



การควบคุมหุ่นยนต์เคมีอิวมานอยด์ระยะไกล

นางสาวสุณัฏฐา จริยาวัฒนากุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ

สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2556

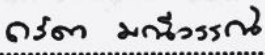
การควบคุมหุ่นยนต์เซมิอัติโนมัติระยะไกล

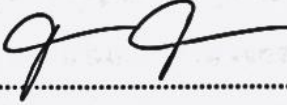
นางสาวสุณัฐรา จริยาวัฒนากุล วศ.บ.(วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์)

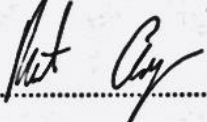
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2556

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ดร.สุริยา นัฏสงกรณ์)


..... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผศ.ดร.อุทัย มณีวรรณ)


..... กรรมการ
(ผศ.ดร.ธีรนุช จันทโสภิพันธ์)


..... กรรมการ
(ดร.รัชณี กุลขานนท์)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ระยะไกล
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นางสาวสุณัฐา จริยาวัฒนากุล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ถวิดา มณีวรรณ
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
คณะ	สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
พ.ศ.	2556

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการควบคุมหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ซึ่งท่อนบนของหุ่นยนต์มีลักษณะคล้ายมนุษย์
 ก็สามารถเคลื่อนไหวศีรษะที่มี 3 องศา และ มีแขน 2 ข้าง แต่ละข้างประกอบด้วยข้อต่อ 7
 องศา หุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีชื่อว่า นะโม ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ของ
 สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม โดยมีจุดประสงค์ให้เป็นหุ่นยนต์ต้อนรับและประชาสัมพันธ์ของ
 ทางสถาบัน ดังนั้นหุ่นยนต์จึงต้องทำการปฏิสัมพันธ์กับมนุษย์ด้วยการแสดงท่าทางต่างๆ ในงานวิจัยนี้
 จึงได้เสนอการควบคุมหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์แบบ Master – Slave เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถ
 ปฏิสัมพันธ์กับมนุษย์ได้อย่างเป็นธรรมชาติมากขึ้น โดยมีการควบคุมหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ให้แสดง
 ท่าทางผ่านชุดควบคุมส่วนศีรษะและชุดควบคุมส่วนแขนสำหรับควบคุมส่วนแขนแบบ joint control
 ที่ทำการควบคุมการเคลื่อนไหวของแต่ละข้อต่อโดยตรงใช้กับท่าทางแบบเปิด และ การควบคุมแบบ
 Cartesian control สำหรับควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่สัมพันธ์กับส่วนอื่นๆซึ่งนำไปใช้กับท่าทางแบบ
 ปิด เพื่อทำการชดเชยค่ามุม เมื่อต้องการควบคุมให้หุ่นยนต์ให้ทำท่าทางใดๆจึงต้องมีการแยกแยะ
 ท่าทางให้ชัดเจนเพื่อสามารถเลือกการควบคุมที่เหมาะสมกับหุ่นยนต์ในขณะนั้น

คำสำคัญ : หุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ / การควบคุมแบบ Master – Slave / การปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์
 กับหุ่นยนต์ / การแยกแยะท่าทาง / ท่าทางแบบเปิด / ท่าทางแบบปิด / การชดเชยค่ามุม

Thesis Title	Tele-operation of Semi-humanoid Robot
Thesis Credits	12
Candidate	Ms.Sunatthra Jariyawattanakul
Thesis Advisor	Dr. Thavida Maneewarn
Program	Master of Engineering
Field of Study	Robotics and Automation
Faculty	Institute of Field Robotics
B.E.	2556

Abstract

This research presents controlling semi-humanoid robot which the top is human-look-like body. Its head can be moved in 3 degrees of freedom and each one of its arms can be moved in 7 degrees of freedom. The semi-humanoid robot in this study names Namo, the robot of Institute of Field Robotics which is a reception and public relation robot. So the robot can interact with human by its gestures. For this search, the robot is controlled by Master-Slave control for more natural interacting. This semi-humanoid robot is controlled to display its gestures via head and arms controller by using Joint control which can control each joint of the robot directly for opening gestures, and using Cartesian control which can control the robot to move relatively with other parts for compensation of the closing gestures. When controlling the robot, its gestures should be distinguished clearly so we can select a suitable control for the robot in each period.

Keywords: Semi-humanoid robot / Master-Slave control / Ambient environment / Interaction between robot and human / Distinguishing the gesture / Open gesture / Close gesture / Compensation

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำงานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยการได้รับการสนับสนุนและความร่วมมือจากหลายหน่วยงาน ได้แก่ โครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม (NUI-RC) ซึ่งเป็นโครงการที่ต้องได้รับความร่วมมือจาก 3 ฝ่าย คือสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) บริษัทอริ แอนด์ แอสโซซิเอทส์ จำกัด อยู่ในส่วนของฝ่ายอุตสาหกรรม และส่วนของสถาบันการศึกษา คือ สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ซึ่งได้สนับสนุนทุนการศึกษา ค่าใช้จ่ายต่างๆ พร้อมทั้งคำแนะนำต่างๆ และด้วยความกรุณาของ ผศ.ดร. ถวิดา มณีวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้แนวคิด ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษาในการแก้ไขปัญหาในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านที่สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ เพื่อให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนามทุกท่านรวมถึงเพื่อน พี่ น้องทุกท่านในสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนามและทั้งผู้ที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ที่ได้ให้กำลังใจและความช่วยเหลือเสมอมา สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ มารดา บิดา คุณน้า และพี่สาว ผู้ซึ่งให้การสนับสนุนและคอยช่วยเหลือในทุกๆด้าน จนสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้ได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฉ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	2
2. แนวคิดในการออกแบบระบบ	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1.1 การควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกล	3
2.2 แนวคิดในการออกแบบระบบ	10
2.2.1 หุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์	10
2.2.2 ชุดควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์	12
3. ระบบควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์แบบ Master - Slave	15
3.1 การควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์แบบ Joint Control	15
3.2 การควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์แบบ Cartesian Control	20
3.2.1 คิเนมาติกส์โมเดลและฟอร์เวิร์ดคิเนมาติกส์	20
3.2.2 อินเวิร์สคิเนมาติกส์แบบ Pseudoinverse	24

	หน้า
4. ระบบการควบคุมท่าทางแบบ Master - Slave	27
4.1 การแสดงท่าทางของมนุษย์เพื่อการสื่อสาร	27
4.2 การแยกแยะท่าทางสำหรับควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิวमानอยด์	28
4.3 การชดเชยค่ามุม	31
5. การทดลองและผลการทดลอง	34
5.1 การทดลองการแสดงท่าทางของหุ่นยนต์ด้วยค่ามุมจากชุดควบคุมโดยตรง	34
5.1.1 วัตถุประสงค์การทดลอง	34
5.1.2 วิธีการทดลอง	34
5.1.3 ผลการทดลอง	35
5.1.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	37
5.2 การทดลองการควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิวमानอยด์จำลองในการแสดงท่าทางแบบปิดด้วยวิธีการชดเชยค่ามุม	38
5.2.1 วัตถุประสงค์การทดลอง	38
5.2.2 วิธีการทดลอง	38
5.2.3 ผลการทดลอง	38
5.2.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	57
5.3 การทดลองการควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิวमानอยด์ในการแสดงท่าทางแบบปิดด้วยวิธีการชดเชยค่ามุมด้วยค่า neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร	58
5.3.1 วัตถุประสงค์การทดลอง	58
5.3.2 วิธีการทดลอง	58
5.3.3 ผลการทดลอง	58
5.3.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	70
6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	71
6.1 สรุปผลการทดลอง	71
6.2 ข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง	73

ภาคผนวก	75
ก. เอกสารตีพิมพ์เผยแพร่งานวิจัยในการประชุมวิชาการ	75
ประวัติผู้วิจัย	83

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 แสดงขอบเขตการหมุนของศีรษะในแกน Roll Pitch Yaw	17
3.2 แสดงค่าตัวแปรของข้อต่อของหุ่นยนต์ด้วยวิธี Denavit - Hartenberg	22
3.3 แสดงค่าตัวแปรของแขนชุดควบคุมส่วนแขนของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ด้วยวิธี Denavit - Hartenberg	23
4.1 แสดงตัวอย่างการแสดงผลท่าทางของมนุษย์	28
4.2 แสดงตำแหน่ง Anchor point ของท่าทางต่างๆ	32
5.1 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่าวันทยหัตถ์ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.10 เมตร	40
5.2 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่าเท้าเอวระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.10 เมตร	41
5.3 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่าไหว้ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.10 เมตร	42
5.4 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่า Sarang ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.10 เมตร	43
5.5 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่าวันทยหัตถ์ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร	44
5.6 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่าเท้าเอวระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร	45

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
5.7 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำทำไห้ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร	46
5.8 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำทำ Sarang ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร	47
5.9 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำทำวันทยหัตถ์ ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.20 เมตร	48
5.10 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำทำวันเท้าเอว ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.20 เมตร	49
5.11 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำทำวันไห้ ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.20 เมตร	50
5.12 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำทำ Sarang ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.20 เมตร	51
5.13 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำทำวันทยหัตถ์ ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.25 เมตร	52
5.14 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำทำเท้าเอว ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.25 เมตร	53

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
5.15 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำทำไ่ว้ ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.25 เมตร	54
5.16 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำทำ Sarang ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.25 เมตร	55
5.17 แสดงผลการทดลองของการแสดงท่าทางโดยกำหนด neighborhood threshold value เท่ากับ 0.10 เมตร	56
5.18 แสดงผลการทดลองของการแสดงท่าทางโดยกำหนด neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร	56
5.19 แสดงผลการทดลองของการแสดงท่าทางโดยกำหนด neighborhood threshold value เท่ากับ 0.20 เมตร	56
5.20 แสดงผลการทดลองของการแสดงท่าทางโดยกำหนด neighborhood threshold value เท่ากับ 0.25 เมตร	57
5.21 แสดงผลการทดลองของการแสดงท่าทางของหุ่นยนต์เซมิอิวิมานอยด์ในท่าวันทยหัตถ์ เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร	59
5.22 แสดงผลการทดลองของการแสดงท่าทางของหุ่นยนต์เซมิอิวิมานอยด์ในท่าเท้าเอว เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร	60
5.23 แสดงผลการทดลองของการแสดงท่าทางของหุ่นยนต์เซมิอิวิมานอยด์ในท่าไหว้ เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร	61
5.24 แสดงผลการทดลองของการแสดงท่าทางของหุ่นยนต์เซมิอิวิมานอยด์ในท่า Sarang เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร	62

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 แสดงตำแหน่ง marker ที่ติดบนตัวผู้ควบคุม [1]	3
2.2 แสดงผู้ควบคุมสวมชุดควบคุม KIST master arm [2]	3
2.3 แสดงการแสดงผลท่าทางของหุ่นยนต์ฮิวมานอยด์ที่ทำตามท่าทางที่ถูกบันทึกไว้ [3]	4
2.4 แสดงแนวทางการควบคุมแขนของหุ่นยนต์ [4]	4
2.5 แสดงชุดควบคุมลักษณะ cockpit [5]	5
2.6 แสดงหุ่นยนต์ Telesar II และ มือของหุ่นยนต์ [5]	5
2.7 แสดงภาพผู้ควบคุมถูกฉายอยู่บนหุ่นยนต์ Telesar II [5]	5
2.8 แสดงตำแหน่งติดตั้ง motion sensor และ tactile sensor บนร่างกายของผู้ควบคุม [6]	6
2.9 แสดงท่าทางของผู้ควบคุม และการแสดงผลท่าทางของ telecommunicator [7]	6
2.10 แสดงภาพรวมของระบบในการควบคุมแบบ Hybrid [8]	7
2.11 แสดงการควบคุมจาก Qumarian ไปยังภาพจำลองในภาพยนตร์ animation [9,10]	8
2.12 แสดงการโบกธงในการให้สัญญาณเป็นตัวอักษร katakana ในภาษาญี่ปุ่น [12]	8
2.13 แสดงตำแหน่งของข้อต่อในระบบ 3 มิติ และมุมของแต่ละข้อต่อ [12]	9
2.14 แสดงหุ่นยนต์ฮิวมานอยด์สำหรับงานบริการ [11]	9
2.15 แสดงการตรวจจับตำแหน่งข้อต่อของผู้ควบคุม [11]	10
2.16 แสดงท่าทางของหุ่นยนต์นะโม	10
2.17 แสดงความยาวของแต่ละ link ของแขนขาหุ่นยนต์นะโม	12
2.18 แสดงแกนหมุนของศีรษะมนุษย์	12
2.19 แสดงภาพการทำงานของ 9 DOF Razor IMU	13
2.20 แสดงความยาว link ของชุดของคัมส่วนแขน	13
2.21 แสดงภาพ Potentiometer อุปกรณ์วัดค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงของชุดควบคุมส่วนแขน	14
2.22 แสดงภาพการทำงานของระบบควบคุมหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์	14
3.1 แสดงภาพรวมของระบบการควบคุมแบบ Master – Slave	15
3.2 แสดงกราฟจากการวัดการเคลื่อนไหวศีรษะแบบต่างๆ โดยใช้ 9DOF IMU	16
3.3 แสดงแผนภาพการควบคุมมอเตอร์ของส่วนศีรษะของหุ่นยนต์ด้วย 9DOF IMU	17

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
3.4 แสดงการควบคุมมอเตอร์ของส่วนแขนข้างขวาของหุ่นยนต์ด้วยชุด Potentiometer	18
3.5 แสดงภาพหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์นะโมจำลองบน VPthon	19
3.6 แสดงท่าโบกมือลา (แถวบน) และท่าไหว้ (แถวล่าง) ของแบบจำลองหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์เมื่อควบคุมแบบ Joint Control	20
3.7 แสดงคิเนมาติกส์และ frame ของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์นะโมตามแนวทางของ Denavit-Hartenberg	21
3.8 แสดงคิเนมาติกส์และ frame ของชุดควบคุมส่วนแขนตามแนวทางของ Denavit-Hartenberg	21
3.9 แสดงแผนภาพในการคำนวณโดยใช้ Pseudo Inverse Jacobian	26
3.10 แสดงค่าผลต่างของตำแหน่งปลายแขนปัจจุบันและตำแหน่งเป้าหมายของแขนขวา	26
4.1 แสดงตัวอย่างการแสดงท่าทางของมนุษย์	27
4.2 แสดงการแยกแยะท่าทางด้วยรูปแบบ Decision Tree	29
4.3 แสดงตำแหน่ง anchor point ในตำแหน่งต่างๆ	31
4.4 แสดง diagram ของการชดเชยค่ามุมด้วย pseudo-inverse	32
4.5 แสดงภาพรวมของระบบ	32
5.1 แสดงการทำท่าทาง 5 ท่าทางได้แก่ การทำท่าโบกมือลา วันทยหัตถ์ ท่าเท้าเอว ท่าไหว้ และ ท่า Sarang ตามลำดับ	34
5.2 แสดงผลของการควบคุมท่าทางของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์นะโมจำลอง ซึ่งแสดงท่าทาง 5 ท่าทางได้แก่ การทำท่าโบกมือลา วันทยหัตถ์ ท่าเท้าเอว ท่าไหว้ และท่า Sarang ตามลำดับ	35
5.3 แสดงแผนภาพเปรียบเทียบค่ามุมในข้อต่อต่างๆส่วนแขนขวาของชุดควบคุมส่วนแขนและแบบจำลองหุ่นยนต์นะโมโดยการควบคุมโดยตรง ในท่าทางแบบเปิด (ท่าโบกมือลา)	36

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า
5.4 แสดงแผนภาพเปรียบเทียบค่ามุมในข้อต่อต่างๆ ส่วนแขนขาของชุดควบคุมส่วนแขน และค่ามุมแขนขาของแบบจำลองหุ่นยนต์นะโม โดยการควบคุมโดยตรง และการชดเชยค่ามุมในท่าทางแบบปิด (ท่าวันทยหัตถ์)	37
5.5 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 1 แขนขาหุ่นยนต์นะโม	63
5.6 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 2 แขนขาหุ่นยนต์นะโม	63
5.7 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 3 แขนขาหุ่นยนต์นะโม	64
5.8 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 4 แขนขาหุ่นยนต์นะโม	64
5.9 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 5 แขนขาหุ่นยนต์นะโม	65
5.10 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 6 แขนขาหุ่นยนต์นะโม	65
5.11 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 7 แขนขาหุ่นยนต์นะโม	66
5.12 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 1 แขนซ้ายหุ่นยนต์นะโม	66
5.13 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 2 แขนซ้ายหุ่นยนต์นะโม	67
5.14 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 3 แขนซ้ายหุ่นยนต์นะโม	67
5.15 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 4 แขนซ้ายหุ่นยนต์นะโม	68
5.16 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 5 แขนซ้ายหุ่นยนต์นะโม	68
5.17 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 6 แขนซ้ายหุ่นยนต์นะโม	69
5.18 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 7 แขนซ้ายหุ่นยนต์นะโม	69

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

การควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกลมีจุดประสงค์เพื่อให้หุ่นยนต์ทำงานแทนมนุษย์ในกรณีต่างๆกันไป เช่น หุ่นยนต์กู้ภัยสามารถไปในพื้นที่ที่มนุษย์เข้าถึงได้ยาก เสี่ยงอันตราย ในทางการแพทย์ได้พัฒนาหุ่นยนต์ที่สามารถทำการผ่าตัดระยะไกลได้ โดยหุ่นยนต์จะถูกควบคุมจากแพทย์ผู้เชี่ยวชาญ เพื่อช่วยแก้ปัญหาการขาดบุคลากรทางการแพทย์ นอกเหนือจากนี้เทคโนโลยีการควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกลยังนำมาใช้ในงานเกี่ยวกับการสร้างความบันเทิง งานประชาสัมพันธ์ เพื่อสร้างสีสันและดึงดูดความสนใจจากผู้คน ซึ่งงานในด้านนี้จะใช้หุ่นยนต์ฮิวมานอยด์หรือหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ ที่มีลักษณะคล้ายกับมนุษย์เพื่อประโยชน์ทางการปฏิสัมพันธ์กับผู้คน หุ่นยนต์ที่มีลักษณะคล้ายกับมนุษย์นั้นมีความสลับซับซ้อน ทั้งต้องทำการควบคุมข้อต่อจำนวนมาก ในแขนแต่ละข้างของหุ่นยนต์จะมีข้อต่อ 6 ถึง 7 ข้อต่อ รวมถึงการทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนไหวได้ และแสดงท่าทางได้ตรงตามที่ต้องการ เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถสื่อสารและปฏิสัมพันธ์กับมนุษย์ได้อย่างราบรื่น

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ ซึ่งมีลักษณะคล้ายมนุษย์ โดยมีแขน 2 ข้าง แต่ละข้างประกอบด้วยข้อต่อจำนวน 7 ข้อต่อ และข้อต่อที่ศีรษะ 3 ข้อต่อ และทำการควบคุมหุ่นยนต์โดยใช้ชุดควบคุมหุ่นยนต์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือชุดควบคุมส่วนศีรษะ และชุดควบคุมส่วนแขน เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนไหวและแสดงท่าทางได้ถูกต้องตามที่ผู้ควบคุมต้องการ

เนื่องด้วยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ได้จัดตั้งโครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากรเพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม “NSTDA University Industry Research Collaboration (NUI-RC)” ขึ้นเพื่อกระตุ้นให้เกิดการสร้างร่วมมือระหว่างหน่วยงาน ประกอบด้วย สวทช. สถาบันการศึกษา และภาคอุตสาหกรรมการผลิตและบริการ ได้แก่ บริษัทอริ แอนด์ แอสโซซิเอทส์ จำกัด ซึ่งได้ให้แนวความคิดเกี่ยวกับหัวข้องานวิจัยในโครงการดังกล่าว โดยโครงการวิจัยนี้ได้เน้นการพิจารณาในเรื่องการแสดงท่าทางเพื่อการปฏิสัมพันธ์ระหว่างหุ่นยนต์กับผู้พบเห็น ซึ่งได้ทำการทดลองกับหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ของสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม เพื่อพัฒนาการควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกลที่สามารถปฏิสัมพันธ์กับมนุษย์ได้อย่างเป็นธรรมชาติ

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์สำหรับควบคุมการเคลื่อนไหวท่อนบนของหุ่นยนต์เคมีฮิวมานอยด์
2. เพื่อศึกษาและพัฒนาการควบคุมการเคลื่อนไหวหุ่นยนต์เคมีฮิวมานอยด์ให้แสดงท่าทางได้อย่างเป็นธรรมชาติ

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ทำการศึกษาการเคลื่อนไหวของแขนหุ่นยนต์เคมีฮิวมานอยด์ ซึ่งมีแขน 2 ข้าง ซึ่งแขนแต่ละข้างประกอบด้วย ข้อต่อจำนวน 7 องศาอิสระ
2. พัฒนาชุดควบคุมหุ่นยนต์เคมีฮิวมานอยด์ให้สามารถควบคุมหุ่นยนต์เคมีฮิวมานอยด์ให้แสดงท่าทางได้อย่างเหมาะสม

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

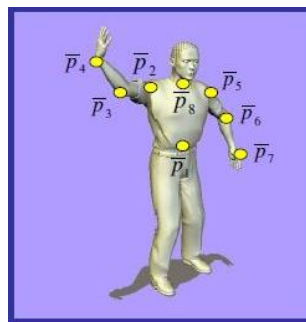
1. ชุดควบคุมที่สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวแขน 2 ข้าง ของหุ่นยนต์ ซึ่งแต่ละข้างมี 7 องศาอิสระ
2. อัลกอริทึมในการควบคุมแขนของหุ่นยนต์เคมีฮิวมานอยด์ให้แสดงท่าทางได้ตามการควบคุมแบบ Master-Slave

บทที่ 2 แนวคิดในการออกแบบระบบ

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

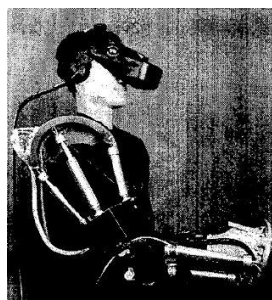
2.1.1 การควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกล

งานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิวแมนอยด์หรือหุ่นยนต์อิวแมนอยด์มีหลากหลายรูปแบบ การออกแบบชุดควบคุมมีลักษณะแตกต่างกันออกไป โดยส่วนใหญ่งานวิจัยชุดควบคุมจะใช้โครงสร้างทางกลที่ผู้ควบคุมสามารถสวมใส่ได้ แต่จะใช้วิธีในการจับการเคลื่อนไหวของผู้ควบคุมต่างกันไป ในงานวิจัยของ Dariush ในปี 2008[1] ทำการควบคุมหุ่นยนต์ ASIMO ซึ่งเบื้องต้นได้ทำการทดสอบกับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Simulation) สำหรับการควบคุมหุ่นยนต์ได้กำหนดจุดอ้างอิงไว้ตามตำแหน่งร่างกายของผู้ควบคุม ทั้งหมด 8 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 2.1 และใช้กล้องในการบันทึกภาพและการเคลื่อนไหวของผู้ที่ทำการควบคุม งานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากการ scaling ระหว่างชุดควบคุมกับหุ่นยนต์



รูปที่ 2.1 แสดงตำแหน่ง marker ที่ติดบนตัวผู้ควบคุม [1]

งานวิจัยในปี 1999 [2] เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการควบคุมหุ่นยนต์อิวแมนอยด์ระยะไกล โดยชุดควบคุมที่ประกอบด้วย 3 ส่วนคือแขนท่อนบน ข้อศอก และ ข้อมือ และชุดควบคุมนี้ถูกเรียกว่า KIST master arm ซึ่งชุดควบคุมนี้สามารถยืดหยุ่นได้ตามลักษณะของผู้สวมใส่ สามารถควบคุมหุ่นยนต์ที่มี 7 องศาอิสระได้ โดยทำการควบคุมผ่าน อุปกรณ์ virtual environment รูปที่ 2.2



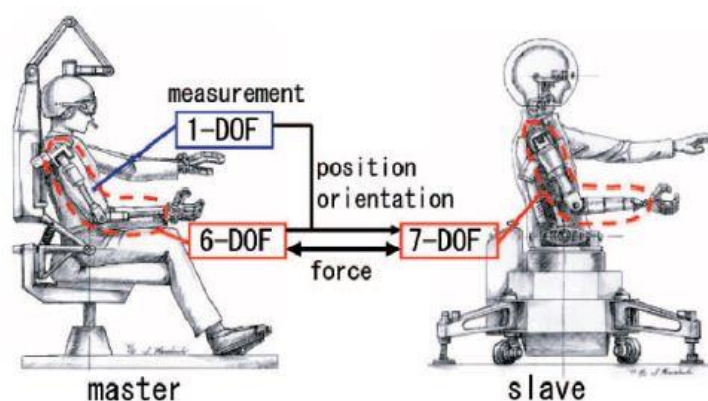
รูปที่ 2.2 แสดงผู้ควบคุมสวมชุดควบคุม KIST master arm [2]

ในรูปที่ 2.3 เป็นการทดสอบในงานวิจัยในปี 2002 [3] ใช้วิธีการควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ โดยการบันทึกท่าทางต่างๆของนักแสดง แล้วจึงนำไปควบคุมการเคลื่อนไหวท่อนบนของหุ่นยนต์ - ฮิวมานอยด์ โดยการใช้อุปกรณ์ประเภทกล้องหลายตัว ที่ชื่อว่า Vicon [4] (กล้อง 8 ตัว) ร่วมกับการ ติดตั้ง marker จำนวน 35 ชิ้นบนตัวของนักแสดง เพื่อช่วยเพิ่มความละเอียดในการจับการเคลื่อนไหว ของนักแสดง



รูปที่ 2.3 แสดงการแสดงท่าทางของหุ่นยนต์ฮิวมานอยด์ที่ทำตามท่าทางที่ถูกบันทึกไว้ [3]

งานวิจัยของ Tadakuma ในปี 2005 [4] ได้พัฒนาชุดควบคุมแขนหุ่นยนต์ เพื่อที่จะนำไปใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกลต่อไป หุ่นยนต์ที่ถูกใช้ในงานวิจัยนี้ในส่วนแขน มี 7 องศาอิสระ ชุดควบคุมมีลักษณะเป็นชุดโครงสร้าง (exoskeleton) ขนาดใหญ่ติดตั้งอยู่กับในส่วนควบคุมแขนของ ชุดควบคุมมีเพียง 6 องศาอิสระเท่านั้น เนื่องจากชุดควบคุมมีน้ำหนักมาก แต่ทางผู้วิจัยได้แก้ไขโดยใน องศาอิสระสุดท้ายที่ขาดไป โดยใช้ accelerometer วัดการหมุนของ link ระหว่างไหล่กับข้อศอก



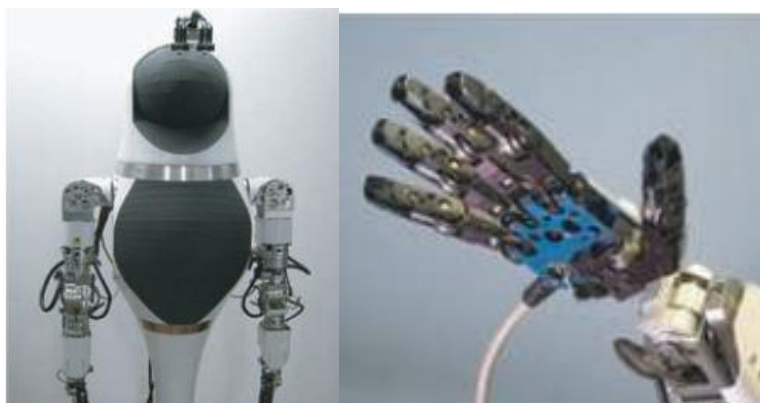
รูปที่ 2.4 แสดงแนวทางการควบคุมแขนของหุ่นยนต์ [4]

งานวิจัยของ Tachi ในปี 2008 [5] เป็นงานวิจัยการควบคุมหุ่นยนต์คล้ายมนุษย์ระยะไกล ซึ่ง ชุดควบคุมในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นแบบ cockpit คือโครงสร้างทางกลขนาดใหญ่ติดตั้งอยู่กับที่ และ แขนแต่ละข้างมี 7 องศาอิสระ และนิ้วมืออีก 8 องศาอิสระ เท่ากับแขนและนิ้วของหุ่นยนต์ ซึ่งมีชื่อว่า

Telesar II ดังรูปที่ 2.5 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ ขณะทำการควบคุมสามารถฉายภาพจริงของผู้ควบคุมบนตัวหุ่นยนต์ได้เพื่อทำให้รู้สึกเหมือนได้พูดคุยกับผู้ควบคุมมากกว่าพูดคุยกับหุ่นยนต์ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.5 แสดงชุดควบคุมลักษณะ cockpit [5]

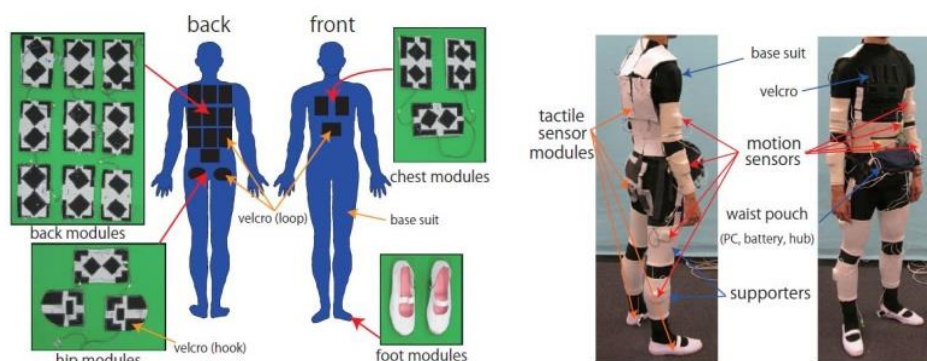


รูปที่ 2.6 แสดงหุ่นยนต์ Telesar II และ มือของหุ่นยนต์ [5]



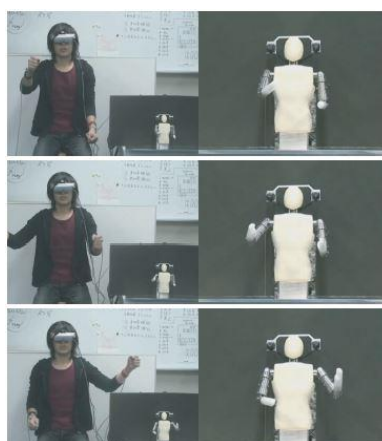
รูปที่ 2.7 แสดงภาพผู้ควบคุมถูกฉายอยู่บนหุ่นยนต์ Telesar II [5]

งานวิจัยปี 2009 ของ Fujimori [6] ได้นำเสนออีกวิธีในการจับท่าทางของมนุษย์เพื่อนำไปพัฒนาในการควบคุมหุ่นยนต์ ฮิวมานอยด์ต่อไป โดยใช้ motion sensor และ tactile sensor ติดตั้งบนส่วนต่างๆ ของร่างกายของผู้ควบคุม ดังใน รูปที่ 2.8 เมื่อผู้ควบคุมเคลื่อนไหวส่วนใดของร่างกายค่าที่เซ็นเซอร์ในส่วนนั้นๆจะสามารถวัดความเปลี่ยนแปลงได้ แล้วจึงนำข้อมูลทั้งหมดมาประมวลผล และนำไปใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ฮิวมานอยด์ที่ถูกจำลองขึ้นในคอมพิวเตอร์ต่อไป



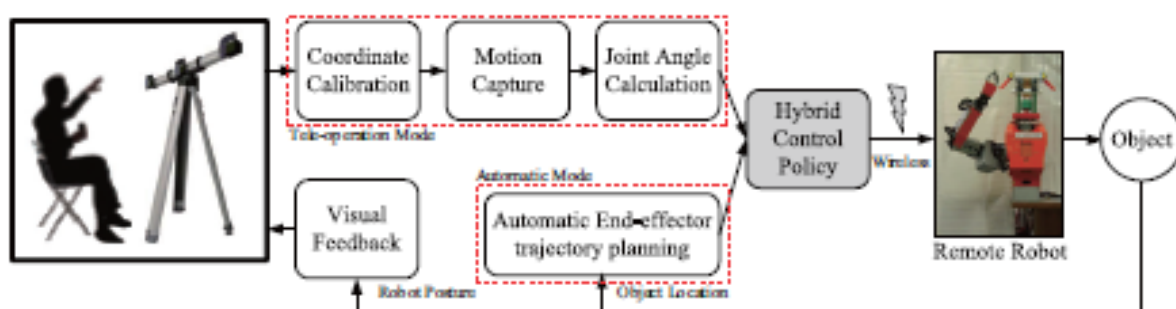
รูปที่ 2.8 แสดงตำแหน่งติดตั้ง motion sensor และ tactile sensor บนร่างกายของผู้ควบคุม[6]

งานวิจัยต่อมา ในปี 2011 ของ Tsumaki [7] ได้มีแนวคิดพัฒนาอุปกรณ์ที่เรียกว่า telecommunicator ซึ่งมีลักษณะ คล้ายกับ โทรศัพท์ติดตามตัวแต่เปลี่ยนจากการพูดคุยผ่านโทรศัพท์เป็นหุ่นยนต์ฮิวมานอยด์ขนาดเล็กที่สามารถแสดงท่าทางเหมือนกับผู้ที่อยู่อีกฝั่งของการติดต่อ โดยหุ่นยนต์มี 2 แขน ข้างละ 4 องศาอิสระและศีรษะ 3 องศาอิสระและมีกล้อง stereo vision ติดตั้งอยู่บนตัวหุ่นยนต์ เมื่อมีผู้ติดต่อเข้ามาจะได้รับภาพที่หุ่นยนต์อยู่ในขณะนั้น ในส่วนของระบบควบคุมประกอบด้วย electromagnetic sensor 2 ตัวถูกติดตั้งที่ข้อมือทั้ง 2 ข้าง ผลที่ได้คือ ค่าตำแหน่งและค่าการหมุนของส่วนศอกถึงข้อมือ และ 3D motion sensor 1 ตัว เพื่อตรวจวัดการเคลื่อนไหวของศีรษะ รูปที่ 2.9 การแสดงท่าทางของผู้ควบคุม และการแสดงท่าทางของ telecommunicator



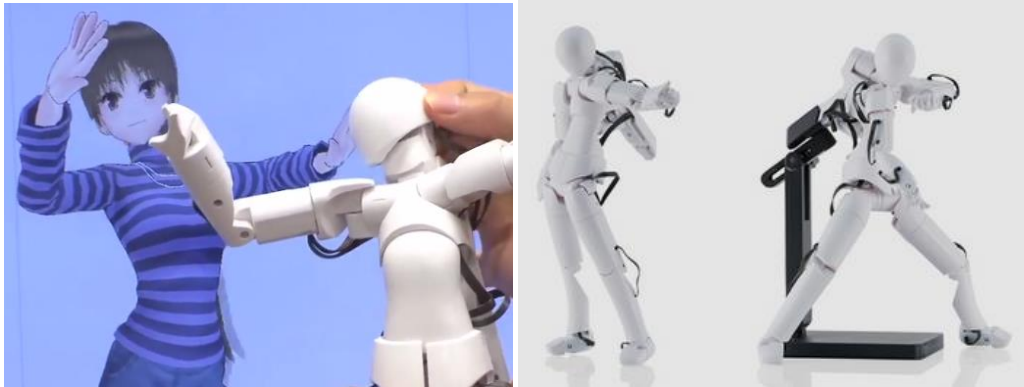
รูปที่ 2.9 แสดงท่าทางของผู้ควบคุม และการแสดงท่าทางของ telecommunicator [7]

งานวิจัยในปี 2011 ของ Lin และ Chen[8]ได้นำเสนองานวิจัยเกี่ยวกับแนวทางการควบคุมแขนของหุ่นยนต์ระยะไกลให้มีประสิทธิภาพและความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น โดยการควบคุมจะเป็นรูปแบบการควบคุมการเคลื่อนไหวของผู้ควบคุมด้วยกล้องและติดตั้ง marker บนแขนของผู้ควบคุม แขนของหุ่นยนต์มีข้อต่อทั้งหมด 6 ข้อต่อ ในส่วนการควบคุมที่ได้ถูกนำเสนอ คือ ระบบ hybrid control โดยมีการควบคุม 2 รูปแบบ การทำงานในแต่ละรูปแบบจะขึ้นอยู่กับสถานการณ์ของหุ่นยนต์ในขณะนั้น ในรูปแบบที่ 1 การควบคุมหุ่นยนต์จะเริ่มจากการควบคุมโดยตรงจากการเคลื่อนไหวของผู้ควบคุม เมื่อปลายแขนของหุ่นยนต์เข้าใกล้วัตถุเป้าหมายระบบจะสลับไปใช้การควบคุมรูปแบบที่ 2 ซึ่งเป็นระบบอัตโนมัติ infrared sensor ที่ปลายแขนหุ่นยนต์จึงวัดระยะทางจากปลายแขนไปถึงวัตถุ แล้วจึงใช้วิธี inverse kinematics ในการคำนวณหามุมสำหรับแต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์เพื่อทำให้ปลายแขนเคลื่อนไปยังวัตถุได้



รูปที่ 2.10 แสดงภาพรวมของระบบในการควบคุมแบบ Hybrid [8]

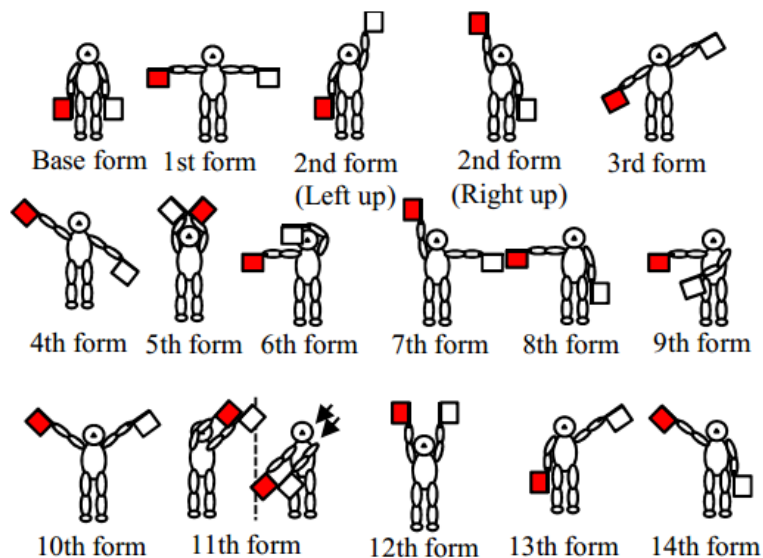
Qumarian [9,10] เป็นผลงานจากความร่วมมือของมหาวิทยาลัย Electro-communications และมหาวิทยาลัย Tsukuba ในปี 2012 Qumarian เป็นชื่ออุปกรณ์ควบคุมการแสดงท่าทางที่มีลักษณะคล้ายมนุษย์ ซึ่งมีความสูงเพียง 30 เซนติเมตรและน้ำหนักเบา โดยที่มีข้อต่อทั้งหมด 16 ข้อต่อและเซ็นเซอร์ทั้งหมด 32 ตัว โดยจะทำการเชื่อมต่อด้วย USB โดยผู้ควบคุมอุปกรณ์นี้สามารถจัดทำท่าทางของ Qumarian ใน 3 มิติ และนำค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์ไปใช้ประโยชน์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นงานที่ใช้กับการออกแบบบุคลิกให้กับตัวละครใน animation ที่เป็นรูปแบบ 3 มิติได้ และสามารถควบคุมให้แสดงท่าทางต่างๆและการเคลื่อนไหวของมนุษย์ได้ ดังรูปที่ 2.11



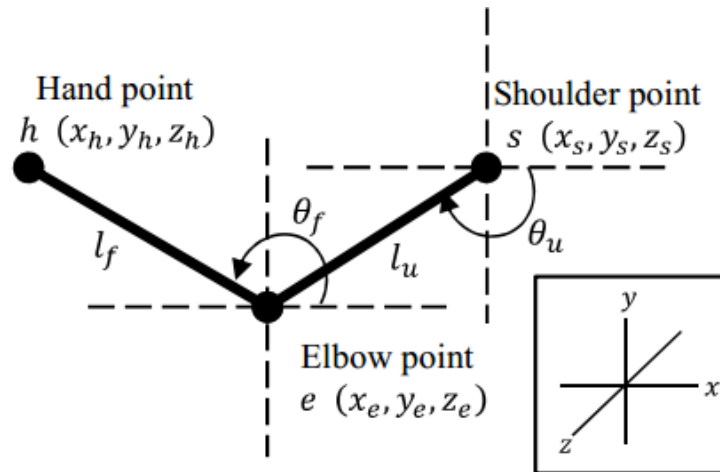
รูปที่ 2.11 แสดงการควบคุมจาก Qumarian ไปยังภาพจำลองในกระบวนการพัฒนา animation [9,10]

2.1.2 การแยกแยะท่าทางเพื่อใช้ในการควบคุม

ในปี 2012 งานวิจัยของ Iwane [12] เกี่ยวกับการจำแนกการเคลื่อนไหวของแขนในการให้สัญญาณด้วยวิธีการโบกธงเป็นตัวอักษร katakana ในภาษาญี่ปุ่น ในแต่ละตัวอักษรจะมีวิธีการโบกธงด้วยวิธีที่แตกต่างกัน บางตัวอักษรมีการเคลื่อนไหว 9 ขั้นตอน แต่บางตัวอักษรมีการเคลื่อนไหวถึง 14 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.12 โดยในงานวิจัยนี้ใช้กล้อง Kinect ในการอ่านการเคลื่อนไหวของผู้โบกธง และมีวิธีการจำแนกโดยใช้ค่าของตำแหน่งต่างๆ ได้แก่ ตำแหน่งของข้อศอก ไหล่และข้อมือใน 3 มิติ และความยาว link ของแขนท่อนบนและแขนท่อนล่าง พร้อมทั้งมุมที่ตำแหน่งไหล่ และมุมที่ตำแหน่งข้อศอก เพื่อระบุท่าทางในการโบกธง ดังในรูปที่ 2.13

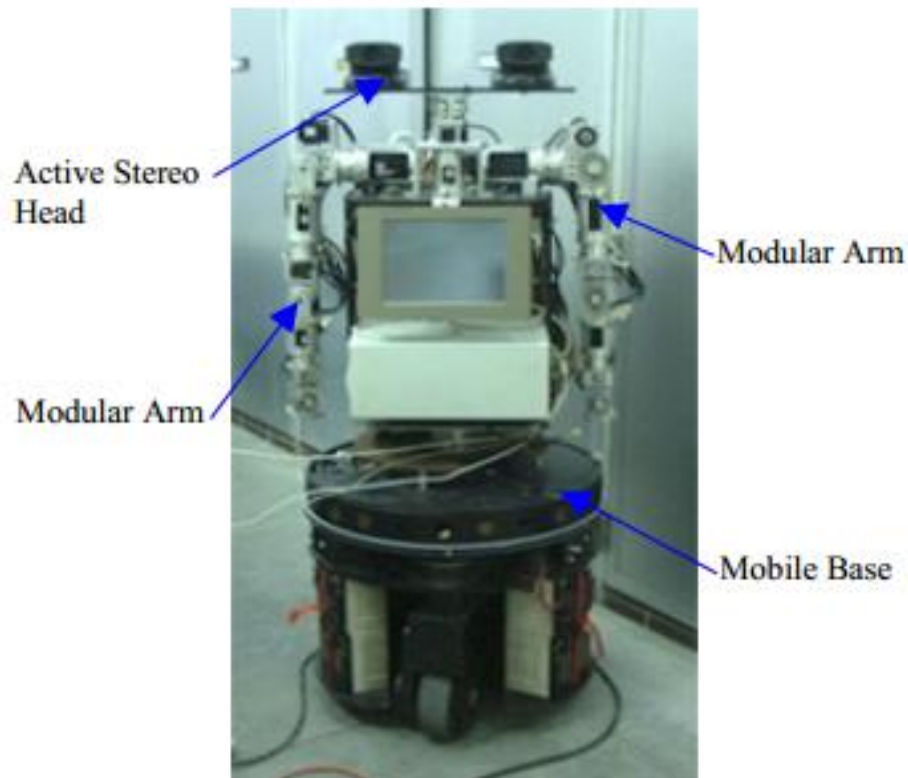


รูปที่ 2.12 แสดงการโบกธงในการให้สัญญาณเป็นตัวอักษร katakana ในภาษาญี่ปุ่น [12]

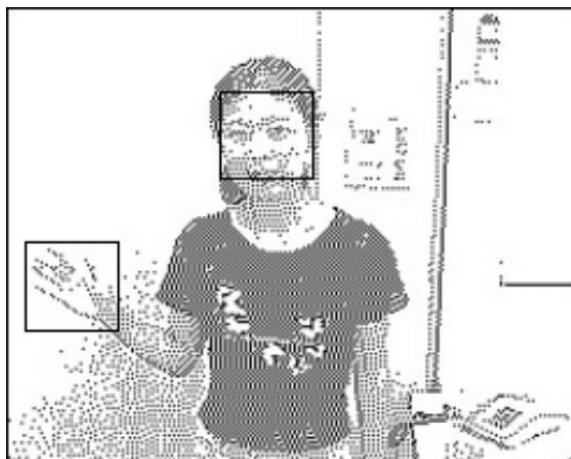


รูปที่ 2.13 แสดงตำแหน่งของข้อต่อในระบบ มิติ และมุมของแต่ละข้อต่อ [12]

งานวิจัยของ Guo [11] เกี่ยวกับการควบคุมหุ่นยนต์บริการ (service robot) แสดงท่าทางตามผู้ควบคุม หุ่นยนต์จะมีลักษณะคล้ายกับร่างกายของมนุษย์ส่วนบน คือมีแขน 2 ข้าง โดยทำการระบุท่าทางโดยให้ผู้ควบคุมแสดงท่าทางต่างๆ ผ่านกล้องประเภท stereo vision และนำข้อมูลตำแหน่งของข้อต่อส่วนของมือ ข้อศอก และไหล่ ของแขนแต่ละข้าง เพื่อนำไปควบคุมหุ่นยนต์อิมานอยด์ต่อไป



รูปที่ 2.14 แสดงหุ่นยนต์อิมานอยด์สำหรับงานบริการ [11]



รูปที่ 2.15 แสดงการตรวจจับตำแหน่งข้อต่อของผู้ควบคุม [11]

2.2 แนวคิดในการออกแบบระบบการควบคุมหุ่นยนต์เคมีอีวานอยด์

หุ่นยนต์ประเภทอีวานอยด์มักถูกใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับผู้คน เนื่องจากท่อนบนของหุ่นยนต์ - อีวานอยด์และเคมีอีวานอยด์สร้างขึ้นให้มีลักษณะคล้ายมนุษย์ คือ มีแขน 2 ข้าง แต่ละข้างประกอบด้วย ส่วนไหล่ ข้อศอก และข้อมือ แขน 1 ข้างจะประกอบด้วยข้อต่อจำนวน 6-7 องศาอิสระ ซึ่งมีจำนวนองศาอิสระมากและมีความซับซ้อน จึงเป็นเรื่องยากที่จะทำการควบคุมหุ่นยนต์อีวานอยด์ หรือเคมีอีวานอยด์ให้เคลื่อนไหวได้อย่างราบรื่น

2.2.1 หุ่นยนต์เคมีอีวานอยด์

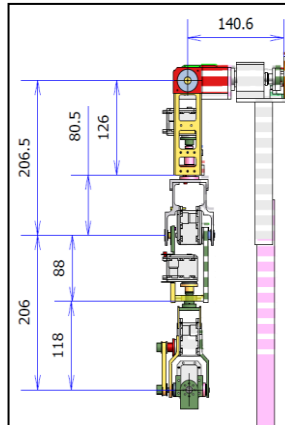
หุ่นยนต์อีวานอยด์หรือหุ่นยนต์เคมีอีวานอยด์เป็นหุ่นยนต์ในประเภทมีลักษณะคล้ายมนุษย์ โดยเฉพาะท่อนบนของหุ่นยนต์ ได้แก่ ส่วนศีรษะและส่วนแขน ในส่วนศีรษะจะเคลื่อนไหวได้ 2 - 3 องศาอิสระ และส่วนแขนจะเคลื่อนไหวได้ 6 - 7 องศาอิสระ เนื่องจากแขนของมนุษย์มี 7 องศาอิสระ ทำให้แขนของหุ่นยนต์ที่มี 7 องศาอิสระจะสามารถเคลื่อนไหวได้คล้ายมนุษย์มากกว่าแขนหุ่นยนต์ที่มี 6 องศาอิสระ



รูปที่ 2.16 แสดงท่าทางของหุ่นยนต์นะโม

หุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ที่นำมาทดลองในงานวิจัยนี้เป็นหุ่นยนต์สำหรับต้อนรับและประชาสัมพันธ์ของสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม (FIBO) ชื่อ นะโม (NAMO : Novel Articulated MOBILE platform) โดยปกติทาง FIBO จะใช้หุ่นยนต์นะโมในการต้อนรับผู้มาเยี่ยมชมสถาบัน นอกจากนี้ยังมีองค์กรจากภายนอกได้นำไปใช้ในการช่วยประชาสัมพันธ์งานต่างๆ ทั้งงานต้อนรับผู้ที่มาร่วมงาน การแนะนำสินค้า หรือแม้แต่การเป็นผู้ช่วยพิธีกร ในการทำงานของหุ่นยนต์จะแสดงท่าทางประกอบกับเสียงพูด ซึ่งจะต้องกำหนดลำดับการพูดมาก่อนล่วงหน้า แล้วจึงทำการกำหนดให้นะโมแสดงท่าทางต่างๆที่เหมาะสม จากนั้นต้องทำการบันทึกการเคลื่อนไหวและเสียงพูดไว้ล่วงหน้า ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2.16 ทำให้หุ่นยนต์นะโมไม่สามารถปฏิสัมพันธ์กับมนุษย์ได้ทันสถานการณ์จริงในขณะนั้น และจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเห็นว่าการควบคุมแขนของหุ่นยนต์ฮิวมานอยด์หรือเซมิฮิวมานอยด์ ส่วนใหญ่จะมีชุดควบคุมที่มีขนาดใหญ่ ไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก ทำให้ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบชุดควบคุมหุ่นยนต์ที่สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของแขนหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ที่มี 6 - 7 องศาอิสระได้ และชุดควบคุมมีขนาดเล็กทำให้สามารถเคลื่อนย้ายชุดควบคุมไปในสถานที่ต่างๆได้โดยสะดวก

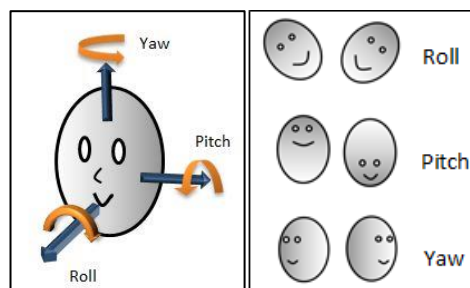
หุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์นะโม มีท่อนบนลักษณะคล้ายมนุษย์ คือมีแขน 2 ข้าง และแต่ละข้างมีข้อต่อจำนวน 7 องศาอิสระ ในแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ดิจิทัลเซอร์โว robotis รุ่น Rx-64 ในข้อต่อที่ 1 , 2 และ 4 ในข้อต่อที่ 3 , 5 , 6 , 7 และส่วนหัวซึ่งมีข้อต่อ 3 องศาอิสระใช้ดิจิทัลเซอร์โวมอเตอร์ robotis รุ่น Rx-28 ซึ่งมอเตอร์ robotis นี้จะมีการรับ-ส่งข้อมูลในรูปแบบ packet ซึ่งสามารถกำหนดคุณสมบัติต่างๆของมอเตอร์ เช่น ตำแหน่งมุมที่ต้องการให้เคลื่อนที่ไป หรือความเร็วการหมุนของมอเตอร์ ทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนไหวได้คล้ายมนุษย์ และ พร้อมทั้งในส่วนหัวของหุ่นยนต์ทั้ง 3 ข้อต่อ และมีช่วงการหมุนอยู่ระหว่าง 0 - 300 องศา ทั้งนี้ความยาวสำหรับแต่ละ link ของแขนหุ่นยนต์นะโมได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.17 ประกอบด้วยความยาวจากข้อต่อที่ 1 ถึงข้อต่อที่ 2 มีความยาว 140.6 มิลลิเมตร ข้อต่อที่ 2 ถึง ข้อต่อที่ 4 มีความยาว 206.5 มิลลิเมตร และความยาวจากข้อต่อที่ 4 ถึง ข้อต่อที่ 7 เท่ากับ 206 มิลลิเมตร ความยาว link ของแขนหุ่นยนต์นะโมมีขนาดเท่ากันทั้งข้างขวาและข้างซ้าย และความยาวของ link ศีรษะของหุ่นยนต์ถึงตำแหน่งอ้างอิงมีขนาด 191 มิลลิเมตรและหุ่นยนต์นะโมเคลื่อนที่ได้ด้วยล้อ



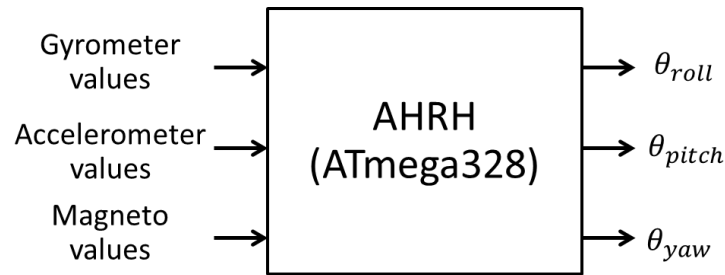
รูปที่ 2.17 แสดงความยาวของแต่ละ link ของแขนขาหุ่นยนต์นะโม

2.2.2 ชุดควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์

ชุดควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์ที่ได้ออกแบบขึ้นจะแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ชุดการควบคุมส่วนศีรษะ และชุดการควบคุมแขน เนื่องด้วยหุ่นยนต์อิมานอยด์และหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์โดยส่วนใหญ่ ส่วนคอหรือส่วนศีรษะของหุ่นยนต์จะเคลื่อนไหวได้ 2-3 องศาอิสระ ในรูปที่ 2.18 แสดงแกนหมุนของศีรษะมนุษย์ จึงได้นำอุปกรณ์ที่สามารถวัดทิศทางการเคลื่อนไหวของส่วนศีรษะได้ทั้ง 3 ทิศทาง จึงเลือกใช้อุปกรณ์ตรวจวัดที่สามารถแสดงค่ามุมเอียงตามแกนหมุนออกมาเป็นค่ามุมจากทั้ง 3 แกนได้ ซึ่งก็คือ 9DOF IMU ซึ่งประกอบด้วยเซ็นเซอร์อีก 3 ชนิด ได้แก่ gyrosensor 3 แกน accelerometer 3 แกน และ magnetometer 3 แกน ติดตั้งอยู่บนบอร์ดเดียวกัน และจะได้ค่า output จากเซ็นเซอร์ทั้ง 3 ชนิดทั้งทั้งหมด 9 ค่า ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปประมวลในไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega328 ทำให้ค่า output ออกมา 3 ค่า ซึ่งก็คือค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงไปในแกน roll pitch และ yaw ดังแผนภาพในรูปที่ 2.19 เมื่อนำ 9DOF Razor IMU มาติดตั้งบนศีรษะของผู้ควบคุม ทำให้เมื่อผู้ควบคุมขยับหรือเคลื่อนไหวศีรษะ ค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงไปในแกนต่างๆจะถูกส่งไปประมวลผลเป็นค่ามุมเอียงในแกน roll pitch yaw ซึ่งค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละแกนจะถูกส่งไปโดยการเชื่อมต่อในรูปแบบ FTDI ไปยังคอมพิวเตอร์ทำการสร้าง packet และส่ง packet ค่ามุมไปยังมอเตอร์ robotis เพื่อให้มอเตอร์หมุนไปตามค่ามุมที่ถูกส่งมาจาก 9DOF IMU



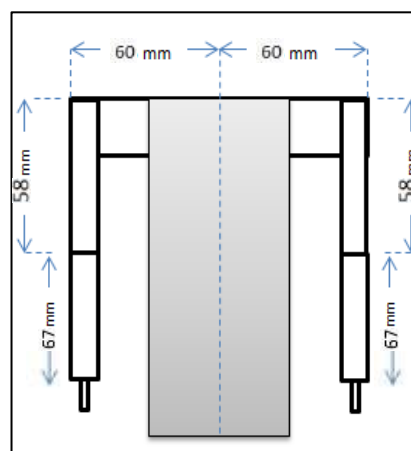
รูปที่ 2.18 แสดงแกนหมุนของศีรษะมนุษย์



รูปที่ 2.19 แสดงภาพการทำงานของ 9 DOF Razor IMU

ในส่วนของคุณควบคุมส่วนแขน เนื่องจากลักษณะแขนของหุ่นยนต์ฮิวมานอยด์และเซมิฮิวมานอยด์มีลักษณะคล้ายมนุษย์ดังที่กล่าวข้างต้น และแขนแต่ละข้างมักจะมี 6 -7 องศาอิสระ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบให้คุณควบคุมมีลักษณะคล้ายมนุษย์ด้วยเช่นกัน โดยออกแบบให้คุณควบคุมมีแขน 2 ข้าง แต่ละข้างมี 7 ข้อต่อ เพื่อให้คุณควบคุมนี้สามารถควบคุมหุ่นยนต์แขนของหุ่นยนต์ฮิวมานอยด์หรือหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ที่มีองศาอิสระไม่เกิน 7 องศาอิสระได้ คุณควบคุมส่วนแขนนี้ออกแบบให้มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา เพื่อให้สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก โดยมีความสูงประมาณ 30 เซนติเมตร

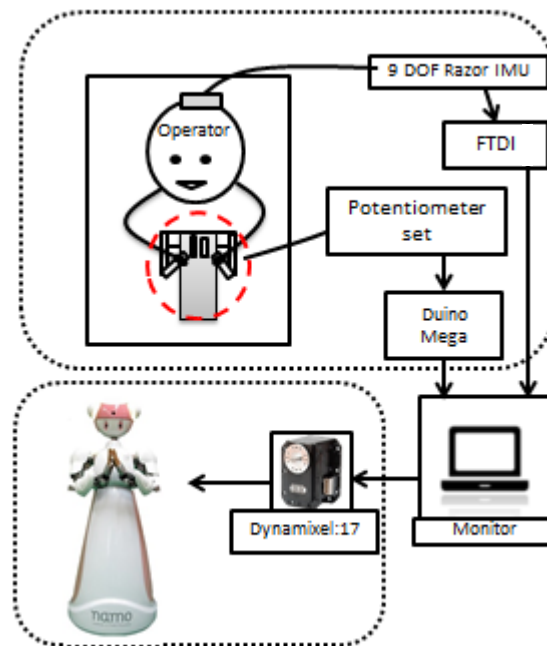
รูปที่ 2.20 แสดงความยาว link ของคุณควบคุม ในส่วนข้อต่อของแขนคุณควบคุมจะติดตั้ง potentiometer ดังรูปที่ 2.21 ไว้ทุกข้อต่อ ซึ่ง potentiometer มีขนาด 10 k และมีช่วงของการหมุน $0^\circ - 245^\circ$ เมื่อผู้ควบคุมจัดให้คุณควบคุมอยู่ในท่าทางต่างๆ potentiometer ทั้ง 14 ตัว จะอ่านค่าการเคลื่อนไหวของแต่ละข้อต่อของคุณควบคุมแขนโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega เพื่อแปลงค่า $0^\circ - 245^\circ$ เป็นค่า 0 - 1023 เพื่อส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปควบคุมดิจิทัลเซอร์โว -มอเตอร์ หลังจากนั้นนำข้อมูลที่รับมาทำการสร้าง packet และส่งข้อมูลไปยังมอเตอร์ robotis เพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนไหวส่วนแขนของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ต่อไป รูปที่ 2.22 แสดงการทำงานของระบบควบคุมหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ทั้งส่วนของศีรษะและส่วนแขน



รูปที่ 2.20 แสดงความยาว link ของคุณควบคุมส่วนแขน

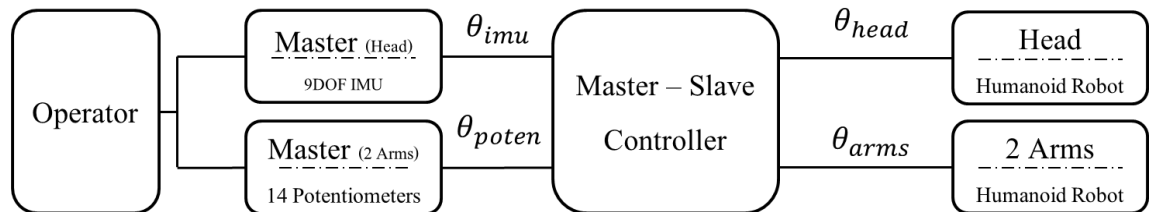


รูปที่ 2.21 แสดงภาพ Potentiometer อุปกรณ์วัดค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงของชุดควบคุมส่วนแขน



รูปที่ 2.22 แสดงการทำงานของระบบควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิวแมนอยด์

บทที่ 3 ระบบควบคุมหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์แบบ Master – Slave



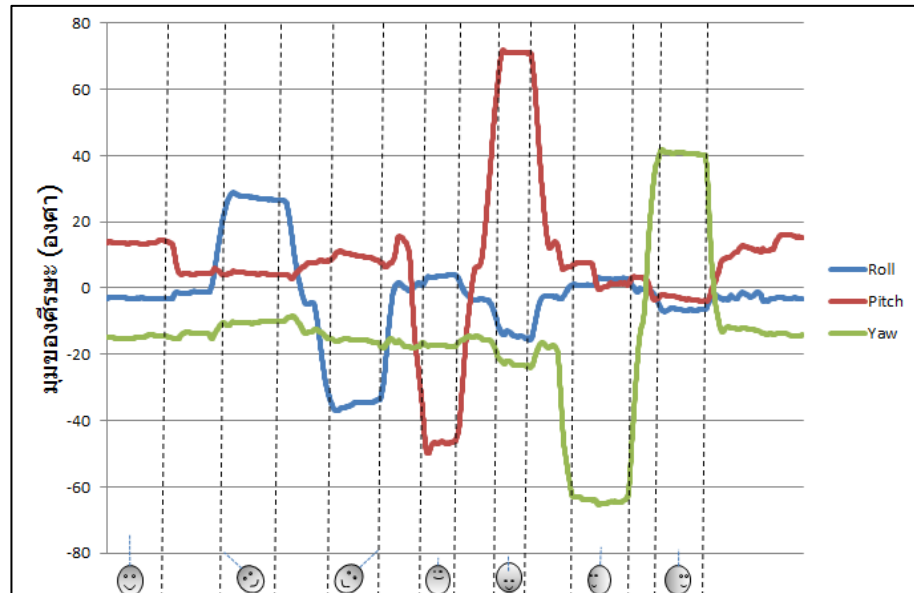
รูปที่ 3.1 แสดงภาพรวมของระบบการควบคุมแบบ Master – Slave

การควบคุมแบบ Master – Slave เป็นรูปแบบการควบคุมแบบหนึ่งมีลักษณะคือ มีอุปกรณ์หนึ่งเป็นตัวควบคุมหรือสั่งการเรียกว่า Master ทำหน้าที่ควบคุมอีกอุปกรณ์หนึ่งเรียกว่า Slave ให้ทำตามคำสั่งการควบคุมแบบ Master-Slave ในงานวิจัยนี้ได้ทำการควบคุมหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ เริ่มจากผู้ควบคุมสวมอุปกรณ์ที่ติดตั้ง 9DOF IMU เพื่อวัดค่าความเปลี่ยนแปลงจากการเคลื่อนไหวส่วนศีรษะและทำการควบคุมชุดควบคุมส่วนแขนที่ได้ติดตั้ง potentiometer ในทุกๆข้อต่อของชุดควบคุม เพื่อวัดค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงแต่ละข้อต่อ และจึงส่งข้อมูลของมุมที่เปลี่ยนแปลงทั้งในส่วนศีรษะและส่วนแขนไปยังส่วนการประมวลผล เพื่อทำการคำนวณและระบุการควบคุมที่เหมาะสมในแต่ละส่วนของหุ่นยนต์ และส่งค่ามุมไปยังหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ ในรูปที่ 3.1 แสดงภาพรวมของระบบการควบคุมแบบ master - slave

3.1 การควบคุมหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์แบบ joint control

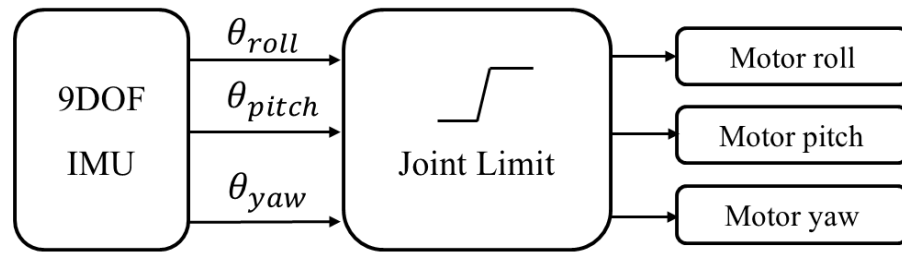
การควบคุมแบบ joint control จะให้ความสนใจเกี่ยวกับข้อมูลเชิงมุมของข้อต่อต่างๆ ได้แก่ ตำแหน่งเชิงมุม ความเร็ว ความเร่ง โดยไม่ได้อ้างอิงกับข้อต่ออื่นๆหรือสิ่งแวดล้อม ในการควบคุมหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์แบบ joint control แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือการควบคุมศีรษะของหุ่นยนต์ และการควบคุมแขนทั้งสองข้างของหุ่นยนต์ ในส่วนการควบคุมศีรษะของหุ่นยนต์จะเห็นว่าเป็น การส่งค่ามุมที่ถูกวัดได้จากการเคลื่อนไหวของศีรษะผู้ควบคุม ค่าได้ที่ออกมาจากเซ็นเซอร์ 9DOF IMU ซึ่งค่ามุมในแต่ละแกนการหมุนที่เปลี่ยนไปใน คือแกน roll pitch และ yaw โดยผ่าน limit function เพื่อให้ค่ามุมอยู่ในช่วงที่เหมาะสม แล้วจึงนำไปควบคุมตำแหน่งมุมของดิจิตอลเซอร์โว มอเตอร์ที่ศีรษะของหุ่นยนต์ทั้ง 3 ตัว ที่วางตามแกนหมุน roll pitch และ yaw เมื่อทดสอบการทำงานของเซ็นเซอร์ที่ควบคุมส่วนศีรษะ โดยผู้ควบคุมสวมอุปกรณ์ที่ติดตั้ง 9DOF IMU ที่ศีรษะของผู้ควบคุมและผู้ควบคุมเคลื่อนไหวศีรษะ 7 ลักษณะ คือ ตั้งศีรษะตรง เอียงศีรษะไปทางขวา เอียงศีรษะไปทางซ้าย เงยศีรษะไปด้านหลัง ก้มศีรษะมาด้านหน้า หันศีรษะไปด้านขวา และหันศีรษะไปด้านซ้าย

โดยได้แสดงผลด้วยกราฟในรูปที่ 3.2 แสดงค่าที่วัดการเคลื่อนไหวศีรษะแบบต่างๆโดยใช้ 9DOF IMU



รูปที่ 3.2 แสดงกราฟจากการวัดการเคลื่อนไหวศีรษะแบบต่างๆโดยใช้ 9DOF IMU

จากรูปที่ 3.2 กราฟแสดงข้อมูลจากเซ็นเซอร์ 9DOF IMU จะเห็นว่ามีกราฟ 3 เส้น สีน้ำเงิน สีแดง และ สีเขียว แทนค่ามุมในแกน roll pitch และ yaw ตามลำดับ โดยให้ค่า roll pitch และ yaw ของการตั้งศีรษะตรงเป็นค่าอ้างอิง ในกรณีที่ผู้ควบคุมเอียงศีรษะไปทางขวากราฟจะมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟสีน้ำเงิน โดยเส้นกราฟสูงขึ้น ซึ่งคือการเปลี่ยนแปลงค่ามุมของแกน roll ที่มีค่าเพิ่มขึ้น กลับกันกับเมื่อผู้ควบคุมเอียงศีรษะไปทางซ้ายกราฟสีน้ำเงินมีลักษณะต่ำลง คือค่าการเปลี่ยนแปลงของมุมในแกน roll ลดลงเมื่อเทียบกับค่าอ้างอิง ซึ่งกราฟสีแดงและสีเขียวจะมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากหรือแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเลย เช่นเดียวกับการยกศีรษะหรือก้มศีรษะเส้นกราฟสีแดงซึ่งก็คือค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงแกน pitch โดยที่เมื่อผู้ควบคุมยกศีรษะ ค่ามุมในแกน pitch จะมีค่าลดต่ำลงทำให้กราฟเส้นสีแดงต่ำลงจากระดับอ้างอิงและเมื่อผู้ควบคุมก้มศีรษะจะทำให้เส้นกราฟสีแดงสูงขึ้นคือค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงในแกน pitch มีค่าสูงขึ้นจากค่าอ้างอิง และในกรณีหันศีรษะไปทางขวาและซ้ายกราฟสีเขียวจะมีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด คือค่ามุมในแกน yaw มีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด คือเมื่อหันศีรษะไปทางขวาค่ามุมที่วัดได้จากแกน yaw จะมีค่าลดลงและเมื่อหันศีรษะไปทางซ้ายค่าจะสูงขึ้นทำให้กราฟเส้นสีเขียวมีการลดต่ำลงและเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ แต่ค่าอื่นๆจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงมากเท่ากราฟเส้นสีเขียว เมื่อได้ค่า roll pitch yaw มาแล้วจะทำการส่งไปยังเซอร์โวมอเตอร์ 3 ตัวในส่วนศีรษะของหุ่นยนต์เพื่อควบคุมหุ่นยนต์เซมิอัตโนมัติให้เคลื่อนไหวส่วนศีรษะตามที่ผู้ควบคุมต้องการ ดังรูปที่ 3.3 และในตารางที่ 3.1 แสดงขอบเขตของค่าการหมุนของศีรษะในแกน roll, pitch และ yaw



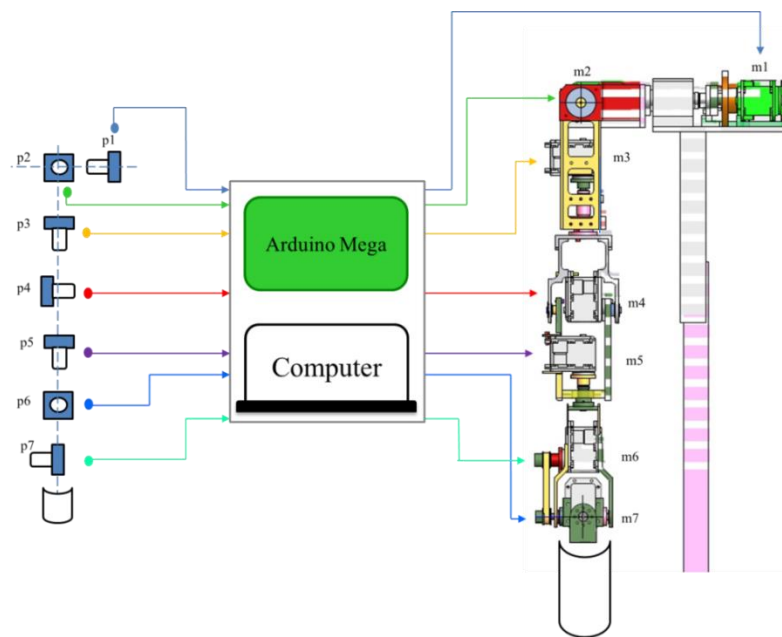
รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพการควบคุมมอเตอร์ของส่วนศีรษะของหุ่นยนต์ด้วย 9DOF IMU

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงขอบเขตของค่าการหมุนของศีรษะในแกน Roll Pitch Yaw

แกน Roll	เอียงศีรษะไปทางซ้าย	ศีรษะตั้งตรง	เอียงศีรษะไปทางขวา
	 -55°C	 0°C	 55°C
แกน Pitch	ก้มศีรษะ	ศีรษะตั้งตรง	เงยศีรษะ
	 -60°C	 0°C	 60°C
แกน Yaw	หันศีรษะไปทางซ้าย	ศีรษะตั้งตรง	หันศีรษะไปทางขวา
	 -83°C	 0°C	 83°C

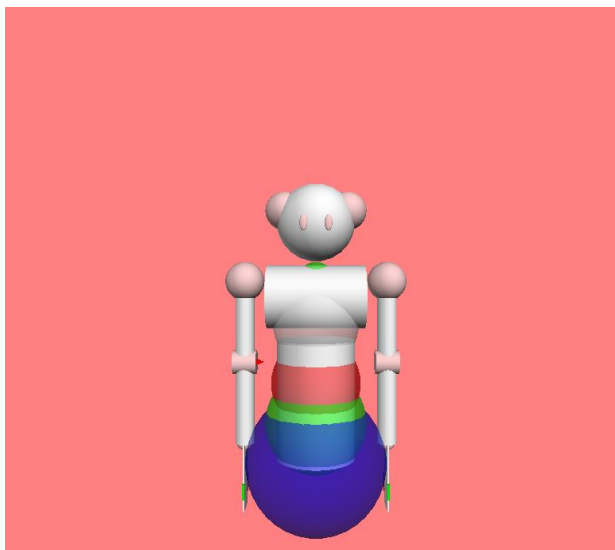
ในส่วนแขนของหุ่นยนต์ การควบคุมแขนแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้ค่าที่ได้รับจาก potentiometer ที่ถูกติดตั้งในแต่ละข้อต่อของชุดควบคุม โดยเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง (zero pose) ก่อนอื่นต้องกำหนดตำแหน่งอ้างอิงของชุดควบคุม และตำแหน่งอ้างอิงของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ โดยจัดให้ชุดควบคุมอยู่ในท่ายืนตรงแขนชิดลำตัวและกำหนดให้ค่าที่อ่านได้จาก potentiometer นั้นเป็นค่าอ้างอิงของชุดควบคุม เช่นเดียวกับหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ เมื่อจัดให้หุ่นยนต์อยู่ในท่ายืนตรงและแขนอยู่ข้างลำตัวและทำการอ่านค่าของดิจิตอลเซอร์โวมอเตอร์ในแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์และกำหนดให้เป็นค่ามุมของตำแหน่งอ้างอิงของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ เมื่อผู้ควบคุมขยับแขนของชุดควบคุมทำให้ตำแหน่งมุมของ potentiometer เกิดการเปลี่ยนแปลง เมื่อนำค่าการเปลี่ยนแปลงนั้นรวมเข้ากับค่าอ้างอิงของหุ่นยนต์ที่ได้กำหนดไว้ ทำให้แต่ละแขนของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์เคลื่อนไปยังตำแหน่งมุมตามค่ามุมที่ได้รับมาจาก potentiometer จากรูปที่ 3.4

แสดงการส่งข้อมูลจาก potentiometer ไปยังมอเตอร์ของหุ่นยนต์ จากนั้นได้ทำการทดสอบการควบคุมแขนหุ่นยนต์ด้วยการควบคุมแบบ joint control โดยการสร้างหุ่นยนต์เคมีอีวานอยด์จำลองขึ้นในคอมพิวเตอร์ด้วย VPthon [13] ซึ่งเป็น library ในภาษา Python ซึ่งเป็นโมดูลที่สามารถสร้างแบบจำลอง 3 มิติ และ สร้างภาพที่มีการเคลื่อนไหวได้ โดยในโปรแกรมจะมีคำสั่งสร้างวัตถุรูปทรงเรขาคณิตทั้งทรงกลม ทรงกรวย ทรงลูกบาศก์ ทรงกระบอก และรูปทรงอื่นๆ และสามารถกำหนดขนาด สี การเคลื่อนที่ และการหมุนของวัตถุนั้นๆได้



รูปที่ 3.4 แสดงการควบคุมมอเตอร์ของส่วนแขนข้างขวาของหุ่นยนต์ด้วยชุด Potentiometer

ในการใช้ VPthon สร้างแบบจำลองของหุ่นยนต์เคมีอีวานอยด์นั้น จะต้องกำหนดให้แบบจำลองมีคุณสมบัติและค่าตัวแปรต่างๆให้เหมือนกับหุ่นยนต์เคมีอีวานอยด์นั้นๆ เริ่มจากการกำหนดเฟรมการหมุนของตำแหน่งอ้างอิงหรือเฟรม {0} และกำหนดเฟรมการหมุนของข้อต่ออื่นๆและ การเรียงตัวของมอเตอร์ของแต่ละข้อต่อให้มีความสัมพันธ์กับข้อต่อก่อนและหลังของข้อต่อนั้น โดยเมื่อเริ่มสร้างข้อต่อใหม่จะต้องทำการอ้างอิงกับเฟรมของข้อต่อก่อนหน้า รวมถึงกำหนดความยาว link ตามขนาดจริงของหุ่นยนต์ ข้อดีของการนำแบบจำลองหุ่นยนต์มาใช้ควบคุมแทนหุ่นยนต์จริงคือ ป้องกันความเสียหายที่จะเกิดจากหุ่นยนต์จริงได้ จากรูปที่ 3.5 แสดงภาพหุ่นยนต์เคมีอีวานอยด์จำลองบน VPthon



รูปที่ 3.5 แสดงภาพหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์นะโมจำลองบน VPthon

ใน VPthon สามารถกำหนดตำแหน่งและมุมการหมุนของแต่ละวัตถุที่สร้างขึ้นได้ ดังนั้นจึงสามารถควบคุมแขนแต่ละข้อต่อของแบบจำลองได้โดยเปลี่ยนค่ามุม จึงทำการทดสอบการควบคุมหุ่นยนต์ - เซมิฮิวมานอยด์โดยใช้ค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงไปของ potentiometer จากชุดควบคุมมาควบคุมการเคลื่อนไหวในส่วนแขนของแบบจำลองหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ได้โดยตรง จากรูปที่ 3.6 แสดงการเคลื่อนไหวของแบบจำลองหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์จากการควบคุมแบบ joint control ของชุดควบคุมส่วนแขน แต่เนื่องจากชุดควบคุมส่วนแขนและหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์มีขนาดที่แตกต่างกัน ความยาวของแต่ละ link ไม่เป็นสัดส่วนต่อกันโดยตรง เมื่อทำการควบคุมในบางท่าทาง หุ่นยนต์สามารถแสดงท่าทางได้คล้ายกับชุดควบคุม แต่บางท่าทางไม่สามารถแสดงท่าทางได้เหมือนกับชุดควบคุม และไม่สามารถเข้าใจได้ว่าหุ่นยนต์ต้องการสื่อความหมายอะไร ดังเช่นท่าทางการไหว้ที่แสดงในรูป 3.6 เมื่อควบคุมแบบ joint control แสดงท่าไหว้มือทั้งสองข้างของหุ่นยนต์จะไม่บรรจบกันในลักษณะเดียวกับตัวควบคุม ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงในส่วนของการควบคุมต่อไป



รูปที่ 3.6 แสดงท่าโบกมือลา (แถวบน) และท่าไหว้ (แถวล่าง) ของแบบจำลองหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ เมื่อควบคุมแบบ Joint Control

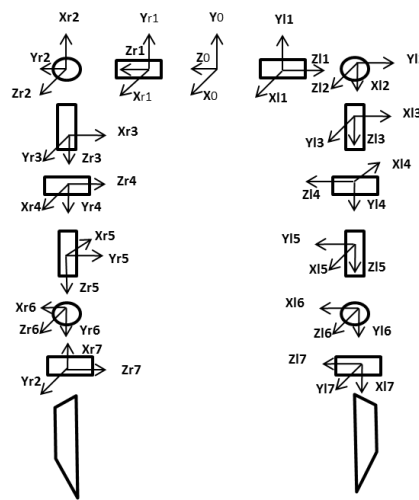
3.2 การควบคุมหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์แบบ Cartesian Control

Cartesian control คือการควบคุมการเคลื่อนไหวยของหุ่นยนต์ใน 3 มิติ โดยมีแกนอ้างอิง คืออ้างอิงตำแหน่งของแต่ละ joint กับแกน x, y, z ใน 3 มิติ โดยจะหาความสัมพันธ์ระหว่างเฟรมอ้างอิงซึ่งในที่นี้คือ เฟรม $\{0\}$ ไปยังเฟรมของข้อต่อถัดไป จนกระทั่งถึงเฟรมที่ $\{7\}$ ของแขนหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ ซึ่งก็คือตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ โดยต้องใช้ วิธี forward kinematics ในการหาความสัมพันธ์ดังกล่าว

3.2.1 คินมาติกส์โมเดลและฟอร์เวิร์ดคินมาติกส์

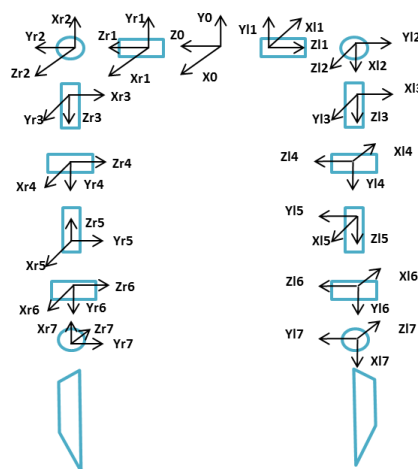
คินมาติกส์เป็นเรื่องที่เกี่ยวกับการใช้เรขาคณิตมาอธิบายการเคลื่อนที่ทั้งในเรื่องตำแหน่ง ทิศทาง และการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลา ในด้านของหุ่นยนต์นั้นคินมาติกส์จะใช้เกี่ยวกับการเคลื่อนไหวยของหุ่นยนต์ เช่น การเคลื่อนไหวยของแขนกล (manipulator) และการทำงานของแขนกลเพื่อสร้างสมการที่ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์และการควบคุมหุ่นยนต์ โดยใช้ transformation matrix ในการคำนวณเพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อต่อปัจจุบันอ้างอิงกับโลก transformation matrix ประกอบด้วย เมตริกซ์การหมุน (rotation matrix) ขนาด 3×3 และมี เมตริกซ์ homogeneous นำมาใช้อธิบายเกี่ยวกับตำแหน่งใน 3 มิติ ดังนั้น transformation matrix มีขนาด 4×4 แสดงว่า homogeneous transformation matrix ได้แสดงความสัมพันธ์ของแต่ละ link ในหุ่นยนต์ จะประกอบด้วยการอธิบายเคลื่อนที่แบบหมุน (rotational motion) และการเคลื่อนที่แบบเลื่อน (translation motion) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Denavit-Hartenberg matrix [14] ในงานวิจัยนี้จึงได้นำวิธีของ Denavit-Hartenberg มาใช้ในการ

คำนวณฟอร์เวิร์ดคิเนมาติกส์ (forward kinematics) เป็นการคำนวณหาความสัมพันธ์ของข้อต่อปัจจุบันกับข้อต่อข้างเคียงเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ โดยกำหนดค่าตัวแปรต่างๆของหุ่นยนต์ และติดตั้งเฟรม (frame) ให้กับแต่ละข้อต่อ และผลที่ได้คือออกมาคือค่าตำแหน่งและทิศทางการหมุนของแต่ละ link ในรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8 แสดงคิเนมาติกส์และเฟรมของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์นะโมและคิเนมาติกส์ของชุดควบคุมส่วนแขนตามลำดับ นอกจากนั้นได้แสดงค่าของตัวแปรต่างๆของแขนหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ และของชุดควบคุมส่วนแขนไว้ในตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ เพื่อนำไปทำการคำนวณ forward kinematics ต่อไป ตัวแปรสำหรับการคำนวณ forward kinematics มี 4 ตัวแปร ได้แก่ ความยาว link (a_i) ค่ามุมที่ link ปิด (α_i) ระยะระหว่าง joint (d_i) และ ค่ามุมที่หมุนไปของ joint (θ_i)



รูปที่ 3.7 แสดงคิเนมาติกส์และ frame ของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์นะโม ตามแนวทางของ

Denavit-Hartenberg



รูปที่ 3.8 แสดงคิเนมาติกส์และ frame ของชุดควบคุมส่วนแขนตามแนวทางของ Denavit-Hartenberg

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงค่าตัวแปรของข้อต่อของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์นะโมด้วยแนวทางของ

Denavit - Hartenberg

Number of Joints	Right / Left	θ_i (degree)	d_i (mm)	a_i (mm)	α_i (degree)
1	R	$\theta_{r1} + 0^\circ$	182	0	0°
2	R	$\theta_{r2} + 90^\circ$	0	0	90°
3	R	$\theta_{r3} - 90^\circ$	0	0	90°
4	R	$\theta_{r4} + 90^\circ$	206.5	0	90°
5	R	$\theta_{r5} - 180^\circ$	0	0	90°
6	R	$\theta_{r6} - 90^\circ$	206	0	90°
7	R	$\theta_{r7} - 90^\circ$	0	0	90°
1	L	$\theta_{l1} + 180^\circ$	-182	0	0°
2	L	$\theta_{l2} - 90^\circ$	0	0	90°
3	L	$\theta_{l3} + 90^\circ$	0	0	90°
4	L	$\theta_{l4} - 90^\circ$	206.5	0	90°
5	L	$\theta_{l5} + 180^\circ$	0	0	90°
6	L	$\theta_{l6} + 90^\circ$	206	0	90°
7	L	$\theta_{l7} + 90^\circ$	0	0	90°

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงค่าตัวแปรของแขนชุดควบคุมส่วนแขนของหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์ด้วย

แนวทางของ Denavit - Hartenberg

Number of Joints	Right /Left	θ_i (degree)	d_i (mm)	a_i (mm)	α_i (degree)
1	R	$\theta_{r1} + 0^\circ$	60	0	0°
2	R	$\theta_{r2} + 90^\circ$	0	0	90°
3	R	$\theta_{r3} - 90^\circ$	0	0	90°
4	R	$\theta_{r4} + 90^\circ$	58	0	90°
5	R	$\theta_{r5} - 180^\circ$	0	0	90°
6	R	$\theta_{r6} - 180^\circ$	67	0	90°
7	R	$\theta_{r7} - 90^\circ$	0	0	90°
1	L	$\theta_{l1} + 180^\circ$	-60	0	0°
2	L	$\theta_{l2} - 90^\circ$	0	0	90°
3	L	$\theta_{l3} + 90^\circ$	0	0	90°
4	L	$\theta_{l4} - 90^\circ$	58	0	90°
5	L	$\theta_{l5} + 180^\circ$	0	0	90°
6	L	$\theta_{l6} + 180^\circ$	67	0	90°
7	L	$\theta_{l7} + 90^\circ$	0	0	90°

นำข้อมูลจากตาราง Denavit – Hartenberg มาคำนวณหาความสัมพันธ์ของแต่ละ joint โดยการแทนค่าใน Transformation matrix ในสมการที่ 3.1 และจะได้ความสัมพันธ์ของแต่ละข้อต่อ

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i\cos\alpha_i & \sin\theta_i\sin\alpha_i & a_i\cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i\cos\alpha_i & -\cos\theta_i\sin\alpha_i & a_i\sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

เมื่อทำการคำนวณ Transformation matrix ของแขนแต่ละข้างตั้งแต่ joint ที่ 1 จนถึง ปลายแขนจะได้เมตริกซ์ออกมา 8 เมตริกซ์ ได้แก่ ${}^1_1T, {}^1_2T, {}^2_3T, {}^3_4T, {}^4_5T, {}^5_6T$ และ 6_7T และหากต้องการทราบตำแหน่งของแต่ละ joint เมื่อเทียบกับเฟรม $\{0\}$ นั้นสามารถทำได้ในสมการที่ 3.2 ถึง 3.8

$$\text{Joint ที่ 1 เทียบกับโลก จะได้} \quad {}^0_1T = {}^0_1T \quad (3.2)$$

$$\text{Joint ที่ 2 เทียบกับโลก จะได้} \quad {}^0_2T = {}^0_1T * {}^1_2T \quad (3.3)$$

$$\text{Joint ที่ 3 เทียบกับโลก จะได้} \quad {}^0_3T = {}^0_1T * {}^1_2T * {}^2_3T \quad (3.4)$$

$$\text{Joint ที่ 4 เทียบกับโลก จะได้} \quad {}^0_4T = {}^0_1T * {}^1_2T * {}^2_3T * {}^3_4T \quad (3.5)$$

$$\text{Joint ที่ 5 เทียบกับโลก จะได้} \quad {}^0_5T = {}^0_1T * {}^1_2T * {}^2_3T * {}^3_4T * {}^4_5T \quad (3.6)$$

$$\text{Joint ที่ 6 เทียบกับโลก จะได้} \quad {}^0_6T = {}^0_1T * {}^1_2T * {}^2_3T * {}^3_4T * {}^4_5T * {}^5_6T \quad (3.7)$$

$$\text{Joint ที่ 7 เทียบกับโลก จะได้} \quad {}^0_7T = {}^0_1T * {}^1_2T * {}^2_3T * {}^3_4T * {}^4_5T * {}^5_6T * {}^6_7T \quad (3.8)$$

และสมการที่ 3.9 มาจากการนำเมตริกซ์ที่ได้มานั้นมาคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนจะได้

$${}^{end}_0T, {}^0_7T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & x \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & y \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

จากสมการที่ 3.10 จะได้ $\begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{bmatrix}$ เมตริกซ์ขนาด 3x3 นี้คือ rotation matrix และ $[x \ y \ z]^T$ คือค่าตำแหน่งในแกน x y และ z ของแขนหุ่นยนต์เมื่อเทียบกับ Cartesian space

3.2.2 อินเวอร์สคิเนมาติกส์แบบ Pseudoinverse

การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เซมิอัติโนมัติ และต้องการให้ปลายแขน (end-effector) ของหุ่นยนต์เคลื่อนไปในตำแหน่งที่ผู้ควบคุมต้องการหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าตำแหน่งเป้าหมาย (target position) ต้องทำการคำนวณด้วย inverse kinematics เพื่อต้องการทราบค่าของมุมในแต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ และจะต้องกำหนดค่าตำแหน่งเป้าหมาย (x,y,z) ที่ต้องการให้ปลายแขนของหุ่นยนต์ไปถึง และค่ามุมเริ่มต้นของข้อต่อแขนหุ่นยนต์ (θ_{i-1}) ในขณะนั้น จึงสามารถทำการคำนวณ inverse kinematics ได้ แต่เนื่องด้วยแขนของหุ่นยนต์และชุดควบคุมแต่ละข้างมี 7 องศาอิสระจึงต้อง

คำนวณ inverse matrix ด้วยวิธีเฉพาะ ทำให้การคำนวณหา inverse kinematics ให้งานวิจัยนี้จะใช้การคำนวณด้วยวิธี pseudo-inverse ในแบบ iterative ซึ่งมีรูปแบบดังสมการที่ 3.10 ถึง 3.12

$$\Delta\theta = J^+ \vec{e} \quad (3.10)$$

ซึ่ง $J^+ = J^T (JJ^T)^{-1}$ (3.11)

จะได้ $\Delta\theta = J^T (JJ^T)^{-1} \vec{e}$ (3.12)

เมื่อกำหนดให้ $\Delta\theta$ คือ ผลต่างของมุมในแต่ละ joint

$\vec{e}$ คือ ค่าผลต่างของตำแหน่งเป้าหมายกับค่าตำแหน่งของปลายแขนปัจจุบัน

J คือ จาโคเบียน

การคำนวณหาจาโคเบียน (J) แบบ Explicit form สามารถทำได้ดังนี้

$$J = \begin{pmatrix} J_v \\ J_\omega \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

ซึ่ง $J_v = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial x}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \ddots & \frac{\partial y}{\partial \theta_n} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial z}{\partial \theta_n} \end{pmatrix}$ (3.14)

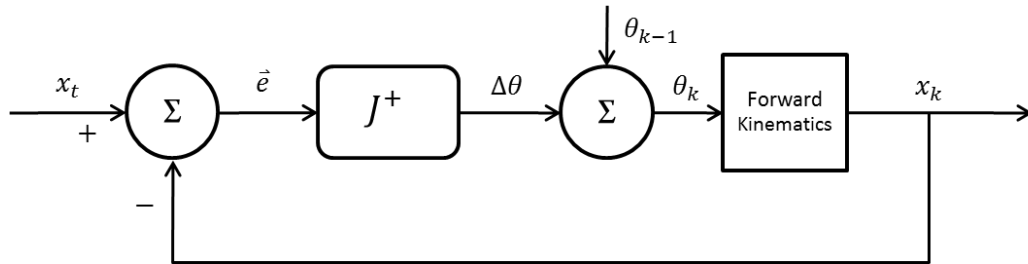
$${}^{end}T, {}^0T = \begin{bmatrix} r11 & r21 & r31 & x \\ r12 & r22 & r32 & y \\ r13 & r23 & r33 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

และ $J_\omega = ({}^0Z \dots {}^nZ)$ (3.16)

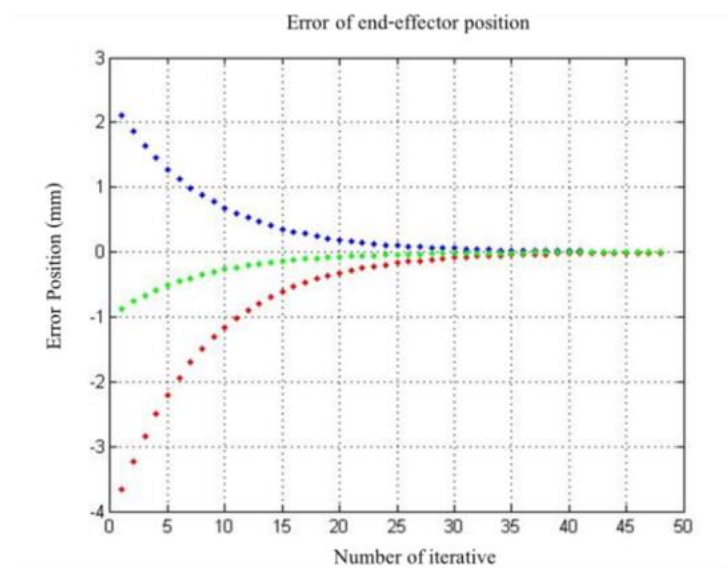
$${}^0T = \begin{bmatrix} r11 & r21 & r31 & x \\ r12 & r22 & r32 & y \\ r13 & r23 & r33 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

เมื่อได้กำหนดตำแหน่งเป้าหมายและมุมปัจจุบันของแต่ละข้อต่อทั้ง 8 ข้อต่อแล้ว ทำการคำนวณหาค่า jacobian ดังสมการที่ 3.13 – 3.17 โดยสมการที่ 3.14 ตัวแปร x, y และ z คือค่าที่มาจากตำแหน่ง 3 ตัว ด้านบนของหลักสุดท้ายของ transformation matrix ตามลำดับซึ่งแสดงในสมการที่ 3.15 และในสมการที่ 3.16 ตัวแปร 0Z ถึง nZ ในสมการที่ 3.16 มาจากตัวแปร 3 ตัวแรกในคอลัมน์ที่ 3 ของ 0T ถึง ${}^{end}T$ ตามลำดับ ซึ่งแสดงตัวอย่างการหา 0Z จาก 0T ในสมการที่ 3.17 ดังนั้น J_v จะเป็นเมตริกซ์ที่มีขนาด 3x7 และเมตริกซ์ของ J_ω มีขนาด 3x7 เมื่อนำ J_v และ J_ω มารวมกันเป็นเมตริกซ์ของ Jacobian จะเป็นเมตริกซ์ที่มีขนาด 6x7 นำเมตริกซ์ Jacobian ที่ได้มาไปคำนวณตามสมการที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ จะได้ ค่า $\Delta\theta$ ของข้อต่อที่ 1 ถึง 7 แล้วนำค่านั้นไปคำนวณ forward kinematics เพื่อหาค่า

ตำแหน่งปัจจุบันที่ปลายแขนของหุ่นยนต์อยู่ แล้วนำค่าตำแหน่งนั้นไปหาค่าความต่างกับตำแหน่งเป้าหมายที่กำหนดไว้และนำค่าผลต่างนี้มาใช้ในการคำนวณในครั้งถัดไป ตามแผนภาพที่ได้แสดงในรูปที่ 3.9 ทำเช่นนี้ไปจนกว่าค่าผลต่างจากตำแหน่งเป้าหมายจะลดน้อยลงจนกระทั่งอยู่ในค่าที่น้อยตามที่คุณควบคุมต้องการ นำค่าผลต่างของตำแหน่งปลายแขนปัจจุบันและตำแหน่งเป้าหมายมาทำการ plot กราฟซึ่งแสดงค่า และค่าความผิดพลาดนั้นมีค่าเข้าสู่ค่า 0 ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.9 แสดงแผนภาพในการคำนวณ โดยใช้ Pseudo Inverse Jacobian

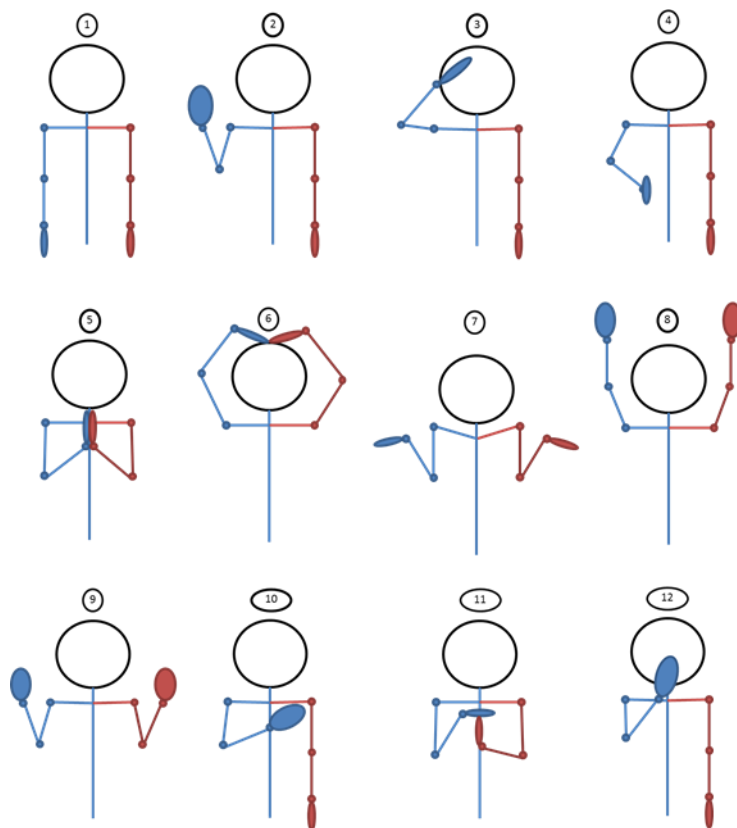


รูปที่ 3.10 แสดงค่าผลต่างของตำแหน่งปลายแขนปัจจุบันและตำแหน่งเป้าหมายของแขนขา

บทที่ 4 ระบบการควบคุมท่าทางแบบ Master- Slave

4.1 การแสดงท่าทางของมนุษย์เพื่อการสื่อสาร

มนุษย์ใช้การแสดงท่าทางเพื่อสื่อสารและแสดงอารมณ์ การแสดงท่าทางของมนุษย์มีหลากหลาย ทั้งแสดงท่าทางเพื่อประกอบการบรรยาย หรือการแสดงท่าทางเพื่อสื่อสารให้ผู้อื่นเข้าใจทั้งประกอบคำพูดหรือแสดงท่าทางเพียงอย่างเดียว การแสดงท่าทางเพื่อการสื่อสารโดยไม่ใช้คำพูด เป็นแสดงท่าทางแบบสัญลักษณ์เพื่อการสื่อสาร (emblematic gestures)[15] สามารถแสดงออกได้โดยการขยับใบหน้า มือ หรือแขน ซึ่งเป็นการสื่อสารของมนุษย์ที่มีมาตั้งแต่อดีตและสืบทอดกันมาจากวัฒนธรรมดั้งเดิมที่แตกต่างกันจนถึงปัจจุบัน เช่นการไหว้ คือการแสดงความเคารพหรือการทักทายต่อกันของไทย สำหรับชาวต่างชาติการโบกมือคือการทักทายหรือการบอกลา การแสดงท่าทางต่างๆของมนุษย์นั้นมีเพื่อสื่อสารให้ผู้อื่นเข้าใจอารมณ์ ความรู้สึก ความคิด การแสดงท่าทางเพื่อการสื่อสารบางครั้งอาจใช้มือเพียงข้างเดียว บางท่าทางอาจใช้มือทั้ง 2 ข้าง หรือบางท่าทางอาจใช้มือกับส่วนอื่นๆของร่างกาย ดังในรูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างการแสดงท่าทางแบบสัญลักษณ์



รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างการแสดงท่าทางของมนุษย์

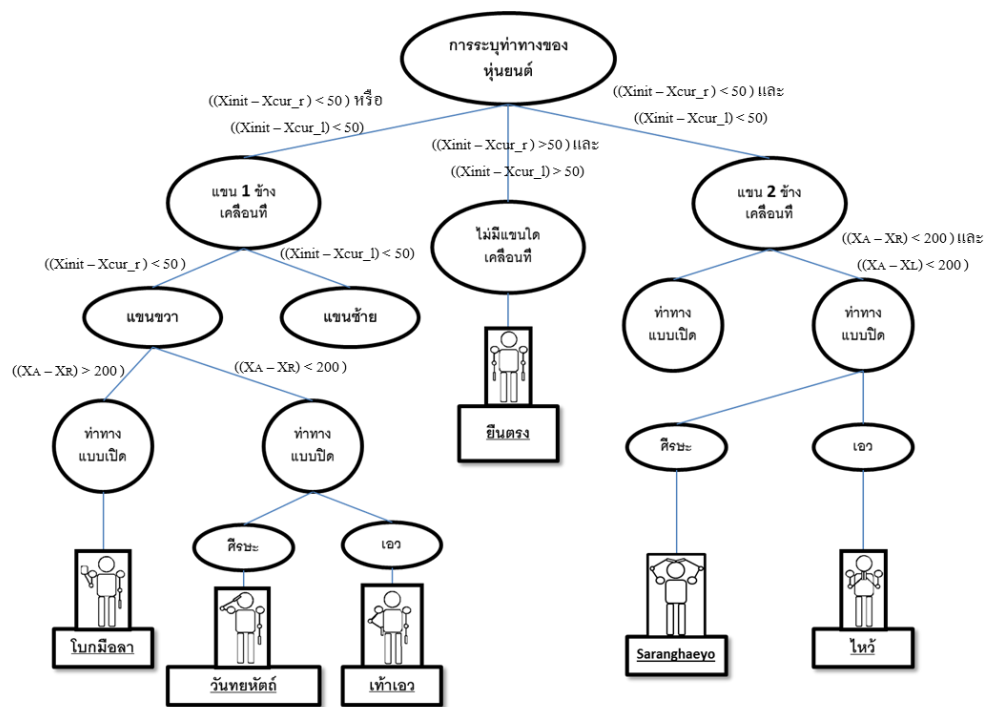
4.2 การแยกแยะท่าทางสำหรับควบคุมหุ่นยนต์เคมีอิวมานอยด์

ในงานวิจัยนี้หุ่นยนต์เคมีอิวมานอยด์นั้นถูกใช้ในงานที่ต้องอาศัยการแสดงท่าทางเพื่อการสื่อสารกับมนุษย์ โดยที่หุ่นยนต์เคมีอิวมานอยด์ซึ่งมีท่อนบนคล้ายมนุษย์สามารถเคลื่อนไหวส่วนศีรษะ แขน และมือได้ แต่ไม่สามารถเคลื่อนไหวส่วนนิ้วมือได้ งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการพิจารณาการเคลื่อนไหวส่วนแขนเพื่อแยกแยะการแสดงท่าทางของหุ่นยนต์ การแบ่งประเภทท่าทางของมนุษย์โดยอ้างอิงจากการเคลื่อนไหวส่วนแขน โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ การแสดงท่าทางแบบเปิดและการแสดงท่าทางแบบปิด ตามตารางที่ 4.1 โดยอ้างอิงตามลำดับของรูปที่ 4.1 ซึ่งอธิบายลักษณะของการแสดงท่าทางแบบเปิดคือการแสดงท่าทางโดยเคลื่อนไหวแขนข้างใดข้างหนึ่งหรือทั้ง 2 ข้าง โดยที่ปลายแขนไม่เคลื่อนที่มาบรรจบกันและไม่บรรจบกับส่วนใดของร่างกาย ดังนั้นการแสดงท่าทางแบบเปิดจึงไม่ต้องการความแม่นยำของตำแหน่งปลายแขนสูงมากนัก ชุดควบคุมสามารถควบคุมหุ่นยนต์ให้แสดงท่าทางที่สื่อความหมายตรงกับชุดควบคุมได้ ตัวอย่างท่าทางที่มีลักษณะเป็นท่าทางแบบเปิด ได้แก่ ท่าโบกมือลา ท่าขอมแพ้ และลักษณะการแสดงท่าทางแบบปิด คือท่าทางที่เคลื่อนไหวแขนทั้งสองข้างเพื่อให้ปลายแขนทั้งสองมาบรรจบกันที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง หรือหรือเคลื่อนไหวแขนเพียงข้างเดียวไปบรรจบกับส่วนอื่นๆของร่างกายที่มีตำแหน่งที่ค่อนข้างแน่นอน เช่น ศีรษะ เอว หน้าอก ดังนั้นในกรณีนี้ความแม่นยำของตำแหน่งปลายแขนจึงสำคัญมาก ตัวอย่างของลักษณะท่าทางแบบปิด เช่น ท่าวันทยหัตถ์ ท่าเอว ไหว้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงตัวอย่างการท่าทางของมนุษย์

No.	ชื่อท่าทาง	ประเภทของท่าทาง	
		ท่าทางแบบเปิด	ท่าทางแบบปิด
1	ยืนตรง	-	-
2	โบกมือลา	ใช้แขน 1 ข้าง	-
3	วันทยหัตถ์	-	ใช้แขน 1 ข้าง
4	เท้าเอว	-	ใช้แขน 1 ข้าง
5	ไหว้	-	ใช้แขน 2 ข้าง
6	Saranghaeyo	-	ใช้แขน 2 ข้าง
7	ยกไหล่	ใช้แขน 2 ข้าง	-
8	ดีใจ	ใช้แขน 2 ข้าง	-
9	ขอมแพ้	ใช้แขน 2 ข้าง	-
10	Hand over heart	-	ใช้แขน 1 ข้าง
11	ขอเวลานอก	-	ใช้แขน 2 ข้าง
12	ส่งจูบ	-	ใช้แขน 1 ข้าง

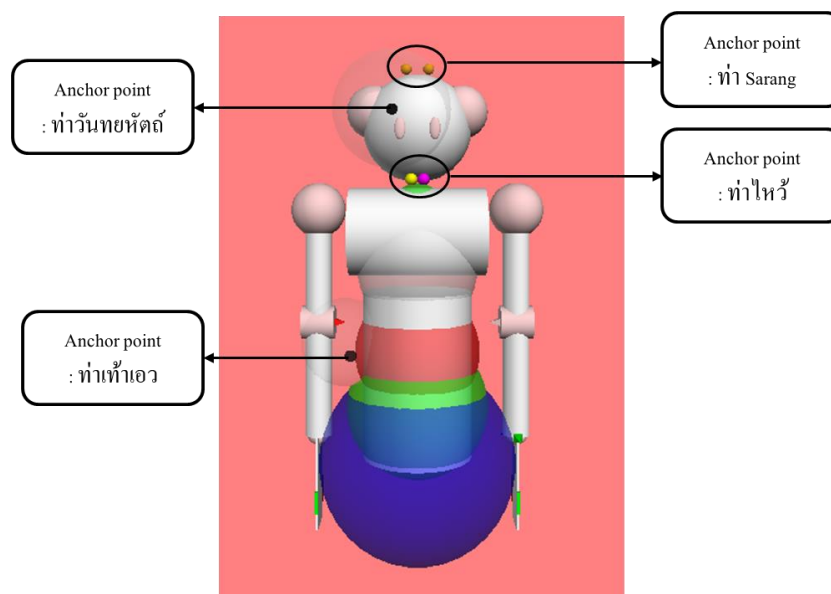
ทำทางแบบเปิดและทำทางแบบปิดจะมีผลต่อการควบคุมหุ่นยนต์เคมีอีวานอยด์ผ่านระบบควบคุมแบบ master-slave เนื่องจากกรณีที่ขนาดของชุดควบคุมและหุ่นยนต์ที่ถูกควบคุมต่างกันมาก การควบคุมโดยใช้ค่ามุมจากชุดควบคุมโดยตรงจะทำให้ปลายแขนของหุ่นยนต์อยู่ในตำแหน่งที่คลาดเคลื่อนแตกต่างจากชุดควบคุมเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงซึ่งจะมีผลต่อการแสดงทำทางแบบปิด ดังนั้นในการควบคุมแขนหุ่นยนต์เคมีอีวานอยด์แสดงทำทางต่างๆจำเป็นต้องทำการจัดประเภททำทางให้ชัดเจนเพื่อการเลือกใช้วิธีการควบคุมหุ่นยนต์ได้อย่างเหมาะสม โดยได้เลือกวิธีการแยกแยะทำทางต่างๆด้วยรูปแบบของ decision tree ดังรูปที่ 4.2 โดยการสร้างแผนผังการตัดสินใจแบบ decision tree ส่วนมากจะนำไปใช้ในการช่วยตัดสินใจเมื่อมีข้อมูลเป็นจำนวนมาก ซึ่งโครงสร้างของ decision tree จะประกอบด้วย โหนด (node) ซึ่ง node จะมีคุณลักษณะ (attribute) ที่แตกต่างกัน โดยที่ โหนดราก (root node) ซึ่งเป็น node ที่อยู่บนสุดของแผนผัง ในที่นี้คือ การระบุทำทางของหุ่นยนต์ ส่วนต่อไปคือสาขาของต้นไม้ (branch) จะเป็นตัวระบุคุณสมบัติเพื่อไปยัง node ที่เป็นไปตามเงื่อนไขนั้น และใบ (leaf) คือผลลัพธ์ที่ได้จากการตัดสินใจโดยใช้ decision tree



รูปที่ 4.2 แสดงการแยกแยะทำทางด้วยรูปแบบ Decision Tree

ซึ่งการทำแผนภาพ Decision Tree ในรูปที่ 4.2 ได้นำตัวอย่างทำทาง 6 ทำทางได้แก่ ทำยืนตรง ทำโบกมือลา ทำวันทยหัตถ์ ทำเท้าเอว ทำไหว้ ทำ Sarang มาใช้ในการแสดงการแยกแยะทำทางด้วย Decision Tree เนื่องจากแต่ละทำทางสามารถแสดงทำทางได้ชัดเจน สะดวกต่อการทดสอบแนวทางที่จะใช้แยกแยะประเภททำทาง โดยเริ่มจากกำหนดทำทางเริ่มต้นคือ ทำยืนตรง แขนทั้ง 2 ข้างอยู่ข้างลำตัว

เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงของปลายแขนทั้ง 2 ของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ ขั้นต้นแรกคือการแยกแยะท่าทางที่ใช้แขน 2 ข้าง หรือ 1 ข้าง ขั้นที่ 2 ถ้าระบุว่าเป็นกรณีใช้แขน 1 ข้างนั้น ต้องระบุได้ว่าเป็นแขนข้างใดที่เคลื่อนที่โดยตำแหน่งอ้างอิงสำหรับแขนขวาและซ้ายของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ในแกน x, y, และ z ที่ได้กำหนดไว้ตามลำดับ คือ $[0, -577.5, 182]$ และ $[0, -577.5, -182]$ และมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร คำนวณระยะทางจากจุดอ้างอิง คือ เฟรม $\{0\}$ ถึงปลายแขนแต่ละข้างของหุ่นยนต์ แทนด้วย X_{init} เมื่อควบคุมแขนของหุ่นยนต์ข้างใดข้างหนึ่งในท่าทางต่างๆให้มีระยะทางจากปลายแขนด้านขวาในขณะนั้น แทนด้วย X_{cur_r} หรือในกรณีปลายแขนด้านซ้าย จะแทนด้วย X_{cur_l} เทียบกับจุดอ้างอิง มีค่าระยะทางน้อยกว่าระยะทางที่หุ่นยนต์อยู่ในท่าเริ่มต้น 50 มิลลิเมตร จะเข้าสู่สถานะ “ แขน 1 ข้างเคลื่อนที่ ” และระบุได้ว่าปลายแขนขวาหรือซ้ายเคลื่อนที่ จะเข้าสู่สถานะ “ แขนขวาเคลื่อนที่ ” หรือสถานะ “ แขนซ้ายเคลื่อนที่ ” ในกรณีที่ระยะทางของปลายแขนทั้ง 2 ข้างมีระยะทางน้อยกว่าระยะทางของปลายแขนทั้ง 2 ข้างของท่าเริ่มต้น 50 มิลลิเมตร จะเข้าสู่สถานะ “ แขน 2 ข้างเคลื่อนที่ ” แต่ในกรณีที่ไม่มีแขนใดเคลื่อนที่คือระบบจะแสดงสถานะ “ ไม่มีแขนใดเคลื่อนที่ ” และจะระบุต่อไปว่าเป็นท่าทางเริ่มต้น คือ ท่ายืนตรง จากนั้นในขั้นต่อไปจะต้องระบุได้ว่าเป็นท่าทางแบบเปิดหรือท่าทางแบบปิด จากตัวอย่างท่าทางทั้ง 6 ท่าทาง สังเกตได้ว่า ท่ายืนตรงและท่าโบกมือลา เป็น ท่าทางแบบเปิด แต่ท่าวันทยหัตถ์ ท่าเท้าเอว ท่าไหว้ และท่า Sarang เป็นท่าทางแบบปิด โดยที่ท่าวันทยหัตถ์ ปลายแขนข้างขวาต้องเคลื่อนที่เพื่อไปบรรจบกับตำแหน่งหน้าหน้าผิงขวาของศีรษะ เช่นเดียวกับท่าเท้าเอวที่มีลักษณะใช้ปลายแขนขวาเคลื่อนไปบรรจบกับส่วนด้านข้างของลำตัว แต่สำหรับท่าไหว้เป็นท่าทางที่ใช้ปลายแขนทั้งสองข้างเคลื่อนมาบรรจบกันที่ตำแหน่งด้านหน้าของลำตัว ส่วนบนของหุ่นยนต์ และท่า Sarang เป็นท่าทางที่ใช้ปลายแขนทั้งสองข้างเคลื่อนไปบรรจบกับด้านบนของศีรษะ ดังนั้นจึงทำการกำหนด anchor point ไว้เป็นตำแหน่งเป้าหมายสำหรับท่าทางแบบปิดแต่ละท่าทางดังรูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่ง anchor point ในตำแหน่งต่างๆ ในกรณีเมื่อปลายแขนขวาเคลื่อนที่เข้าใกล้บริเวณด้านหน้าของศีรษะซึ่งมีค่าระยะห่างจาก ตำแหน่งของ anchor point ที่กำหนดไว้คือตำแหน่ง (100, 220, 93) น้อยกว่า 20 มิลลิเมตร ระบบจะทำการระบุว่าหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ กำลังจะทำท่า วันทยหัตถ์ สำหรับท่าทางอื่นๆก็เช่นกัน หากปลายแขนทั้ง 2 ข้างเคลื่อนที่เข้าใกล้ anchor point ส่วนบนของศีรษะหุ่นยนต์ ระบบจะทำการระบุว่า หุ่นยนต์กำลังจะทำท่า Sarang โดยจะมีค่า anchor point แตกต่างกันไปในแต่ละท่าทาง



รูปที่ 4.3 แสดงตำแหน่ง anchor point ในตำแหน่งต่างๆ

4.3 การชดเชยค่ามุม

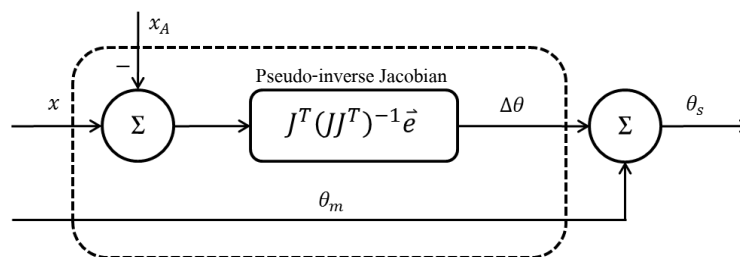
เมื่อความยาว link ของชุดควบคุมส่วนแขนและหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์แตกต่างกันมาก และไม่เป็นสัดส่วนต่อกันโดยตรง ทำให้เมื่อทำการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยวิธี joint control คือส่งค่ามุมจากชุดควบคุมส่วนแขนมาควบคุมตำแหน่งการหมุนของแต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ ทำให้มีความคลาดเคลื่อนตำแหน่งของมือ ในกรณีที่ถูกระบุว่าเป็นท่าทางแบบเปิดซึ่งเป็นท่าทางประเภทที่ไม่จำเป็นต้องอยู่ในตำแหน่งแม่นยำนัก และไม่ต้องทำการชดเชยค่ามุม แต่ในกรณีที่ท่าทางของหุ่นยนต์ถูกระบุว่าเป็นท่าทางแบบปิดซึ่งจำเป็นต้องมีตำแหน่งที่แน่นอนจึงต้องทำการคำนวณเพื่อชดเชยค่ามุมที่ผิดพลาดไป ให้ปลายแขนของหุ่นยนต์สามารถเข้าสู่ตำแหน่งที่กำหนดไว้ได้อย่างถูกต้อง ในแต่ละท่าทางแบบปิดที่นำมาเป็นตัวอย่าง ได้แก่ ทำวันทยหัตถ์ ทำเท้าเอว ทำไหว้และท่า Sarang ในการทำการชดเชยค่ามุนั้นสามารถทำได้โดยใช้การคำนวณอินเวอร์สคิเนมาติกส์ด้วยวิธีการใช้ pseudo-inverse ของเมตริกซ์จาโคเบียน โดยมีขั้นตอนที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ในรูปที่ 4.4 และได้แสดง diagram ของการชดเชยมุมด้วย pseudo-inverse

ในแต่ละท่าทางที่เป็นท่าทางแบบปิด ได้มีการกำหนด anchor point ไว้ในตำแหน่งที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นตำแหน่งเป้าหมายของแต่ละท่าทางนั้นๆ โดยได้แสดงค่าตำแหน่งของ anchor point ในตารางที่ 4.2 นอกจากนี้ในแต่ละท่าทางแบบปิดจะกำหนดค่าอีกค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่ารัศมีที่เข้าใกล้ anchor point ในตำแหน่งต่างๆเมื่อแขนของหุ่นยนต์ที่ถูกควบคุมได้เคลื่อนที่เข้าในรัศมีที่กำหนดไว้ ซึ่งบริเวณหรือขอบเขตเหล่านี้เรียกว่า neighborhood threshold value ซึ่งการกำหนดค่าของ neighborhood threshold จำเป็นต้องใช้ค่าที่เหมาะสมไม่มากหรือน้อยจนเกินไป เนื่องจากมีผลกับความถูกต้องของการแสดงท่าทางของหุ่นยนต์ด้วย จากนั้นระบบจะตัดเข้าสู่ขั้นตอนการชดเชยค่ามุม ซึ่งก็คือเข้าสู่การคำนวณ

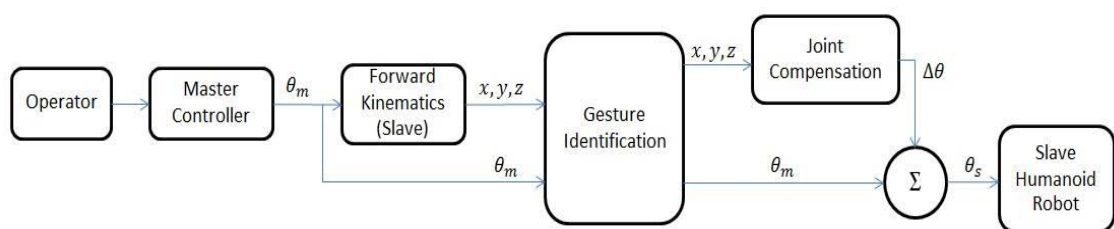
อินเวอร์สคิเนมาติกส์ ขั้นตอนการชดเชยค่ามุมจะสมบูรณ์ได้จะต้องได้รับข้อมูลที่ถูส่งเข้ามาคือ ตำแหน่งปลายแขน (X) และค่าตำแหน่ง anchor point (X_a) และหาผลต่างของตำแหน่งทั้งสอง เพื่อหาค่าความ error ของตำแหน่งปัจจุบันของปลายแขนหุ่นยนต์กับตำแหน่งเป้าหมาย และเข้าสู่อัลกอริทึมการคำนวณหา $\Delta\theta$ ในแต่ละข้อต่อ และนำไปรวมกับค่ามุมของแต่ละข้อต่อในปัจจุบัน และส่งค่าผลรวมของมุมที่ได้ไปควบคุมหุ่นยนต์

ตารางที่ 4.2 แสดงตำแหน่ง Anchor point ของท่าทางต่างๆ

No.	ชื่อท่าทาง	ตำแหน่ง	
		ขวา	ซ้าย
1.	วันทยหัตถ์	(100, 220, 93)	-
2.	เท้าเอว	(200, -240, 110)	-
3.	ไหว้	(220, 50, 15)	(220, 50, -15)
4.	Sarang	(150, 250, 20)	(150, 250, -20)



รูปที่ 4.4 แสดง diagram ของการชดเชยค่ามุมด้วย pseudo-inverse



รูปที่ 4.5 แสดงภาพรวมของระบบ

รูปที่ 4.5 แสดงภาพรวมของระบบการควบคุมแขนของหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์ เมื่อผู้ควบคุมควบคุมชุดควบคุมส่วนแขน potentiometer ส่งค่ามุมที่เปลี่ยนแปลง (θ_m) ไปทำการคำนวณ forward kinematics ของหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์ เพื่อหาค่าตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์ในขณะนั้น ข้อมูลตำแหน่งและมุมจะถูกส่งเข้าไปในระบบแยกแยะท่าทาง เพื่อทำการประมวลผลว่าเป็นท่าทางแบบใด

ในกรณีเป็นท่าทางแบบเปิด จะทำการส่งค่า θ_m เพื่อไปควบคุมแขนของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ โดยตรง แต่ถ้าถูกระบุว่าเป็นท่าทางแบบปิด จะต้องส่งค่าตำแหน่งปัจจุบันของปลายแขนหุ่นยนต์ (x, y, z) ไปยังระบบการชดเชยค่ามุม เนื่องจากการควบคุมโดยส่งค่ามุมจากชุดควบคุมโดยตรงทำให้ ตำแหน่งของหุ่นยนต์คลาดเคลื่อนจากที่ควรเป็น เมื่อผ่านขั้นตอนการคำนวณการชดเชยค่ามุมแล้ว จะได้ค่ามุมเล็กๆ ($\Delta\theta$) ของแต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์ จึงนำค่า $\Delta\theta$ ไปรวมกับค่ามุมปัจจุบันของข้อต่อส่วนแขนหุ่นยนต์ และส่งค่านั้นไปควบคุมหุ่นยนต์ ทำซ้ำจนกว่าค่าระยะห่างระหว่างปลายแขนของหุ่นยนต์กับตำแหน่งเป้าหมายลดน้อยลงจนถึงค่าที่พอใจจึงหยุดการทำซ้ำ

บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง

5.1 การทดลองการแสดงผลท่าทางของหุ่นยนต์ด้วยค่ามุมจากชุดควบคุมโดยตรง

5.1.1 วัตถุประสงค์การทดลอง

การทำการทดสอบการควบคุม แบบ Master – Slave ระหว่างชุดควบคุมส่วนแขนและหุ่นยนต์ เซมิฮิวแมนอยด์จำลองด้วย VPython ซึ่งเป็นไลบรารีสำหรับสร้างภาพ 3 มิติในโปรแกรม Python เพื่อทดสอบการแสดงผลท่าทางของหุ่นยนต์ เมื่อทำการควบคุมจากชุดควบคุมด้วยวิธีแบบ joint control ทั้งท่าทางที่เป็นลักษณะท่าทางแบบเปิด และท่าทางที่เป็นลักษณะท่าทางแบบปิด

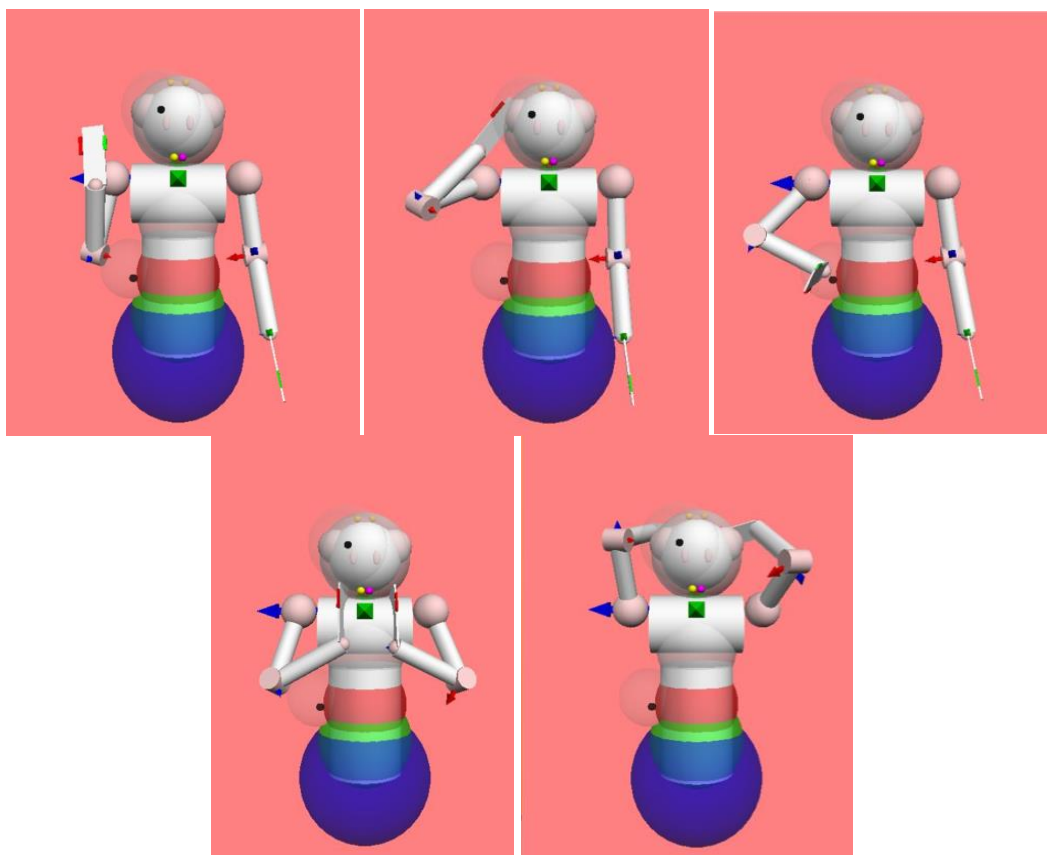
5.1.2 วิธีการทดลอง

นำชุดควบคุมส่วนแขนที่ได้ทำการติดตั้ง potentiometer ควบคุมการแสดงผลท่าทางของหุ่นยนต์ เซมิฮิวแมนอยด์ จากรูปที่ 5.1 แสดงการทำท่าทาง 5 ท่าทางของชุดควบคุมส่วนแขนโดยใช้ค่ามุมที่ได้รับจากชุดควบคุมส่วนแขนโดยตรง โดยทดสอบการแสดงผลท่าทาง 5 ท่าทาง ได้แก่ การทำท่าโบกมือ ลา วันทยหัตถ์ ท่าเท้าแอ ท่าไหว้ และ ท่า Sarang ด้วย VPthon



รูปที่ 5.1 แสดงการทำท่าทาง 5 ท่าทาง ได้แก่ การทำท่าโบกมือ ลา วันทยหัตถ์ ท่าเท้าแอ ท่าไหว้ และ ท่า Sarang ตามลำดับ

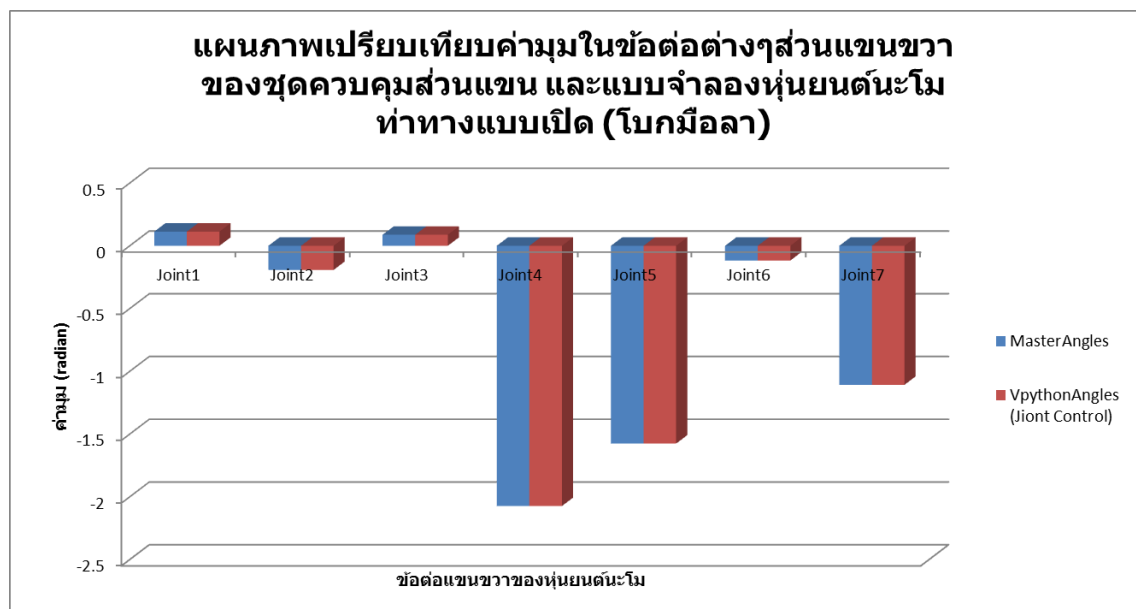
5.1.3 ผลการทดลอง



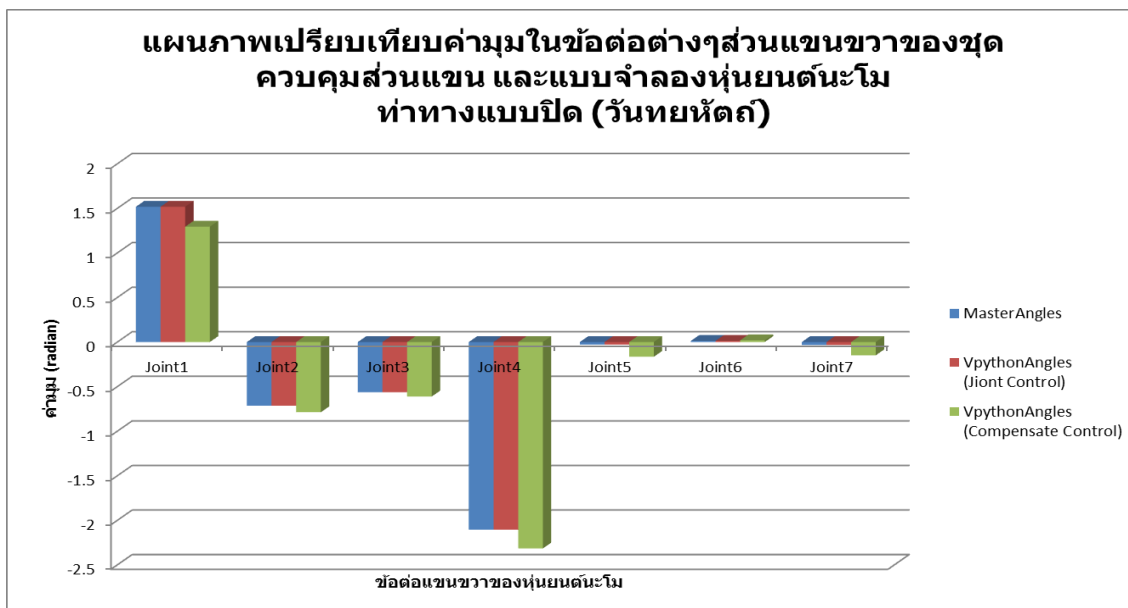
รูปที่ 5.2 แสดงผลของการควบคุมท่าทางของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์นะโมจำลอง ซึ่งแสดงท่าทาง 5 ท่าทางได้แก่ การทำท่าโบกมือลา วันทยหัตถ์ ท่าเท้าเอว ท่าไหว้ และ ท่า Sarang ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.2 เมื่อทำการทดลองควบคุม โดยการส่งค่ามุมจากชุดควบคุมส่วนแขน โดยตรงให้หุ่นยนต์แสดงท่าโบกมือลาซึ่งเป็นท่าทางแบบเปิด หุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์จำลองสามารถทำตามการควบคุมได้ และสื่อสารให้เข้าใจว่าเป็นการแสดงท่าโบกมือลา การแสดงท่าทางของหุ่นยนต์เมื่อพยายามแสดงท่าทางแบบปิดในท่าทางต่างๆกันออกไป ในกรณีของการควบคุมให้หุ่นยนต์นะโมจำลองแสดงท่าวันทยหัตถ์ ซึ่งในความเป็นจริงตำแหน่งปลายแขนขาของหุ่นยนต์ต้องบรรจบกับตำแหน่งด้านหน้าศีรษะด้านขวาจึงจะเป็นท่าทำวันทยหัตถ์ที่สมบูรณ์และจากผลการทดลอง ปลายแขนขาของหุ่นยนต์นะโมจำลองกลับอยู่ตำแหน่งด้านหลังศีรษะด้านขวา การแสดงท่าทางของหุ่นยนต์นะโมจำลองในท่าเท้าเอวควรมีลักษณะคือปลายแขนขาบรรจบกับด้านข้างลำตัวแต่จากผลการทดลอง ปลายแขนด้านขวาของหุ่นยนต์นะโมจำลองไม่ได้บรรจบกับส่วนใดของหุ่นยนต์จำลอง เมื่อทำการควบคุมให้หุ่นยนต์นะโมจำลองแสดงท่าไหว้โดยปลายแขนทั้ง 2 ข้างของหุ่นยนต์ควรเคลื่อนมาบรรจบกันที่ตำแหน่งด้านหน้าลำตัวส่วนบน แต่จากการทดลองหุ่นยนต์จำลองไม่สามารถเคลื่อนที่ให้ปลายแขนทั้งสองข้างมาบรรจบกันพอดีในตำแหน่งดังกล่าวได้ และท่าทางสุดท้ายคือท่า Sarang ปลายแขนทั้งสอง

ข้างควรเคลื่อนที่มาบรรจบกับด้านบนของศีรษะ แต่ผลการทดสอบคือ ปลายแขนทั้ง 2 ข้าง เคลื่อนที่
 เลยจากตำแหน่งด้านบนของศีรษะ ไปอยู่ตำแหน่งด้านหลังของศีรษะ และเมื่อนำค่ามุมในแต่ละข้อต่อ
 จากชุดควบคุมส่วนแขนเปรียบเทียบกับมุมที่ถูกส่งไปควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์นะโมใน VPython
 ทั้งในกรณีที่เป็นท่าทางแบบเปิด ซึ่งใช้ข้อมูลจากท่าโบกมือลา และท่าทางแบบปิด ซึ่งใช้ท่าวันทยหัตถ์
 เป็นตัวอย่างการแสดงท่าทางแบบปิด และกราฟแท่งสีเขียวมาจากค่ามุมที่ทำการชดเชยค่ามุมซึ่งทำให้
 ตำแหน่งปลายแขนของแบบจำลองหุ่นยนต์นะโมเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างถูกต้อง เพื่อนำมา
 เปรียบเทียบกับค่ามุมที่ถูกส่งมาโดยตรงจากชุดควบคุม จะเห็นได้ว่าค่ามุมที่มาจากการควบคุมโดยตรง
 หรือ joint control มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยกับค่ามุมที่ได้จากวิธีการชดเชยค่ามุม ดังรูปที่ 5.3
 และ 5.4



รูปที่ 5.3 แสดงแผนภาพเปรียบเทียบค่ามุมในข้อต่อต่างๆส่วนแขนขวาของชุดควบคุมส่วนแขน และ
 แบบจำลองหุ่นยนต์นะโมโดยการควบคุมโดยตรง ในท่าทางแบบเปิด (ท่าโบกมือลา)



รูปที่ 5.4 แสดงแผนภาพเปรียบเทียบค่ามุมในข้อต่อต่างๆส่วนแขนขาของชุดควบคุมส่วนแขนของ และค่ามุมแขนขาของแบบจำลองหุ่นยนต์นะโม โดยการควบคุมโดยตรง และการชดเชยค่ามุม ในทำทางแบบปิด (ทำวันทยหัตถ์)

5.1.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

การควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์นะโมซึ่งจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยการควบคุมแบบ joint control ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลที่วัดได้จากชุดควบคุมเพื่อนำไปควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์นะโม โดยตรง ค่าของมุมที่วัดได้จากชุดควบคุมมีค่าเท่ากับค่ามุมที่ถูกนำไปใช้ในการควบคุมแบบจำลองหุ่นยนต์นะโม สังเกตได้จากกราฟในรูปที่ 5.3 ซึ่งสามารถควบคุมให้แบบจำลองของหุ่นยนต์นะโม แสดงท่าทางแบบเปิดได้เป็นอย่างดี คือสามารถแสดงท่าทางและสื่อสารความหมายได้ตรงกับชุดควบคุม เนื่องด้วยท่าทางแบบเปิดนั้นเป็นท่าทางที่ตำแหน่งปลายแขนไม่ต้องบรรจบกับส่วนอื่นของหุ่นยนต์ จึงไม่จำเป็นต้องให้ความสำคัญในเชิงตำแหน่งเป้าหมายมากนัก แตกต่างจากกรณีของท่าทางแบบปิด ซึ่งเป็นท่าทางที่ตำแหน่งปลายแขนต้องบรรจบกันหรือต้องบรรจบกับส่วนอื่นของร่างกาย และเนื่องจากขนาดความยาว link ของแต่ละส่วนของชุดควบคุมและหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์นะโมไม่เท่ากัน และไม่ใช่ว่าส่วนต่อกันโดยตรง ดังนั้นการควบคุมแบบ joint control ซึ่งควบคุมเฉพาะตำแหน่งมุมของมอเตอร์แต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์ แต่ไม่ได้พิจารณาเกี่ยวกับตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ จึงทำได้แค่เพียงควบคุมให้ปลายแขนของแบบจำลองอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งเป้าหมายเท่านั้น และทำให้เกิดความผิดพลาดเกี่ยวกับตำแหน่งปลายแขน ทำให้ผลที่ได้จากการทดลอง ตำแหน่งปลายแขนของแบบจำลองหุ่นยนต์นะโมในท่าทางแบบปิด ได้แก่ ท่าวันทยหัตถ์ ท่าเท้าเอว ท่าไหว้ และท่า Sarang มีตำแหน่งปลายแขนที่มีลักษณะผิดไปจากชุดควบคุมและไม่สามารถสื่อสารได้ว่ากำลังแสดงท่าทางอะไร จากกราฟในรูปที่ 5.4 ได้แสดงการเปรียบเทียบค่ามุมที่ได้จากชุด

ควบคุมโดยตรงและค่ามุมที่ทำการชดเชยเพื่อเป็นตำแหน่งอ้างอิงให้ตำแหน่งปลายแขนของแบบจำลองหุ่นยนต์นั้นไม่เข้าสู่ตำแหน่งที่สามารถแสดงท่าทางแบบปิดได้อย่างแม่นยำ จะเห็นว่าค่ามุมที่ถูกชดเชยค่ามุนั้นมีค่าที่แตกต่างจากค่ามุมที่ได้รับจากชุดควบคุมส่วนแขนไม่มากนัก แสดงถึงว่าค่ามุมจากการควบคุมโดยตรงนั้นสามารถควบคุมปลายแขนของแบบจำลองหุ่นยนต์เข้าใกล้ตำแหน่งเป้าหมายได้แต่ไม่สามารถเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างแม่นยำ

5.2 การทดลองการควบคุมหุ่นยนต์เคมีฮิวมานอยด์จำลองในการแสดงท่าทางแบบปิดด้วยวิธีการชดเชยค่ามุม

5.2.1 วัตถุประสงค์การทดลอง

การทำการทดสอบการควบคุม แบบ Master – Slave ระหว่างชุดควบคุมส่วนแขนและหุ่นยนต์เคมีฮิวมานอยด์นั้นจำลองด้วย VPython เพื่อทดสอบการแสดงท่าทางแบบปิดของหุ่นยนต์ เมื่อทำการควบคุมจากชุดควบคุมด้วยวิธีการชดเชยค่ามุม สำหรับท่าทางที่เป็นลักษณะท่าทางแบบปิด โดยกำหนด neighborhood threshold value เท่ากับ 0.10 เมตร 0.15 เมตร 0.20 เมตร และ 0.25 เมตร เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการแสดงท่าทางของหุ่นยนต์เคมีฮิวมานอยด์นั้นจำลองเมื่อกำหนดค่า neighborhood threshold ที่แตกต่างกัน

5.2.2 วิธีการทดลอง

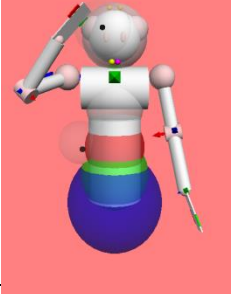
นำชุดควบคุมส่วนแขนที่ได้ทำการติดตั้ง potentiometer ควบคุมการแสดงท่าทางของหุ่นยนต์เคมีฮิวมานอยด์นั้นจำลอง โดยทดสอบการแสดงท่าทางแบบปิด 4 ท่าทาง ได้แก่ วันทยหัตถ์ ท่าทำเอว ท่าไหว้ และ ท่า Sarang โดยทำการทดลอง 4 ชุด ชุดที่ 1 กำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.10 เมตร ชุดที่ 2 กำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร ชุดที่ 3 กำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.20 เมตร และชุดที่ 4 กำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.25 เมตร ซึ่งทำการทดลองแต่ละท่าทางชุดละ 5 ครั้ง และสังเกตการณ์เคลื่อนไหวของแบบจำลองของหุ่นยนต์ในคอมพิวเตอร์

5.2.3 ผลการทดลอง

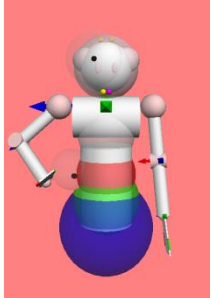
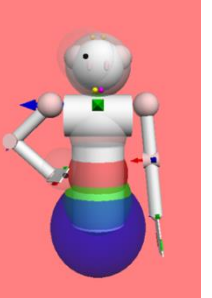
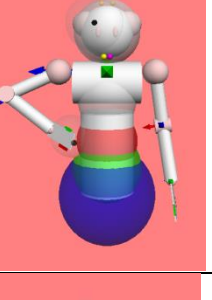
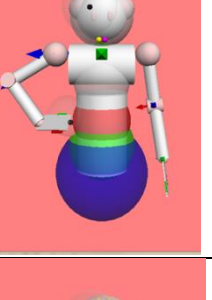
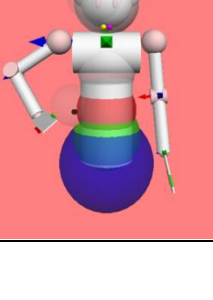
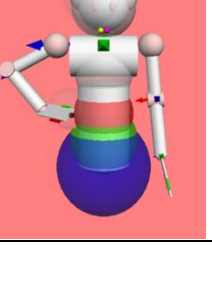
ผลของการกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.10 เมตร 0.15 เมตร 0.20 เมตร และ 0.25 เมตร ตามลำดับ เมื่อเข้าสู่สถานะของการชดเชยค่ามุม ปลายแขนของแบบจำลองหุ่นยนต์นั้นในคอมพิวเตอร์เคลื่อนเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายหรือ anchor point ของแต่ละท่าทางได้ ภาพการเคลื่อนที่ได้ถูกบันทึกไว้ในตารางที่ 5.1 ถึง ตารางที่ 5.16 ซึ่งแต่ละตารางนั้นแสดงภาพเปรียบเทียบการทำท่าทางของแบบจำลองหุ่นยนต์เคมีฮิวมานอยด์นั้นในคอมพิวเตอร์ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุมและหลังทำการชดเชยค่ามุม โดยมีท่าทางที่ทำการทดลองทั้งหมด 4 ท่าทาง ซึ่งเป็นท่าทางแบบปิด

ได้แก่ ทำวันทยหัตถ์ ทำเท้าเอว ทำไห้ว และ ทำ Sarang ผลจากการทดลองจะได้ว่าระบบการควบคุมนี้สามารถแยกแยะประเภทท่าทางแบบปิดที่กำหนดเอาไว้ทั้ง 4 ท่าทางได้ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแยกแยะประเภทของท่าทาง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการชดเชยค่ามุมแล้วแบบจำลองหุ่นยนต์นั้นโมสามารถเคลื่อนปลายแขนไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้จริง แต่มีความคลาดเคลื่อนของการเรียงตัวของข้อต่อของหุ่นยนต์ ทำให้การแสดงท่าทางส่วนใหญ่ของแบบจำลองหุ่นยนต์นั้นโมสามารถสื่อสารได้ว่ากำลังทำท่าทางอะไร แต่ในบางกรณีก็แสดงท่าทางได้ไม่สมบูรณ์ จะเห็นได้จากตารางที่ 5.17 ถึงตารางที่ 5.20 จะกล่าวเกี่ยวกับเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของท่าทางต่างๆของแต่ละ neighborhood threshold value ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ในการทดลองที่กำหนดค่า neighborhood threshold เท่ากับ 0.10 เมตร มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการแสดงท่าทางเพียง 60 เปอร์เซ็นต์ ทำเท้าเอวและทำ Sarang มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ และทำไห้วมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการแสดงท่าทางเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อกำหนดค่า neighborhood threshold เท่ากับ 0.15 เมตร ในกรณีทำวันทยหัตถ์ ทำเท้าเอว และทำ Sarang มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการแสดงท่าทางเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ทำไห้วมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการแสดงท่าทาง 80 เปอร์เซ็นต์ ต่อมาเมื่อกำหนดให้ค่า neighborhood threshold เท่ากับ 0.20 เมตร มีผลใกล้เคียงกับกรณีก่อนหน้านี้ คือมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการแสดงท่าทางของทำวันทยหัตถ์ ทำเท้าเอว ทำ Sarang เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ทำไห้วมีค่าเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ และค่า neighborhood threshold ค่าสุดท้ายในการทดลองนี้เท่ากับ 0.25 เมตร ผลการแสดงผลทำวันทยหัตถ์ และทำไห้ว มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการแสดงท่าทางเท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ แต่ทำเท้าเอวและทำ Sarang มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์

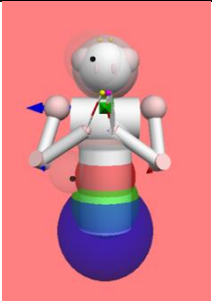
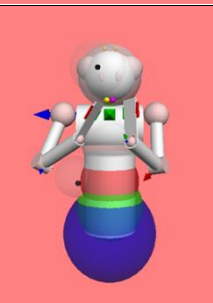
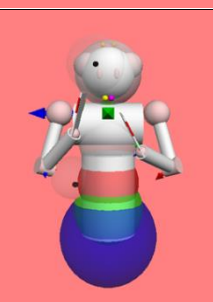
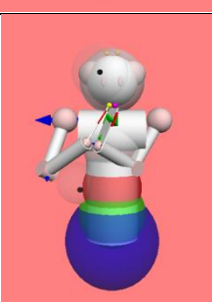
ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท้าวันทยหัดถ้ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.10 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

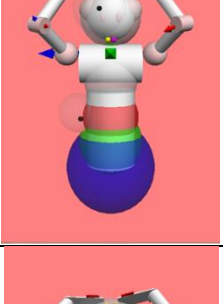
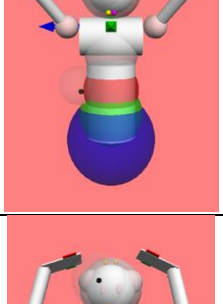
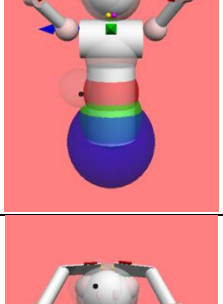
ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่าเท้าเอวระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุมและ
หลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.10 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

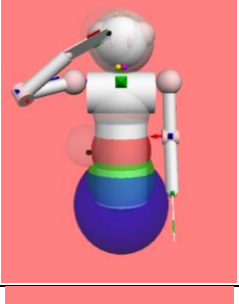
ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่าให้ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุมและหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.10 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

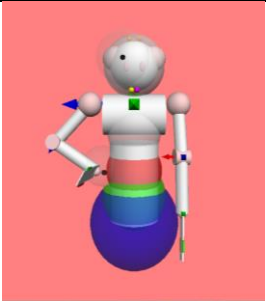
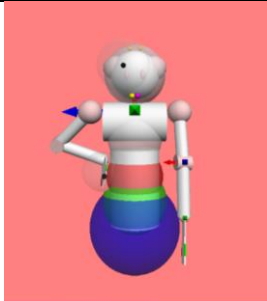
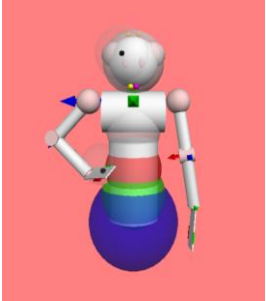
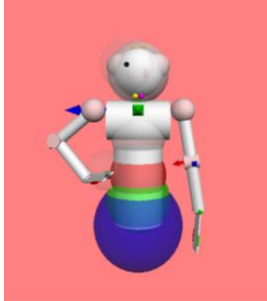
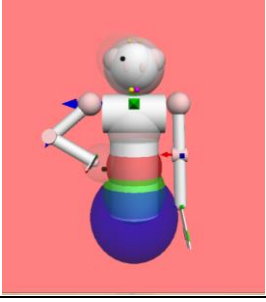
ตารางที่ 5.4 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่า Sarang ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุมและ
หลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.10 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

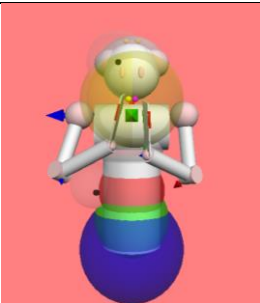
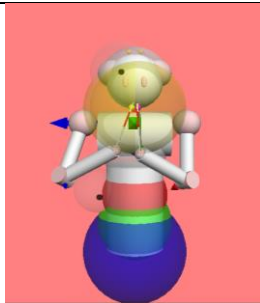
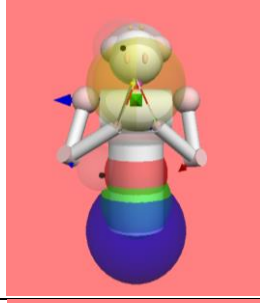
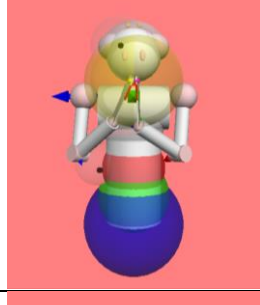
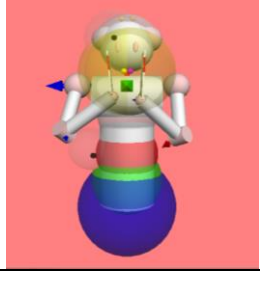
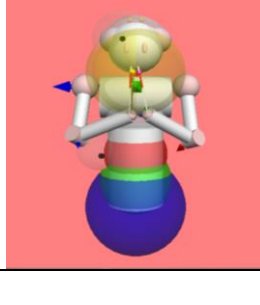
ตารางที่ 5.5 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท้าวันทยหัดกระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่าเท้าเอวระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุมและ
 หลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำทำให้ว่ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุมและหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

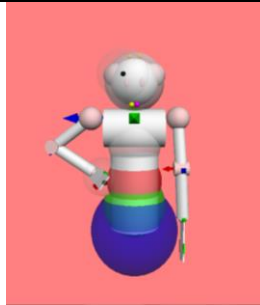
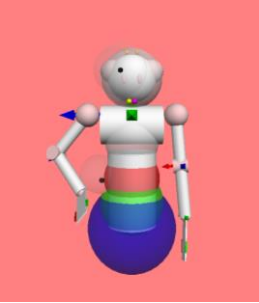
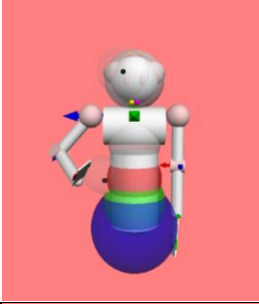
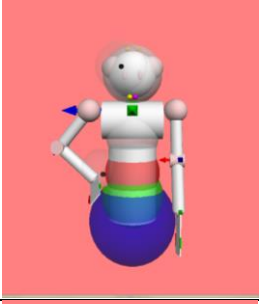
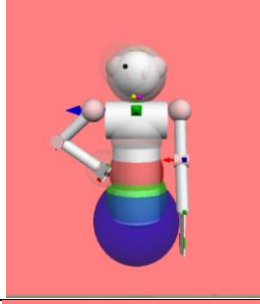
ตารางที่ 5.8 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่า Sarang ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุมและ
หลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

ตารางที่ 5.9 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท้าวันทยหัดระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.20 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

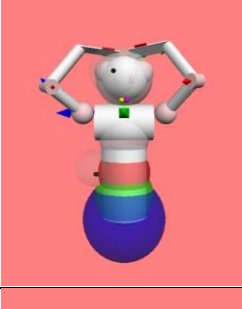
ตารางที่ 5.10 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่าเท้าเอวระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุมและ
หลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.20 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

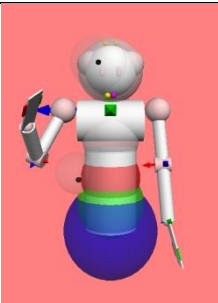
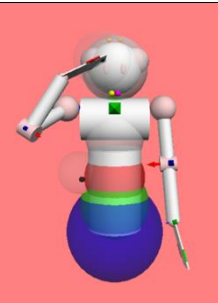
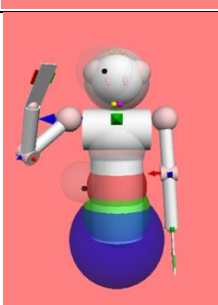
ตารางที่ 5.11 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่าให้ไว้ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุมและหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.20 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

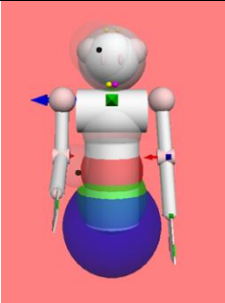
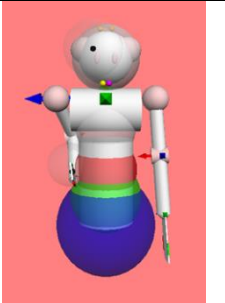
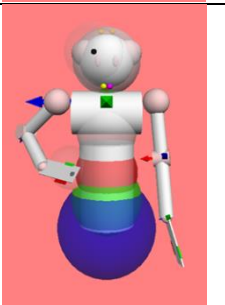
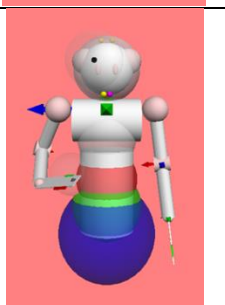
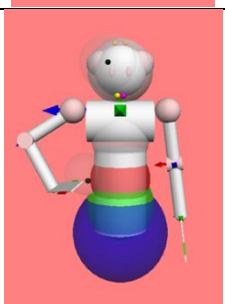
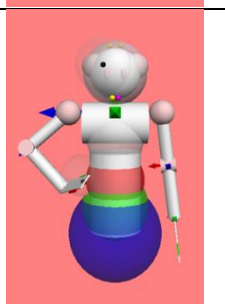
ตารางที่ 5.12 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่า Sarang ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุมและ
หลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.20 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

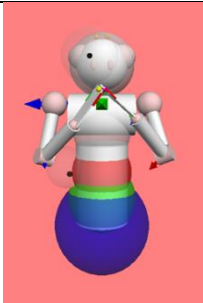
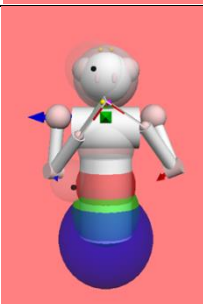
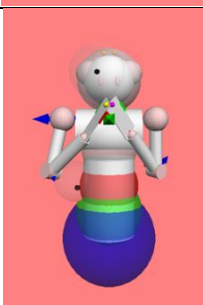
ตารางที่ 5.13 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท้าวันทยหัตถ์ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุม และหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.25 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

ตารางที่ 5.14 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่าเท้าเอวระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุมและ
หลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.25 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

ตารางที่ 5.15 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่าให้ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุมและหลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.25 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

ตารางที่ 5.16 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบการทำท่า Sarang ระหว่างก่อนทำการชดเชยค่ามุมและ
หลังทำการชดเชยค่ามุม เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.25 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

ตารางที่ 5.17 แสดงผลการทดลองของการแสดงท่าทางโดยกำหนด neighborhood threshold value เท่ากับ 0.10 เมตร

ชื่อท่าทาง	% ความถูกต้องของการแยกแยะประเภทท่าทาง	% ความถูกต้องของการแสดงท่าทาง
วันทยหัตถ์	100%	60%
เท้าเอว	100%	100%
ไหว้	100%	20%
Sarang	100%	100%

ตารางที่ 5.18 แสดงผลการทดลองของการแสดงท่าทางโดยกำหนด neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร

ชื่อท่าทาง	% ความถูกต้องของการแยกแยะประเภทท่าทาง	% ความถูกต้องของการแสดงท่าทาง
วันทยหัตถ์	100%	100%
เท้าเอว	100%	100%
ไหว้	100%	80%
Sarang	100%	100%

ตารางที่ 5.19 แสดงผลการทดลองของการแสดงท่าทางโดยกำหนด neighborhood threshold value เท่ากับ 0.20 เมตร

ชื่อท่าทาง	% ความถูกต้องของการแยกแยะประเภทท่าทาง	% ความถูกต้องของการแสดงท่าทาง
วันทยหัตถ์	100%	100%
เท้าเอว	100%	100%
ไหว้	100%	20%
Sarang	100%	100%

ตารางที่ 5.20 แสดงผลการทดลองของการแสดงท่าทางโดยกำหนด neighborhood threshold value เท่ากับ 0.25 เมตร

ชื่อท่าทาง	% ความถูกต้องของการแยกแยะประเภทท่าทาง	% ความถูกต้องของการแสดงท่าทาง
วันทยหัตถ์	100%	0%
เท้าเอว	100%	20%
ไหว้	100%	0%
Sarang	100%	20%

5.2.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองควบคุมการแสดงท่าทางของแบบจำลองหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์นะโม โดยใช้การชดเชยค่ามุม การทดลองนี้ยังแสดงผลเกี่ยวกับความแม่นยำการแยกแยะท่าทางและแสดงให้เห็นว่าค่า neighborhood threshold ที่แตกต่างกันมีผลต่อความถูกต้องในการแสดงท่าทางของแบบจำลองหุ่นยนต์นะโม จากการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าการกำหนดค่า neighborhood threshold ที่มากหรือน้อยเกินไปจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการแสดงท่าทางของแบบจำลองหุ่นยนต์นะโมมากยิ่งขึ้น ในกรณีที่ค่า neighborhood threshold น้อยเกินไป ในการทดลองนี้คือ 0.10 เมตร ทำให้เมื่อตำแหน่งปลายแขนของแบบจำลองหุ่นยนต์นะโมจะต้องเคลื่อนที่เข้าใกล้ตำแหน่งเป้าหมายได้มากกว่าค่าอื่น ในกรณีที่ระบบควบคุมเข้าสู่สถานะของการชดเชยค่ามุมโดยที่ข้อต่อต่างๆของแบบจำลองหุ่นยนต์จัดเรียงตัวมาในทิศทางที่ไม่ใกล้เคียงกับท่าทางนั้นๆ แต่ตำแหน่งปลายแขนเข้าสู่บริเวณที่กำหนดค่า neighborhood threshold ไว้ อาจทำให้เมื่อปลายแขนเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายอย่างรวดเร็ว โดยที่ข้อต่อส่วนอื่นๆยังมีความคลาดเคลื่อนในการจัดเรียงตัวให้อยู่ในท่าทางที่ต้องการ แต่หากในกรณีที่ข้อต่อต่างๆของแบบจำลองหุ่นยนต์จัดเรียงตัวมาในทิศทางที่ใกล้เคียงกับท่าทางนั้นๆ ผลของความถูกต้องในการแสดงท่าทางน่าจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น แต่ในกรณีที่ค่า neighborhood threshold มากเกินไป ในการทดลองนี้คือ 0.25 เมตร การที่ค่า neighborhood threshold มากเกินไป หมายถึงตำแหน่งปลายแขนของแบบจำลองหุ่นยนต์นะโมจะเข้าสู่สถานะของการชดเชยค่ามุมอย่างรวดเร็ว และอยู่ไกลจากตำแหน่งเป้าหมายมาก โดยที่ท่าทางที่ถูกควบคุมแบบ joint control ยังไม่ใกล้เคียงกับท่าทางที่ต้องการ ทำให้แบบจำลองหุ่นยนต์นะโมแสดง ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการแสดงท่าทางต่างๆ ดังนั้นการจะทำให้ระบบการชดเชยค่ามุมสามารถควบคุมให้แบบจำลองหุ่นยนต์นะโมสามารถแสดงท่าทางได้ถูกต้องนั้นน่าจะขึ้นอยู่กับควบคุมแบบ joint control ในการจัดเรียงข้อต่อของแบบจำลองหุ่นยนต์

นะโมให้อยู่ในท่าทางที่ใกล้เคียงกับท่าทางที่ต้องการให้หุ่นยนต์แสดง และกำหนดค่า neighborhood threshold ให้เหมาะสม

5.3 การทดลองการควบคุมหุ่นยนต์เคมีอีวานอยด์ในการแสดงท่าทางแบบปิด ด้วยวิธีการชดเชยค่ามุมด้วยค่า neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร

5.3.1 วัตถุประสงค์การทดลอง

การทำการทดสอบการควบคุม แบบ Master – Slave ระหว่างชุดควบคุมส่วนแขนและหุ่นยนต์เคมีอีวานอยด์นะโม เพื่อทดสอบการแสดงท่าทางแบบเปิด และแบบปิดของหุ่นยนต์ ซึ่งต้องทำการควบคุมจากชุดควบคุมด้วยวิธีการชดเชยค่ามุมในกรณีของท่าทางแบบปิด โดยกำหนด neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร เพื่อสังเกตลักษณะการแสดงท่าทางของหุ่นยนต์เคมีอีวานอยด์นะโม

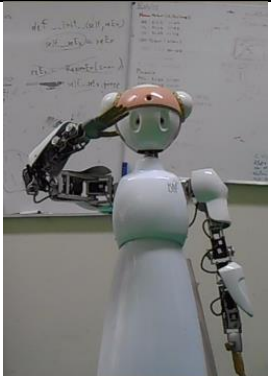
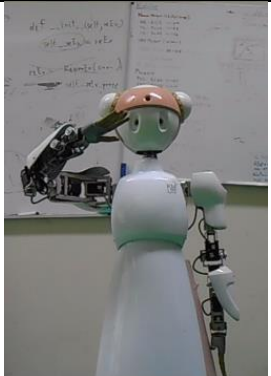
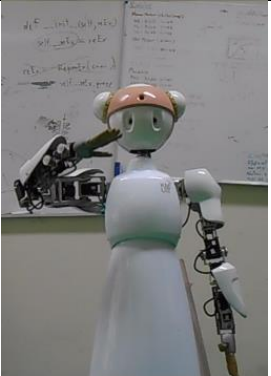
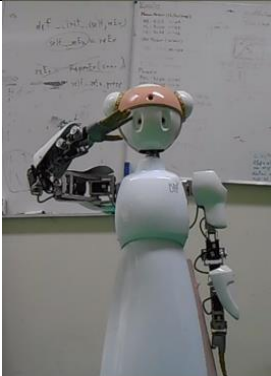
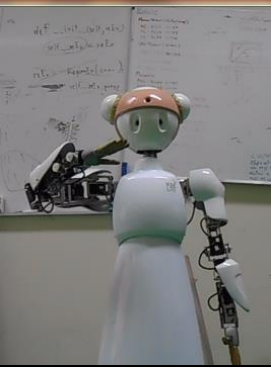
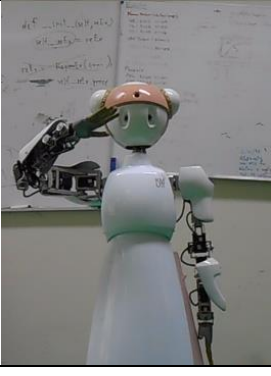
5.3.2 วิธีการทดลอง

นำชุดควบคุมส่วนแขนที่ได้ทำการติดตั้ง potentiometer ควบคุมการแสดงท่าทางของหุ่นยนต์เคมีอีวานอยด์นะโม โดยควบคุมให้หุ่นยนต์ทำท่าทาง 4 ท่าทางซึ่งเป็นแบบปิด ได้แก่ ท่าวันทยหัตถ์ ท่าเท้าเอว ท่าไหว้ และ ท่า Sarang ทำการทดลองโดยกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร สังเกตการเคลื่อนไหวของแขนหุ่นยนต์เคมีอีวานอยด์

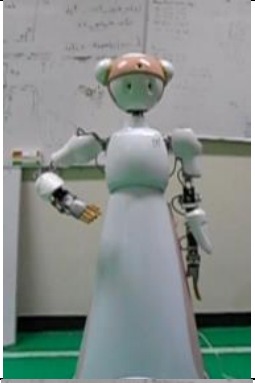
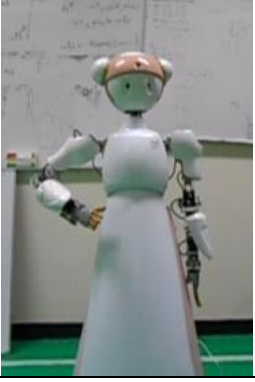
5.3.3 ผลการทดลอง

ผลของการควบคุมหุ่นยนต์เคมีอีวานอยด์นะโม โดยกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร ทำให้ปลายแขนของหุ่นยนต์นะโม พยายามเคลื่อนเข้าสู่ตำแหน่ง ตามที่ได้รับค่าจากการชดเชยค่ามุมของแต่ละท่าทางได้ โดยในตารางที่ 5.21 ถึง 5.24 เป็นการแสดงท่าทางของหุ่นยนต์ตามชุดควบคุม ซึ่งเป็นท่าทางก่อนและหลังการชดเชยค่ามุม โดยแสดงผลการทดลองของท่าวันทยหัตถ์ ท่าเท้าเอว ท่าไหว้ และ ท่า Sarang ตามลำดับ และ ผลของการทดลองท่าทางทั้ง 4 ท่าทาง คือ ท่าวันทยหัตถ์ และท่าเท้าเอว หุ่นยนต์นะโมสามารถแสดงท่าทางได้ตามความตั้งใจของผู้ควบคุม แต่ในกรณีของท่าไหว้ หุ่นยนต์ไม่สามารถแสดงท่าทางได้ตามผู้ควบคุมต้องการ และในท่า Sarang หุ่นยนต์สามารถแสดงท่าทางได้ใกล้เคียงกับความตั้งใจของผู้ควบคุม

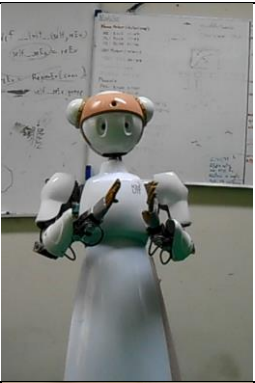
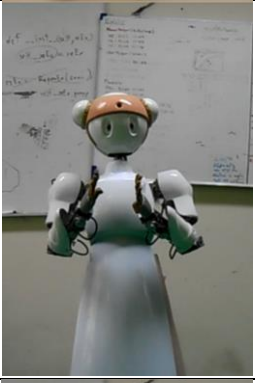
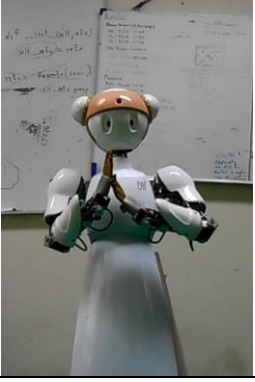
ตารางที่ 5.21 แสดงผลการทดลองการแสดงท่าทางของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์นะโม ในท่า
วันทยหัตถ์ เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		

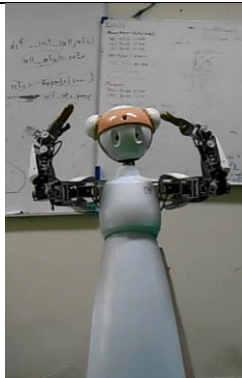
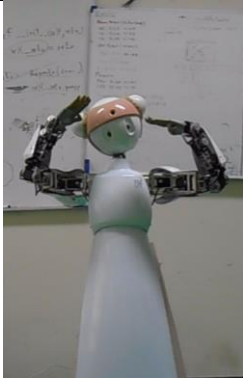
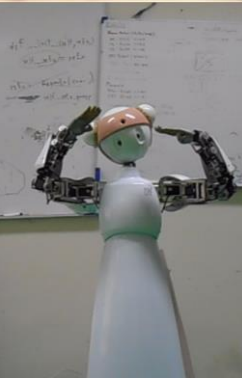
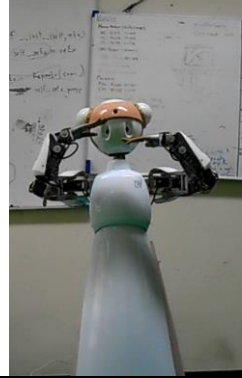
ตารางที่ 5.22 แสดงผลการทดลองการแสดงท่าทางของหุ่นยนต์เซมิฮิวแมนอยด์นะโม ในท่าเท้าเอว
เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร

No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		

ตารางที่ 5.23 แสดงผลการทดลองการแสดงท่าทางของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์นะโม ในท่าไหว้
เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร

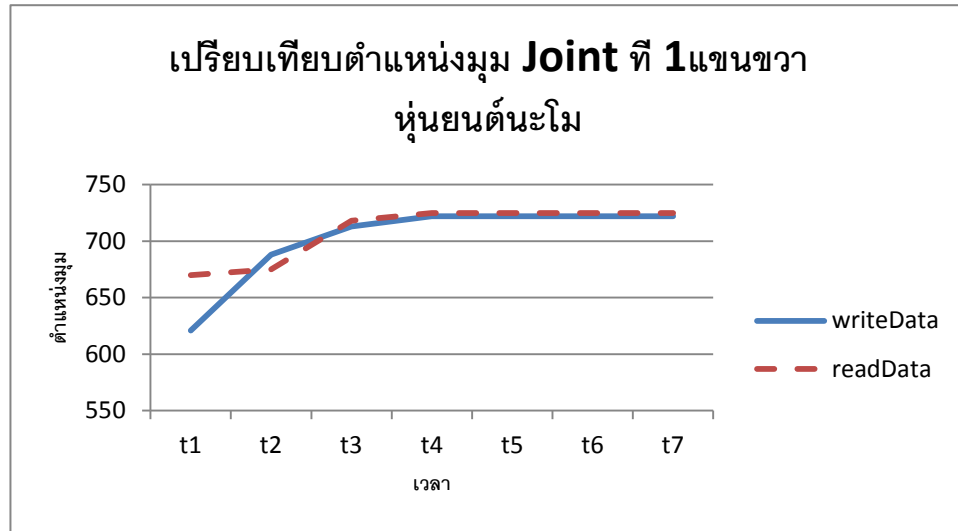
No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		

ตารางที่ 5.24 แสดงผลการทดลองการแสดงผลทางของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์นะโม ในท่า Sarang
เมื่อกำหนดให้ neighborhood threshold value เท่ากับ 0.15 เมตร

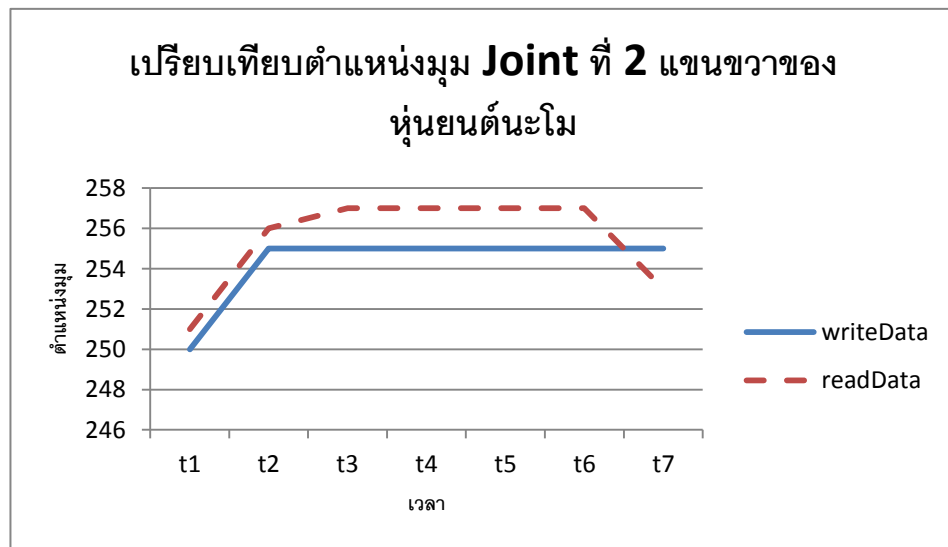
No.	ก่อนทำการชดเชยค่ามุม	หลังทำการชดเชยค่ามุม
1.		
2.		
3.		

จากตารางที่ 5.23 ซึ่งได้แสดงผลการทดลองการแสดงผลทางของหุ่นยนต์เซมิฮิวมานอยด์นะโมในท่าไหว้ สังเกตเห็นได้ว่าแขนข้างซ้ายของหุ่นยนต์ไม่สามารถเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายได้ จึงได้นำค่าตำแหน่งมุมที่ส่งไปยังมอเตอร์ robotis และทำการอ่านค่าตำแหน่งมุมของมอเตอร์ robotis ในขณะนั้นเพื่อเปรียบเทียบค่ามุมที่ส่งไปกับค่ามุมที่มอเตอร์ robotis เคลื่อนไปได้จริง ซึ่งได้แสดงกราฟของการเปรียบเทียบตำแหน่งมุมแต่ละข้อต่อของแขนทั้ง 2 ข้างของหุ่นยนต์นะโมในรูปที่ 5.5 ถึงรูปที่ 5.18 จะเห็นได้ว่าค่าตำแหน่งมุมที่ส่งจากชุดควบคุมส่วนแขนเพื่อนำไปควบคุมมอเตอร์ robotis ในแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์ ไม่เท่ากับค่าที่ทำการอ่านตำแหน่งมุม ณ ขณะนั้นของมอเตอร์ ส่วนใหญ่จะมีความ

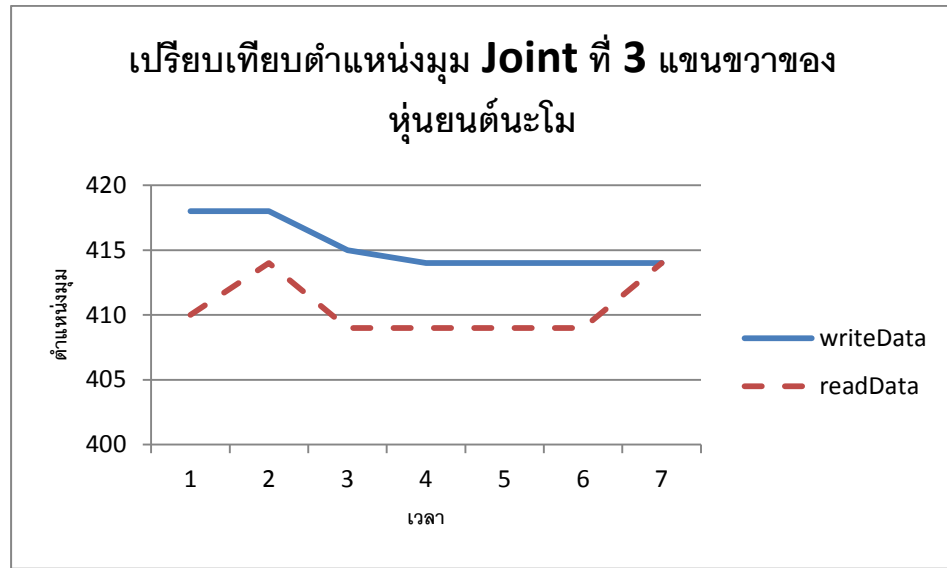
คลาดเคลื่อนเล็กน้อย แต่ในตารางที่ 5.8 มีค่าตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 4 ของแขนขาของหุ่นยนต์นะโมที่แตกต่างกันมาก



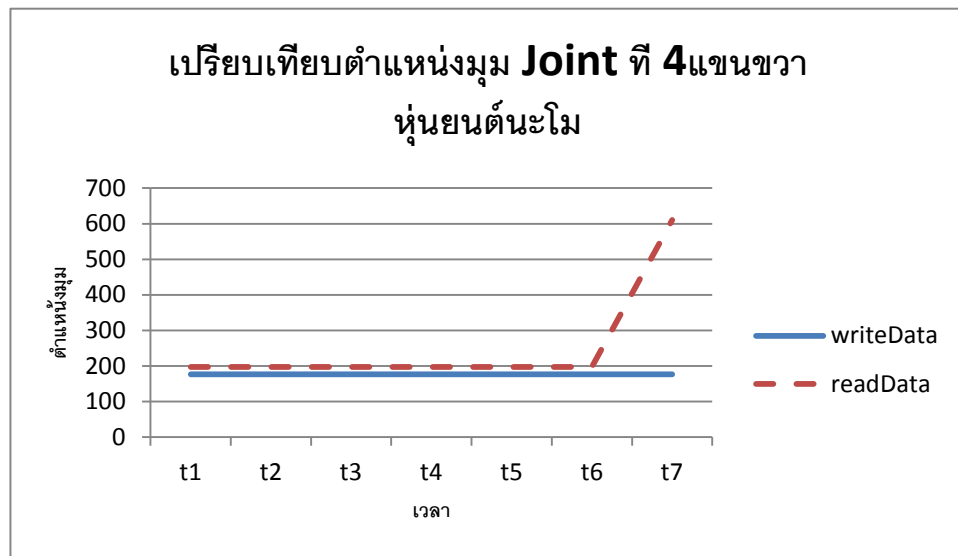
รูปที่ 5.5 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 1 แขนขวารุ่นหุ่นยนต์นะโม



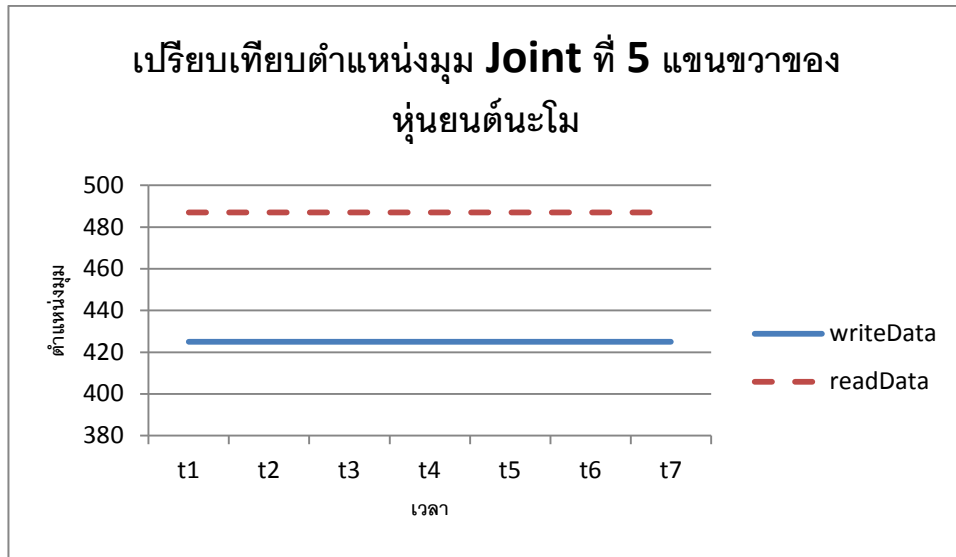
รูปที่ 5.6 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 2 แขนขวารุ่นหุ่นยนต์นะโม



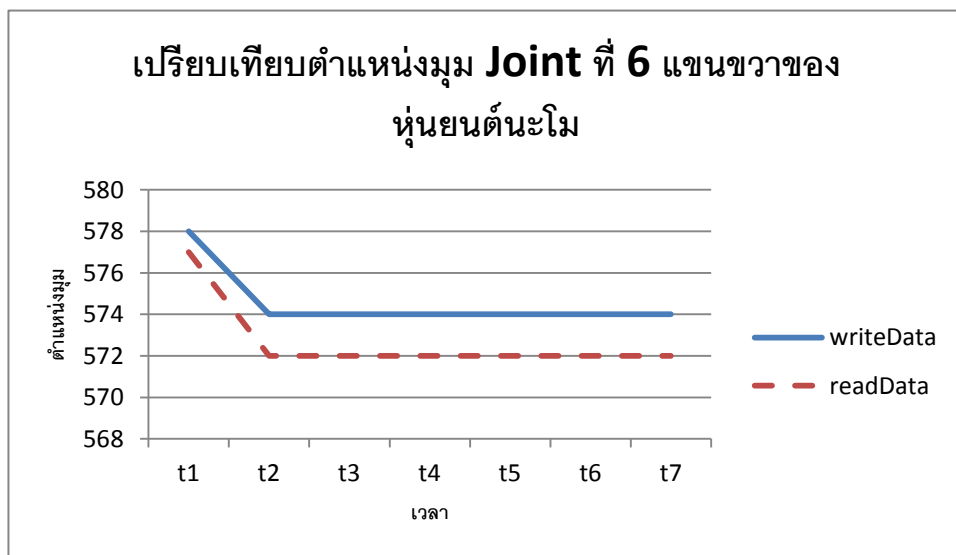
รูปที่ 5.7 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 3 แขนขวารุ่นยนต์นะโม



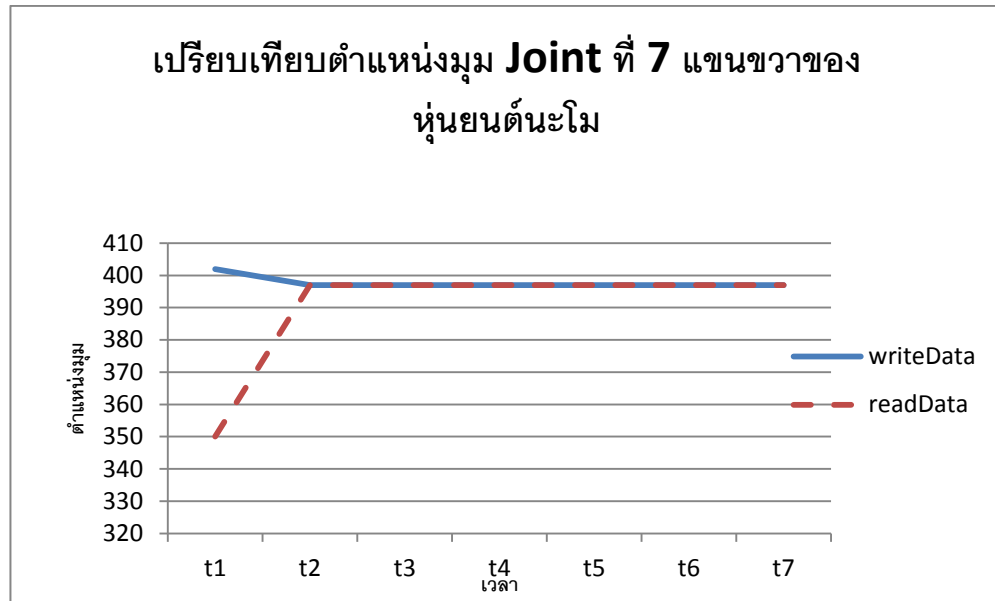
รูปที่ 5.8 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 4 แขนขวารุ่นยนต์นะโม



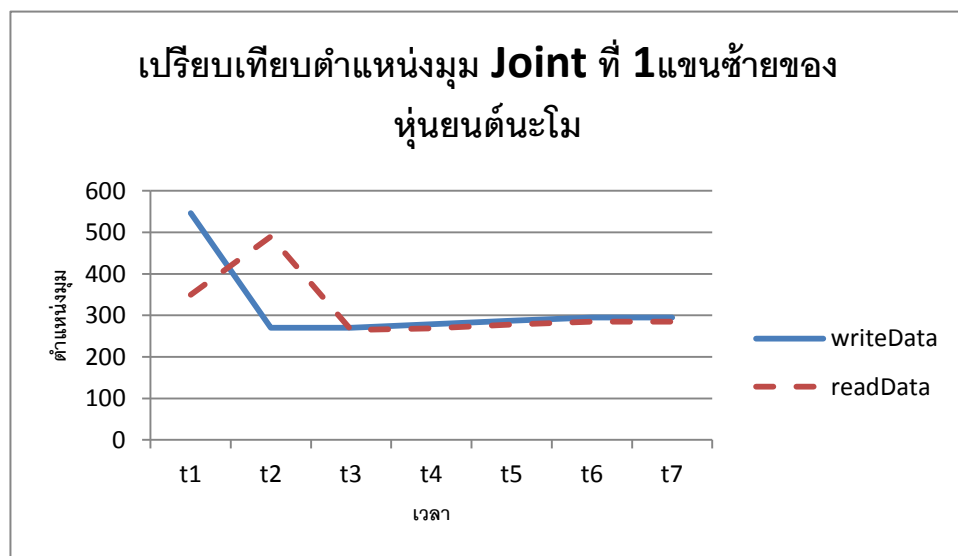
รูปที่ 5.9 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 5 แขนขวาหุ่นยนต์นะโม



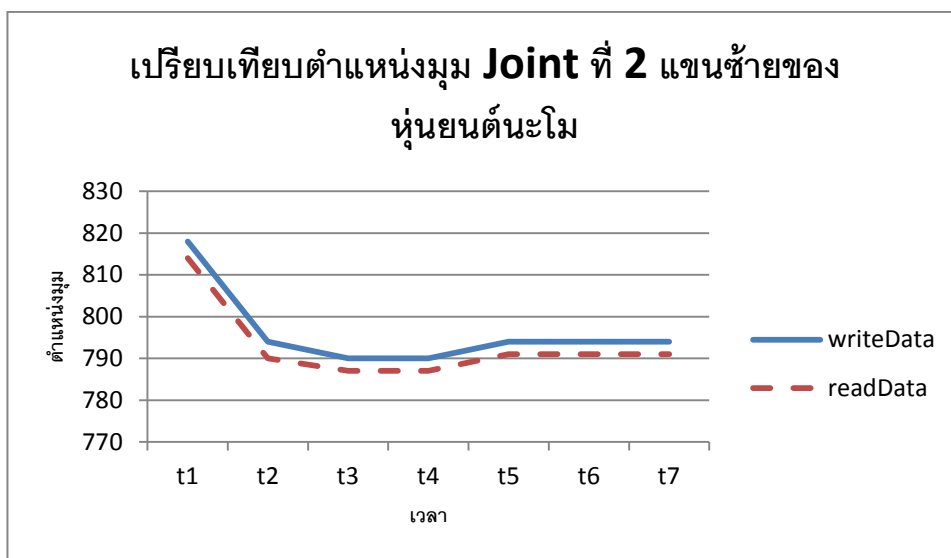
รูปที่ 5.10 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 6 แขนขวาหุ่นยนต์นะโม



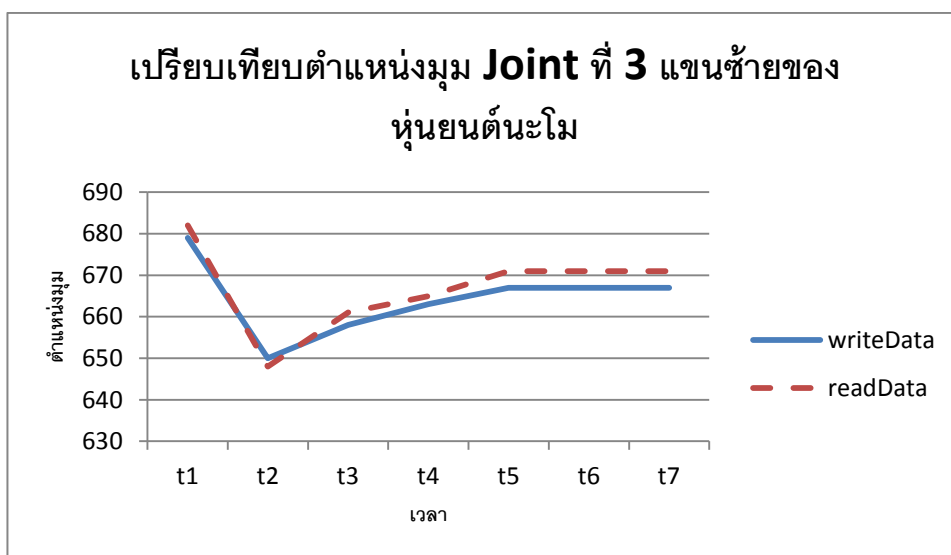
รูปที่ 5.11 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 7 แขนขวาหุ่นยนต์นะโม



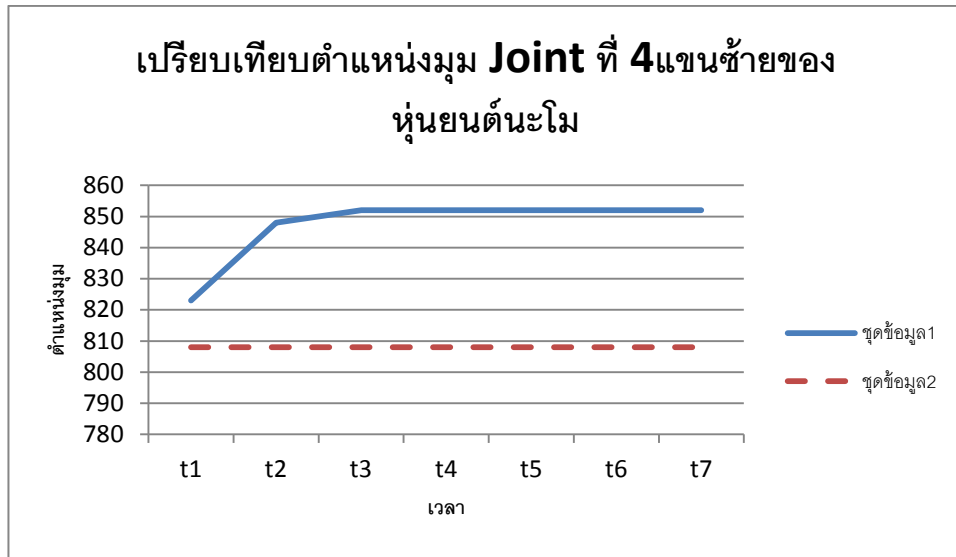
รูปที่ 5.12 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 1 แขนซ้ายหุ่นยนต์นะโม



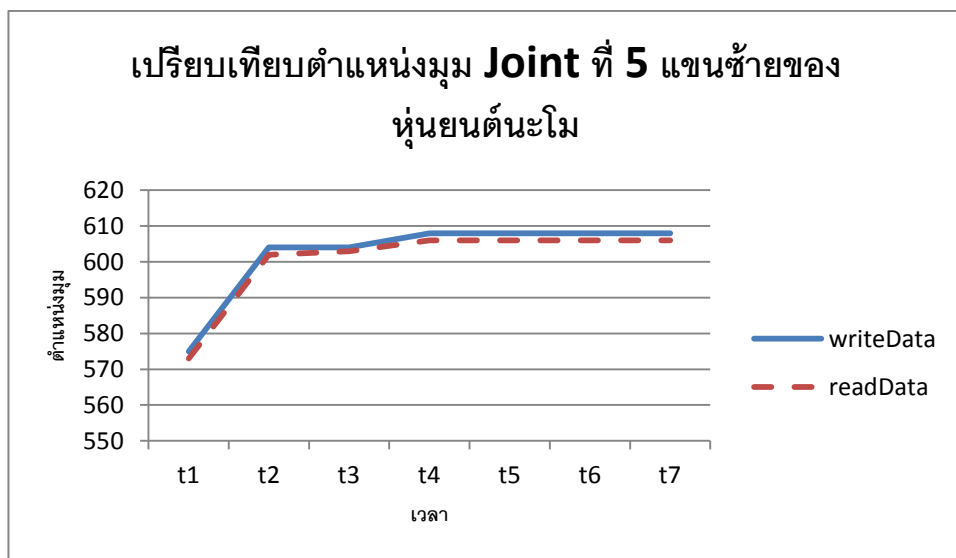
รูปที่ 5.13 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 2 แขนซ้ายหุ่นยนต์นะโม



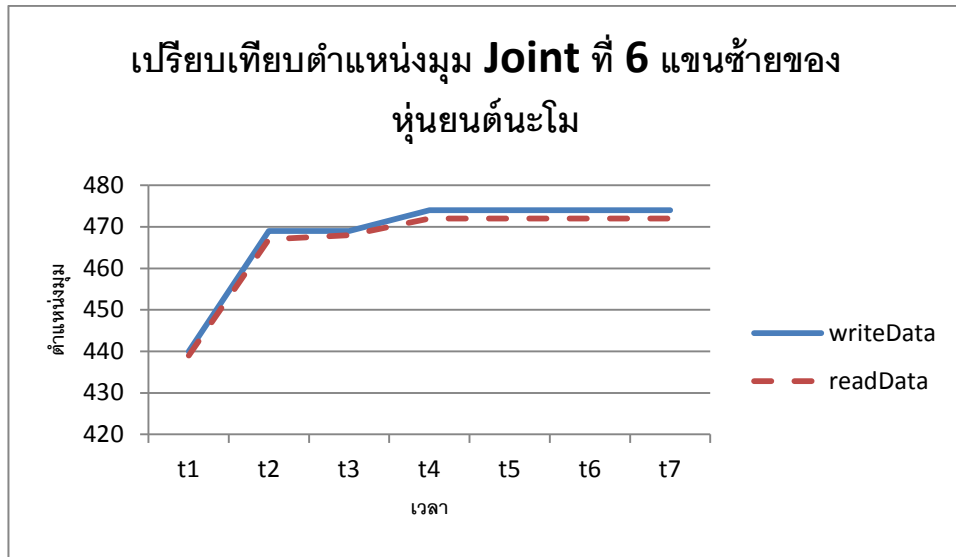
รูปที่ 5.14 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 3 แขนซ้ายหุ่นยนต์นะโม



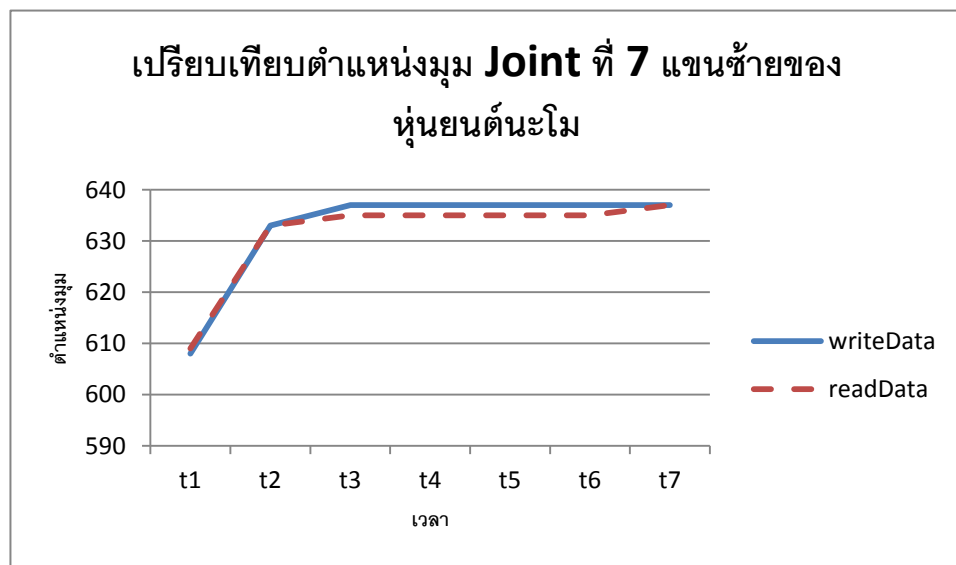
รูปที่ 5.15 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 4 แขนซ้ายหุ่นยนต์นะโม



รูปที่ 5.16 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 5 แขนซ้ายหุ่นยนต์นะโม



รูปที่ 5.17 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 6 แขนซ้ายหุ่นยนต์นะโม



รูปที่ 5.18 แสดงกราฟเปรียบเทียบตำแหน่งมุมของข้อต่อที่ 7 แขนซ้ายหุ่นยนต์นะโม

5.3.4 วิเคราะห์การทดลอง

จากการทดลองการควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิวแมนอยด์นะโมให้แสดงท่าทางตามชุดควบคุม จะเห็นว่าท่าวันทยหัตถ์ และท่าเท้าเอว หุ่นยนต์นะโมสามารถแสดงท่าทางได้ตรงกับความต้องการของผู้ควบคุม แต่ในท่าไหว้ หุ่นยนต์ไม่สามารถแสดงท่าทางได้ตามที่ผู้ควบคุมต้องการ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะท่าไหว้ข้อต่อในส่วนของข้อศอกจะได้รับน้ำหนักมากเกินไป มอเตอร์ robotis จึงตัดการทำงานเพื่อป้องกันไม่ให้มอเตอร์เกิดความเสียหาย ดังจะเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 5.8 ค่าตำแหน่งมุมที่ชุดควบคุมส่งไปยังมอเตอร์กับค่าที่อ่านจากมอเตอร์กลับมานั้นมีความแตกต่างกันเป็นอย่างมาก โดยที่ค่าที่ชุดควบคุมส่งไปเท่ากับ 177 แต่ค่าที่อ่านกลับมาจากมอเตอร์ robotis เท่ากับ 610 ซึ่งในขณะนั้นข้อต่อที่ 4 ของแขนข้างขวาของหุ่นยนต์นะโมได้ถูกตัดการทำงานแล้ว และในการแสดงท่า Sarang หุ่นยนต์ไม่สามารถแสดงท่าทางได้โดยสมบูรณ์ อาจมีสาเหตุจากค่าที่ส่งจากชุดควบคุมนั้นเกินขอบเขตของมอเตอร์ในข้อต่อนั้นๆ ในการควบคุมหุ่นยนต์จริง ๆ นั้นมีปัจจัยและตัวแปรที่ต้องคำนึงถึงมากกว่า การทำการควบคุมหุ่นยนต์ในแบบจำลอง เนื่องจากหุ่นยนต์ในแบบจำลองเราสามารถพิจารณาเฉพาะการเคลื่อนที่ ค่าตำแหน่งมุมของแต่ละข้อต่อ ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ แต่ในกรณีของหุ่นยนต์จริงนั้นมีข้อจำกัด และคุณสมบัติของอุปกรณ์อื่นๆ มาประกอบด้วย เช่น ดิจิตอลเซอร์โวมอเตอร์นั้นสามารถรับน้ำหนักทั้งได้จำกัด ในบางกรณีถึงแม้ว่าจะกำหนดช่วงที่แต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์สามารถหมุนไปได้แล้ว แต่เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนไหวแสดงท่าทางต่างๆ อาจมีบางข้อต่อที่ไม่สามารถหมุนไปยังตำแหน่งมุมที่กำหนดได้เนื่องจากติดโครงสร้างทางกล ทำให้เป็นอีกปัจจัยหนึ่งทำให้หุ่นยนต์ไม่สามารถแสดงท่าทางตามที่ต้องการได้

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อทดสอบการควบคุมของชุดควบคุมส่วนแขนของหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์ สามารถสรุปได้ว่า ระบบการควบคุมนี้อาจแยกแยะประเภทของท่าทางต่างๆในการทดลองได้อย่างแม่นยำ การควบคุมหุ่นยนต์ด้วยวิธีการส่งค่ามุมจาก potentiometer จากชุดควบคุมส่วนแขน โดยตรงหรือที่เรียกว่า การควบคุมแบบ joint control สามารถควบคุมให้หุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์นั้นไม่จำลองแสดงท่าทางประเภทท่าทางแบบเปิดได้ แต่ในกรณีที่เป็นท่าทางแบบปิดที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 4 ท่าทาง ได้แก่ ท่าวันทยหัตถ์ ท่าเท้าเอว ท่าไหว้ และท่า Sarang การทดลองโดยควบคุมส่วนแขนโดยตรงไม่สามารถทำให้หุ่นยนต์จำลองแสดงท่าทางให้ผู้อื่นเข้าใจได้อย่างชัดเจนว่ากำลังสื่อสารหรือแสดงท่าทางอะไรในขณะนั้น และในการทดลองที่ใช้วิธีการชดเชยค่ามุมมาใช้ในการแสดงท่าทางแบบปิด จะต้องกำหนดตำแหน่ง anchor point ที่แน่นอน และตั้งค่า neighborhood threshold ที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.10 เมตร 0.15 เมตร 0.20 เมตร และ 0.25 เมตร ในกรณีที่กำหนดค่า neighborhood threshold เท่ากับ 0.15 เมตร จะเห็นได้ว่าปลายแขนของหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนเข้าสู่ตำแหน่งที่กำหนดไว้ได้ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่า neighborhood threshold อื่นๆ ในกรณีกำหนดค่า neighborhood threshold ที่ 0.15 เมตร ในการแสดงท่าวันทยหัตถ์ ท่าเท้าเอว และท่า Sarang จะมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของท่าทางหลังทำการชดเชยค่ามุมเท่ากับ 100% ยกเว้นท่าไหว้ที่มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง 80% เช่นเดียวกับกรณีกำหนดค่า neighborhood threshold ที่ 0.20 เมตร คือท่าไหว้จะมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง 20% ท่าทางอื่นก็มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเท่ากับ 100% ส่วนในกรณีของค่า neighborhood threshold ที่เท่ากับ 0.10 เมตร เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของท่าเท้าเอว และท่า Sarang เท่ากับ 100% แต่ท่าวันทยหัตถ์มีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเท่ากับ 60% และท่าไหว้มีความถูกต้องเพียง 20% และในกรณีค่า neighborhood threshold เท่ากับ 0.25 เมตร มีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องต่ำมาก โดยที่ท่าเท้าเอวและท่า Sarang มีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเท่ากับ 20% ท่าวันทยหัตถ์และท่าไหว้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเท่ากับ 0% จะเห็นได้ว่าการควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์นั้นในแบบจำลองถึงแม้ปลายแขนจะเข้าสู่ตำแหน่งที่กำหนดไว้แต่ในบางครั้งไม่สามารถแสดงท่าทางได้ถูกต้องเนื่องจากการควบคุมแบบ Cartesian control ขณะที่ทำการชดเชยค่ามุม จะทำการควบคุมตำแหน่งของปลายแขนของหุ่นยนต์เท่านั้น และในการทดลองการควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์นั้น จะเห็นความแตกต่างระหว่างการควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์ที่ถูกจำลองในคอมพิวเตอร์ และการควบคุมหุ่นยนต์เซมิอิมานอยด์จริง คือ การควบคุมหุ่นยนต์จำลองในคอมพิวเตอร์นั้นไม่ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆของหุ่นยนต์ สนใจเพียงความแม่นยำของการเคลื่อนไหวของแต่ละข้อต่อ ตำแหน่งมุม และ

ตำแหน่งของปลายแขนของหุ่นยนต์จำลอง แต่ในหุ่นยนต์นะโมจริงนั้น มีปัจจัยอื่นนอกเหนือจากนี้ที่จะต้องคำนึงถึง เช่น น้ำหนักของแขนหุ่นยนต์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ ข้อจำกัดของเซอร์โวมอเตอร์ในเรื่องทอร์ก เป็นต้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการควบคุมหุ่นยนต์แบบใช้ค่ามุมที่ได้รับจากเซ็นเซอร์โดยตรงมาควบคุมหุ่นยนต์ทั้งในส่วนศีรษะและส่วนแขน ควรกำหนดค่า joint limit ให้กับมอเตอร์แต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์เซมิฮิวแมนอยด์ด้วย เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับมอเตอร์และตัวหุ่นยนต์ เนื่องจากช่วงการหมุนของชุดควบคุมและหุ่นยนต์ไม่เท่ากัน และในกรณีการชดเชยค่ามุมให้กับหุ่นยนต์ในบางท่าทางปลายแขนของหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างถูกต้องแล้ว แต่ทิศทางการวางตัวของปลายแขนของหุ่นยนต์เซมิฮิวแมนอยด์ยังไม่อยู่ในทิศทางที่ถูกต้อง เพื่อให้การแสดงผลท่าทางของหุ่นยนต์นั้นดูเป็นธรรมชาติมากขึ้น ในกรณีการควบคุมให้หุ่นยนต์แสดงผลท่าทางแบบปิด น่าจะมีการชดเชยค่ามุมนอกเหนือจากตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์เท่านั้น เนื่องจากในส่วนตำแหน่งของข้อศอกและข้อมือก็เป็นส่วนสำคัญในการแยกแยะท่าทางของมนุษย์ให้มีความถูกต้องและชัดเจนมากยิ่งขึ้น และในการกำหนด anchor point สำหรับท่า Sarang นั้น ปัจจุบันได้ทำการกำหนดให้ตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านบนของศีรษะหุ่นยนต์ แต่การแสดงผลท่า Sarang จะต้องมีการเอียงศีรษะ ทำให้ในความเป็นจริงควรกำหนด anchor point สำหรับท่า Sarang ด้านบนของศีรษะขณะที่หุ่นยนต์กำลังเอียงศีรษะ นอกจากนี้ในส่วนของการใช้ 9 DOF IMU ควบคุมการเคลื่อนไหวส่วนศีรษะของหุ่นยนต์ โดยติดตั้งเซ็นเซอร์นี้บนศีรษะของผู้ควบคุม พร้อมกับให้ผู้ควบคุมทำการควบคุมชุดควบคุมส่วนแขนนั้น เมื่อนำทั้ง 2 ระบบมารวมกันแล้ว ทำให้การควบคุมการเคลื่อนไหวทั้งส่วนศีรษะและส่วนแขนไม่ราบรื่น ดังนั้นหากเปลี่ยนระบบที่ใช้ควบคุมส่วนศีรษะจากการใช้ 9 DOF IMU เป็นการติดตั้ง Potentiometer เพิ่มเติมอีก 3 องศาอิสระ จากชุดควบคุมส่วนแขนของหุ่นยนต์น่าจะทำให้การควบคุมทั้งส่วนศีรษะและส่วนแขนเป็นไปได้อย่างสะดวกมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Dariush , M. Gienger , B. Jian , C. Goerick and K. Fujimura "Whole body humanoid control from human motion descriptors", *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp.2677 -2684 2008
- [2] S. Chang, J. Kim, I. Kim, J. H. Borm, C. Lee, "KIST Teleoperation system for humanoid robot", in Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 1198-1203, Kyongju, Korea, 1999.
- [3] N.S. Pollard, J. K. Hodgins, M.J. Riley, C. G. Atkeson, "Adapting Human Motion for the Control of a Humanoid Robot", IEEE-RAS Conference on Robotics and Automation, May 2002.
- [4] R. Tadakuma, et al., "Development of anthropomorphic multi-D.O.F. master-slave arm for mutual telexistence," *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, vol. 11, no. 6, pp. 626-638, 2005.
- [5] S.Tachi , M. Kawakami, H. Nii, K.Watanabe, K.Minamizawa , “TELEsarPHONE: Mutual Telexistence Master-Slave Communication,” *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, pp 335-344 , 2008.
- [6] Y. Fujimori , Y. Ohmura , T. Harada and Y. Kuniyoshi, "Wearable motion capture suit with full-body tactile sensors", *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp.3652 -3659 2009.
- [7] Y. Tsumaki, N. Inoue, Y. Satoh and R. Tadakuma, "Miniature Humanoid MH-1 for Wearable Telecommunicator," *Proc. of the 2011 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, pp. 223-228, 2011.
- [8] H. I. Lin and C. L. Chen, “A hybrid control policy of robot arm motion for assistive robots,” in Proceedings of IEEE International Conference on Information and Automation, Jun. 2011, pp. 163-168.
- [9] “Qumarion mannequin input device for intuitive 3D manipulation,” 2012. [Online]. Available: <http://www.youtube.com/watch?v=MfJ4pA8ngDo&feature=relmfu>.
- [10] “Humanoid Input Device [Qumarion],” 2012. [Online]. Available: <http://www.clip-studio.com/quma/en/products/qumarion>.
- [11] D. Guo, X. M. Yin, Y. Jin, M. Xie, “Efficient Gesture Interpretation for Gesture-based Human-Service Robot Interaction,” in *Proc. Int. Conf. on Field and Service Robotics*, Pittsburgh, PA, Aug. 1999.

- [12] N. Iwane, "Arm Movement Recognition for Flag Signaling with Kinect Sensor," in Proceedings of IEEE International Conference on Virtual Environments Human-Computer Interfaces and Measurement Systems (VECIMS), Jul. 2012, pp. 86-90.
- [13] "VPython 3D Programming for Ordinary Mortals," 2013. [Online]. Available: [http:// http://vpython.org/](http://http://vpython.org/).
- [14] Reza N. Jazar, 2006, "Theory of Applied Robotics ," Springer, Newyork, pp.254-257.
- [15] Matsumoto, D. & Hyisung, C. H. (2013). Cultural similarities and difference in emblematic gestures. Journal of Nonverbal Behavior, 37, 1-27

ภาคผนวก ก

เอกสารตีพิมพ์เผยแพร่งานวิจัยในการประชุมวิชาการ

TRS Conference on Robotics and Industrial Technology (CRIT 2012)

ในวันที่ 28-29 พฤศจิกายน 2555 จังหวัดนครปฐม ประเทศไทย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล

นางสาวสุณัฏฐา จริยวัฒน์นากุล

วัน เดือน ปีเกิด

8 สิงหาคม 2528

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา

โรงเรียนช่างตากุ้งีคอนแวนต์ 2543

โรงเรียนศึกษานารีวิทยา 2546

ระดับปริญญาตรี

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2550

ระดับปริญญาโท

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2556

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

Jariyawattanakul, S. and Maneewarn, T., 2013 “การควบคุม
หุ่นยนต์เซมิฮิวแมนอยด์ด้วย 9DOF IMU และชุดควบคุมแขน
แบบตั้งโต๊ะ”, **TRS Conference on Robotics and Industrial
Technology (CRIT 2012)**, Nov. 28-29, 2012, Mahidol
University, Nakhon Pathom, Thailand.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ข้อตกลงว่าด้วยการโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

วันที่ 1 เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2557

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว) สัญญา จริยาวัฒนกุล
รหัสประจำตัว 53432311 เป็นนักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ระดับ ☒ ประกาศนียบัตรบัณฑิต ☒ ปริญญาโท ☐ ปริญญาเอก
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขา วิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
คณะ สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม อยู่บ้านเลขที่ 122/152 หมู่ที่
ครอบครัว พุทธบูชา 36 ถนน พุทธบูชา
ตำบล/แขวง บางมด อำเภอ/เขต ทุ่งครุ
จังหวัด กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10140 เป็น "ผู้โอน"
ขอโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี
..... รศ.ดร. จิต เหล่าวัฒนา ตำแหน่ง ผู้อำนวยการสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
เป็นตัวแทน "ผู้รับโอน" สิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาและมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์ เรื่อง
..... การควบคุมหุ่นยนต์เชิงวิศวกรรมอัจฉริยะ
ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ ศศ.ดร. ฤทธิ มณีวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาและ/หรือ
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ตาม
พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าใน
วิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดจนอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตาม
พระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย
3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใด ๆ ก็ตาม ข้าพเจ้า
จะต้องระบุว่าวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุกครั้งที่มีการ
เผยแพร่
4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่ หรือให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลง
หรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมี

ค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีก่อน

5. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำข้อมูลจากวิทยานิพนธ์ไปประดิษฐ์หรือพัฒนาต่อยอดเป็นสิ่งประดิษฐ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาประเภทอื่น ภายในระยะเวลาสิบ (10) ปี นับจากวันลงนามในข้อตกลงฉบับนี้ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีมีสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญานั้น พร้อมกับได้รับชำระค่าตอบแทนการอนุญาตให้ใช้สิทธิดังกล่าว รวมถึงการจัดสรรผลประโยชน์อันพึงเกิดขึ้นจากส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ในอนาคต โดยให้เป็นไปตามระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วย การบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

6. ในกรณีที่มิมีผลประโยชน์เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาอื่นที่ข้าพเจ้าทำขึ้นโดยมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีเป็นเจ้าของ ข้าพเจ้าจะมีสิทธิได้รับการจัดสรรผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญาดังกล่าวอัตราที่กำหนดไว้ในระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วย การบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

ลงชื่อ.....ผู้โอนลิขสิทธิ์
(นางสาวสุนัญญา จริยาวัฒนากุล)

ลงชื่อ.....ผู้รับโอนลิขสิทธิ์
(รศ.ดร.จิต เหล่าวัฒนา)

ลงชื่อ.....พยาน
(ผศ.ดร.ถวิดา มณีวรรณ)

ลงชื่อ.....พยาน
(ดร.สุริยา นฤสุทธิพงศ์)