประมาณ
 0.003 rad หรือ 0.17 องศา ซึ่งจากการทดสอบสามารถควบคุมให้มีการ
 ประสิทธิภาพควบคุมของแขนทั้งสองได้ดี



รูปที่ 9 ระยะห่างระหว่างของแขนกลทั้ง 2 ข้าง
 และมุมระหว่างของแขนกลทั้ง 2 ข้าง

8. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบควบคุมแขนกลสำหรับหุ่นยนต์บริการ โดย
 ใช้ระบบควบคุมพีดีเคชดด้วยแรงขับเคลื่อน โดยใช้ระบบพีดีจากที่
 อ้างอิงจากสิ่งแวดล้อมไปยังตัวหุ่นยนต์ถึงปลายแขนทั้งสองข้าง ทำให้
 ปลายแขนกลทั้งสองรักษาระยะห่างให้คงที่และพิทักปลายแขนต้องทำให้
 มือถือสิ่งของอยู่ในแนวตั้งที่ขึ้นตลอดเวลาและรักษาแนวระดับคงที่
 การควบคุมพีดีเคชดด้วยแรงขับเคลื่อนจะสร้างสปริงเสมือนเป็น
 เป้าหมายนำให้ปลายแขนของหุ่นยนต์ให้รักษาสถิตของงานการถือของ
 หุ่นยนต์จะรับรู้สภาพการเอียงของฐานล้อหุ่นยนต์สะท้อนสภาพของ
 เส้นทางการเดินด้วยเซนเซอร์วัดความเร็วเพื่อนำไปปรับตำแหน่งเป้าหมาย

ของปลายแขนชดเชยการเสียดำแหน่งจากการเอียงของฐาน จากการ
 ทดสอบพบว่าระบบการควบคุมพีดีเคชดด้วยแรงขับเคลื่อน ทำให้แกน
 Z ของปลายแขนทั้งสองข้างขึ้นเก็บตลอดเวลาและรักษาแนวระดับได้ผล
 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนที่ยังอยู่ในระยะที่ยังไม่ทำให้ของที่ถือเสีย
 สมดุลไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. M. Braun, G. P. Starr, J. E. Wood, and R. Lumia, "A framework for implementing cooperative motion on industrial controllers," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 20, no. 3, pp. 583–589, 2004, doi: 10.1109/TRA.2004.824941.
- [2] F. Caccavale, P. Chiacchio, A. Marino, and L. Villani, "Six-DOF impedance control of dual-arm cooperative manipulators," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 13, no. 5, pp. 576–586, 2008, doi: 10.1109/TMECH.2008.2002816.
- [3] X. Li, Y. H. Liu, and H. Yu, "Iterative learning impedance control for rehabilitation robots driven by series elastic actuators," *Automatica*, vol. 90, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1016/j.automatica.2017.12.031.
- [4] Lorenzo Scialvico and Bruno Siciliano, *Modelling and Control of Robot Manipulators*, Second. McGraw Hill, 1996.
- [5] F. Ficuciello, L. Villani, and B. Siciliano, "Variable Impedance Control of Redundant Manipulators for Intuitive Human-Robot Physical Interaction," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 31, no. 4, pp. 850–863, 2015, doi: 10.1109/TRO.2015.2430053.
- [6] J. Duen, Y. Gan, M. Chen, and X. Dai, "Adaptive variable impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environment," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 102, pp. 54–65, 2018, doi: 10.1016/j.robot.2018.01.009.
- [7] Y. Dong and B. Ren, "UDE-Based Variable Impedance Control of Uncertain Robot Systems," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.*, vol. 49, no. 12, pp. 2487–2498, 2019, doi: 10.1109/TSMC.2017.2787566.
- [8] H. Hu and J. Cao, "Adaptive variable impedance control of dual-arm robots for slabstone installation," *ISA Trans.*, Available online, 2021, doi: 10.1016/j.isatra.2021.10.020.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย ภัทรวัต ชัยคุณสมบัติ
วัน เดือน ปีเกิด	10 พฤศจิกายน พ.ศ. 2535 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ
ที่อยู่	61/12 ต.บางปลา อ.บางพลี จ.สมุทรปราการ 10250 เบอร์โทรศัพท์ 090-3999524 E-mail. Phatarawatch@outlook.co.th
ประวัติการศึกษา	2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผลงานทางวิชาการ	ภัทรวัต ชัยคุณสมบัติ, พลชัย โชติปราชญ์กุล (2565) “กระบวนการ ควบคุมด้วยแรงสำหรับหุ่นยนต์บริการ” การประชุมวิชาการข่ายงาน วิศวกรรมอุตสาหกรรม ปีที่ 2565 ครั้งที่ 40 หน้าที่ 141 – 146

