

การควบคุมความยืดหยุ่นแขนกลแบบ 3 แกน

COMPLIANT CONTROL OF 3-AXIS MANIPULATOR ARM



ศุภโชค ตันติวิวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การควบคุมความยืดหยุ่นแกนกลแบบ 3 แกน

ศุภโชค ตันติวิวัฒน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

| | |
|-------------------|-------------------------------------|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การควบคุมความยืดหยุ่นแกนกลแบบ 3 แกน |
| ชื่อ - นามสกุล | นายศุภโชค ตันติวิวัฒน์ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมเครื่องกล |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | อาจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D. |
| ปีการศึกษา | 2555 |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ นำเสนอการออกแบบ ระบบควบคุมความยืดหยุ่น เพื่อ ใช้กับแกนกล CRS รุ่น A255 แบบ 3 แกน ให้มีการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งที่ต้องการบนพื้นผิวระนาบ เอียง 45 องศา ที่กำหนด โดยสามารถควบคุมแรงโดยทางอ้อมเมื่อทราบค่าความยืดหยุ่นของผิววัสดุ และกำหนดความลึกที่ต้องการให้ปลายแกนกลลงบนวัสดุ

การศึกษา งานวิจัยเริ่มจาก ออกแบบ แบบจำลองโดยใช้ ระบบควบคุม ความยืดหยุ่น เพื่อ จำลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนหุ่นยนต์ CRS รุ่น A255 แบบ 3 แกน ให้เคลื่อนที่ไปยัง ตำแหน่งที่ต้องการด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink จากนั้นนำสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการ จำลองมาใช้ในการควบคุมความยืดหยุ่นของแกนกลจริง โดยใช้โปรแกรม LabVIEW

ผลที่ได้จากแบบจำลองเมื่อทดสอบบนพื้นผิวที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น 16.15 นิวตัน สามารถควบคุมตำแหน่งและแรงที่ปลายแกนกลได้อย่างแม่นยำในเวลา 5 วินาที โดยมีค่าความ ผิดพลาดในแนวนอนกับผิว (u) และตั้งฉากกับผิว (v) อยู่ในช่วง 0-0.05 เปอร์เซ็นต์ และ 3.4-3.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในส่วนของการทดลองกับแกนกลจริงได้ทำการทดลองบนพื้นผิวของ โฟม และ ฟองน้ำ ซึ่งได้นำแผ่นพลาสติกที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร มาเสริมความแข็งแรงด้านบน จากนั้น ทดสอบหาค่าความยืดหยุ่นของวัสดุทั้งสองชนิดโดยหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดที่กระทำในทิศตั้ง ฉากกับระยะการยุบตัวของวัสดุโดยโฟมและฟองน้ำมีค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น 16.15 นิวตันต่อ เมตร และ 16.16 นิวตันต่อเมตร ตามลำดับ ผลการทดลองการควบคุมแกนกลจริงสามารถควบคุม ตำแหน่งและแรงที่ปลายแกนกลได้ในเวลา 1-2 วินาที ซึ่งมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในแนวแกน ขนานกับผิว อยู่ในช่วง 0.05-0.6 เปอร์เซ็นต์ และแกนตั้งฉากกับผิว อยู่ในช่วง 1.6-4.5 เปอร์เซ็นต์ จึง กล่าวได้ว่าระบบควบคุมนี้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนกลไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้และ สามารถควบคุมแรงกดในทิศตั้งฉากกับผิววัสดุได้ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

คำสำคัญ: ระบบควบคุมความยืดหยุ่น ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของวัสดุ แกนกล CRS รุ่น A255

| | |
|-----------------------|---|
| Thesis Title | Compliant Control of 3-Axis Manipulator Arm |
| Name – Surname | Mr. Supachock Tuntivivat |
| Program | Mechanical Engineering |
| Thesis Advisor | Mr. Pradya Prempraneerach, Ph.D. |
| Academic Year | 2012 |

ABSTRACT

This research presents a design of stiffness control system for 3-axis A255 CRS robotic arm which can control the motion from an initial position to a desired position on a specified 45° inclined plane. This control method indirectly controls a contact force, once a stiffness coefficient of the contact surface is known and a deformation pressed into the contact surface is specified.

In the first part, a simulation of the stiffness control system is implemented in Matlab/Simulink such that an end effector of the 3-axis A255 CRS robot can move along a straight trajectory. In the second part, the derived control equation, implemented in LabVIEW, from the simulation can be used to control the stiffness of the real CRS robot arm.

Simulation results show that the experiment on a surface with a stiffness coefficient of 16.15 N can directly control the motion from initial to final positions and contact force of the CRS A225 arm tip within 5 second. The errors in the parallel axis (u) and in the perpendicular axis (v) to the surface are in 0-0.05 % and 3.4-3.6 % range respectively. The stiffness control experiments of the real CRS A225 Arm perform on foam and sponge surfaces, which are covered by a 0.5 mm thick plastic sheet to reinforce stiffness. Then, the elastic coefficients of these 2 materials are determined from a relation between a pressed force in the perpendicular direction and a deformation distance into the contact surface. Foam and sponge have stiffness coefficients of 16.15 N/m and 16.16 N/m respectively. The experimental results show that the stiffness control can control motion from initial to final positions and contact force within 1-2 second. The position error from the experiments along u-axis and v-axis are in the range of 0.05-0.6% and of 1.6-4.5%, respectively. Therefore, both simulation and experimental results confirm that the stiffness controller can control the desired motion as well as contact force.

Keywords: stiffness control, material stiffness coefficient, A255 CRS robotic arm

กิตติกรรมประกาศ

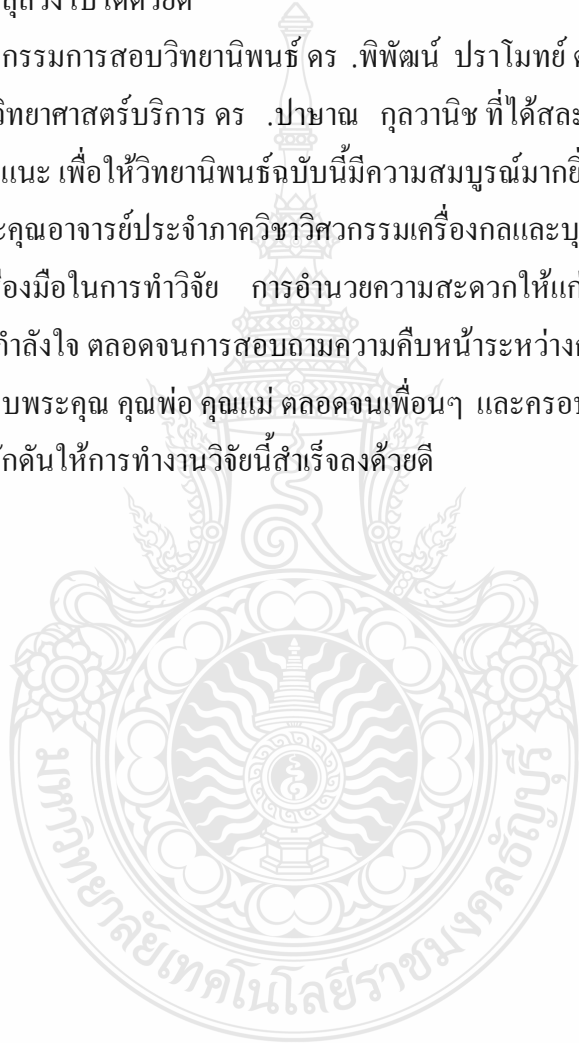
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ อาจารย์ที่ปรึกษาอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษาในการทำวิจัย ตลอดจนเสนอแนะแนวทางในการแก้ปัญหา และอุปกรณ์การวิจัยต่างๆ พร้อมทั้งดูแลสอบถามความก้าวหน้าของวิทยานิพนธ์อย่างต่อเนื่อง ทำให้ผู้เขียนทำงานได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร .พิพัฒน์ ปราโมทย์ ดร .มนูศักดิ์ จานทอง และผู้ทรงคุณวุฒิจากกรมวิทยาศาสตร์บริการ ดร .ปายาน กุลวานิช ที่ได้สละเวลาในการ ให้คำแนะนำเพิ่มเติมพร้อมทั้งเสนอแนะ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและบุคลากรทุกท่าน ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย การอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้เขียนได้ทำวิจัยได้อย่างราบรื่น พร้อมทั้งมอบกำลังใจ ตลอดจนการสอบถามความคืบหน้าระหว่างการทำงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ตลอดจนเพื่อนๆ และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจ เป็นแรงผลักดันให้การทำงานวิจัยนี้สำเร็จลงด้วยดี

ศุภโชค ตันติวิวัฒน์



สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | ง |
| กิตติกรรมประกาศ..... | จ |
| สารบัญ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ช |
| สารบัญภาพ..... | ณ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 3 |
| 1.3 สมมุติฐานการวิจัย..... | 3 |
| 1.4 ระเบียบการวิจัย..... | 4 |
| 1.5 ขอบเขตการวิจัย..... | 4 |
| 1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน..... | 5 |
| 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย..... | 5 |
| 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง..... | 6 |
| 2.1 ทฤษฎีจลนศาสตร์ (Kinematics)..... | 6 |
| 2.2 เมตริกซ์การหมุน..... | 7 |
| 2.3 พารามิเตอร์ของ Denavit-Hartenberg..... | 7 |
| 2.4 การออกแบบระบบควบคุมของแขนกล..... | 9 |
| 2.5 การดำเนินการของจลนศาสตร์ทางตรง (Transformation Operator)..... | 11 |
| 2.6 การสร้างสมการแบบลากรานจ์ (Lagrange Formulation)..... | 12 |
| 2.7 การควบคุมแบบยืดหยุ่น (Stiffness Control)..... | 12 |
| 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 20 |
| 3.1 หุ่นยนต์ต้นแบบ CRS Robot..... | 20 |
| 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... | 21 |

สารบัญ (ต่อ)

| บทที่ | หน้า |
|----------------------|--|
| 3.3 | ค่าพารามิเตอร์ของแกนหุ่นยนต์..... 24 |
| 3.4 | การตั้งแกนของแกนหุ่นยนต์ CRS แบบ 3 แกน..... 25 |
| 3.5 | จลนศาสตร์ทางตรงของแขนกลและสมการพลวัตของแขนกลแบบพื้นฐาน..... 26 |
| 3.6 | ออกแบบระบบการควบคุมความยืดหยุ่นและการเคลื่อนที่ของแขนกล..... 31 |
| 4 | ผลการทดลอง..... 35 |
| 4.1 | ทดสอบหาค่าความยืดหยุ่นของแผ่นโฟมและแผ่นฟองน้ำ..... 35 |
| 4.2 | ผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลบนระนาบเอียง 45° บนแผ่นโฟม ด้วยระบบควบคุมความยืดหยุ่น..... 36 |
| 4.3 | ผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลบนระนาบเอียง 45° บนแผ่นฟอง น้ำด้วยระบบควบคุมความยืดหยุ่น..... 59 |
| 5 | สรุปผลการทดลอง ปัญหาที่พบในการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 64 |
| 5.1 | สรุปผลการทดลอง..... 64 |
| 5.2 | ปัญหาที่พบในการทดลอง..... 65 |
| 5.3 | ข้อเสนอแนะ..... 66 |
| รายการอ้างอิง..... | 67 |
| ภาคผนวก..... | 69 |
| ภาคผนวก ก | ตารางข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 70 |
| ภาคผนวก ข | ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่..... 77 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 104 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|---|
| 1.1 | แผนงานการดำเนินงานวิจัย..... 5 |
| 3.1 | คุณสมบัติต่างๆ ของแกนกล CRS รุ่น A255 ที่ใช้ในการวิจัยนี้..... 24 |
| 3.2 | ค่าตัวแปรของแกนหุ่นยนต์ในแต่ละแกน..... 26 |
| 4.1 | การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแกนกลจริงและแบบจำลองในการเคลื่อนที่บนระนาบ เอียง 45° บนแผ่นโฟมที่รองด้วยแผ่นพลาสติก..... 37 |
| 4.2 | ค่าผลการทดลองที่ได้จากการเคลื่อนที่ของแกนกลจริงเทียบแบบจำลองในการเคลื่อนที่ บนระนาบเอียง 45° บนแผ่นโฟม จากการทดลองครั้งที่ 1..... 42 |
| 4.3 | ค่าผลการทดลองที่ได้จากการเคลื่อนที่ของแกนกลจริงเทียบแบบจำลองในการเคลื่อนที่ บนระนาบเอียง 45° บนแผ่น โฟม จากการทดลองครั้งที่ 2..... 46 |
| 4.4 | ค่าผลการทดลองที่ได้จากการเคลื่อนที่ของแกนกลจริงเทียบแบบจำลองในการเคลื่อนที่ บนระนาบเอียง 45° บนแผ่น โฟม จากการทดลองครั้งที่ 3..... 50 |
| 4.5 | ค่าผลการทดลองที่ได้จากการเคลื่อนที่ของแกนกลจริงเทียบแบบจำลองในการเคลื่อนที่ บนระนาบเอียง 45° บนแผ่น โฟม จากการทดลองครั้งที่ 4..... 54 |
| 4.6 | ค่าผลการทดลองที่ได้จากการเคลื่อนที่ของแกนกลจริงเทียบแบบจำลองในการเคลื่อนที่ บนระนาบเอียง 45° บนแผ่น โฟม จากการทดลองครั้งที่ 5..... 58 |
| 4.7 | ค่าพารามิเตอร์ ของระบบควบคุมความยืดหยุ่น ของแกนกลจริงและแบบจำลองในการ ควบคุมแรงกดของปลายแขนที่ เคลื่อนที่บนระนาบเอียง 45° กับแนวระนาบที่เป็นวัสดุ แผ่นฟองน้ำปะกบผิวด้านบนด้วยแผ่นพลาสติก..... 59 |
| 4.8 | ค่าผลการทดลองที่ได้จากการเคลื่อนที่ของแกนหุ่นยนต์จริงเทียบแบบจำลองในการ เคลื่อนที่บนระนาบเอียง 45° บนแผ่นฟองน้ำ..... 63 |
| 5.1 | ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดการเคลื่อนที่และค่าแรงกดในทิศทางของการทดลอง ครั้งที่ 1-5 เมื่อวัสดุสัมผัสเป็นโฟมและครั้งที่ 6 เมื่อวัสดุสัมผัสเป็นฟองน้ำบนพื้น ระนาบเอียง 45° บนวัสดุทั้งสองชนิด..... 65 |

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 การควบคุมผ่านคันบังคับ..... | 2 |
| 1.2 การประยุกต์ใช้งานหุ่นยนต์ร่วมกับคัลยแพทย์ในงานผ่าตัดขนาดเล็ก..... | 2 |
| 2.1 ตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกล..... | 6 |
| 2.2 การหมุนรอบแกน Z..... | 7 |
| 2.3 D-H Rotation for Revolute..... | 8 |
| 2.4 แขนแบบมีส่วนเชื่อมต่อ 2 ข้อต่อ..... | 10 |
| 2.5 ระบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลแบบหนึ่งองศาอิสระ..... | 13 |
| 2.6 แผนภาพอิสระที่จำลองระบบในรูปแบบมวลและสปริงที่เชื่อมต่อกัน..... | 13 |
| 2.7 การเคลื่อนที่ของแขนกลไปตามพื้นผิวเอียง 45° | 15 |
| 3.1 โครงสร้างของแขนกล CRS Robotic..... | 20 |
| 3.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 V ด้านซ้าย และชนิดปรับค่าแรงดัน 0-30 V ด้านขวา..... | 21 |
| 3.3 มอเตอร์ไดรฟ์ Accelus รุ่น ASP-090-36..... | 22 |
| 3.4 การ์ด DAQ NI PCI – 6221..... | 22 |
| 3.5 บอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์รุ่น CP-jr ARM7 USB-LPC2148 EXP..... | 23 |
| 3.6 อุปกรณ์โดยรวมที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่แขนกล..... | 23 |
| 3.7 ความยาวระหว่างแต่ละแกนขนาดมุมของแต่ละแขน..... | 24 |
| 3.8 การตั้งแกนของแขนกล..... | 25 |
| 3.9 แบบจำลองการควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบยึดหุ่นของแขนกลแบบ 3 แกน..... | 33 |
| 3.10 แผนภาพอย่างง่ายของระบบควบคุม..... | 34 |
| 4.1 วัสดุสองชนิดที่นำมาใช้ในการทดสอบคือโฟมหยาบ (ซ้าย) และฟองน้ำ (ขวา)..... | 35 |
| 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะขยับตัวและแรงกดที่กระทำกับโฟมและฟองน้ำ..... | 36 |
| 4.3 การเปรียบเทียบค่าองศาการเคลื่อนที่บนแผ่นโฟมที่ระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) ในแกนที่ 1 2 และ 3 จากการทดลองครั้งที่ 1..... | 38 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.4 การจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแกนกลจริงและแบบจำลอง บนแผ่นโพลี ที่ระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 1..... | 39 |
| 4.5 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแกนกล บนแผ่นโพลีระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 1..... | 40 |
| 4.6 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดในพิกัด uv และค่าแรงในทิศตั้งฉากที่กระทำบนแผ่นโพลีในระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับ สำหรับแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 1..... | 41 |
| 4.7 การเปรียบเทียบค่าองศาการเคลื่อนที่บนแผ่นโพลีที่ระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) ในแกนที่ 1 2 และ 3 จากการทดลองครั้งที่ 2..... | 43 |
| 4.8 การจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแกนกลจริงและแบบจำลอง บนแผ่นโพลีระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 2..... | 44 |
| 4.9 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแกนกล บนแผ่นโพลีระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 2..... | 44 |
| 4.10 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดในพิกัด uv และค่าแรงในทิศตั้งฉากที่กระทำบนแผ่นโพลีในระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับ สำหรับแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 2..... | 45 |
| 4.11 การเปรียบเทียบค่าองศาการเคลื่อนที่บนแผ่นโพลีที่ระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) ในแกนที่ 1 2 และ 3 จากการทดลองครั้งที่ 3..... | 47 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.12 การจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแกนกลจริงและแบบจำลอง บนแผ่นโพลีเมรนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 3..... | 48 |
| 4.13 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแกนกล บนแผ่นโพลีเมรนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 3..... | 48 |
| 4.14 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดในพิกัด uv และค่าแรงในทิศตั้งฉากที่กระทำบนแผ่นโพลีเมรนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 3..... | 49 |
| 4.15 การเปรียบเทียบค่าองศาการเคลื่อนที่บนแผ่นโพลีเมรนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) ในแกนที่ 1 2 และ 3 จากการทดลองครั้งที่ 4..... | 51 |
| 4.16 การจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแกนกลจริงและแบบจำลอง บนแผ่นโพลีเมรนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 4..... | 52 |
| 4.17 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแกนกล บนแผ่นโพลีเมรนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 4..... | 52 |
| 4.18 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดในพิกัด uv และค่าแรงในทิศตั้งฉากที่กระทำบนแผ่นโพลีเมรนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 4..... | 53 |
| 4.19 การเปรียบเทียบค่าองศาการเคลื่อนที่บนแผ่นโพลีเมรนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) ในแกนที่ 1 2 และ 3 จากการทดลองครั้งที่ 5..... | 55 |
| 4.20 การจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแกนกลจริงและแบบจำลอง บนแผ่นโพลีเมรนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแกนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 5..... | 56 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.21 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกล บนแผ่นโพลีเมรนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 5..... | 56 |
| 4.22 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดในพิกัด uv และค่าแรงในทิศตั้งฉากที่กระทำบนแผ่นโพลีเมรนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 5..... | 57 |
| 4.23 การเปรียบเทียบค่าองศาการเคลื่อนที่บนแผ่นฟองน้ำที่ระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) ในแกนที่ 1 2 และ 3..... | 60 |
| 4.24 การจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและแบบจำลอง บนแผ่นฟองน้ำระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา)..... | 61 |
| 4.25 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกล บนแผ่นฟองน้ำระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา)..... | 61 |
| 4.26 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดในพิกัด uv และค่าแรงในทิศตั้งฉากที่กระทำบนแผ่นฟองน้ำในระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา)..... | 62 |

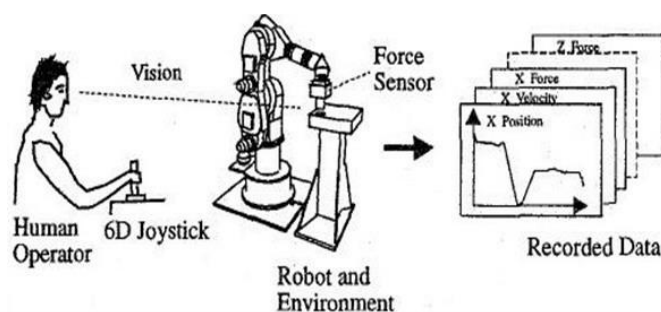
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านต่างๆ ได้พัฒนาอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรม ได้มีการนำเอาหุ่นยนต์มาใช้แทนแรงงานคนเพื่อลดเวลาในการปฏิบัติงาน เพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต อีกทั้งช่วยลดความเสี่ยงในงานที่อันตรายสำหรับผู้ปฏิบัติงาน แขนหุ่นยนต์จึงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญภายในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างมากมาย หรือแม้กระทั่งงานในทางการแพทย์ก็ได้นำหุ่นยนต์มาประยุกต์ใช้อย่างหลากหลายเช่น งานด้านการผ่าตัด ปลูกถ่ายอวัยวะเทียม ดังนั้นระบบการควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมพร้อมที่ สามารถควบคุมแรงที่กระทำกับสิ่งแวดล้อมที่ปลายแขนหุ่นยนต์ได้เป็นกระบวนการที่สำคัญในกระบวนการควบคุมแขนหุ่นยนต์ โดยทั่วไปแล้วการนำเอาหุ่นยนต์มาทำงาน ก็เพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพ การทำงานให้ ที่สุด เช่นเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่น้อยที่สุด พลังงานที่ใช้น้อยที่สุด การกระตุกที่น้อยที่สุด และถ้าสามารถควบคุมแรงที่ปลายแขนที่กระทำกับวัตถุหรือสิ่งแวดล้อมได้ จะยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแขนหุ่นยนต์ และจะช่วยลดความเสี่ยงเมื่อ แขนหุ่นยนต์มีการสัมผัส กับชิ้นงาน ตลอดจนความปลอดภัยก็เป็นสิ่งที่สำคัญเป็นอย่างมากกับการนำหุ่นยนต์มาใช้งานร่วมกับมนุษย์

ในการศึกษานี้ได้ให้ความสนใจไปที่หุ่นยนต์แบบที่ติดตั้งอยู่กับที่ (Fixed Robot) เป็นหุ่นยนต์ชนิดที่ใช้ข้อต่อในการหมุนก้าน โยงเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งของปลายแขนในการหยิบจับชิ้นงาน เนื่องจากหุ่นยนต์ในลักษณะนี้ได้มีการนำมาใช้งานเป็นจำนวนมากในอุตสาหกรรมภาคต่างๆ อาทิเช่น อุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ อุตสาหกรรมงานเชื่อม โลหะ แขนกลจัดเรียงสินค้าลงพาเลต ตลอดจนแขนกลที่ใช้งานทางการแพทย์ เป็นต้น ที่ผ่านมามีการพัฒนา ระบบทางกลของแขนหุ่นยนต์มาโดยตลอดไม่ว่าจะเป็นเรื่องของโครงสร้าง ข้อต่อจุดหมุน ตลอดจนระบบเกียร์ทด แต่ในส่วนของระบบการควบคุมก็มีความสำคัญมากเช่นเดียวกันเพราะเปรียบได้ดั่งสมองของแขนหุ่นยนต์ในการสั่งการงานวิจัยที่ผ่านมามีการวิจัยเรื่องการควบคุมแรงที่ปลายแขน โดยมีนักวิจัยดำเนินการเพื่อนำไปใช้งานต่างๆ ดังนี้ Wim Witvrouw and Sean Graves และคณะ [1] ได้วิจัยและพัฒนาเรื่องระบบควบคุมผ่านคัมบังคัมที่สามารถสัมผัสถึงแรงจากปลายแขนหุ่นยนต์ได้ โดยมีชื่อหัวข้อวิจัยว่าการพัฒนาตัวควบคุมแรงที่ปลายแขนหุ่นยนต์โดยมนุษย์เป็นตัวควบคุมผ่านจอยสติ๊กส์



ภาพที่ 1.1 การควบคุมผ่านคันทิ้งบังคับ [1]

อีกหนึ่งงานวิจัยถัดมาคือการควบคุมและการตรวจวัดแรงของหุ่นยนต์ผ่าตัดนั้นได้ทำการวิจัยโดย Peter Kazanzides และคณะ [2] ได้นำไปประยุกต์เพื่อใช้กับการปลูกถ่ายอวัยวะเทียม ส่วน Qinjun DU [3] ได้วิจัยเรื่องการออกแบบหุ่นยนต์ผ่าตัดขนาดเล็กพร้อมการบังคับควบคุมแรง ได้ประยุกต์ใช้งานหุ่นยนต์ร่วมกับศัลยแพทย์ควบคุมในการดำเนินการเพื่อใช้ผ่าตัดเนื้องอกขนาดเล็ก



ภาพที่ 1.2 การประยุกต์ใช้งานหุ่นยนต์ร่วมกับศัลยแพทย์ในงานผ่าตัดขนาดเล็ก [3]

นอกจากนี้ Satoshi Komada และคณะ [4] ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมแรงแบบคงทนโดยการประเมินค่าแรงจากสิ่งแวดล้อมอย่างมีประสิทธิภาพ โดยในงานวิจัยได้ทำการประเมินค่าสิ่งแวดล้อมภายนอกซึ่งประกอบด้วยแรงเสียดทาน แรงโน้มถ่วง และแรงกระทำภายนอกนั้นจะถูกนำมาชดเชยในการควบคุม จะเห็นได้ว่าการพัฒนาระบบการควบคุมแขนหุ่นยนต์ได้มีมาโดยตลอด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ แขนหุ่นยนต์สามารถทำงานได้อย่างดียิ่งขึ้น จึงมีความจำเป็นที่จะศึกษาและพัฒนาระบบการควบคุมการทำงานของแขนหุ่นยนต์ให้มีความสามารถในด้านการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำและราบเรียบ พร้อมทั้งสามารถควบคุมแรงที่ปลายแขนได้เพื่อให้แขนหุ่นยนต์สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย และพัฒนาให้มีประสิทธิภาพ

ที่สูงขึ้น การควบคุม ความยืดหยุ่น (Stiffness Control) เป็นระบบควบคุมที่ให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่สัมผัสกับวัตถุและกดลงไปยังผิวของวัตถุ โดยการวิเคราะห์ ทางคณิตศาสตร์เพื่อควบคุมแรง ที่ปลายแขนหุ่นยนต์กระทำกับสิ่งแวดล้อม

วิธีการควบคุมความยืดหยุ่น (Stiffness Control) จะเข้ามามีบทบาทเมื่อการทำงานของแขนหุ่นยนต์ต้องสัมผัสกับชิ้นงาน โดยตรง เพื่อให้แขนหุ่นยนต์สามารถ ออกแรงกดลงไปยังวัตถุโดย จะไม่ทำให้เกิดความเสียหาย ส่งผลให้สามารถนำแขนหุ่นยนต์ไปประยุกต์ ใช้งานให้เกิดประโยชน์ ทั้งงานอุตสาหกรรมและงานด้านการแพทย์ที่ต้องการปรับความยืดหยุ่นของแรง ที่กระทำที่ปลายแขนกับวัตถุที่สัมผัส การออกแบบระบบควบคุมของแขนกล นั้นจะ เป็นพื้นฐานให้สามารถต่อยอดความรู้ให้สามารถนำแขนกลไปใช้ในงานอุตสาหกรรมทั้งในและต่างประเทศต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล แบบ 3 แกน

1.2.2 เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้ทฤษฎีการควบคุมความยืดหยุ่น (Stiffness Control) และวิเคราะห์ การควบคุมตำแหน่งปลายของแขนหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด

1.2.3 เพื่อประยุกต์ทดลองการใช้ระบบควบคุมความยืดหยุ่น (Stiffness Control) กับแขนกล CRS แบบ 3 แกนในการทดลองจริง ในการควบคุมการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด โดยให้ปลายแขนกลออกแรงกดที่คงที่บนพื้นราบ

1.3 สมมุติฐานการวิจัย

ระบบการควบคุมตำแหน่งแบบ PID เป็นระบบการควบคุมที่สามารถควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ได้อย่างง่าย โดยใช้สมการ Inverse Kinematic ในการหาองศาการหมุนของตำแหน่งแต่ละจุดหมุนจากนั้นจึงสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของแต่ละจุดหมุนเพื่อให้แขนหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ได้อย่างราบเรียบ แต่ระบบดังที่กล่าวข้างต้น ไม่สามารถที่จะควบคุมแรงกระทำที่ปลายแขน ได้ ถึงแม้ จะทำได้ก็จำเป็นต้องอาศัยการทดลองที่ต้องยุ่งยากและ เสี่ยงต่อความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้เมื่อปลายแขนกลสัมผัสกับชิ้นงาน ดังนั้นระบบ ควบคุมความยืดหยุ่น (Stiffness Control) จึงได้นำมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหา

1.4 ระเบียบการวิจัย

1.4.1 ศึกษาโครงสร้างและการทำงานของแขนกล CRS แบบ 3 แกน

1.4.2 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล CRS เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อ

1.4.3 ออกแบบการควบคุมแบบจำลองแขนกล CRS Robotic โดยใช้การควบคุมแบบยืดหยุ่น (Stiffness Control) ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

1.4.4 ทดลองการทำงานของแขนกล CRS Robotic จริง โดยใช้ระบบการควบคุมแบบยืดหยุ่น (Stiffness Control) ด้วยโปรแกรม LabVIEW

1.4.5 วิเคราะห์และเปรียบเทียบการทำงานของระบบควบคุมความยืดหยุ่นระหว่างแขนกลจริงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.4.6 สรุปผลการทดลองที่ได้

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 ออกแบบและจำลองวิธีการควบคุมความยืดหยุ่น (Stiffness Control) ของแขนกล CRS แบบ 3 แกน ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ให้สามารถจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์บนระนาบ 45° โดยรักษาแรงกดบนระนาบเอียงให้คงที่

1.5.2 ออกแบบระบบการควบคุมความยืดหยุ่น (Stiffness Control) กับแขนกล CRS จริงแบบ 3 แกนด้วยโปรแกรม LabVIEW เพื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนที่ได้บนระนาบเอียง 45° โดยรักษาแรงกดบนระนาบเอียงให้คงที่

1.5.3 จำกัดขอบเขตของพื้นที่การงานของแขนกลโดย แกนที่ 1 ให้เคลื่อนที่ได้เป็นมุม 110° ส่วนแกนที่ 2 ให้เคลื่อนที่ได้เป็นมุม 125° และแกนที่ 3 ให้เคลื่อนที่ได้เป็นมุม 220° แขนสามารถยืดเหยียดได้ยาวมากที่สุดเท่ากับ 0.652 m

1.5.4 จำกัดค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยังมอเตอร์แต่ละแกนดังนี้ ของแกนที่ 1 จำกัดค่ากระแสไม่เกิน 10 A ส่วนแกนที่ 2 จำกัดค่ากระแสไม่เกิน 10 A และแกนที่ 3 จำกัดค่ากระแสไม่เกิน 5 A

1.5.5 ทดลองและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ ควบคุมความยืดหยุ่น (Stiffness Control) ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแขนกลจริง

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนงานการดำเนินงานวิจัย

| รายละเอียด | 2555 | | | | | | | 2556 | | | |
|--|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| | มิ.ย. | ก.ค. | ส.ค. | ก.ย. | ต.ค. | พ.ย. | ธ.ค. | ม.ค. | ก.พ. | มี.ค. | เม.ย. |
| 1. ศึกษาข้อมูลงานวิจัยและนำเสนอ งานวิจัย | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | | | |
| 2. ศึกษาวิธีการควบคุม ความ ยืดหยุ่น (Stiffness Control) | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | | |
| 3. สร้างสมการการเคลื่อนที่ของแขนกล และจัดเตรียมอุปกรณ์ ต่างๆ ของแขน กล CRS | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | |
| 4. ออกแบบระบบควบคุม ความยืดหยุ่น ด้วยโปรแกรม MATLAB/ Simulink | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | |
| 5. ทดสอบการเคลื่อนของแขนกล ด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ | | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | |
| 6. ทดสอบระบบควบคุมการทำงาน ของ แขนหุ่นยนต์ CRS จริง | | | | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | |
| 7. เปรียบเทียบผลการผลการทดลอง พร้อมสรุปผล | | | | | | | | | | ✓ | |
| 8. จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์ | | | | | | | | | | | ✓ |

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

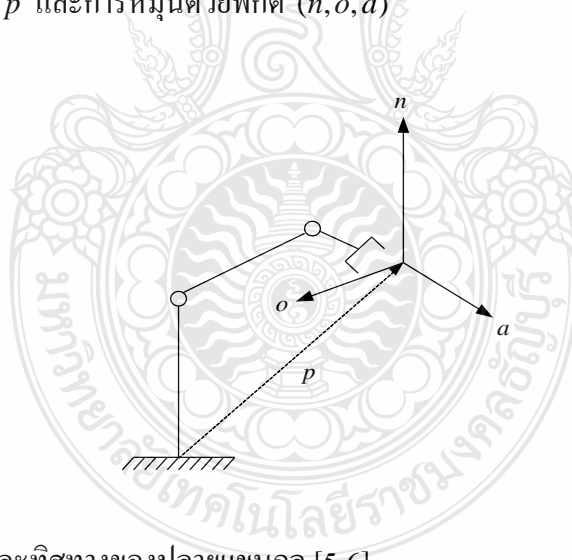
ได้ศึกษาเรียนรู้ระบบการควบคุมแบบยืดหยุ่นโดยใช้การจำลองการเคลื่อนที่จากสมการทางพลวัต และนำระบบควบคุมนี้ ไปประยุกต์ใช้งานได้จริงกับแขนกล CRS แบบ 3 แกน ตลอดจนการศึกษารหัสแวร์ที่นำมาป ะยุกต์ใช้งานกับแขนหุ่นยนต์จริง นอกจากนั้นยังเป็น ประโยชน์ในการประยุกต์ ใช้การควบคุมอุปกรณ์อื่นที่มีหลักการทำงานใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นยัง เป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาระบบการควบคุมความยืดหยุ่น อีกทั้ง ยังสามารถนำ ไปประยุกต์ใช้งานอุตสาหกรรมจริงได้ในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีจลนศาสตร์ (Kinematics) [5]

เป็นการศึกษาถึงตำแหน่ง (Position) ความเร็ว (Velocity) และความเร่ง (Acceleration) ของจุดๆใดจุดหนึ่งรวมถึงความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) และความเร่งเชิงมุม (Angular Acceleration) ของวัตถุ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จำเป็นที่จะใช้อธิบายถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) ตำแหน่งของวัตถุสามารถบอกได้จากตำแหน่งของจุดที่อยู่บนวัตถุ ประกอบกับตำแหน่งเชิงมุม (Angular Position) ของวัตถุนั้น หุ่นยนต์หรือแขนกลในทางจลนศาสตร์นั้นประกอบขึ้น มาจากการ ประกอบหรือการต่อกันของก้านโยง ซึ่งประมาณว่าก้านโยงนั้นมีคุณสมบัติเป็นวัตถุแข็งเกร็ง คือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีสิ่งใดมากระทำการต่อกันของแต่ละก้านโยงนั้นมีหลายวิธีซึ่งในการนำมาต่อกันนั้นเรียกได้ว่าเป็นจลนศาสตร์ลูกโซ่ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ก้านโยงและข้อต่อ การบอกตำแหน่งและการหมุนของปลายแขนกล (End Effector) สามารถแสดงอยู่ใน ภาพของการบอกตำแหน่งด้วยเวกเตอร์ p และการหมุนด้วยพิกัด (n, o, a)



ภาพที่ 2.1 ตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกล [5-6]

ส่วนประกอบทั้งสามกำหนด คขึ้นในระบบพิกัดตามแกนคาร์ทีเซียนที่ยึดติดอยู่กับฐานที่อยู่ กับที่ (Fixed Cartesian Frame at The Base) ของหุ่นยนต์ โดยที่เวกเตอร์ a คือเวกเตอร์มีขนาดหนึ่ง หน่วย มีทิศทางเคลื่อนที่พุ่งเข้าไปหาวัตถุ ส่วนเวกเตอร์ o มีทิศทางตามนิ้วจับชิ้นงานสองนิ้ว ในที่นี้

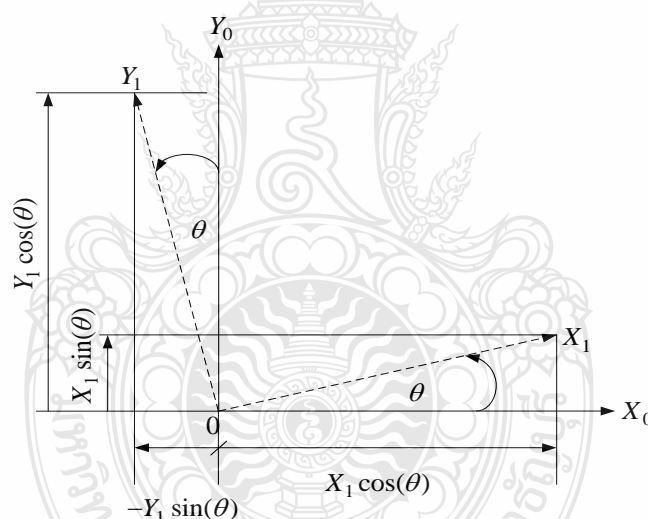
คือ มีทิศทางตามจุดปลายทั้งสองของนิ้วสองนิ้ว และเวกเตอร์ n คือ เวกเตอร์ที่ตั้งฉาก โดยเวกเตอร์ทั้งหมดนี้เป็นไปตามกฎมือขวา คือ

$$n = o \times a \quad (2.1)$$

การหมุนสามารถใช้วิธีการแบบอื่นได้ ดังเช่นวิธีการต่อไปนี้คือ

2.2 เมตริกซ์การหมุน [5-6]

เมตริกซ์การหมุน (Rotation Matrix) สัญลักษณ์ R เป็นตัวแปรที่ระบุว่าวัตถุที่มีการหมุนเปลี่ยนไปจากแกนอ้างอิง จากภาพที่ 2.2 จะหาเมตริกซ์การหมุนตามรอบแกน Z แกนอ้างอิงที่ 1 หมุนไปจากแกนอ้างอิงที่ 0 รอบแกน Z เป็นมุม θ

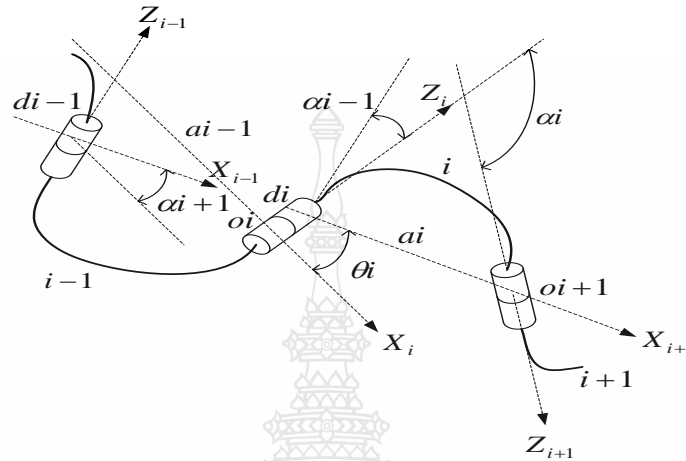


ภาพที่ 2.2 การหมุนรอบแกน Z [5]

2.3 พารามิเตอร์ของ Denavit – Hartenberg [5-6]

การสร้างแขนกล โดยทั่วไปนั้นมักประกอบไปด้วย ก้าน โยงที่ต่อกันแบบอนุกรมด้วยข้อต่อ จากนั้นจะกำหนดแกนอ้างอิงที่ติดกับวัตถุ (Body Fixed Coordinate) ในแต่ละก้าน โยงเพื่อคำนวณการเปลี่ยนแกนอ้างอิงจากแต่ละก้าน โยงไปยังปลายสุดท้าย หรือจุดปลายของแขน กล โดยทั่วไปมักเป็นมือที่ใช้จับชิ้นงาน จากการคำนวณนี้สามารถบอก ได้ว่าตำแหน่งใดในระนาบสามมิติ วิธีที่ขอมรับวิธี

หนึ่ง ได้แก่ Denavit-Hartenberg หรือใช้ตัวย่อเรียกสั้นๆ ว่า D-H Parameters จากภาพที่ 2.3 บอกถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ใน D-H Parameters ในกรณีของข้อต่อแบบหมุน (R: Revolute Joint) ตัวแปรที่เปลี่ยนแปลง (Variable) คือ มุม θ โดยระยะระหว่างข้อต่อ d คงที่



ภาพที่ 2.3 D-H Rotation for Revolute Joints [5]

นิยามของตัวแปรที่มีดังนี้

- a_i = ระยะจากแกน Z_{i-1} ถึงแกน Z_i วัดตามแนวแกน X_i
- d_i = ระยะจากแกน X_{i-1} ถึงแกน X_i วัดตามแนวแกน Z_{i-1}
- α_i = มุมบิด (Twist Angle) ถึงแกน Z_{i-1} กับ Z_i รอบแกน X_i
- θ_i = มุมระหว่างแกน X_{i-1} ถึงแกน X_i หมุนรอบแกน Z_{i-1}

วิธีการกำหนดแกนมีดังนี้

1. เริ่มจากที่ฐานกำหนดแกนอ้างอิงเป็น 0 ร่วมกับแกนอ้างอิงหลัก (World Coordinate Frame)
2. กำหนดแกนในแต่ละแกน โยง ตามกฎมือขวาโดยแกนหมุนเป็นแกนเริ่มต้นที่ 0 เช่น Z_0 ในส่วนของข้อต่อแบบหมุน
3. กำหนดแกนของก้าน โยง ถัดไปให้ดูตามแกนการหมุน โดยให้แกนนั้นเป็นแกน Z_1
4. ทิศทางของแกน X_1 หาได้โดยได้มาจากผลลัพท์ของ Cross Product $Z_0 \times Z_1$ แกนแต่ละแกนจะถูกกำหนดที่ส่วนปลายของข้อต่อ (Distal Joint) ของก้าน โยง
5. กรณีมีระยะออฟเซตจะมีระยะ d หรือถ้าไม่มี $d=0$
6. แกน Z อยู่ร่วมในแนวเดียวกับแกนการหมุน

2.4 การออกแบบระบบควบคุมของแขนกล [7]

ถ้าพิจารณาแขนกลในระนาบที่มีการเชื่อมต่อกันของ 2 ข้อต่อและดังแสดงในภาพที่ 2.4 ซึ่งตำแหน่งของแขนกลนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยเวกเตอร์ θ ของ 2 มุมรวม และมีอินพุตจากตัวขับเคลื่อนที่ประกอบไปด้วย 2 เวกเตอร์ τ ของ 2 แรงบิด (Torque) ที่ประยุกต์ใช้ในข้อต่อของแขนกล พลวัตของแขนกลแบบพื้นฐานนั้นเป็นสมการแบบไม่เชิงเส้น และสามารถเขียนในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

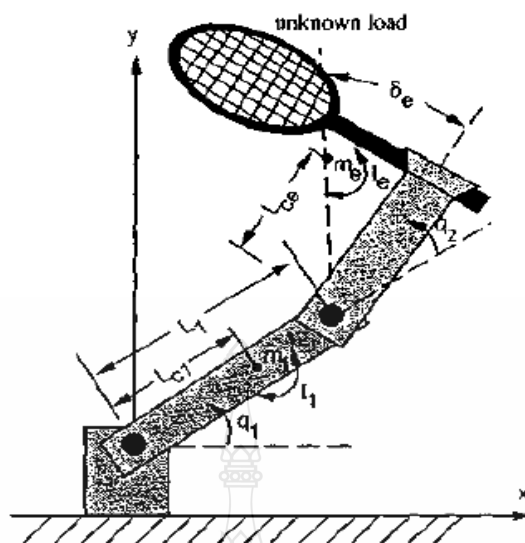
$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta) = \tau \quad (2.2)$$

เมื่อ $M(\theta)$ เป็นเมตริกซ์ความเฉื่อยของแขนหุ่นที่มีขนาด 2×2 ซึ่งเป็นจำนวนเต็มที่เป็นบวกและสมมาตร และ $C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta}$ เป็นเมตริกซ์ของแรงบิดเข้าหาศูนย์กลางและแรงบิดแบบ Coriolis โดยที่ $C(\theta, \dot{\theta})$ เป็นเมตริกซ์ที่มีขนาด 2×2 และ $g(\theta)$ เป็นเมตริกซ์ของแรงบิด เนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

ปัญหาการควบคุมแบบป้อนกลับสำหรับ ระบบนั้นคือการคำนวณหาอินพุตของตัวขับเคลื่อนเพื่อทำการกิจที่ต้องการ เช่น การเคลื่อนที่ตามวิถีโคจรที่ต้องการ เพื่อให้ได้เวกเตอร์ θ ของมุมรวม และเวกเตอร์ $\dot{\theta}$ ของความเร็วเชิงมุมรวมตามที่ต้องการ

เมตริกซ์ของ ความเฉื่อย M นั้นจะมีค่าที่ขึ้นอยู่กับ มุมรวม θ ซึ่งสามารถอธิบายให้สอดคล้องกับ ลักษณะทางกายภาพ ของแขนกลได้ดัง ตัวอย่างเช่น เมื่อมองจา กส่วนบ่าของมัน แขนที่ยื่นออกไปจะมีความเฉื่อยที่มากกว่าความเฉื่อยของแขนที่พับอยู่ ส่วนแรงบิดที่พุ่งเข้าหาศูนย์กลางนั้น จะมีค่าขึ้นกับกำลังสองของความเร็ว เชิงมุมรวมของแต่ละแกน ในขณะที่แรงบิดแบบ Coriolis นั้นเปลี่ยนแปลงไปตามผลคูณของความเร็ว เชิงมุม ที่จุดรวมที่แตกต่างกัน 2 จุดจะสามารถสังเกตได้ว่า พลังงานจลศาสตร์ของแขน กล (T) นั้นมีรูปสมการคล้าย ๆ กับ $\frac{1}{2}mv^2$ หรือพลังงานจลน์ของระบบแบบเชิงเส้นที่มีหนึ่งองศาอิสระในการเคลื่อนที่ (One Degree-of-Freedom)

$$T = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T H(\theta) \dot{\theta} \quad (2.3)$$



ภาพที่ 2.4 แขนแบบมีส่วนเชื่อมต่อ 2 ข้อต่อ [7]

จากสูตรนอร์มัลเมตริกซ์ความเฉื่อย $M(\theta)$ ซึ่งจะมีค่าที่เป็นบวกเสมอ ซึ่งจะสอดคล้องกับพลังงานจลนศาสตร์ที่จะต้องมีค่าเป็นบวกสำหรับ มุมของข้อต่อ θ ใดๆ และความเร็วจข้อต่อที่ไม่เป็นศูนย์ $\dot{\theta}$ ในการหาระบบควบคุม ของแขนกลนั้นเราจะใช้ข้อเท็จจริงที่เมตริกซ์ $M(\theta)$ นั้นจะมีเป็นค่าบวกเสมอ นั่นคือว่าจะมีค่าคงที่ $\alpha > 0$ สำหรับมุมของแต่ละข้อต่อ θ ทั้งหมดในพื้นที่ทำงานของแขนกลที่จะทำให้

$$M(\theta) \geq \alpha I$$

เมื่อ I เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ จากคุณสมบัตินี้เราสามารถเห็นได้โดยการสังเกตว่า ถ้าไม่มีค่า $\alpha > 0$ จะส่งผลให้มีมุม θ ในพื้นที่ทำงาน ของแขนกล ซึ่งมีเมตริกซ์ความเฉื่อยที่มีค่าคุณลักษณะ (Eigenvalue) เป็นศูนย์เนื่องจากพื้นที่ทำงาน ของแขนกลนั้นเป็นเซตที่มีค่าใกล้เคียงกัน ถ้าให้ v_0 เป็นเวกเตอร์ลักษณะ (Eigenvector) ที่สัมพันธ์กับค่าคุณลักษณะที่เป็นศูนย์ แขนกลสามารถเคลื่อนไหวด้วยความเร็วที่มีค่าเป็น $(v_0 / \|v_0\|)$ แต่ด้วยพลังงานจลนศาสตร์ที่ศูนย์ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ เมื่อแขนกลมีการเคลื่อนที่ ดังนั้น $M(\theta)$ จะต้องเป็นบวกแน่นอน

2.5 การดำเนินการของจลนศาสตร์ทางตรง (Transformation Operators) [5-6]

โดยทั่วไปในวิชาการหุ่นยนต์นั้น จุดสนใจจุดหนึ่ง คือ ตำแหน่งของวัตถุในระนาบสามมิติ โดยมีเมตริกซ์การหมุน ซึ่งบอกถึงการหมุนของวัตถุในสามมิติ และเพิ่มการ เคลื่อนที่แบบเลื่อนเข้าไป ในคอลัมน์ ทางด้านขวา จะได้เมตริกซ์ใหม่ ที่เรียกว่า เมตริกซ์การเปลี่ยนพิกัด (Transformation Operators) โดยเป็นเมตริกซ์ขนาด 4x4 มีลักษณะดังสมการที่ 2.4

$$T_{NA} = \begin{bmatrix} \text{Rotation}_{(3 \times 3)} & \text{Translation}_{(3 \times 1)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

โดย N คือ แกนอ้างอิงเริ่มต้นและ A คือ แกนอ้างอิงสุดท้ายเช่นวัตถุมีการหมุนรอบแกน x_0 เป็นมุม θ และเลื่อนไปยังตำแหน่ง (1,1,0) ดังนั้นตำแหน่งของแกนอ้างอิงที่ 1 เมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงที่ 0 จะสามารถเขียนแสดงได้ดังนี้

$$T_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ 0 & -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

ในทำนองเดียวกัน Transformation Operators นี้มีคุณสมบัติคล้ายกับเมตริกซ์การหมุน คือ สามารถนำมาคูณต่อกัน สำหรับกรณีที่มีการเคลื่อนย้ายวัตถุในหลายๆ แกนอ้างอิง เช่น

$$T_{03} = T_{01}T_{12}T_{23} \quad (2.6)$$

ดังสมการที่ 2.6 แสดงถึง T_{03} สามารถอ้างอิงจากแกนอ้างอิงที่ 0 ไปยังแกนอ้างอิงที่ 3 แต่อย่างไรก็ตาม การหา ค่าผกผัน (Inverse) ของเมตริกซ์ T นั้นไม่เหมือนกับเมตริกซ์การหมุน เพราะ Transformation Operator ไม่มีคุณสมบัติที่ตั้งฉากกันและผลคูณเป็นหนึ่งหน่วย (Orthornormal) สูตรการคำนวณหาเมตริกซ์ผกผันของ T จะได้ดังสมการที่ 2.7

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} R^T & \vdots & -R^T P \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)} \quad (2.7)$$

2.6 การสร้างสมการแบบลากรานจ์ (Lagrange Formulation) [8]

แบบจำลองพลวัตของหุ่นยนต์ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง องศาการหมุน แรงบิด และการเคลื่อนที่ของ โครงสร้างหุ่นยนต์ ด้วยการสร้างสมการแบบลากรานจ์ (Lagrange Formulation)

$$L = T - U \quad (2.8)$$

เมื่อ T และ U คือพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบตามลำดับ ซึ่ง ผลรวม (L) เป็นพลังงานทั้งหมดของระบบ

สมการลากรานจ์ (Lagrange) สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังในสมการที่ 2.9

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial \theta_i} \right) = Q_i \quad i = 1, \dots, n \quad (2.9)$$

เมื่อ Q_i คือ แรงสุทธิต่อกระทำกับระบบในพิกัด θ_i เมื่อนำสมการที่ 2.9 มาเขียนใหม่ในรูปเมตริกซ์ให้ดูกระชับขึ้นจะได้เป็นสมการที่ 2.10

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right)^T - \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \right)^T = Q \quad (2.10)$$

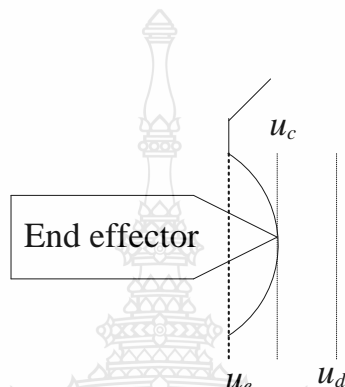
สมการ ลากรานจ์ ข้างต้น นี้สามารถใช้ สร้าง สมการพลวัต ของระบบทางกลต่างๆ ไป โดยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ สร้างสมการพลวัต ของแขนกล และสามารถนำไปจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อจะนำมา ใช้ในการควบคุมตำแหน่ง ความเร็ว หรือ ความเร่ง

2.7 การควบคุมแบบยืดหยุ่น (Stiffness Control) [9]

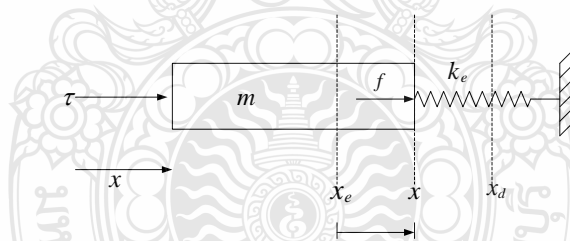
แนวคิดเบื้องต้นของ การควบคุมความยืดหยุ่น ให้พิจารณาปัญหาของการควบคุมแรงของระบบอธิบายภาพที่ 2.5 เมื่อสมมุติว่าปลายแขนของ แขนกล สัมผัสกับสิ่งแวดล้อมที่ตำแหน่ง u_c ปัญหาของการควบคุมคือการกำหนดแรงให้ แขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการในระบบนั้น หากสมมุติตำแหน่งของปลายแขน กลมากกว่าตำแหน่ง u_c ที่กำหนดแรงกระทำต่อสิ่งแวดล้อมจะถูกหาได้จาก

$$f = K_e(u_c - u_e) \quad (2.11)$$

เมื่อ K_e คือ ค่าคงที่ใช้กำหนดความยืดหยุ่นของ ingsสัมผัส โดยเป็นการสมมุติค่าความยืดหยุ่นของสภาพแวดล้อมในระบบ ซึ่งสามารถสร้างสมมุติฐานดังกล่าวให้อยู่ในรูปแบบจำลองด้วยสปริงที่กำหนดค่าความยืดหยุ่นเป็น K_e จากสมมุติฐานสามารถพิจารณาให้ระบบเป็นการเคลื่อนที่ในหนึ่งองศาอิสระ โดยระบบมวลและสปริงดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.5 ระบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลแบบหนึ่งองศาอิสระ



ภาพที่ 2.6 แผนภาพอิสระที่จำลองระบบในรูปแบบมวลและสปริงที่เชื่อมต่อกัน

สมมุติฐานนั้นไม่คำนึงถึงแรงโน้มถ่วงและแรงเสียดทาน จากระบบในภาพ ที่ 2.6 สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของระบบได้เป็น

$$\tau = m\ddot{x} + K_e(x - x_c) \quad (2.12)$$

2.7.1 เมตริกซ์จาโคเบียนและแรงจากสิ่งแวดล้อม

ก่อนกล่าวถึงระบบควบคุมความยืดหยุ่นจะกล่าวถึง แขนกลแบบหลายก้านโยง (n-link) เราจะต้องกำหนดสัญลักษณ์ในการพิจารณาแรงของแขนกลที่กระทำต่อสิ่งแวดล้อม อธิบายถึงแรงกระทำในทิศทางจากและแรงกระทำในทิศทางกับพื้นผิวโดยใช้เมตริกซ์จาโคเบียน ในส่วนนี้เราจะกำหนดเมตริกซ์จาโคเบียนในเทอมของระบบพิกัดพื้นที่ที่สามารถเข้าถึงได้ ซึ่งแนวคิด นี้นำมาประยุกต์ใช้งานอธิบายดัง ภาพที่ 2.7 แสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ของ แขนกล ได้เคลื่อนไปตามพื้นผิวลาดเอียงตามระบบพิกัดพื้นที่ผิวสัมผัสซึ่งได้กำหนดทิศทางเป็นพิกัด u และ v โดยการเคลื่อนที่ของตำแหน่งปลายแขนกลขนานไปตามพื้นผิวสัมผัสในทิศทาง v ในขณะที่กำหนดให้แรงตั้งฉากกับพื้นผิวไปตามทิศทาง u วิธีนี้เหมาะกับการนำแขนกลไปประยุกต์ใช้งานให้เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับค่า x คือเวกเตอร์ของพื้นที่ที่เข้าถึงได้

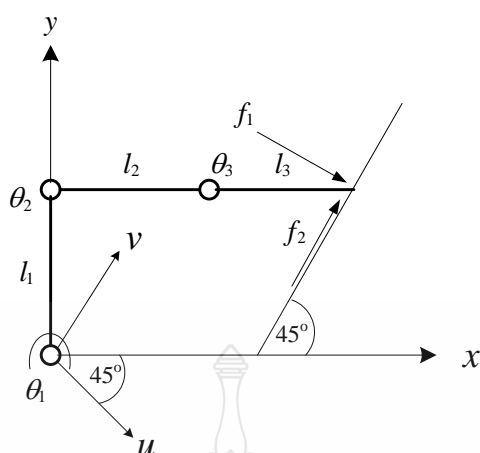
$$x = h(\theta) \quad (2.13)$$

เมตริกซ์ $h(\theta)$ คำนวณมาจากสมการจลนศาสตร์ของแขน กลซึ่งเป็นค่าพิกัดตำแหน่งของปลายแขนกลซึ่ง มีความสัมพันธ์กับองศาการหมุนของข้อต่อ และพื้นที่ที่เข้าถึงได้ ค่าอนุพันธ์ของ x แสดงในสมการที่ 2.14

$$\dot{x} = J(\theta)\dot{\theta} \quad (2.14)$$

ซึ่งเมตริกซ์จาโคเบียนของพื้นที่ที่เข้าถึงได้ $J(\theta)$ คือ

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} \frac{\partial h(\theta)}{\partial \theta} \quad (2.15)$$



ภาพที่ 2.7 การเคลื่อนที่ของแขนกลไปตามพื้นผิวเอียง 45°

เมตริกซ์เอกลักษณ์ I และเมตริกซ์การแปลงพิกัด T มีขนาดขึ้นอยู่กับระบบพิกัดพื้นที่ที่เข้าถึงได้ เมตริกซ์การแปลงพิกัดโดยทั่วไปนำมาประยุกต์ใช้เมื่อ ความเร็วของข้อต่อ เป็นการหมุนในระบบของสภาวะกลิ้ง (Roll) องศาปีกแล้วเงย (Pitch) และองศาการหันเห (Yaw) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับเป้าหมายของปลายแขน เราตั้งสมมุติฐานของ แขนกล ที่กล่าวถึงในส่วนนี้ว่า ไม่มีความซ้ำซ้อน (Nonredundant) และไม่เป็นเอกพจน์ (Nonsingular) เสมอ ดังนั้นเมตริกซ์จาโคเบียนจึงเป็นเมตริกซ์ที่ไม่เป็นเอกลักษณ์

จากแนวคิดระบบพิกัดของ ปฏิภูมิของงาน หากเราพิจารณาสมการของ แขนกลใหม่โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาให้สามารถควบคุมตำแหน่งและแรงปลายแขนกลเมื่อสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมได้ โดยแรงที่กระทำระหว่างปลายแขนและสิ่งแวดล้อม เป็นแรงปฏิกิริยา สำหรับพื้นที่ที่เข้าถึงได้ โดยสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของแขนกล

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + V_m(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + F(\dot{\theta}) + \tau_e \quad (2.16)$$

เมื่อ τ_e คือ แรงบิดจากภายนอกที่กระทำต่อแขนกลในพื้นที่ที่เข้าถึงได้ สมการการเคลื่อนที่ของแขนกลขณะแขนกลไม่มีการเคลื่อนที่คือ

$$\tau = G(\theta) + \tau_e \quad (2.17)$$

เป็นสมการของหุ่นยนต์ในสภาวะหยุดนิ่ง แรง บิดที่ใช้ในการรักษาตำแหน่งมีค่าเท่ากับ แรงบิดกระทำต่อสิ่งแวดลอมรวมกับแรง บิดที่ต้องเอาชนะ จากแรงดึงดูดของโลก โดยสมการ ที่ 2.17 เราไม่พิจารณาถึงแรง บิดเนื่องจากแรงเสียดทานในระบบ จากที่กล่าวข้างต้นสมการในรูปทั่วไปของ แขนกลคือ

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + V_m(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + F(\dot{\theta}) + J^T(\theta)f \quad (2.18)$$

เมื่อ f คือ เวกเตอร์แรงที่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม
สมการที่ 2.18 มีค่าเท่ากับสมการที่ 2.16 โดยพิจารณาด้านขวา ของทั้งสองสมการจะได้ ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\tau_e = J^T(\theta)f \quad (2.19)$$

สมการนี้สามารถพิสูจน์ได้อย่างง่าย โดยการใช้อนุกรมอนุพันธ์พลังงาน จากอนุพันธ์ พลังงานที่เกิดจากแรงบิด นั้นต้องเท่ากับพลังงานที่เกิดจากแรงเชิงเส้น จะได้ว่า

$$\dot{\theta}^T \tau_e = \dot{x}^T f \quad (2.20)$$

เมื่อแทนสมการที่ 2.14 ไปในสมการที่ 2.20 จะได้

$$\dot{\theta}^T \tau_e = \dot{\theta}^T J^T(\theta)f \quad (2.21)$$

2.7.2 การควบคุมความยืดหยุ่นของแขน กลที่มีหลายก้านโยง (Stiffness Control of an N-Link Manipulator)

จุดประสงค์ของระบบการควบคุมนี้จะกำหนดหาแรงบิด (τ) ที่จะส่งไปยังมอเตอร์ในแต่ละข้อต่อเพื่อ ควบคุมให้แขน กลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ (x_d) โดยแรงที่กระทำต่อ สิ่งแวดล้อมกำหนดได้ดังสมการที่ 2.22

$$f = K_e(x - x_e) \quad (2.22)$$

เมื่อ K_e คือเมตริกซ์ ในแนวเส้นทแยงมุมที่เป็นค่าคงที่ ที่ใช้กำหนดความยืดหยุ่นของ สิ่งแวดล้อม และ x_e คือเวกเตอร์ของตำแหน่งของพื้นผิวสัมผัสในลักษณะปกติ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะ ให้แขนกลหยุดนิ่งอยู่บนชิ้นงาน

หมายเหตุ ถ้าแขนกลไม่ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ในบางทิศทางบนพื้นที่ของการทำงาน K_e ใน แนวทแยงมุมของเมตริกซ์ในทิศทางนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ นอกจากนี้แล้วแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสกับ สิ่งแวดล้อมนั้น โดยทั่วไปจะถูกละไว้ใน การควบคุมความยืดหยุ่น

สมการ ระบบ ควบคุมความยืดหยุ่น ในหลายมิตินั้นจะใช้ระบบควบคุมแบบ PD ดังใน สมการที่ 2.23

$$\tau = J^T(\theta)(-K_v \dot{x} + K_p \tilde{x}) + G(\theta) + F(\dot{\theta}) \quad (2.23)$$

เมื่อ K_p และ K_v คือเมตริกซ์ในแนวทแยงมุม ที่เป็นค่าคงที่และเป็นเมตริกซ์ที่มีค่าบวก เสมอ และค่าความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดของปริภูมิพื้นที่งานถูกนิยามโดย

$$\tilde{x} = x_d - x \quad (2.24)$$

ดังที่กล่าวข้างต้นค่า x_d คือ แสดงถึงตำแหน่งของปลายแขนที่เป็นค่าคงที่ที่ต้องการโดยให้ แขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนดดังกล่าว ซึ่ง x_d จะเป็นเวกเตอร์ที่มีมิติ $n \times 1$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการ ที่ 2.22 และสมการ ที่ 2.23 ลงในสมการ ที่ 2.18 จะได้ระบบ พลวัต แบบลูปปิดดังนี้

$$M(\theta)\ddot{\theta} + V_m(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} = J^T(q)(-K_v \dot{x} + K_p \tilde{x} - K_e(x - x_e)) \quad (2.25)$$

เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพ ของระบบ ในสมการที่ 2.25 โดยใช้ฟังก์ชัน Lyapunov-Link ดังต่อไปนี้จะได้

$$V = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta} + \frac{1}{2} \tilde{x}^T K_p \tilde{x} + \frac{1}{2} (x - x_e)^T K_e \quad (2.26)$$

เมื่อทำการอนุพันธ์สมการที่ 2.26 เทียบกับเวลาและใช้สมการที่ 2.14 จะได้

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \dot{\theta}^T M(\theta) \dot{\theta} - \dot{\theta}^T M(\theta) \ddot{\theta} - \dot{\theta}^T J^T(\theta) K_p \tilde{x} + \dot{\theta}^T J^T(\theta) K_e (x - x_e) \quad (2.27)$$

หมายเหตุใน สมการที่ 2.27 เราใช้ เงื่อนไข ของ x_e และ x_d ที่เป็นค่าคงที่และการหา ทรานสโพสค์ของฟังก์ชันแบบสเกลาร์ หรือเมตริกซ์ในแนวทแยงมุมนั้นจะทำกับฟังก์ชันหรือ เมตริกซ์นั้นๆ หากแทนสมการที่ 2.25 ในสมการที่ 2.27 และใช้สมการที่ 2.14 จะได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\dot{V} = \dot{\theta}^T \left(\frac{1}{2} \dot{M}(\theta) - v_m(\theta, \dot{\theta}) \right) \dot{\theta} - \dot{\theta}^T J^T(\theta) K_v J(\theta) \dot{\theta} \quad (2.28)$$

นำคุณสมบัติของเมตริกซ์แบบสมมาตรและ Skew มาประยุกต์ใช้ในสมการที่ 2.28 จะได้

$$\dot{V} = -\dot{\theta}^T J^T(\theta) K_v J(\theta) \dot{\theta} \quad (2.29)$$

ซึ่งจะมีค่าติดลบเสมอและเนื่องจาก เมตริกซ์ $J(\theta)$ และ $J^T(\theta) K_v J(\theta)$ เป็นเมตริกซ์ซึ่งไม่เป็นเอกพจน์ดังนั้น V จะมีค่าเป็นศูนย์ตามเส้นทางการเคลื่อนที่ ที่มีค่า $\theta = 0$ เท่านั้น เมื่อแทน $\theta = 0$ ในสมการที่ 2.25 และนำสมการที่ 2.14 มาประยุกต์ใช้จะได้

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [K_p \tilde{x} - K_e (x - x_e)] = 0 \quad (2.30)$$

หรือมีค่าเทียบเท่ากับ

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_i = (K_{pi} + K_{ei})^{-1} (K_{pi} x_{di} + K_{ei} x_{ei}) \quad (2.31)$$

เมื่อตัวห้อย i ใช้แสดงส่วนประกอบลำดับที่ i ของเวกเตอร์ x, x_d, x_e และส่วนประกอบ ในแนวทแยงมุมลำดับที่ i ของเมตริกซ์ K_p และ K_e

การวิเคราะห์เสถียรภาพข้างต้นนั้นสามารถตีความหมายได้ว่าแกนกลจะหยุดการเคลื่อนที่ที่ ต่อเมื่อพิกัดของพื้นที่งาน เป็นไปตามเงื่อนไขในสมการที่ 2.31 นั่นคือตำแหน่งสุดท้ายของปลายแกน กลจะถูกกำหนดโดยสมการ ที่ 2.31 เพื่อให้ได้ส่วนประกอบลำดับที่ i ของแรงที่กระทำต่อ สิ่งแวดล้อม ในสภาวะคงตัว จะทำการแทนค่า สมการที่ 2.31 ไปในแต่ละองค์ประกอบ ที่ i ของสมการที่ 2.22 จะ ได้

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f_i = K_{ei} (K_{pi} + K_{ei})^{-1} K_{pi} (x_{di} - x_{ei}) \quad (2.32)$$

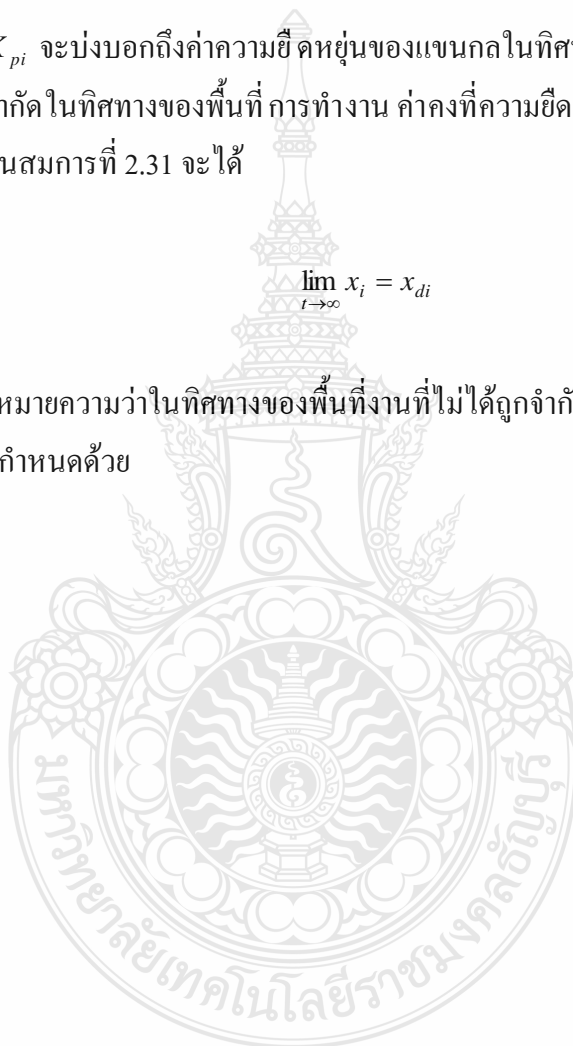
ดังนั้นแรงในสภาวะคงตัวที่กระทำโดยปลายแขนต่อสิ่งแวดล้อมในสมการที่ 2.32 เมื่อเทียบกับในกรณีที่มีเพียงหนึ่งองศาอิสระในการเคลื่อนที่โดยสมมติให้ค่า K_{ei} นั้นมีค่ามากกว่าค่า K_{pi} ในทิศทางที่จะควบคุมแรงที่ผิวสัมผัสดังนั้นแรงในสภาวะคงตัวจะประมาณได้เป็น

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f_i \cong K_{pi}(x_{di} - x_{ei})$$

ดังนั้นค่า K_{pi} จะบ่งบอกถึงค่าความยืดหยุ่นของแขนกลในทิศทาง i ของพื้นที่การทำงานนั้น ถ้าแขนกลไม่ถูกจำกัดในทิศทางของพื้นที่การทำงาน ค่าคงที่ความยืดหยุ่นจะเป็น $K_e = 0$ ฉะนั้นเมื่อแทนค่า $K_{ei} = 0$ ในสมการที่ 2.31 จะได้

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_i = x_{di} \tag{2.33}$$

ผลที่ได้นั้นหมายความว่าในทิศทางของพื้นที่งานที่ไม่ได้ถูกจำกัด เราจะได้การควบคุมการเคลื่อนที่ตามจุดพิคัดที่กำหนดด้วย



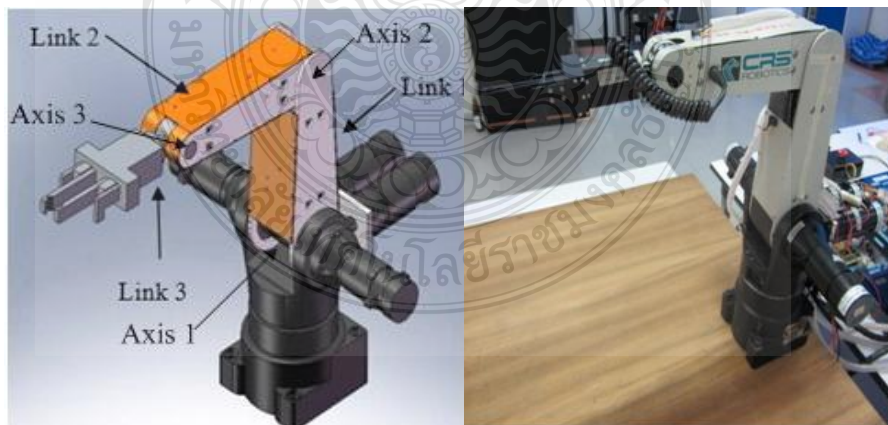
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 หุ่นยนต์ต้นแบบ CRS Robot

จากคำจำกัดความด้านหุ่นยนต์ตามมาตรฐาน ISO 8373 หุ่นยนต์คือเครื่องจักรที่ถูกควบคุมอัตโนมัติ สามารถโปรแกรมการทำงานใหม่ได้ ใช้งานได้เอนกประสงค์ และสามารถโปรแกรมการเคลื่อนที่ได้อย่างน้อย 3 แกนหรือมากกว่า โดยหุ่นยนต์อาจจะยึดอยู่กับที่ (Fixed Robot) หรือสามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้ (Mobile Robot) เพื่อใช้งานอุตสาหกรรม หุ่นยนต์ที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือแขนกล CRS ชนิด 5 แกน รุ่น A255 P/A RSA-14-103 ได้ถูกสร้างขึ้นเมื่อปี 1995 โดยบริษัท CRS Robotics Corporation ประเทศแคนาดา จากโครงสร้างของหุ่นยนต์ CRS รุ่น A255 เป็นหุ่นยนต์แบบยึดอยู่กับที่ (Fixed Robot) ที่มีจุดหมุน 5 จุด ซึ่งประกอบด้วยลิงก์และมือจับ ซึ่งมือจับเป็นข้อต่อส่วนสุดท้ายของแขนกล ในงานวิจัยนี้ไม่จำเป็นต้องใช้มือจับจึงได้ถอดมือจับออกแล้วติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการกวดผิวสัมผัสแทนมือจับ

เนื่องจากหุ่นยนต์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานจึงเกิดความเสียหายที่เฟืองเกียร์แกนที่ 1 หรือที่ฐานของหุ่นยนต์ซึ่งไม่สามารถหาอะไหล่มาเปลี่ยนทดแทนได้ ทำให้การทดลองสามารถทำได้เพียง 3 แกนเท่านั้น ดังนั้นแกนที่ 1 ซึ่งเป็นแกนด้านล่างสุด ซึ่งเป็นองค์ประกอบของฐานไม่สามารถใช้งานได้จึงเปลี่ยนการนับแกนที่ 2 เป็นแกนที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของแขนกล CRS Robotic

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

นอกเหนือจากแขนหุ่นยนต์ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 3.1 แล้วนั้นยังมีอุปกรณ์อื่นๆ ที่ได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย อุปกรณ์ที่ใช้จะจำแนกชนิดตามลักษณะการใช้ ได้แก่ ภาคจ่ายกระแสไฟ ภาคควบคุมการทำงานอุปกรณ์ ภาคประมวลผล โดยองค์ประกอบแต่ละส่วนมีดังนี้

ภาคจ่ายกระแสไฟ ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อเลี้ยงอุปกรณ์ต่างๆ ให้ทำงานได้ โดยแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นแบบ DC ซึ่งในระบบไฟฟ้าต้องการความต่างศักย์ที่ 24 V 12 V และ 5V โดยไฟเลี้ยง 24 V นำไปใช้กับกล่องควบคุมไครฟ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ ส่วนไฟเลี้ยง 12 V ถูกนำไปใช้กับระบบเบรกในแต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ และไฟเลี้ยง 5 V สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM 7 ลักษณะของอุปกรณ์เป็นดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 V ด้านซ้าย และชนิดปรับค่าแรงดัน 0-30 V ด้านขวา

ภาคควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ ในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยกล่องวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ Accelus รุ่น ASP-090-36 และ การ์ดรับส่งข้อมูลของ NI PCI-6221 กล่องวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่เรานำมาใช้ควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปยังมอเตอร์แต่ละแกน ส่วนการ์ดรับส่งข้อมูลเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับสัญญาณดิจิทัลอินพุตจากลิมิตสวิตช์ นอกจากนี้แล้วตัวการ์ดรับส่งข้อมูลยังทำหน้าที่ผลิตสัญญาณอนาล็อกเอาต์พุตและสัญญาณ PWM เพื่อนำสัญญาณไปควบคุมการทำงานของไครฟ์ขับเคลื่อนมอเตอร์ ส่วนคอมพิวเตอร์รับสัญญาณจากพอร์ตอนุกรม หรือ RS232 จากไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 3.3 มอเตอร์ไดรฟ์ Accelus รุ่น ASP-090-36

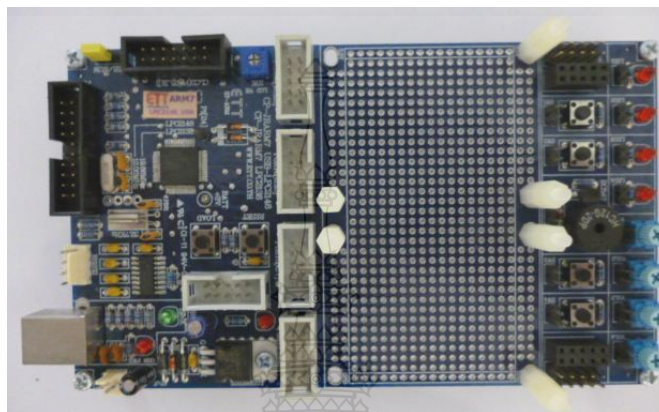
มอเตอร์ไดรฟ์ รุ่น ASP-090-18 จากบริษัทผู้ผลิต Copley Control Corporation ใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้ตั้งค่าการใช้งานในโหมดควบคุมกระแสเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าตามที่ต้องการ เพื่อให้ควบคุมแรงบิดของมอเตอร์แต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ ลักษณะของอุปกรณ์เป็นดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.4 การ์ด DAQ NI PCI – 6221

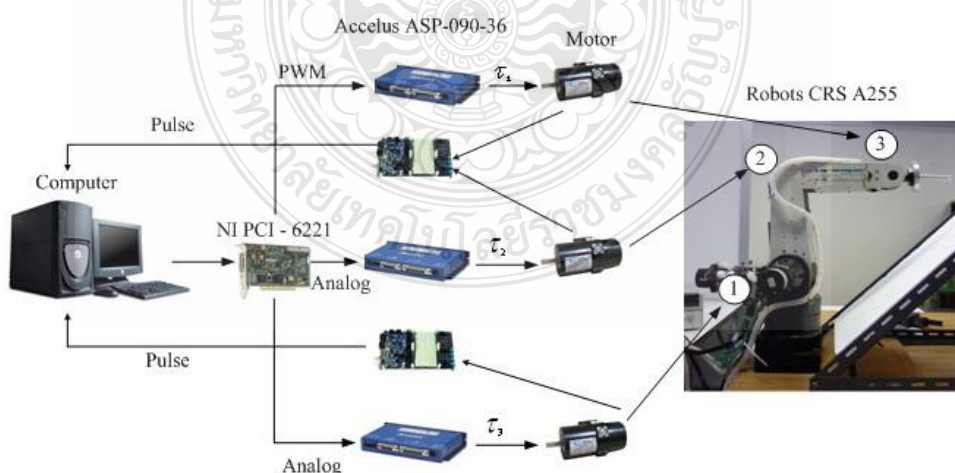
การ์ด DAQ NI PCI – 6221 จากบริษัทผู้ผลิต National Instruments ใช้งานร่วมกับโปรแกรม LabVIEW นำมาใช้ในการผลิตสัญญาณ นาลอกเอาต์พุตและสัญญาณ PWM เพื่อนำสัญญาณไปควบคุมการทำงานของรีฟซ์มอเตอร์ พร้อมทั้งเก็บข้อมูล ลักษณะของอุปกรณ์เป็นดังภาพที่ 3.4

ในส่วนสุดท้ายภาคประมวลผลนั้นประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ และไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM7 คอมพิวเตอร์นำมาใช้ในการประมวลผลผลการควบคุมการทำงานของแขนหุ่นยนต์ ด้วยโปรแกรม LabVIEW และ ARM7 ได้เขียนโปรแกรมเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการนับตำแหน่งของเอ็นโค้ดเดอร์ ลักษณะของอุปกรณ์เป็นดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น CP-jr ARM7 USB-LPC2148 EXP

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM7 รุ่น LPC2148 จากบริษัทผู้ผลิต Philips ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานโดยเขียนโปรแกรมในการอ่านสัญญาณเอ็นโค้ดเดอร์ เพื่ออ่านค่าตำแหน่งองศาการหมุนของมอเตอร์แต่ข้อต่อ



ภาพที่ 3.6 อุปกรณ์โดยรวมที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่แขนกล

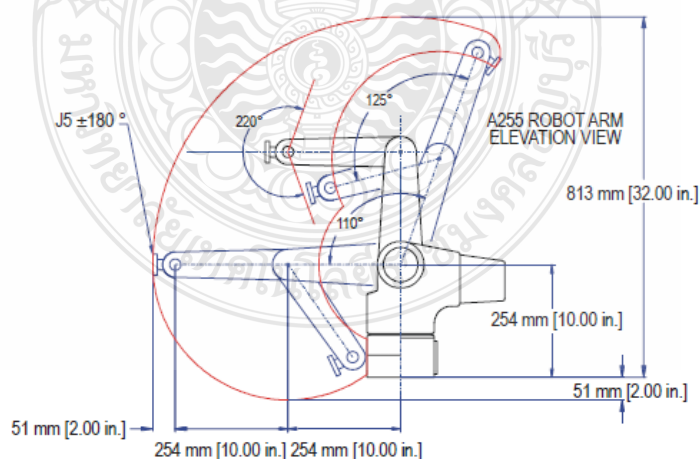
3.3 ค่าพารามิเตอร์ของแขนหุ่นยนต์

ในศาสตร์ของการควบคุมหุ่นยนต์จะมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งได้จากการวัดและค่าพารามิเตอร์บางอย่างมีความซับซ้อนสามารถหาได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เช่น จาโคเบียน เมตริกซ์ เมตริกซ์ความเฉื่อย และเมตริกซ์แรงบิดเนื่องจากแรงโน้มถ่วง เป็นต้นค่าเหล่านี้จะกล่าวในหัวข้อที่ 3.5 ส่วนนี้เราจะนำเสนอค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการ วัดโดยได้นำค่ามาจากคู่มือของแขนกล CRS รุ่น A255 ดังแสดงค่าตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติต่างๆ ของแขนกล CRS รุ่น A255 ที่ใช้ในการวิจัยนี้

| Axis | Range of Motion | Maximum Speed | Default Acceleration | Gear Ratio | Torque Rating |
|---------|-----------------|---------------|----------------------|------------|-----------------------|
| Joint 1 | 0° ถึง +110° | 210°/s | 498°/s ² | 72:1 | 9.6 N-m [85 in.-lb] |
| Joint 2 | -125° ถึง 0° | 210°/s | 498°/s ² | 72:1 | 9.6 N-m [85 in.-lb] |
| Joint 3 | ±110° | 675°/s | 2240°/s ² | 72:1 | 2.7 N-m [24.3 in.-lb] |

ค่าพารามิเตอร์แรกคือองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์หากพิจารณาารวมกันทั้ง 3 ข้อต่อก็แสดงการเข้าถึงของพื้นที่การทำงาน (Workspace) ที่แขนกล CRS สามารถเคลื่อนที่ไปได้หรือเข้าถึงได้ซึ่งแสดงในภาพที่ 3.7 นอกจากนั้นยังแสดงขนาดมุมของแต่ละแกนของแขนกล CRS ที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้

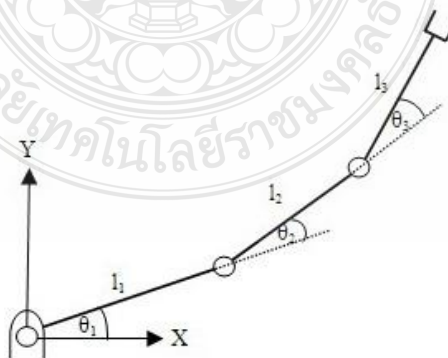


ภาพที่ 3.7 ความยาวระหว่างแต่ละแกนขนาดมุมของแต่ละแขน [10]

ข้อสังเกตจากการทดลองสั่งการทำงาน ให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่เพื่อดูความสัมพันธ์ของแต่ละข้อต่อว่าเป็นอิสระต่อกันหรือไม่ จากการทดลองทำให้ทราบว่า เมื่อเราสั่งงานแกนที่ 1 ให้เคลื่อนที่เป็นมุม θ_1 แกนที่ 2 จะเคลื่อนที่เป็นมุม $-\theta_1$ และ แกนที่ 3 จะเคลื่อนที่เป็นมุม $+\theta_1$ ด้วย และเมื่อสั่งงานเคลื่อนที่แกนที่ 2 ให้เคลื่อนที่เป็นมุม $+\theta_2$ แกนที่ 3 จะเคลื่อนที่เป็น $-\theta_2$ ความสัมพันธ์ขององศาการหมุนของข้อต่อที่กำลังหมุนมีความสัมพันธ์ในการรักษาระนาบของลิงค์ถัดไปได้ นั่น ในวิทยาการควบคุมหุ่นยนต์จะต้องให้องศาการหมุนแต่ละข้อต่อเป็นอิสระต่อกันจึงต้องมีการปรับแก้องศาการหมุนหรือการชดเชยการหมุนเพื่อให้องศาการหมุนของแต่ละข้อต่อเปรียบเสมือนว่าเป็นอิสระแก่กัน โดยปรับแก้ดังนี้เพื่อให้แขนในแกนที่ 2 และ 3 หมุนไปตามองศาที่ต้องการอย่างอิสระในแกนที่ 2 จะมีการชดเชยด้วยการหมุนด้วยการนำค่า $+\theta_1$ มาชดเชย ในส่วนของแกนที่ 3 จะต้องนำค่า $-\theta_1 + \theta_2$ มาชดเชยเครื่องหมายลบหมายถึงหมุนทวนทิศทางที่ค่าองศาอื่นๆ หมุน

3.4 การตั้งแกนของแขนหุ่นยนต์ CRS แบบ 3 แกน

ในศาสตร์ของการควบคุมแขนหุ่นยนต์จะมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแขนหุ่นยนต์ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 3.3 ซึ่งในส่วนนี้จะนำเสนอค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการตั้งแกนให้กับแขนหุ่นยนต์ วิธีการตั้งแกนของแขนหุ่นยนต์มีหลายวิธีด้วยกัน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธี ของ เดเนวิต ฮาเซนเบิร์ก (Denavit-Hartenberg) มาใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับและนิยมใช้อย่างมากในปัจจุบัน องค์ประกอบหลักทางกลของตัวแขนหุ่นยนต์ประกอบด้วย ก้าน โยงที่ต่อกันแบบอนุกรม ของแต่ละ ข้อต่อ และกำหนดแกนอ้างอิงที่ติดกับข้อต่อและก้าน โยง โดยการตั้งแกนของแขนหุ่นยนต์ถูกกำหนดดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 การตั้งแกนของแขนกล

เมื่อพิจารณาภาพที่ 3.8 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ Denavit – Hartenberg ตามนิยามในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3 จะได้ค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ค่าตัวแปรของแขนหุ่นยนต์ในแต่ละแกน

| i | a_i | α_i | d_i | θ_i |
|-----|--------|------------|-------|------------|
| 1 | 0.254* | 0 | 0 | θ_1 |
| 2 | 0.254* | 0 | 0 | θ_2 |
| 3 | 0.244* | 0 | 0 | θ_3 |

หมายเหตุ * หน่วยเป็น เมตร

เมื่อ a_{i-1} คือค่าความยาวลิงค์ของแขนหุ่นยนต์

ข้อสังเกต ค่า α และค่า d มีค่าเป็นศูนย์เนื่องจากแขนหุ่นยนต์เป็นหุ่นยนต์แบบ Planar robot คือหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้เฉพาะในระนาบเดียวเท่านั้น ในที่นี้จะเป็นการเคลื่อนที่ในระนาบ xy

3.5 จลนศาสตร์ทางตรงของแขนกลและสมการพลวัตของแขนกลแบบพื้นฐาน

จลนศาสตร์ทางตรงแขนหุ่นยนต์นำมาใช้ในการคำนวณหาค่าตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ ในที่นี้ได้คำนวณหาโดยใช้ เมตริกซ์การแปลงพิกัด (Transformation Matrices) ในการคำนวณค่าที่ได้ ในเมตริกซ์การแปลงพิกัด จะประกอบด้วยตำแหน่งปลายแขนที่พิจารณาและทิศทาง การหมุนตัวของระบบพิกัดที่พิจารณาเทียบกับ ระบบพิกัดอ้างอิง การคำนวณหาค่าเมตริกซ์การแปลงพิกัด โดยนำค่าจากตารางที่ 3.3 มาแทนลงในสมการที่ 3.1

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\alpha_i)\cos(\alpha_i) & a\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ในการคำนวณหาค่าเมตริกซ์การแปลงพิกัด ของตำแหน่งปลายแขนเทียบกับ พิกัดอ้างอิงที่ติดกับฐานจะได้

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} \overbrace{\begin{matrix} \cos(\theta_{123}) & -\sin(\theta_{123}) & 0 \\ \sin(\theta_{123}) & \cos(\theta_{123}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{matrix}}^{\text{Rotation}} & \overbrace{\begin{matrix} l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_{12}) + l_3 \cos(\theta_{123}) \\ l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_{12}) + l_3 \sin(\theta_{123}) \\ 0 \\ 1 \end{matrix}}^{\text{Translation}} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

ค่า T_3^0 ประกอบด้วยเมตริกซ์การหมุนคือค่าทิศทางการหมุนตัวของระบบพิกัดที่ปลายแขน เทียบกับระบบพิกัดพื้นฐาน และเวกเตอร์การเลื่อนค่าตำแหน่งปลายแขนในระบบพิกัด xy

$$\text{เมตริกซ์การหมุน (Rotation Matrices)} = \begin{bmatrix} c(\theta_{123}) & -s(\theta_{123}) & 0 \\ s(\theta_{123}) & c(\theta_{123}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{เวกเตอร์การเลื่อน (Translation Vector)} = \begin{bmatrix} l_1 * c(\theta_1) + l_2 * c(\theta_{12}) + l_3 * c(\theta_{123}) \\ l_1 * s(\theta_1) + l_2 * s(\theta_{12}) + l_3 * s(\theta_{123}) \\ 0 \end{bmatrix}$$

จากเมตริกซ์การแปลงพิกัดที่จะนำมาใช้หาค่าตำแหน่งปลายของแต่ละลิงค์ในระบบพิกัด xy จะได้อดังนี้

$$\text{Link 1: } \left. \begin{matrix} x_1 = l_1 \cos(\theta_1) \\ y_1 = l_1 \sin(\theta_1) \end{matrix} \right\} \quad (3.3)$$

$$\text{Link 2: } \left. \begin{matrix} x_2 = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y_2 = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{matrix} \right\} \quad (3.4)$$

$$\text{Link 3: } \left. \begin{matrix} x_2 = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ y_2 = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{matrix} \right\} \quad (3.5)$$

คำนวณหา Dynamic ของหุ่นยนต์เพื่อหาค่าเมตริกซ์ $M(\theta)\ddot{\theta}$, $C(\theta, \dot{\theta})$ และ $G(\theta)$ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของสมการพลวัตของแขนกลอย่างง่าย เพื่อนำค่าเมตริกซ์ไปใช้ในการออกแบบ ระบบ

ควบคุม โดยใช้สมการลากรางจ์ (Lagrange Equation) ในการหาได้ตั้งสมมุติฐานให้จุดศูนย์กลางของมวลอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของแต่ละลิงค์ แล้วคำนวณหาค่าพลังงานทั้งหมด L

$$L = K - U$$

$$\text{เมื่อ } K = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 + \frac{1}{2}m_3v_3^2$$

$$U = m_1gh_1 + m_2gh_2 + m_3gh_3$$

โดย h_i คือ ค่าระยะที่วัดจากระบบพิกัดฐานถึงกึ่งกลางของลิงค์ i ที่พิจารณา

v_i คือ ค่าความเร็วที่ตำแหน่งกึ่งกลางของลิงค์ i ที่พิจารณาเทียบกับระบบพิกัดอ้างอิงที่ฐาน

จากสมการลากรางจ์ (Lagrange Equation) จะเขียนอยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial \theta_i} \right) = Q_i \quad i = 1, \dots, n$$

จากนั้นจัดรูปสมการให้อยู่ในสมการพลวัตแบบพื้นฐานของแขนกลได้ดังนี้

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

สมการพลวัตของแขนกลแบบ 3 แกนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

ผลลัพธ์ของเมตริกซ์ $M(\theta)$, $V(\theta, \dot{\theta})$ และ $G(\theta)$ ซึ่งเป็น เมตริกซ์ความเฉื่อย เมตริกซ์แรงบิด ศูนย์ศูนย์กลางและ Corolis และเมตริกซ์แรงบิดจากความโน้มถ่วง ตามลำดับ

องค์ประกอบแต่ละเอลิเมนต์ของเมตริกซ์ $M(\theta)$ จะมีค่าเป็น

$$M_{11} = \frac{l_1^2 m_1}{4} + l_1^2 m_2 + l_1^2 m_3 + \frac{l_2^2 m_2}{4} + l_2^2 m_3 + \frac{l_3^2 m_3}{4} + l_1 l_3 m_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ + l_1 l_2 m_2 \cos(\theta_2) + 2l_1 l_2 m_3 \cos(\theta_2) + l_2 l_3 m_3 \cos(\theta_3)$$

$$M_{12} = \frac{l_2^2 m_2}{4} + l_2^2 m_3 + \frac{l_3^2 m_3}{4} + \frac{l_1 l_3 m_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)}{2} + \frac{l_1 l_2 m_2 \cos(\theta_2)}{2} \\ + l_1 l_2 m_3 \cos(\theta_2) + l_2 l_3 m_3 \cos(\theta_3)$$

$$M_{13} = \frac{l_3^2 m_3}{4} + \frac{l_1 l_3 m_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)}{2} + \frac{l_2 l_3 m_3 \cos(\theta_3)}{2}$$

$$M_{21} = \frac{l_2^2 m_2}{4} + l_2^2 m_3 + \frac{l_3^2 m_3}{4} + \frac{l_1 l_3 m_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)}{2} + \frac{l_1 l_2 m_2 \cos(\theta_2)}{2} \\ + l_1 l_2 m_3 \cos(\theta_2) + l_2 l_3 m_3 \cos(\theta_3)$$

$$M_{22} = \frac{l_2^2 m_2}{4} + l_2^2 m_3 + \frac{l_3^2 m_3}{4} + l_2 l_3 m_3 \cos(\theta_3)$$

$$M_{23} = \frac{l_3^2 m_3}{4} + \frac{l_2 l_3 m_3 \cos(\theta_3)}{2}$$

$$M_{31} = \frac{l_3^2 m_3}{4} + \frac{l_1 l_3 m_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)}{2} + \frac{l_2 l_3 m_3 \cos(\theta_3)}{2}$$

$$M_{32} = \frac{l_3^2 m_3}{4} + \frac{l_2 l_3 m_3 \cos(\theta_3)}{2}$$

$$M_{33} = \frac{l_3^2 m_3}{4}$$

องค์ประกอบแต่ละเอลิเมนต์ของเมตริกซ์ $V(\theta)$ จะมีค่าเป็น

$$V_{11} = -\dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_2 l_1 l_3 m_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + \dot{\theta}_1 l_1 l_3 m_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + \dot{\theta}_2 l_1 l_2 m_2 \sin(\theta_2) + 2\dot{\theta}_2 l_1 l_2 m_3 \sin(\theta_2) + \dot{\theta}_3 l_2 l_3 m_3 \sin(\theta_3))$$

$$V_{12} = \left(\frac{-l_1 l_3 m_3 \sin(\theta_2 + \theta_3)}{2} - \frac{l_1 l_2 m_2 \sin(\theta_2)}{2} - l_1 l_2 m_3 \sin(\theta_2) \right) \dot{\theta}_2^2 - (l_1 l_3 m_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \dot{\theta}_3 - l_2 l_3 m_3 \sin(\theta_3) \dot{\theta}_3) \dot{\theta}_2$$

$$V_{13} = \left(\frac{-l_1 l_3 m_3 \sin(\theta_2 + \theta_3)}{2} - \frac{l_2 l_3 m_3 \sin(\theta_3)}{2} \right) \dot{\theta}_3^2$$

$$V_{21} = \left(\frac{l_1 l_3 m_3 \sin(\theta_2 + \theta_3)}{2} + \frac{l_1 l_2 m_2 \sin(\theta_2)}{2} - l_1 l_2 m_3 \sin(\theta_2) \right) \dot{\theta}_1^2 - l_2 l_3 m_3 \sin(\theta_3) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3$$

$$V_{22} = -l_2 l_3 m_3 \sin(\theta_3) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3$$

$$V_{23} = \frac{-l_2 l_3 m_3 \sin(\theta_3) \dot{\theta}_3^2}{2}$$

$$V_{31} = \frac{l_3 m_3 (2l_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) + 2l_2 \sin(\theta_3)) \dot{\theta}_1^2}{4} + l_2 l_3 m_3 \sin(\theta_3) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2$$

$$V_{32} = \frac{m_3 l_2 l_3 \sin(\theta_3) \dot{\theta}_2^2}{2}$$

$$V_{33} = 0$$

องค์ประกอบของเมตริกซ์ $G(\theta)$ จะมีค่าเป็น

$$G_1 = \frac{gl_2m_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)}{2} + gl_2m_3 \cos(\theta_1 + \theta_2) + \frac{gl_1m_1 \cos(\theta_1)}{2} \\ + gl_2m_2 \cos(\theta_1) + gl_2m_3 \cos(\theta_1) + \frac{gl_3m_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)}{2}$$

$$G_2 = gl_2m_2 \cos(\theta_1) + gl_2m_3 \cos(\theta_1) + \frac{gl_3m_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)}{2}$$

$$G_3 = \frac{gl_3m_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)}{2}$$

3.6 ออกแบบระบบการควบคุมความยืดหยุ่นและการเคลื่อนที่ของแขนกล

ในการวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ที่มีการเชื่อมต่อของ 3 ลิงค์ดังภาพที่ 3.8 ซึ่งตำแหน่งของแต่ละข้อต่อสามารถอธิบายได้ด้วยเวกเตอร์ของมุมรวม (θ) ที่มีขนาด 3×1 และ อินพุต ของตัวขับเคลื่อนหรือมอเตอร์ประกอบไปด้วยเวกเตอร์ของแรงบิด (τ) ที่มีขนาด 3×1 ที่ประยุกต์ใช้กับแต่ละข้อต่อของแขนกล สมการพลวัตของแขนกลอย่างง่าย นั้นเป็นแบบไม่เชิงเส้นและสามารถเขียนในรูปแบบทั่วไปดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 3.5 เป็นดังนี้

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

โดยที่ $M(\theta)$, $V(\theta, \dot{\theta})$ และ $G(\theta)$ คือ เมตริกซ์ความเฉื่อย เมตริกซ์แรงบิดสู่ศูนย์กลางและ Corolis และ เมตริกซ์แรงบิดจากความโน้มถ่วง ตามลำดับ ในกฎการควบคุมสำหรับการควบคุมความยืดหยุ่นโดยมีการชดเชยแรงโน้มถ่วงและค่าแรงเสียดทาน สามารถแสดงได้ดังในสมการที่ 3.7 เพื่อให้สามารถกำหนดแรงในแนวตั้งฉากจากปลายแขนได้

$$\tau = J^T(q)(K_v \dot{x}_d - K_p \bar{x}) + G(\theta) + F(\dot{\theta}) \quad (3.7)$$

เมื่อ $\bar{x} = x_d - x_c$ คือค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขน ในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวสัมผัส $J(q)$ คือจาโคเบียน (Jacobian) ของพื้นที่ๆเข้าถึงได้สำหรับปลายแขนหุ่นยนต์ ค่าแรงเสียด

ทานในแต่ละจุด มุม $F(\dot{q})$ จะไม่ได้นำมาคิดในที่นี้ ส่วนเมตริกซ์ K_v และ K_p คือค่าสัมประสิทธิ์แบบอนุพันธ์ และแบบแปรผันตรงซึ่งอยู่ในเมตริกซ์รูปแบบทแยงมุม

ค่า $J(\theta)$ หาได้จากการอนุพันธ์สมการตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์ (X_c) ในระบบพิกัด uv

$$X_c = \begin{bmatrix} \sin(\theta)(l_1 \cos(\theta_1) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)) \dots \\ \dots - \cos(\theta)(l_1 \sin(\theta_1) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)) \\ \cos(\theta)(l_1 \cos(\theta_1) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)) \dots \\ \dots + \sin(\theta)(l_1 \sin(\theta_1) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

เมื่อ θ_i คือ มุมของแกน i และทำการอนุพันธ์ตัวแปร X_c เทียบกับเวลา

$$\dot{X}_c = \frac{\partial(X_c(\theta_1, \theta_2, \theta_3))}{\partial t} \quad (3.9)$$

โดยจาโคเบียนจะเป็นตัวเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นกับความเร็วเชิงมุม ดังสมการที่ 3.10

$$\{V\} = [J]\{\dot{\theta}\} \quad (3.10)$$

จากการอนุพันธ์สมการ ที่ 3.10 เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงเส้นกับความเร็วเชิงมุมจะได้

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$J_{11} = -\sin(\theta)(l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \\ - \cos(\theta)(l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3))$$

$$J_{12} = -\sin(\theta)(l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \\ - \cos(\theta)(l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3))$$

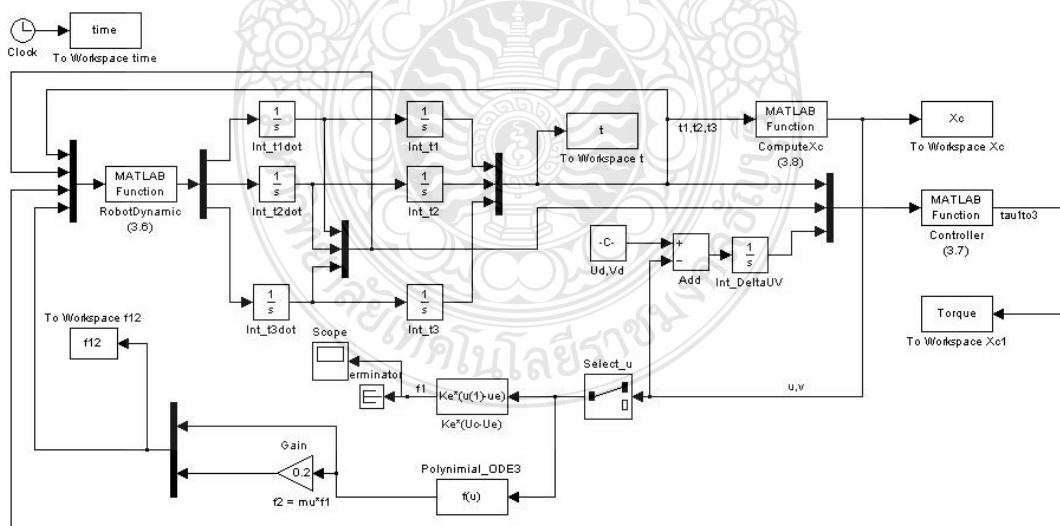
$$J_{13} = -\sin(\theta)(l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) - \cos(\theta)(l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3))$$

$$J_{21} = -\cos(\theta)(l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \\ + \sin(\theta)(l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3))$$

$$J_{22} = -\cos(\theta)(l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) \\ + \sin(\theta)(l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3))$$

$$J_{23} = -\cos(\theta)(l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)) + \sin(\theta)(l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3))$$

จากสมการพลวัตของแขนกล จะสามารถออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของแขนกล
ใน Matlab/Simulink ได้ดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 แบบจำลองการควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบยี่ดหุนของแขนกลแบบ 3 แขน

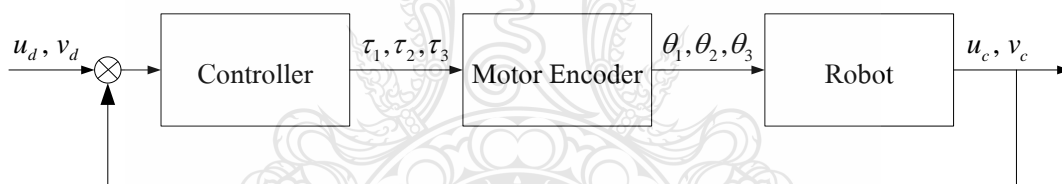
จากภาพที่ 3.9 แสดงการออกแบบระบบการควบคุมความยืดหยุ่นของแขนกลแบบ 3 แกน เป็นระบบที่มีอินพุตเป็นค่าตำแหน่งที่ปลายแขนกลที่ต้องการ (u_d, v_d) และมีเอาต์พุตเป็นค่าแรงบิดที่จะป้อนกลับ (τ_1, τ_2, τ_3) ในการคำนวณในรอบถัดไปโดยมีค่าเงื่อนไขเริ่มต้นคือค่าตำแหน่งองศาการหมุนของแต่ละแกนคือ θ_1, θ_2 และ θ_3 โดยระบบควบคุมแบบยืดหยุ่นได้ออกแบบโดยใช้สมการที่ 3.7

$$\tau = J^T(q)(K_i x_i - K_v \dot{x} + K_p \bar{x}) + G(\theta) + F(\dot{\theta})$$

ในระบบการควบคุมจริงไม่ได้คิดค่าแรงเสียดทานของระบบ $F(\dot{\theta})=0$ ดังนั้นสมการที่ 3.7 จะเขียนได้ใหม่ได้ดังสมการที่ 3.12

$$\tau = J^T(q)(K_i x_i - K_v \dot{x} + K_p \bar{x}) + G(\theta) \quad (3.12)$$

จากระบบที่ออกแบบสามารถเขียนเป็นแผนภาพอย่างง่ายได้ดังแสดงในภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 แผนภาพอย่างง่ายของระบบ ควบคุม

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ทดสอบหาค่าความยืดหยุ่นของแผ่นโฟมและแผ่นฟองน้ำ

ในการทดสอบระบบควบคุมความยืดหยุ่น ในการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ CRS แบบ 3 แกน ได้ใช้เลือกใช้วัสดุสองชนิด มาใช้ในการทดสอบ ระบบควบคุม โดยวัสดุชนิดแรก que เลือกคือใช้โฟมแบบหยาบที่มีความหนา 25 mm และอีกชนิดเลือกใช้คือฟองน้ำที่มีความหนา 10 mm ดังแสดงในภาพที่ 4.1 โดยในขั้นแรกจะทำการทดสอบหาค่าความยืดหยุ่น ของวัสดุ โดยได้นำแผ่นพลาสติกที่หนา 0.5 mm มารองด้านบนของผิวของวัสดุทั้งสองเพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับผิวของวัสดุทั้งสองชนิด และลดแรงเสียดทานบนผิวสัมผัส



ภาพที่ 4.1 วัสดุสองชนิดที่นำมาใช้ในการทดสอบคือโฟมหยาบ (ซ้าย) และฟองน้ำ (ขวา)

การหาค่าความยืดหยุ่นของวัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบ หาได้จากการใช้ไดอัลเกจ ประยุกต์ใช้ร่วมกับเซนเซอร์วัดแรง กด ได้นำไดอัลเกจมาใช้วัด ระยะการยุบตัวของแผ่นโฟม ส่วนเซนเซอร์วัดแรงใช้วัดแรงกดบนผิวของวัสดุทั้งสองชนิด จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองของวัสดุทั้งสองชนิดมาทำการประมาณค่าโดยใช้ฟังก์ชันพหุนามอันดับ 3 ได้สมการความยืดหยุ่นของวัสดุแต่ละชนิดดังนี้

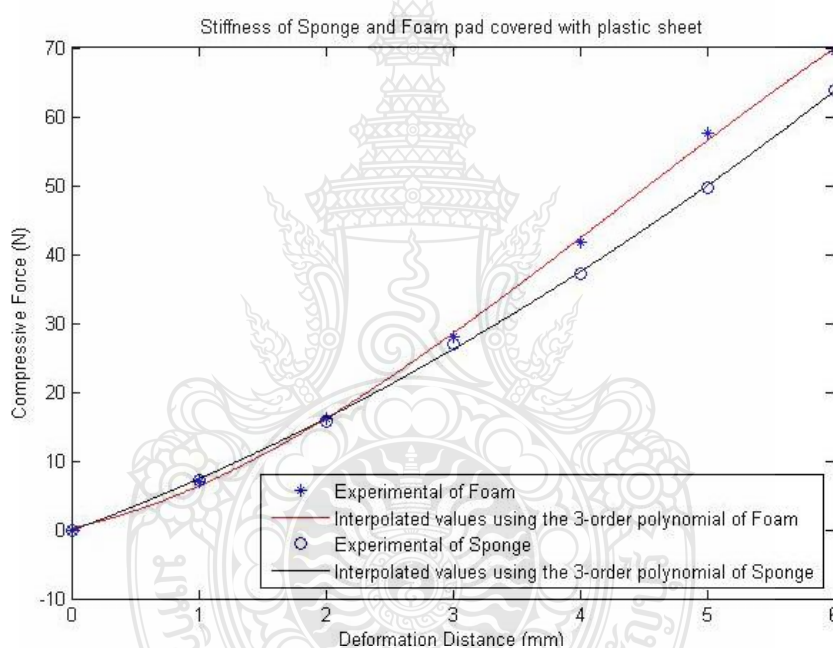
สมการความยืดหยุ่นที่ประมาณด้วย ฟังก์ชันพหุนามอันดับ 3 ของฟองน้ำที่ประกบด้านบนด้วยแผ่นพลาสติกใส

$$f_1 = -0.0017x^3 + 0.6375x^2 + 6.8708x - 0.1188 \quad (4.1)$$

สมการความยืดหยุ่นที่ประมาณด้วยฟังก์ชันพหุนามอันดับ 3 ของโฟมที่ประกบด้านบนด้วยแผ่นพลาสติกใส

$$f_1 = -0.1864x^3 + 2.4061x^2 + 3.8770x - 0.2603 \quad (4.2)$$

จากสมการทั้งสองนำมาวาดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบตัว (Deformation Distance) กับค่าแรงกดที่กระทำต่อวัสดุทั้งสองชนิดแสดงดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะยุบตัวและแรงกดที่กระทำกับโฟมและฟองน้ำ

4.2 ผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลบนระนาบเอียง 45° บนแผ่นโฟมด้วยระบบควบคุมความยืดหยุ่น

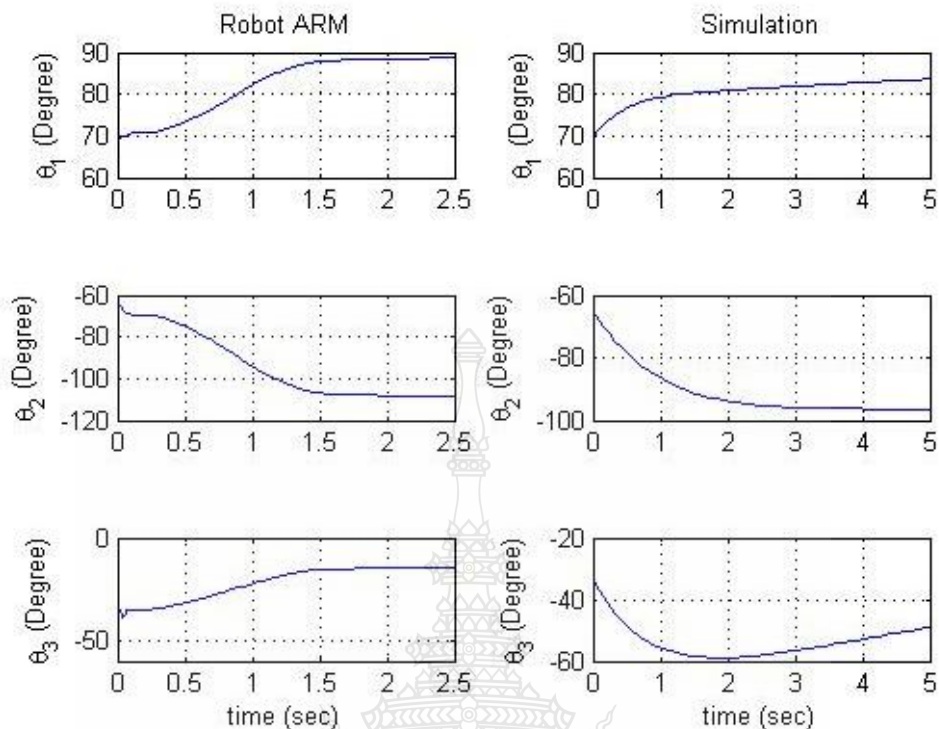
จากการออกแบบระบบ ควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล 3 แกน ด้วยระบบควบคุม ความยืดหยุ่น (Stiffness Control) โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ในการจำลองระบบการเคลื่อนที่และควบคุมแรงโดยอ้อม โดยให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง บนระนาบที่ทำมุมกับพื้นผิวเอียง 45° จากตำแหน่ง $(u_0, v_0) = (0.193, 0.470)$ m (ค่าผิวของผนังในแนวแกน u มีค่า 0.193 m) ไปยัง

ตำแหน่ง $(u_d, v_d) = (0.195, 0.300)$ m ในระบบพิกัด uv โดยการทดลองจริงได้ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง โดยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ตามในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแขนกลจริงและแบบจำลองในการเคลื่อนที่บนระนาบเอียง 45° บนแผ่นโฟมที่รองด้วยแผ่นพลาสติก

| พารามิเตอร์ | การทดลองจริง | แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ |
|----------------------------|---|--|
| m_1 (Kg) | 0.81 | 0.81 |
| m_2 (Kg) | 0.52 | 0.52 |
| m_3 (Kg) | 0.1 | 0.1 |
| l_1 (m) | 0.255 | 0.255 |
| l_2 (m) | 0.255 | 0.255 |
| l_3 (m) | 0.144 | 0.144 |
| I_1 (Kg-m ²) | - | 0.39 |
| I_2 (Kg-m ²) | - | 0.27 |
| I_3 (Kg-m ²) | - | 0.18 |
| K_v | $\begin{bmatrix} 0.000007 & 0 \\ 0 & 0.00005 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 60,000 & 0 \\ 0 & 60,000 \end{bmatrix}$ |
| K_p | $\begin{bmatrix} 320 & 0 \\ 0 & 280 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 80,000 & 0 \\ 0 & 80,000 \end{bmatrix}$ |
| K_i | $\begin{bmatrix} 0.005 & 0 \\ 0 & 0.028 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 40,000 & 0 \\ 0 & 40,000 \end{bmatrix}$ |

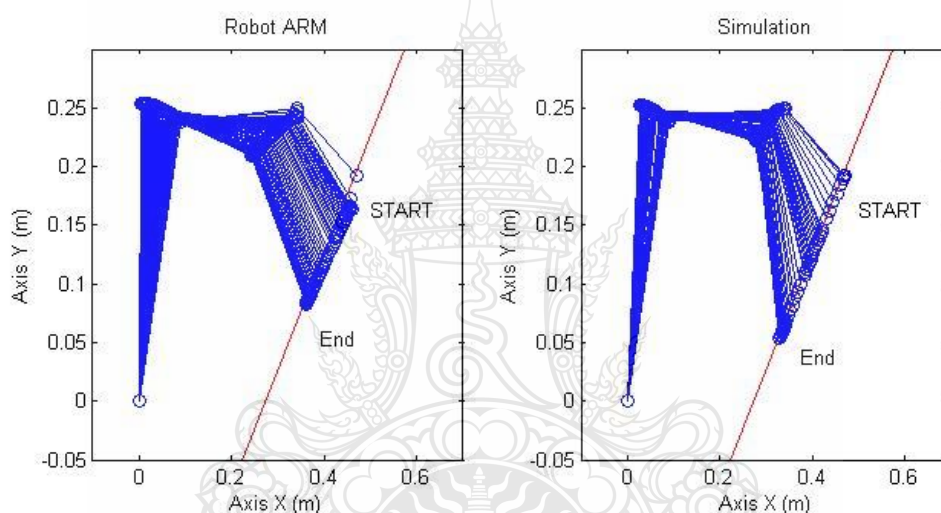
ผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลบนระนาบเอียง 45° บนแผ่นโฟมด้วยระบบควบคุมความยืดหยุ่นครั้งที่ 1 นำค่าองศาการเคลื่อนที่ในแกนที่ 1 2 และ 3 ของแขนกลจริงกับของแขนกลจากแบบจำลองมาวาดกราฟจะได้ ดังภาพที่ 4.3



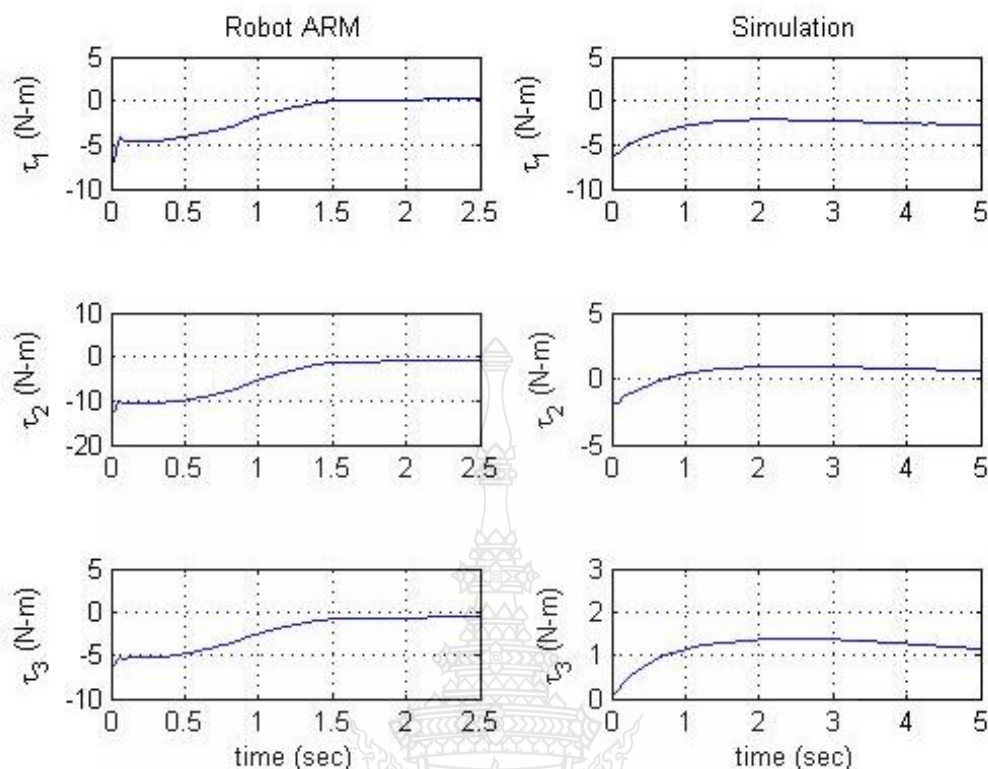
ภาพที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าองศาการเคลื่อนที่บนแผ่นโฟมที่ระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) ในแกนที่ 1 2 และ 3 จากการทดลองครั้งที่ 1

จากภาพที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงองศาการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์จริงและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นได้ว่าองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์จริงและแบบจำลองในแกนเดียวกันจะเริ่มที่ องศาเดียวกันและองศาการหมุนตำแหน่ง สุดท้ายจะได้ค่าที่ต่างกันหรือแขนกลเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งที่ต้องการด้วยตำแหน่งการหมุนที่ในแต่ละแกนไม่เท่ากับ ผลที่ได้จากแบบจำลองอันเนื่องมาจาก ค่าแรงบิดของแต่ละแกนของแขนหุ่นยนต์จริงและของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าไม่เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงองศาการเคลื่อนที่ของแขนกลข้อต่อที่ 1 และข้อต่อ 2 มีทิศทางไปทางเดียวกัน ในส่วนของข้อต่อที่ 3 องศาการหมุนของแบบจำลองมีการเคลื่อนที่ตรงข้ามกับแขนกลจริงในช่วงแรกจากนั้นจึงปรับกลับมาเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน และหากนำองศาการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อ จากภาพที่ 4.3 มาจำลอง เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการเคลื่อนที่ดังแสดงในภาพที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและแบบจำลองมีลักษณะการเคลื่อนที่ที่คล้ายคลึงกันจากภาพที่ 4.4 ฟังซ้ายมือจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่

ของแขนกล CRS จึงเกิดการกระโดดไปยังตำแหน่งที่ 2 อย่างทันทีทันใด ซึ่งในการทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกล ในแบบจำลอง ไม่ได้เกิดลักษณะดังกล่าว ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นจากการควบคุมแขนกล จริงที่มีแรงบิด ในแต่ละข้อต่อเกิดการเปลี่ยนแปลง ค่าที่มากขึ้นอย่างทันทีทันใด ในช่วงแรก ทำให้โซ่และเฟืองเกียร์เกิดการกระชากส่งผลให้ระบบโซ่เกิดการตึง อีกทั้งผลจากระยะคลอนของข้อต่อแต่ละจุดทำให้ตำแหน่งเอ็นโค้ดเดอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ส่งผลให้ค่าตำแหน่งในระยะแรกๆมีค่าผิดพลาดมากทำให้เกิดลักษณะดังกล่าว เมื่อนำมาวาดจำลองดูลักษณะการเคลื่อนที่ที่จะส่งผลต่อตำแหน่งปลายแขนให้ผิดพลาดด้วยซึ่งส่งผลให้ค่าแรงที่ได้จากการทดลองในช่วงแรกมีค่ามากเกินไปจนความเป็นจริงดังแสดงในภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.4 การจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและแบบจำลอง บนแผ่นโฟม ที่ระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 1

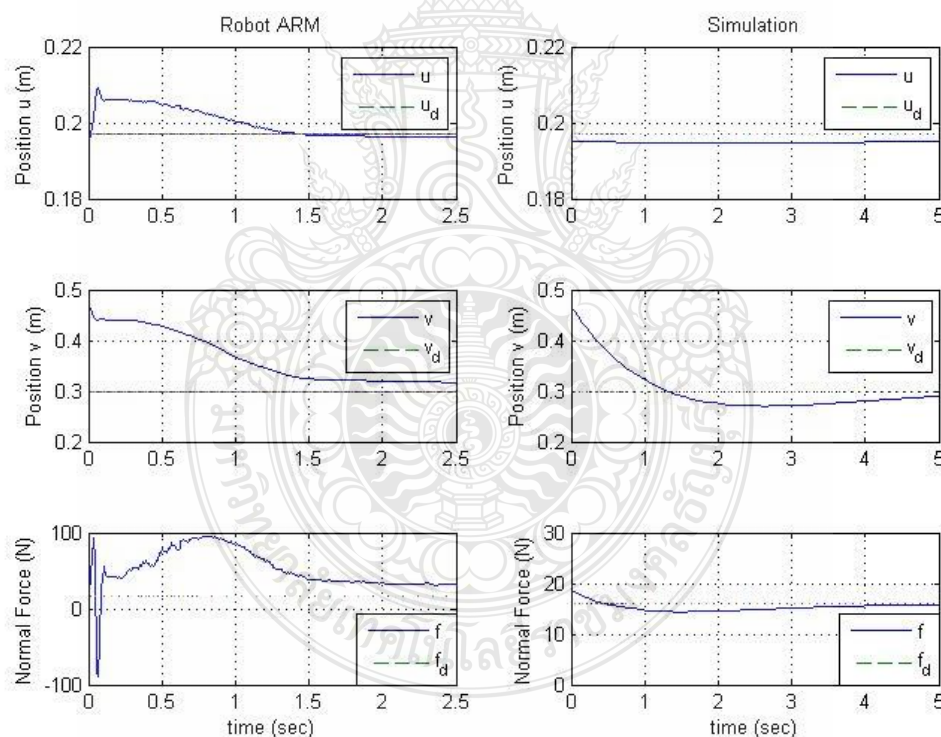


ภาพที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกล บนแผ่นโฟมระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 1

จากภาพที่ 4.5 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกลจริงกับของแบบจำลองในแกนที่ 1 2 และ 3 ของการทดลองครั้งที่ 1 จะเห็นได้ว่าค่าแรงบิดในแต่ละแกนของแบบจำลองมีค่าที่ราบเรียบตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่ ซึ่งต่างกับ ค่าแรงบิดของแขนหุ่นยนต์จริงซึ่งในช่วงแรกค่าแรงบิดเกิดการกระตุกอันเนื่องมาจากการสั่งงานให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการ โดยมีระยะทางการเคลื่อนที่ที่ต้องการ ที่ยาวทำให้ค่าแรงบิดเกิดการ กระชากและเปลี่ยนแปลงอย่างทันที ทันใด ส่งผลให้แขนหุ่นยนต์ เกิดการ กระตุกในช่วงแรก จะทำให้ ค่าแรงบิด ของแขนกลจริงในช่วงแรกไม่ราบเรียบเหมือน กับแรงบิดของ แบบจำลอง นอกจากนั้น จากภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าแรงบิด ของแต่ละแกนของแขนหุ่นยนต์มีค่าต่างกัน อันเนื่องมาจากค่าพารามิเตอร์ของแขนหุ่นยนต์จริงกับของแบบจำลองใช้ค่าที่แตกต่างกัน และค่าแรงบิดของแกนที่ 1 ของแขนกลจริงมีลักษณะต่างกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยค่าแรงบิดข้อต่อที่ 1 ของแขนหุ่นยนต์จริงมีค่าเริ่มต้น -7 N-m จากนั้นค่าแรงบิดจึงลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 1.7 s

ค่าแรงบิดจึงมีค่าคงที่ที่ 0.2 N-m ส่วนค่าแรงบิดในแบบจำลองของแกนที่ 1 ค่าเริ่มต้น -6.54 N-m จากนั้นค่าแรงบิดจึงลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง วินาทีที่ 2 จึงมีค่าเท่ากับ -2.15 N-m จากนั้นค่าแรงบิดค่อนข้างคงที่ในช่วง -2.15 ถึง -2.78 N-m ส่วนค่าแรงบิดในข้อต่อที่ 2 และ 3 ของแขนกลจริงมีค่าเริ่มต้นที่ -13 N-m และ -6 N-m ตามลำดับ จากนั้นจึงมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 1.5 s จึงมีค่าคงที่ที่ 1 N-m ในส่วนของแบบจำลองค่าแรงบิดข้อต่อที่ 2 มีค่าเริ่มต้นที่ 2 N-m จากนั้นเปลี่ยนแปลงในช่วงแรกมีค่าลดลงและเพิ่มขึ้นในฝั่งตรงกันข้ามโดยค่ามาคงที่ที่วินาทีที่ 2 มีค่าแรงบิดอยู่ที่ 1 N-m หลังจากนั้นแรงบิดข้อต่อที่ 2 ของแบบจำลองจะเปลี่ยนค่าอยู่ในช่วง $0.5-1 \text{ N-m}$ ส่วนของข้อต่อที่ 3 ของแบบจำลองค่าแรงบิดมีค่าเริ่มต้นที่ 0 N-m จากนั้นเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 2 แล้วค่าจึงอยู่ที่ประมาณ 1.4 N-m แล้วลดลงทีละน้อยจนถึงวินาทีที่ 5 ค่าแรงบิดอยู่ที่ 1.14 N-m

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่เขาค่าตำแหน่งที่กำหนด และการควบคุมแรงโดยอ้อมของระบบ การควบคุมความยืดหยุ่นดัง ภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.6 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดในพิกัด uv และค่าแรง ในทิศทางตั้งฉากที่กระทำบนแผ่นโฟมในระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับ สำหรับแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 1

จากภาพที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดโดยในการทดสอบกำหนดให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง $(u_0, v_0) = (0.193, 0.470)$ m หรือไปยังตำแหน่ง $(u_0, v_0) = (0.195, 0.3)$ m ในระบบพิกัด uv ค่าตำแหน่ง ในระบบพิกัด (u, v) นั้นได้จากการคำนวณด้วยความสัมพันธ์ทาง คณิตศาสตร์ และซึ่งระยะที่แขนกลลดลงไปยังแผ่นโฟมอยู่ที่ 0.002 m หรือ 2 mm จากสมการที่ 4.2 สำหรับความยืดหยุ่นของโฟม สามารถคำนวณ หาแรงที่แขนกลกระทำกับแผ่นโฟม ในแนวตั้งฉากเมื่อค่า $x = 2$ mm ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

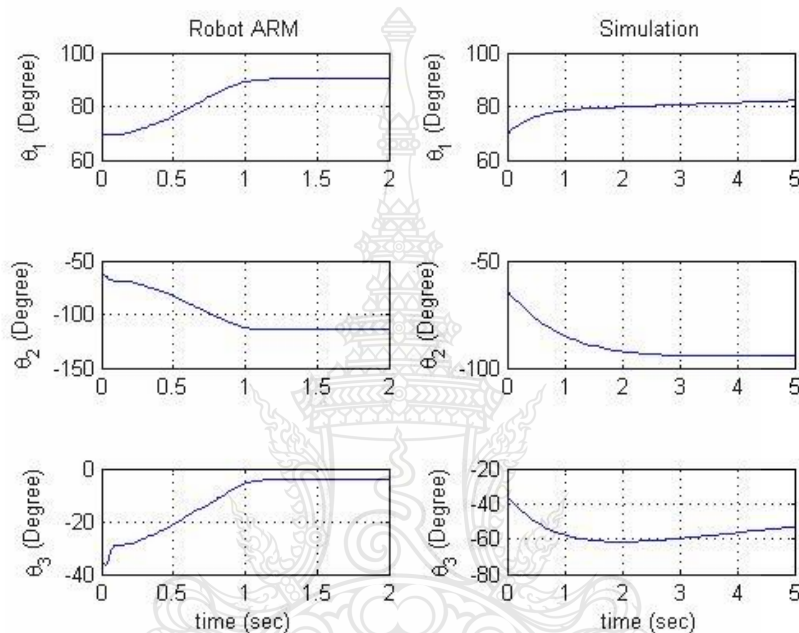
ตารางที่ 4.2 ค่าผลการทดลองที่ได้จากการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงเทียบแบบจำลองในการเคลื่อนที่ บนระนาบเอียง 45° บนแผ่นโฟม จากการทดลองครั้งที่ 1

| พารามิเตอร์ | ที่ต้องการ | | ที่ได้จากการทดลอง | | ค่าความคลาดเคลื่อน | | แรงกดในทิศตั้งฉาก จากภาพที่ 4.2 |
|---------------|--------------|--------------|-------------------|--------------|--------------------|--------------|---------------------------------|
| | u_d (m) | v_d (m) | u_c (m) | v_c (m) | u_e (m) | v_e (m) | |
| การเคลื่อนที่ | u_d (m) | v_d (m) | u_c (m) | v_c (m) | u_e (m) | v_e (m) | f_i (N) |
| แขนกลจริง | 0.195 | 0.3 | 0.1960 | 0.3134 | -0.001 | -0.0134 | 32.10 |
| แบบจำลอง | 0.195 | 0.3 | 0.1950 | 0.2898 | 0 | 0.0102 | 15.87 |

จากตารางที่ 4.2 ผลทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงของการทดลองครั้งที่ 1 ผลการเคลื่อนที่ของตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งที่ต้องการ เห็นได้ว่าแขนกลสามารถเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้โดยมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง (u_e, v_e) อยู่ที่ $(-0.001, -0.0134)$ m หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของตำแหน่ง จะได้เป็น $(0.51\%, 4.47\%)$ ในระบบพิกัด uv ในส่วนของแบบจำลองมีค่าความผิดพลาด ของการเคลื่อนที่อยู่ที่ $(0, 0.0102)$ m คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของตำแหน่งจะได้เป็น $(0\%, 3.4\%)$ จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของแขนกลจริงและของแบบจำลอง ในแนวแกน uv มีค่าเปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาดน้อยกว่า 5% แต่เมื่อพิจารณาถึงแรงที่ปลายแขนกลกระทำต่อผนังหรือสิ่งแวดล้อม ล้อมจะขึ้นอยู่กับระยะ ในทิศทางตั้งฉากที่ ปลายแขนที่กดลงยังพื้นผิว หรือเป็นค่าความผิดพลาดในแนวแกน u จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของแขนกลจริง (u_e) มีค่า -0.001 m กล่าวคือแขนกลกดลงมากกว่าระยะที่กำหนดส่งผลให้แรงที่กระทำต่อปลายแขนมีค่ามากกว่าค่าที่ต้องการควบคุม ถ้าพิจารณาค่าแรงที่ปลายแขนกลกระทำต่อผนังหรือสิ่งแวดล้อม ของแบบจำลอง จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดมีค่า 0 m หรือกล่าวได้ว่าแบบจำลองสามารถควบคุมแรงได้ตามค่าที่ต้องการ หากพิจารณาแรงกระทำต่อปลายแขนจากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่าแรงของแขนกลจริงมีค่า

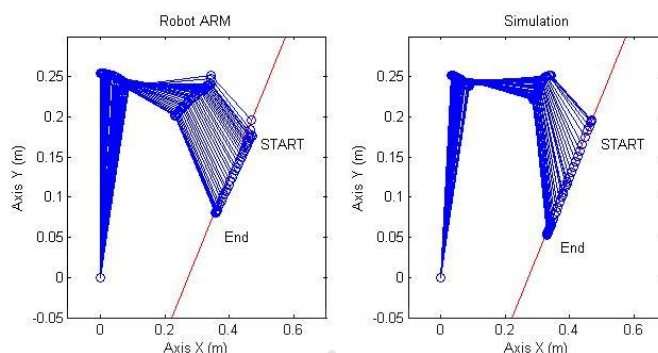
มากกว่าแรงของแบบจำลอง 1 เท่า โดยระยะที่แขนกลลดลงไปยังผนังต่างกัน 0.001 m เนื่องมาจากค่าความสัมพัทธ์ของแรงที่มีต่อระยะขยับตัวของวัสดุโฟม โดยดูความสัมพันธ์ได้จากภาพที่ 4.2

ผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลบนระนาบเอียง 45° บนแผ่นโฟมด้วยระบบควบคุม ความยืดหยุ่นครั้งที่ 2 นำค่าองศาการเคลื่อนที่ในแกนที่ 1 2 และ 3 ของแขนกลจริงกับของแขนกลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาวาดกราฟจะได้ ดังภาพที่ 4.7

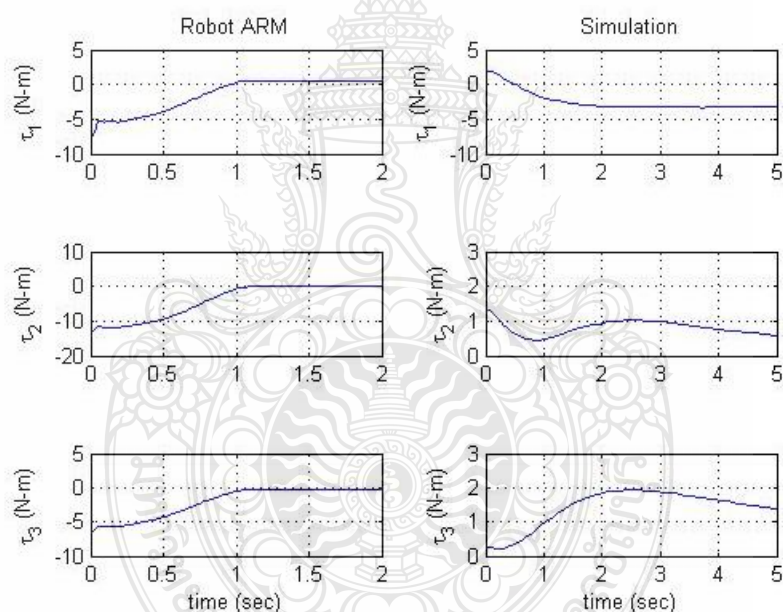


ภาพที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าองศาการเคลื่อนที่ บนแผ่นโฟมที่ระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) ในแกนที่ 1 2 และ 3 จากการทดลองครั้งที่ 2

จากภาพที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์จริงและแบบจำลองในแกนเดียวกันจะเริ่มที่จุดเดียวกันและองศาการหมุนตำแหน่งสุดท้ายจะได้ค่าที่ต่างกันซึ่งเป็นเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 เมื่อนำค่าองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อมาทำการวาดกราฟจำลอง ลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและแบบจำลองดังแสดงด้วยภาพที่ 4.7 โดยภาพด้านซ้ายมือแสดงการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์จริง ส่วนภาพด้านขวามือแสดงการเคลื่อนที่ของแบบจำลอง จะเห็นได้ว่าการกระโดดของตำแหน่งของปลายแขนหรือมีการกระตุกของแรงบิดเนื่องจากข้อเช่นเดียวกับการทดลองครั้งที่ 1 และตำแหน่งสุดท้ายในการทดลองกับแขนกลจริงจะมีค่าน้อยกว่าของในการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



ภาพที่ 4.8 การจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและแบบจำลอง บนแผ่นโฟมระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 2

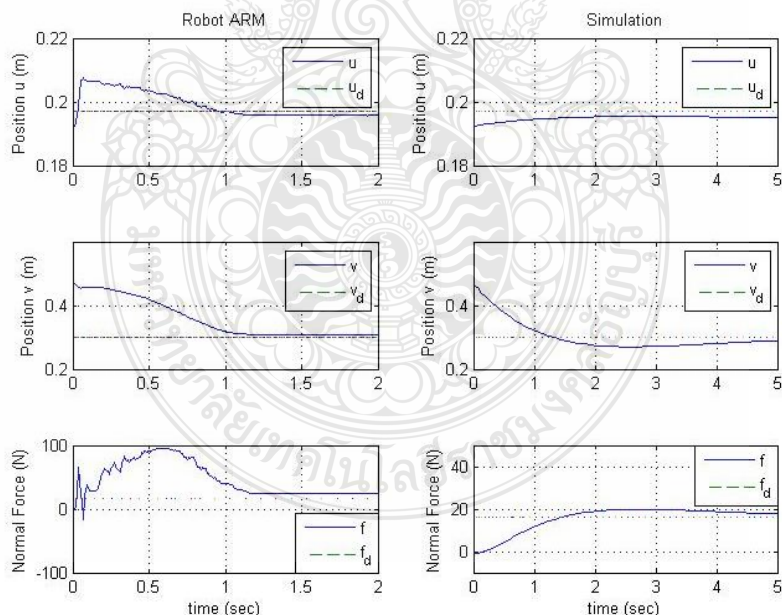


ภาพที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกล บนแผ่นโฟมระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 2

จากภาพที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกลจริงกับของแบบจำลองในแกนที่ 1 2 และ 3 ของการทดลองครั้งที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่าแรงบิดของแขนหุ่นยนต์จริงยังคงมีการกระตุกในช่วงแรกเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 ส่วนค่าแรงบิดของแบบจำลองมี

ลักษณะราบเรียบตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่ตลอดทุกข้อต่อ จากกราฟแสดงให้เห็นถึงค่าแรงบิดแต่ละแกนของแขนหุ่นยนต์มีค่าต่างกัน อันเนื่องมาจากค่าพารามิเตอร์ของแขนหุ่นยนต์จริงกับของแบบจำลองใช้ค่าที่แตกต่างกัน และค่าแรงบิดของแกนที่ 1 ของแขนกลจริงมีลักษณะต่างกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยค่าแรงบิดข้อต่อที่ 1 ของแขนหุ่นยนต์จริงมีค่าเริ่มต้น - 7.5 N-m จากนั้นค่าแรงบิดจึงลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 1 s ค่าแรงบิดจึงมีค่าคงที่ที่ 0.5 N-m ส่วนค่าแรงบิดในแบบจำลองของแกนที่ 1 ค่าเริ่มต้น 1.98 N-m จากนั้นค่าแรงบิดจึงลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 2 s ค่าแรงบิดจึงมีค่าคงที่ที่ -3.2 N-m ส่วนค่าแรงบิดในข้อต่อที่ 2 และ 3 ของแขนกลจริงมีค่าเริ่มต้นที่ - 13.1 N-m และ -6.4 N-m ตามลำดับจากนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 1 s จึงมีค่าคงที่ที่ 0.13 N-m และ -0.22 N-m ในส่วนของแบบจำลองค่าแรงบิดข้อต่อที่ 2 มีค่าเริ่มต้นที่ 1.4 N-m จากนั้นลดลงไปอยู่ที่ 0.45 N-m แล้วจึงเพิ่มขึ้นเป็น 1 N-m โดยใช้เวลา 1.5 s เมื่อแขนกลเคลื่อนที่ครบ 5 s ค่าแรงบิดของแกนที่ 2 ในแบบจำลองอยู่ที่ 0.6 N-m ในส่วนของข้อต่อที่ 3 ของแบบจำลองค่าแรงบิดมีค่าเริ่มต้นที่ 0.3 N-m จากนั้นเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 1.9 N-m โดยใช้เวลา 2.5 s จากนั้นจึงลดลงไปอยู่ที่ 1.4 N-m

พิจารณาการเคลื่อนที่เขาค่าหาตำแหน่งที่กำหนด และการควบคุมแรงโดยอ้อมของระบบการควบคุมความยืดหยุ่นดัง ภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.10 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดในพิกัด uv และค่าแรง ในทิศทางตั้งฉากที่กระทำบนแผ่นโฟมในระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับ สำหรับแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 2

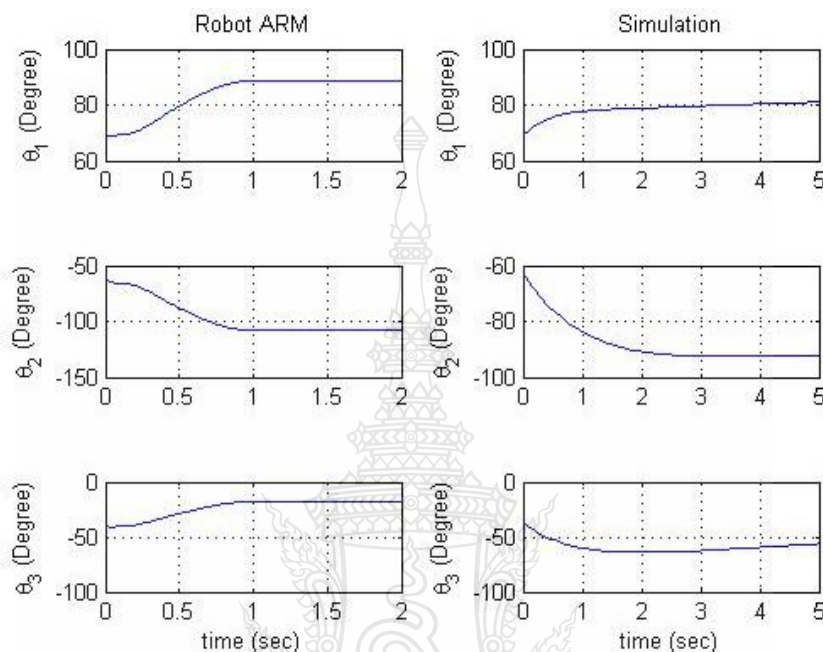
จากภาพที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนด จากการทดลองครั้งที่ 2 โดยในการทดสอบกำหนดให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง $(u_0, v_0) = (0.193, 0.470)$ m ไปยังตำแหน่ง $(u_d, v_d) = (0.195, 0.3)$ m ในระบบพิกัด uv เช่นเดียวกับการทดลองครั้งที่ 1 ค่าตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณด้วยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ และซึ่งระยะที่แขนกลลดลงไปยังแผ่นโฟมอยู่ที่ 0.002 m หรือ 2 mm โดยเป็นเงื่อนไขการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 จากสมการที่ 4.2 สามารถคำนวณแรงที่แขนกลกระทำกับแผ่นโฟมในแนวตั้งฉาก เมื่อค่า $x = 0.002$ m ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าผลการทดลองที่ได้จากการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงเทียบแบบจำลองในการเคลื่อนที่บนระนาบเอียง 45° บนแผ่นโฟม จากการทดลองครั้งที่ 2

| พารามิเตอร์ | ที่ต้องการ | | ที่ได้จากการทดลอง | | ค่าความคลาดเคลื่อน | | แรงกดในทิศตั้งฉากจากภาพที่ 4.2 |
|---------------|--------------|--------------|-------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------------------|
| | u_d (m) | v_d (m) | u_c (m) | v_c (m) | u_e (m) | v_e (m) | |
| การเคลื่อนที่ | u_d (m) | v_d (m) | u_c (m) | v_c (m) | u_e (m) | v_e (m) | f_l (N) |
| แขนกลจริง | 0.195 | 0.3 | 0.1957 | 0.3091 | -0.0007 | -0.0091 | 24.45 |
| แบบจำลอง | 0.195 | 0.3 | 0.1951 | 0.2897 | -0.0001 | 0.0103 | 17.73 |

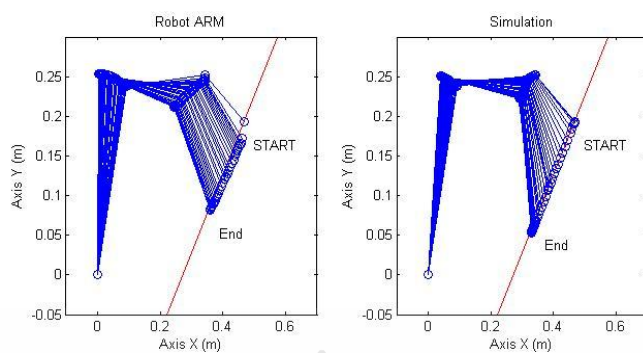
จากตารางที่ 4.3 ผลทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงของการทดลองครั้งที่ 2 ผลการเคลื่อนที่ของตำแหน่งเริ่มต้น ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ เห็นได้ว่าแขนกลสามารถเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้โดยมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง (u_e, v_e) อยู่ที่ $(-0.0007, -0.0091)$ m หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของตำแหน่ง จะได้เป็น $(0.36\%, 3.03\%)$ ในระบบพิกัด uv ในส่วนของแบบจำลองมีค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ อยู่ที่ $(0.0001, 0.0103)$ m คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของตำแหน่ง จะได้เป็น $(0.05\%, 3.43\%)$ จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของแขนกลจริงและของแบบจำลองในแนวแกน uv มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่า 5% แต่เมื่อพิจารณาถึงแรงที่ปลายแขนกลกระทำต่อผนังในทิศตั้งฉากของแขนกลจริงและแบบจำลองมีค่าต่างกัน 6.72 N เนื่องจากค่าความผิดพลาดในแนวแกน u ที่ไม่เท่ากันส่งผลต่อการคำนวณ ค่าแรงกระทำที่ปลายแขน ในทิศตั้งฉากด้วย

ผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลบนระนาบเอียง 45° บนแผ่นโฟมด้วยระบบควบคุมความยืดหยุ่นครั้งที่ 3 เมื่อนำค่าองศาการเคลื่อนที่ในแกนที่ 1 2 และ 3 ของแขนกลจริง กับของแขนกลจากแบบจำลองมาวาดกราฟจะได้ ดังภาพที่ 4.11

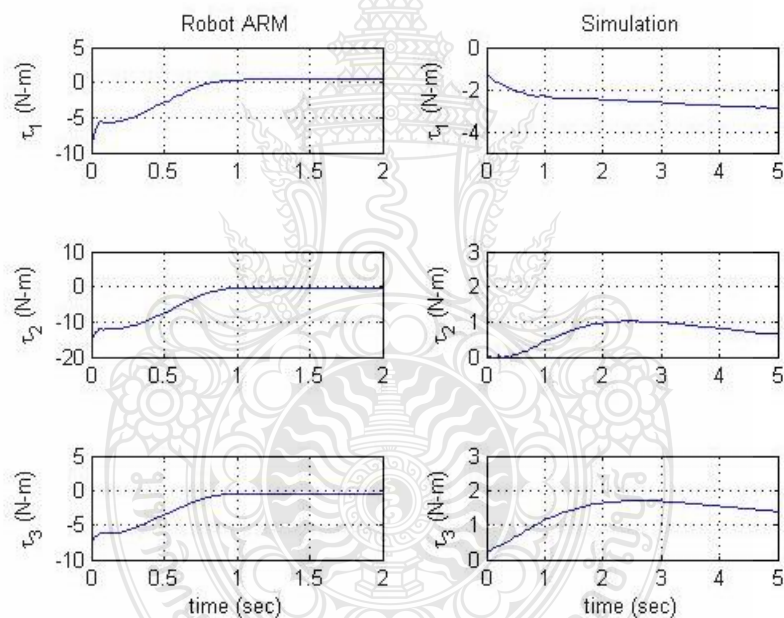


ภาพที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าองศาการเคลื่อนที่ บนแผ่นโฟมที่ระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) ในแกนที่ 1 2 และ 3 จากการทดลองครั้งที่ 3

จากภาพที่ 4.11 เป็นกราฟแสดงองศาการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์จริงและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะเห็นได้ว่าองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์จริงและแบบจำลองในแกนเดียวกันจะเริ่มที่องศาเดียวกันและองศาการหมุนตำแหน่งสุดท้ายจะได้ค่าที่ต่างกันกล่าวได้ว่าแขนกลเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งที่ต้องการด้วยตำแหน่งการหมุนที่ในแต่ละข้อต่อไม่เท่ากัน จากการทดลองที่ 3 จะเห็นได้ว่าลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและแบบจำลองมีทิศทางไปทางเดียวกันทั้ง 3 ข้อต่อนำค่าองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อจากภาพที่ 4.11 มาทำการวาดกราฟจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและแบบจำลอง จะได้ภาพที่ 4.12 เช่นเดียวกับในการทดลองครั้งที่ 1 และ 2 ในการทดลองจะเกิดการกระตุกของปลายแขนในตอนเริ่มต้นการเคลื่อนที่และปลายแขน CRS จริงจะเคลื่อนที่ไม่ถึงระยะที่กำหนดในตอนท้าย



ภาพที่ 4.12 การจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและแบบจำลอง บนแผ่นโฟมระนาบ ทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 3

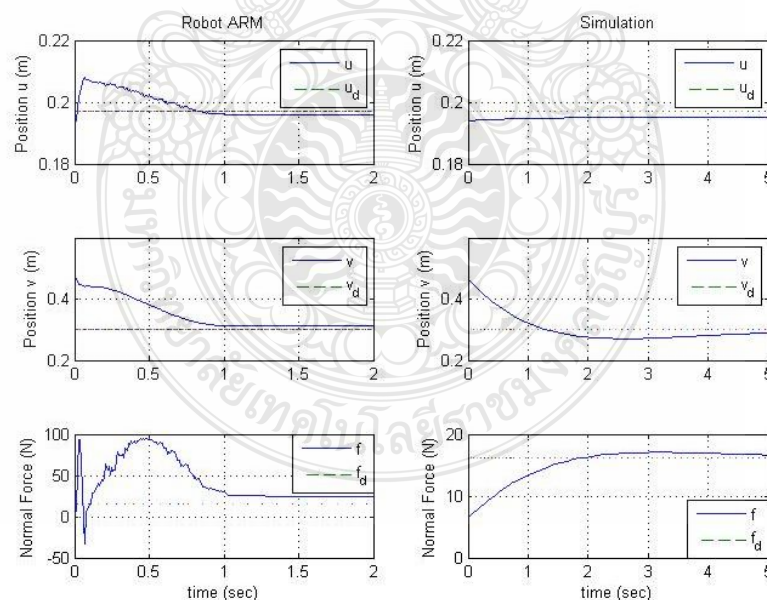


ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกล บนแผ่นโฟมระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 3

จากภาพที่ 4.13 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกลจริงกับของแบบจำลองในแกนที่ 1 2 และ 3 ของการทดลองครั้งที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่าแรงบิดของข้อต่อที่ 1 ของแขนกลจริงและของแบบจำลองมีทิศทางตรงกันข้าม ส่วนค่าแรงบิดของข้อต่อที่ 2 และ 3

ของแขนกลจริงและแบบจำลองทิศทางเดียวกัน โดยมีสาเหตุมาจาก ค่าแรงบิดดังกล่าวได้จากการคำนวณทางสมการคณิตศาสตร์โดยมีค่าพารามิเตอร์เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญการเปลี่ยนแปลงของการคำนวณ ค่าแรงบิดในที่นี้ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของแขนหุ่นยนต์จริงกับของแบบจำลองใช้ มีค่าที่แตกต่างกัน ค่าแรงบิดของแกนที่ 1 ของแขนกลจริงมีลักษณะต่างกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยค่าแรงบิดข้อต่อที่ 1 ของแขนหุ่นยนต์จริงมีค่าเริ่มต้น - 8.5 N-m จากนั้นค่าแรงบิดจึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 1 s ค่าแรงบิดจึงมีค่าคงที่ที่ 0.4 N-m ส่วนค่าแรงบิดในแบบจำลองของแกนที่ 1 ค่าเริ่มต้น -1.3 N-m จากนั้นค่าแรงบิดจึงลดลงอย่างต่อเนื่องจนอยู่ที่ค่า -2.87 N-m ส่วนค่าแรงบิดในข้อต่อที่ 2 และ 3 ของแขนกลจริงมีค่าเริ่มต้นที่ - 14.85 N-m และ - 7.3 N-m ตามลำดับจากนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 1 s จึงมีค่าคงที่ที่ 0.3 N-m และ 0.4 N-m ตามลำดับ ในส่วนของแบบจำลองค่าแรงบิดข้อต่อที่ 2 มีค่าเริ่มต้นที่ 0 N-m จากนั้นค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นไปอยู่ที่ 1 N-m ที่วินาทีที่ 2.5 s แล้วลดลงจนอยู่ที่ 0.64 N-m ในส่วนของข้อต่อที่ 3 ของแบบจำลองค่าแรงบิดมีค่าเริ่มต้นที่ 0.24 N-m จากนั้นเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเป็น 1.7 N-m โดยใช้เวลา 2.5 s เช่นเดียวกับแกนที่ 2 แล้วจึงลดลงอยู่ที่ 1.4 N-m

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่เขาค่าตำแหน่งที่กำหนด และการควบคุมแรงโดยอ้อมของระบบ การควบคุมความยืดหยุ่นดัง ภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดในพิกัด uv และค่าแรง ในทิศทาง z ที่ กระทำบนแผ่นโฟมในระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 3

จากภาพที่ 4.12 แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดโดยในการทดสอบกำหนดให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง $(u_0, v_0) = (0.193, 0.470)$ m ไปยังตำแหน่ง $(u_d, v_d) = (0.195, 0.3)$ m ในระบบพิกัด uv ค่าตำแหน่ง ในระบบพิกัด (u, v) นั้นได้จากการคำนวณด้วยความสัมพันธ์ทาง คณิตศาสตร์ และซึ่งระยะที่แขนกลลดลงไปยังแผ่นโฟมอยู่ที่ 0.002 m หรือ 2 mm จากสมการที่ 4.2 สำหรับความยืดหยุ่นของโฟมสามารถคำนวณ หาแรงที่แขนกลกระทำกับแผ่นโฟมในแนวตั้งฉากเมื่อค่า $x = 0.002$ m ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4

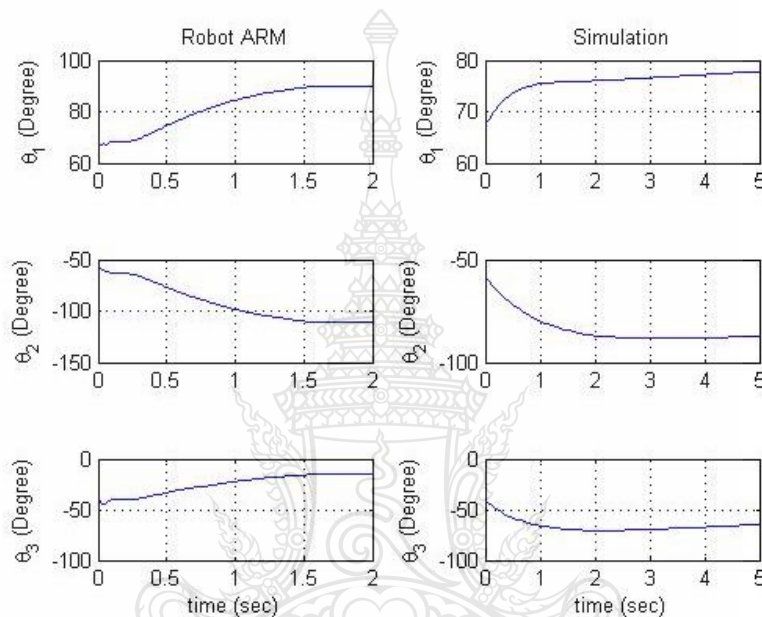
ตารางที่ 4.4 ค่าผลการทดลองที่ได้จากการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงเทียบแบบจำลองในการเคลื่อนที่บนระนาบเอียง 45° บนแผ่นโฟม จากการทดลองครั้งที่ 3

| พารามิเตอร์ | ที่ต้องการ | | ที่ได้จากการทดลอง | | ค่าความคลาดเคลื่อน | | แรงกดในทิศตั้งฉากจากภาพที่ 4.2 |
|---------------|--------------|--------------|-------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------------------|
| | u_d (m) | v_d (m) | u_c (m) | v_c (m) | u_e (m) | v_e (m) | |
| การเคลื่อนที่ | u_d (m) | v_d (m) | u_c (m) | v_c (m) | u_e (m) | v_e (m) | f_l (N) |
| แขนกลจริง | 0.195 | 0.3 | 0.1957 | 0.3117 | -0.0007 | -0.0117 | 24.73 |
| แบบจำลอง | 0.195 | 0.3 | 0.1950 | 0.2898 | 0 | 0.0102 | 16.64 |

จากตารางที่ 4.4 ผลทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงของการทดลองครั้งที่ 3 ผลการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งที่ต้องการ เห็นได้ว่าแขนกลสามารถเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้โดยมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งอยู่ที่ $(u_e, v_e) = (-0.0007, -0.0117)$ m หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาดของตำแหน่ง จะได้เป็น (0.36%, 3.9%) ในระบบพิกัด uv ในส่วนของแบบจำลองมีค่าความผิดพลาด การเคลื่อนที่อยู่ที่ (0, 0.0102) m คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของตำแหน่งจะได้เป็น (0%, 3.4%) จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของแขนกลจริงและของแบบจำลองในแนวแกน uv มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่า 5% แต่เมื่อพิจารณาถึงแรงที่ปลายแขนกลกระทำต่อผนังหรือสิ่งแวดล้อมจะขึ้นอยู่กับระยะ ในทิศตั้งฉากที่ปลายแขนที่กดลงยังพื้นผิว หรือเป็นค่าความผิดพลาดในแนวแกน u จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของแขนกลจริง (u_e) มีค่า -0.0007 m กล่าวคือแขนกลกดลงมากกว่าระยะที่กำหนดส่งผลให้แรงที่กระทำต่อปลายแขนมีค่ามากกว่าค่าที่ต้องการควบคุมโดยค่าแรงกดที่ปลายแขนกลจริง มีค่าประมาณ 24.73 N-m ส่วนของแบบจำลองมีค่าความผิดพลาดในแนวแกน u อยู่ที่ 0 m กล่าวได้ว่าแบบจำลองสามารถควบคุมแรงได้ตามค่าที่ต้องการ โดย

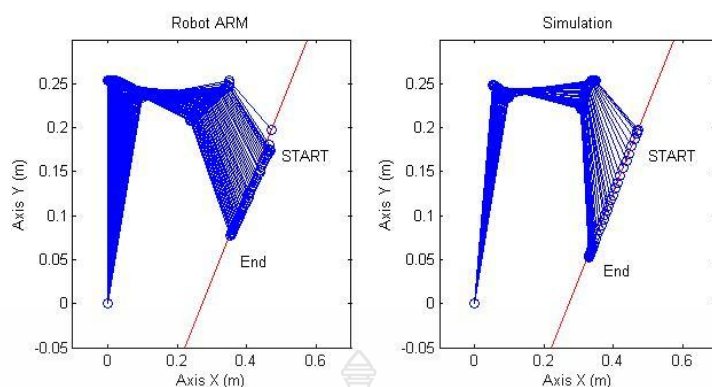
ค่าแรงอยู่ที่ 16.64 N-m โดยในการทดลองครั้งที่ 3 ที่ค่าแรงปลายแขนกลจริงและแบบจำลองมีค่าต่างกัน 8.09 N-m

ผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลบนระนาบเอียง 45° บนแผ่นโฟมด้วยระบบควบคุม ความยืดหยุ่นครั้งที่ 4 นำค่าองศาการเคลื่อนที่ในแกนที่ 1 2 และ 3 ของแขนกลจริงกับของแขนกลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาวาดกราฟจะได้ ดังภาพที่ 4.15

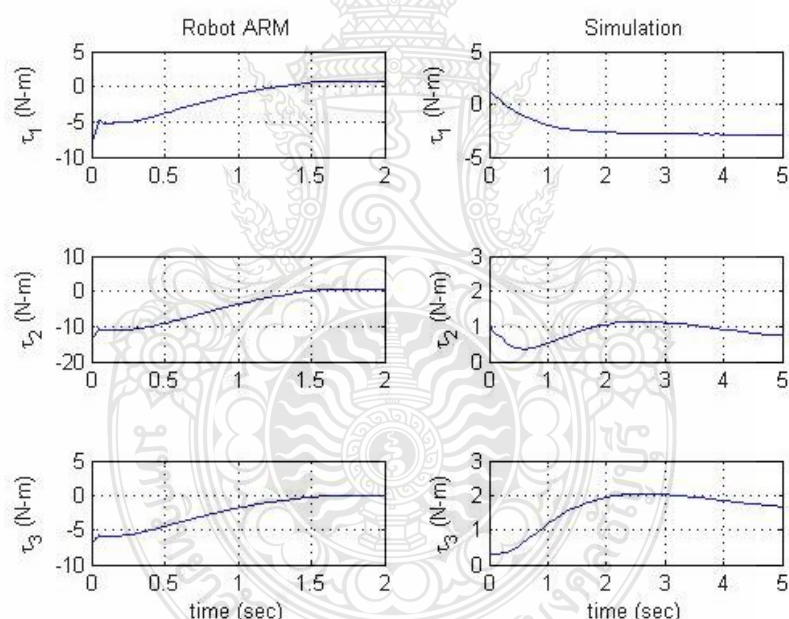


ภาพที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าองศาการเคลื่อนที่บนแผ่นโฟมที่ระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) ในแกนที่ 1 2 และ 3 จากการทดลองครั้งที่ 4

จากภาพที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์จริงและแบบจำลองในแกนเดียวกันจะเริ่มที่จุดเดียวกันและองศาการหมุนตำแหน่งสุดท้ายจะได้ค่าที่ต่างกันหรือแขนกลเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งที่ต้องการด้วยตำแหน่งการหมุนที่ในแต่ละแกนไม่เท่ากับแบบจำลองอันเนื่องมาจาก ค่าแรงบิดของแต่ละแกนของแขนหุ่นยนต์จริงและของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าไม่เท่ากัน โดยดูได้จากค่าแรงบิดใน ภาพที่ 4.17 เมื่อนำค่าองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อมาทำการวาดกราฟจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและแบบจำลองดังแสดงด้วยภาพที่ 4.16 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและของแบบจำลองจะมีพฤติกรรมเหมือนกันในการทดลองครั้งที่ 1 2 และ 3



ภาพที่ 4.16 การจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและแบบจำลอง บนแผ่นโฟมระนาบ ทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 4

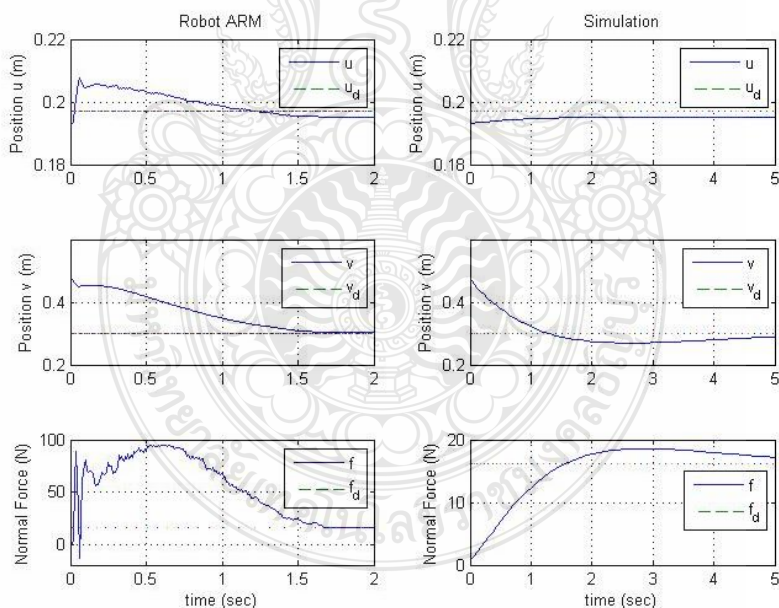


ภาพที่ 4.17 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกล บนแผ่นโฟมระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 4

จากภาพที่ 4.17 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกลจริงกับของแบบจำลองในแกนที่ 1 2 และ 3 ของการทดลองครั้งที่ 4 จากกราฟแสดงให้เห็นถึงค่าแรงบิด

แต่ละแกนของแขนหุ่นยนต์มีค่าต่างกัน อันเนื่องมาจากค่าพารามิเตอร์ของแขนหุ่นยนต์จริงกับของแบบจำลองใช้ค่าที่แตกต่างกัน ค่าแรงบิดของแกนที่ 1 ของแขนกลจริงมีลักษณะต่างกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยค่าแรงบิดข้อต่อที่ 1 ของแขนหุ่นยนต์จริงมีค่าเริ่มต้น - 7.5 N-m จากนั้นค่าแรงบิดจึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 1.5 s ค่าแรงบิดจึงมีค่าคงที่ที่ 0.8 N-m ส่วนค่าแรงบิดในแบบจำลองของแกนที่ 1 ค่าเริ่มต้น -1.2 N-m จากนั้นค่าแรงบิดจึงลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 2 s ค่าแรงบิดจึงมีค่าคงที่ที่ -2.8 N-m ส่วนค่าแรงบิดในข้อต่อที่ 2 และ 3 ของแขนกลจริงมีค่าเริ่มต้นที่ -13 N-m และ -6.64 N-m ตามลำดับ จากนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 1.5 s จึงมีค่าคงที่ที่ 0.55 N-m และ -0.1 N-m ตามลำดับในส่วน ของแบบจำลองค่าแรงบิดข้อต่อที่ 2 มีค่าเริ่มต้นที่ 1 N-m แล้วลดลงอยู่ที่ 0.35 N-m โดยใช้เวลาแค่ 0.6 s จากนั้นเพิ่มขึ้นไปอยู่ที่ 1.15 N-m ที่วินาทีที่ 2.5 ในส่วนของข้อต่อที่ 3 ของแบบจำลองค่าแรงบิดมีค่าเริ่มต้นที่ 0.3 N-m จากนั้นเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 2.5 s ค่าแรงบิดจึงอยู่ที่ 2.05 N-m แล้วจึงลดลงจนอยู่ที่ 1.66 N-m

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งที่กำหนด และการควบคุมแรงโดยอ้อมของระบบ การควบคุมความยืดหยุ่นดังภาพที่ 4.16



ภาพที่ 4.18 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดในพิกัด uv และค่าแรง ในทิศทาง z จากที่ กระทำบนแผ่นโฟมในระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 4

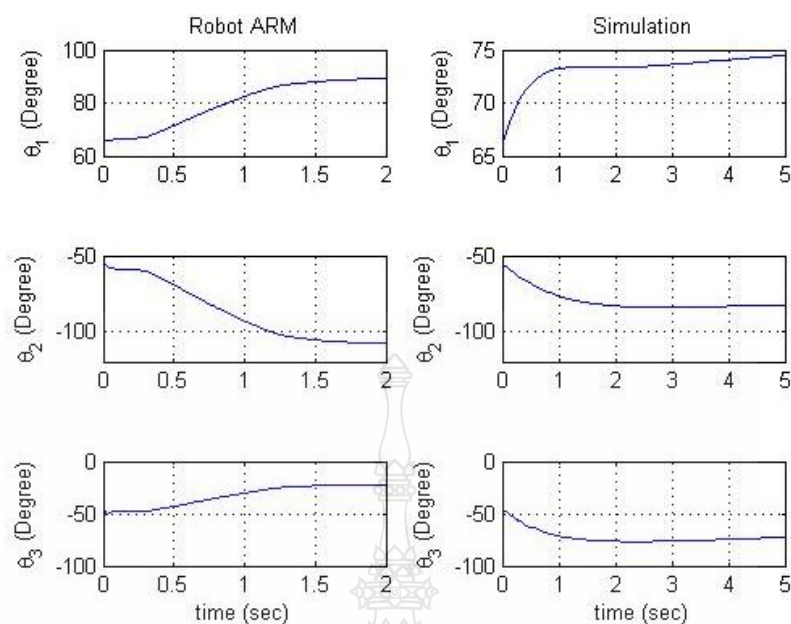
จากภาพที่ 4.16 แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดโดยในการทดสอบกำหนดให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง $(u_0, v_0) = (0.193, 0.470)$ m ไปยังตำแหน่ง $(u_d, v_d) = (0.195, 0.3)$ m ในระบบพิกัด uv ค่าตำแหน่งในระบบพิกัด (u, v) นั้นได้จากการคำนวณด้วยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ และซึ่งระยะที่แขนกลลดลงไปยังแผ่นโฟมอยู่ที่ 0.002 m หรือ 2 mm จากสมการที่ 4.2 สำหรับความยืดหยุ่นของโฟม สามารถคำนวณหาแรงที่แขนกลกระทำกับแผ่นโฟมในแนวตั้งฉากเมื่อค่า $x = 0.002$ m ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าผลการทดลองที่ได้จากการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงเทียบแบบจำลอง ในการเคลื่อนที่บนระนาบเอียง 45° บนแผ่นโฟม จากการทดลองครั้งที่ 4

| พารามิเตอร์ | ที่ต้องการ | | ที่ได้จากการทดลอง | | ค่าความคลาดเคลื่อน | | แรงกดในทิศตั้งฉากจากภาพที่ 4.2 |
|---------------|--------------|--------------|-------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------------------|
| | u_d (m) | v_d (m) | u_c (m) | v_c (m) | u_e (m) | v_e (m) | |
| การเคลื่อนที่ | u_d (m) | v_d (m) | u_c (m) | v_c (m) | u_e (m) | v_e (m) | f_l (N) |
| แขนกลจริง | 0.195 | 0.3 | 0.1949 | 0.3048 | 0.0001 | -0.0048 | 15.47 |
| แบบจำลอง | 0.195 | 0.3 | 0.1951 | 0.2895 | -0.0001 | 0.0105 | 17.23 |

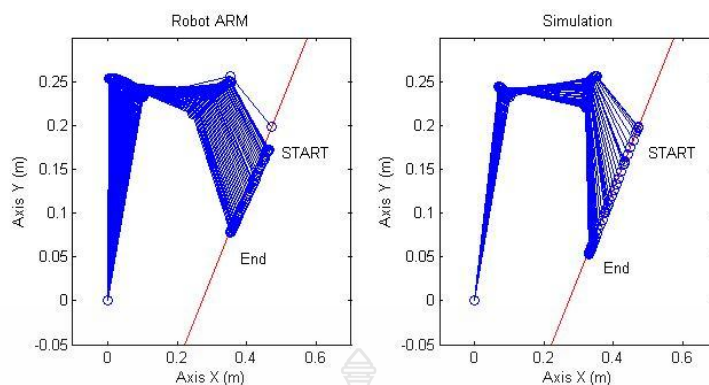
จากตารางที่ 4.5 ผลทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงของการทดลองครั้งที่ 4 ผลการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งที่ต้องการ เห็นได้ว่าแขนกลสามารถเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้โดยมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งอยู่ที่ $(u_e, v_e) = (0.001, -0.0048)$ m หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาดของตำแหน่ง จะได้เป็น (0.05%, 1.6%) ในระบบพิกัด uv ในส่วนของแบบจำลองมีค่าความผิดพลาดการเคลื่อนที่อยู่ที่ $(-0.0001, 0.0105)$ m คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของตำแหน่ง จะได้เป็น (0.05%, 3.5%) จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของแขนกลจริงและของแบบจำลองในแนวแกน uv มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่า 5% จากค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในแนวแกน u ของแขนกลจริงและของแบบจำลองถือว่าน้อยมากทำให้แรงกดที่ปลายแขนจึงมีค่าใกล้เคียงกันมากโดยค่าแรงกดในทิศตั้งฉากที่ปลายแขนของแขนหุ่นยนต์จริงอยู่ที่ 15.47 N ส่วนของแบบจำลองจะอยู่ที่ 17.23 N

ผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลบนระนาบเอียง 45° บนแผ่นโฟมด้วยระบบควบคุมความยืดหยุ่นครั้งที่ 5 นำค่าองศาการเคลื่อนที่ในแกนที่ 1 2 และ 3 ของแขนกลจริงกับของแขนกลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาวาดกราฟจะได้ ดังภาพที่ 4.19

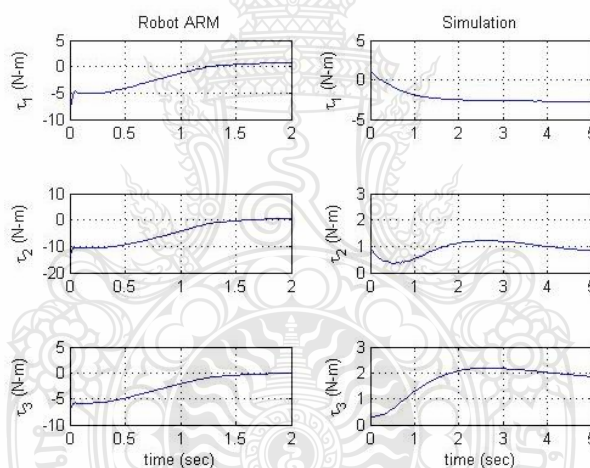


ภาพที่ 4.19 การเปรียบเทียบค่าองศาการเคลื่อนที่บนแผ่นโฟมที่ระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) ในแกนที่ 1 2 และ 3 จากการทดลองครั้งที่ 5

จากภาพที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์จริงและแบบจำลองในแกนเดียวกันจะเริ่มที่จุดเดียวกันและองศาการหมุนตำแหน่งสุดท้ายจะได้ค่าที่ต่างกันหรือแขนกลเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งที่ต้องการด้วยตำแหน่งการหมุนที่ในแต่ละแกนไม่เท่ากับแบบจำลองอันเนื่องมาจาก ค่าแรงบิดของแต่ละแกนของแขนหุ่นยนต์จริงและของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าไม่เท่ากัน โดยดูได้จากค่าแรงบิดในภาพที่ 4.21 เมื่อนำค่าองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อมาทำการวาดกราฟจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและแบบจำลองดังแสดงด้วยภาพที่ 4.20 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและของแบบจำลองจะมีพฤติกรรมเหมือนกันในการทดลองครั้งที่ 1 ถึง 4



ภาพที่ 4.20 การจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและแบบจำลอง บนแผ่นโฟมระนาบ ทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 5

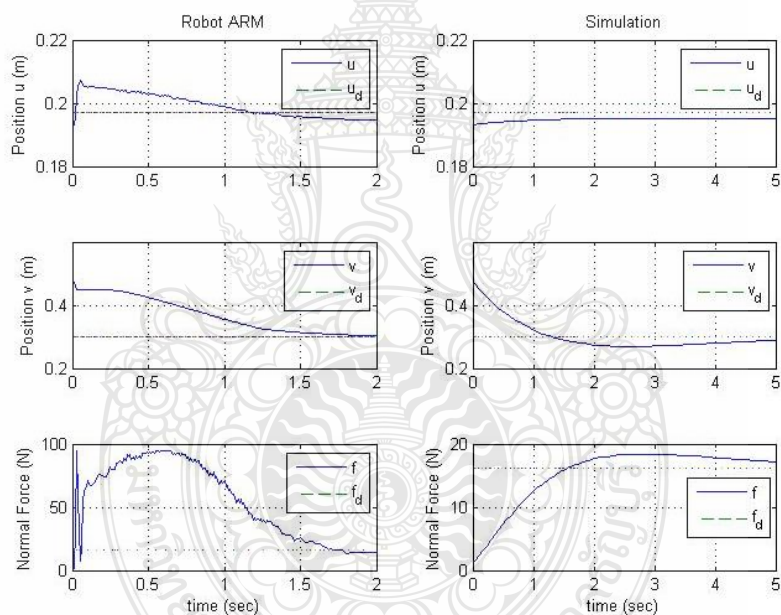


ภาพที่ 4.21 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขน กล บนแผ่นโฟมระนาบทำ มุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 5

จากภาพที่ 4.21 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขน กลจริงกับของแบบจำลองในแกนที่ 1 2 และ 3 ของการทดลองครั้งที่ 5 พิจารณาว่าแรงบิดของแกนที่ 1 ของแขนกลจริงมีลักษณะต่างกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยค่าแรงบิดข้อต่อที่ 1 ของแขน หุ่นยนต์จริงมีค่าเริ่มต้น -7.5 N-m จากนั้นค่าแรงบิดจึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงค่า 0 N-m แล้วจึงเพิ่ม ขึ้นมาคงที่ที่ 0.7 N-m ค่าแรงบิดในแบบจำลองของแกนที่ 1 ค่าเริ่มต้น 1 N-m จากนั้นค่าแรงบิดจึง

ลดลงจนถึงค่า 0 N-m แล้วกลับค่าแรงบิดเป็นค่าติดลบไปคงที่ที่ -2.6 N-m ที่วินาทีที่ 2.6 ส่วนค่าแรงบิดในข้อต่อที่ 2 และ 3 ของแขนกลจริงมีค่าเริ่มต้นที่ -13 N-m และ -6.75 N-m ตามลำดับ จากนั้นจึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวินาทีที่ 1.8 s จึงมีค่าคงที่ที่ 0.5 N-m และ -0.1 N-m ตามลำดับ ในส่วนของแบบจำลองค่าแรงบิดข้อต่อที่ 2 และ 3 เริ่มต้นที่ 1 N-m และ 0.3 N-m ตามลำดับ จากนั้นการเปลี่ยนแปลงของแรงบิดของข้อต่อที่ 2 ลดลงอยู่ที่ 0.4 N-m โดยใช้เวลาแค่ 0.6 s จากนั้นเพิ่มขึ้นไปอยู่ที่ 1.2 N-m ที่วินาทีที่ 2.6 s แล้วจึงลดลงมาอยู่ที่ 0.8 N-m ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแรงบิดข้อต่อที่ 3 ของแบบจำลองค่าแรงบิดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 2.1 N-m ที่วินาทีที่ 2.6 แล้วจึงลดลงอย่างช้าๆ จนถึงค่าคงที่ที่ 1.86 N-m

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งที่กำหนด และการควบคุมแรงโดยอ้อมของระบบ การควบคุมความยืดหยุ่นดัง ภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.22 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดในพิกัด uv และค่าแรง ในทิศทางตั้งฉากที่ กระทำบนแผ่นโพลีในระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) จากการทดลองครั้งที่ 5

จากภาพที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดโดยในการทดสอบกำหนดให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง $(u_0, v_0) = (0.193, 0.470)$ m ไปยังตำแหน่ง $(u_d, v_d) = (0.195, 0.3)$ m ในระบบพิกัด uv ค่าตำแหน่ง ในระบบพิกัด (u, v) นั้นได้จากการคำนวณด้วย

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ และซึ่งระยะที่แขนกลลดลงไปยังแผ่นโคมอยู่ที่ 0.002 m หรือ 2 mm จากสมการที่ 4.2 สำหรับความยืดหยุ่นของโคม สามารถคำนวณหาแรงที่แขนกลกระทำกับแผ่นโคมในแนวตั้งฉากเมื่อค่า $x = 0.002$ m ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าผลการทดลองที่ได้จากการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงเทียบแบบจำลอง ในการเคลื่อนที่บนระนาบเอียง 45° บนแผ่นโคม จากการทดลองครั้งที่ 5

| พารามิเตอร์ | ที่ต้องการ | | ที่ได้จากการทดลอง | | ค่าความคลาดเคลื่อน | | แรงกดในทิศตั้งฉากจากภาพที่ 4.2 |
|---------------|--------------|--------------|-------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------------------|
| | u_d (m) | v_d (m) | u_c (m) | v_c (m) | u_e (m) | v_e (m) | |
| การเคลื่อนที่ | | | | | | | f_1 (N) |
| แขนกลจริง | 0.195 | 0.3 | 0.1948 | 0.3053 | 0.0002 | -0.0053 | 14.44 |
| แบบจำลอง | 0.195 | 0.3 | 0.1951 | 0.2894 | -0.0001 | 0.0106 | 17.16 |

จากตารางที่ 4.6 ผลทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงของการทดลองครั้งที่ 5 ผลการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งที่ต้องการ เห็นได้ว่าแขนกลสามารถเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้โดยมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งอยู่ที่ $(u_e, v_e) = (0.0002, -0.0053)$ m หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของตำแหน่ง จะได้เป็น (0.10%, 1.77%) ในระบบพิกัด uv ในส่วนของแบบจำลองมีค่าความผิดพลาด การเคลื่อนที่อยู่ที่ $(-0.0001, 0.0106)$ m หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของตำแหน่ง จะได้เป็น (-0.05%, 3.53%) จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของแขนกลจริงและของแบบจำลองในแนวแกน uv มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดน้อยกว่า 5% เมื่อพิจารณาค่าแรงกระทำปลายแขนของแขนกลจริงอยู่ที่ 14.44 N-m ส่วนของแบบจำลองอยู่ที่ 17.16 N-m ซึ่งค่าผลต่างของแรงกระทำที่ปลายแขนกลจริงกับแบบจำลองมีค่าเป็น 2.72 N ซึ่งเป็นค่านี้น้อยมากเนื่องจากตำแหน่งปลายแขนของแขนกลจริงและแบบจำลองในแนวแกน u มีค่าใกล้เคียงกัน

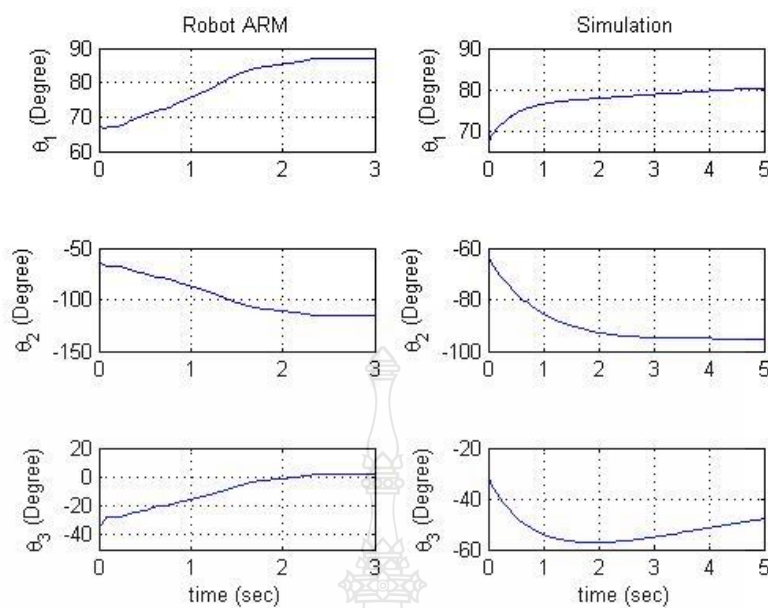
4.3 ผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลบนระนาบเอียง 45° บนแผ่นฟองน้ำด้วยระบบควบคุมความยืดหยุ่น

ในการทดลองให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง บนพื้นระนาบที่เอียงทำมุมกับแนวระนาบเป็นมุม 45° โดยเริ่มเคลื่อนที่จากตำแหน่ง $(u_0, v_0) = (0.208, 0.470)$ m ไปยังตำแหน่ง $(u_d, v_d) = (0.210, 0.300)$ m ในระบบพิกัด uv โดยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ ของระบบควบคุมความยืดหยุ่นของแขนกลจริง และของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไว้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ ของระบบควบคุมความยืดหยุ่น ของแขนกลจริงและแบบจำลองในการควบคุมแรงกดของปลายแขนที่ เคลื่อนที่บนระนาบเอียง 45° กับแนวระนาบ ที่เป็นวัสดุแผ่นฟองน้ำปะกบผิวด้านบนด้วยแผ่นพลาสติก

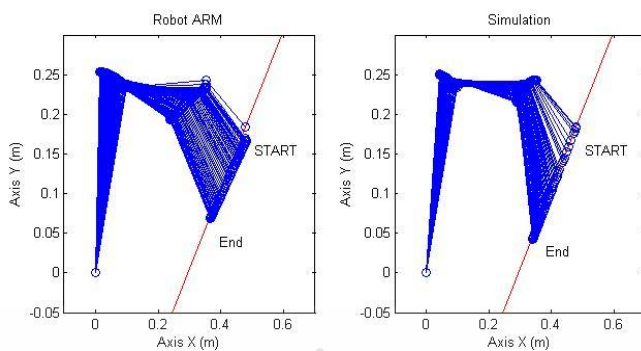
| พารามิเตอร์ | การทดลองจริง | แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ |
|----------------------------|---|--|
| m_1 (Kg) | 0.81 | 0.81 |
| m_2 (Kg) | 0.52 | 0.52 |
| m_3 (Kg) | 0.1 | 0.1 |
| l_1 (m) | 0.255 | 0.255 |
| l_2 (m) | 0.255 | 0.255 |
| l_3 (m) | 0.144 | 0.144 |
| I_1 (Kg-m ²) | - | 0.39 |
| I_2 (Kg-m ²) | - | 0.27 |
| I_3 (Kg-m ²) | - | 0.18 |
| K_v | $\begin{bmatrix} 0.000007 & 0 \\ 0 & 0.00005 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 60,000 & 0 \\ 0 & 60,000 \end{bmatrix}$ |
| K_p | $\begin{bmatrix} 320 & 0 \\ 0 & 280 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 80,000 & 0 \\ 0 & 80,000 \end{bmatrix}$ |
| K_i | $\begin{bmatrix} 0.005 & 0 \\ 0 & 0.028 \end{bmatrix}$ | $\begin{bmatrix} 40,000 & 0 \\ 0 & 40,000 \end{bmatrix}$ |

จากการทดลองนำค่าองศาการเคลื่อนที่ในแกนที่ 1 2 และ 3 ของแขนกล CRS จริงกับของแขนกลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาวาดกราฟจะได้ ดังภาพที่ 4.23

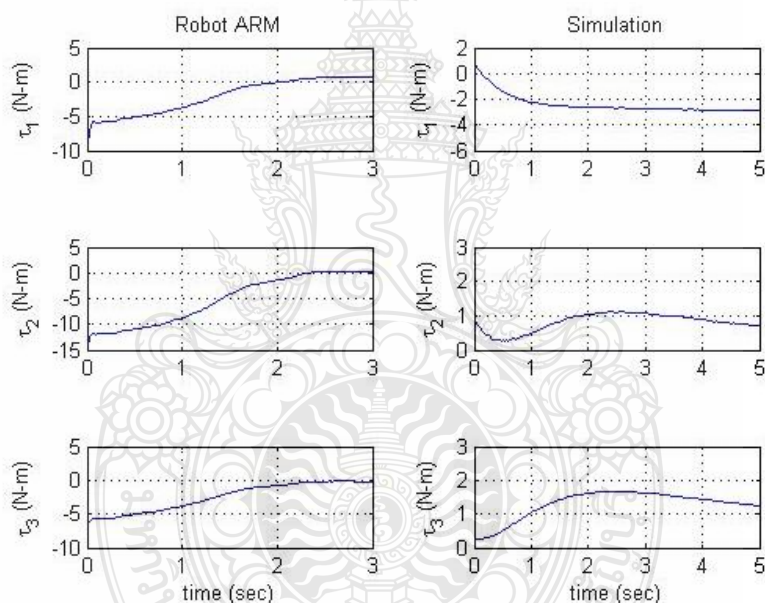


ภาพที่ 4.23 การเปรียบเทียบค่าองศาการเคลื่อนที่ บนแผ่นฟองน้ำที่ระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา) ในแกนที่ 1 2 และ 3

จากภาพที่ 4.23 จะเห็นได้ว่าองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อของแขนกลจริงและแบบจำลองในแกนเดียวกันจะเริ่มที่จุดเดียวกันและองศาการหมุนตำแหน่งสุดท้ายจะได้ค่าองศาการหมุนที่ต่างกัน เป็นเช่นเดียวกับการทดลองบนแผ่นโฟม เมื่อนำค่าองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อ มาทำการวาดกราฟจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและแบบจำลองดังแสดง ในภาพที่ 4.24 ในการทดลองกับแขนกลจริงจะเกิดการกระตุกขององศาการหมุนหรือเกิดการกระชากของโซ่ ขณะแขนกลจริงเริ่มมีการเคลื่อนที่ และตำแหน่งของปลายแขนกลจริงจะมีค่าน้อยกว่าของปลายแขนกลในแบบจำลอง ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้จะคล้ายกับในการทดลองการควบคุมแรงกดบนแผ่นโฟมทั้ง 5 การทดลอง



ภาพที่ 4.24 การจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและแบบจำลอง บนแผ่นฟองน้ำ ระบายทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา)

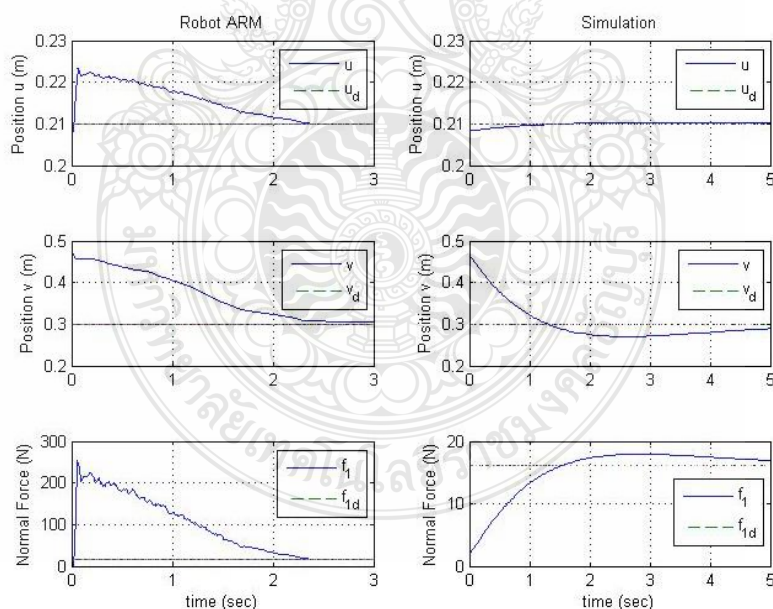


ภาพที่ 4.25 การเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกล บนแผ่นฟองน้ำระบาย ทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา)

จากภาพที่ 4.25 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่กระทำแต่ละข้อต่อของ แขนหุ่นยนต์จริงกับของแบบจำลอง ในแกนที่ 1 2 และ 3 จะเห็นได้ว่าค่าแรงบิดในแต่ละแกนของแบบจำลองมีค่าที่ราบเรียบตลอดเส้นทาง การเคลื่อนที่ ซึ่งต่างกับแขนหุ่นยนต์จริงซึ่งช่วงแรกค่าแรงบิดเกิดการกระตุก จากภาพที่ 4.25 แสดงให้เห็นถึงค่าแรงบิดแต่ละแกนของแขนหุ่นยนต์มีค่าแตกต่างกัน

กัน อันเนื่องมาจากค่าพารามิเตอร์ของแขนหุ่นยนต์จริงกับของแบบจำลองใช้ค่าที่แตกต่างกัน พิจารณา ค่าแรงบิด ของแขนกลจริงของข้อต่อที่ 1 ค่าแรงบิดของแขนหุ่นยนต์จริงมีค่าเริ่มต้น -8 N-m จากนั้นจึง เพิ่มขึ้นแล้วเปลี่ยนค่าไปอยู่ที่ 0.7 N-m ส่วนค่าแรงบิดของข้อต่อที่ 2 มีค่าเริ่มต้นที่ -13 N-m จากนั้นจึง เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแล้วมาคงที่ 0.2 N-m ค่าแรงบิดของข้อต่อที่ 3 มีค่าเริ่มต้นที่ -6 N-m ค่าแรงบิดจะ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่นกันและ มาอยู่ที่ -0.2 N-m ในตอนท้าย ถ้า พิจารณาแรงบิดของแบบจำลองจะ เห็นว่าค่าแรงบิดของข้อต่อทั้ง 3 ข้อต่อมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงคล้าย กับในการทดลองที่ 2 4 และ 5 ของการควบคุมการเคลื่อนที่บนแผ่นโฟมจะเห็นได้ว่าค่าแรงบิด ของข้อต่อที่ 1 มีค่าเริ่มต้นที่ 0.7 N-m จากนั้นจึงลดลงอย่างต่อเนื่องจนมาคงที่ที่ - 2.8 N-m ส่วนค่าแรงบิดข้อต่อที่ 2 เริ่มต้นที่ 0.9 N-m แล้ว ลดลงอยู่ที่ 0.25 N-m ที่วินาทีที่ 0.5 แล้วเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยค่าแรงบิดมากที่สุดจนถึงค่าแรงบิดที่ มากที่สุดของข้อต่อที่ 2 อยู่ที่ 1.1 N-m แล้วจึงลดลงอย่างช้าๆมาอยู่ที่ 0.7 N-m ส่วนค่าแรงบิดข้อต่อที่ 3 เริ่มต้นที่ 0.27 N-m แล้วเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าแรงบิดมากที่สุดของข้อต่อที่ 2 อยู่ที่ 1.65 N-m แล้วจึงลดลงอย่างช้าๆ มาอยู่ที่ 1.24 N-m

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งที่กำหนด และการควบคุมแรงโดยอ้อมของระบบ การควบคุมความยืดหยุ่นดัง ภาพที่ 4.26



ภาพที่ 4.26 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดในพิกัด uv และค่าแรง ในทิศตั้งฉากที่ กระทำบนแผ่นฟองน้ำในระนาบทำมุมเอียง 45° กับแนวระดับของแขนกลจริง (หลักด้านซ้าย) กับแบบจำลอง (หลักด้านขวา)

จากภาพที่ 4.26 แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดโดยในการทดสอบกำหนดให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง $(u_0, v_0) = (0.208, 0.3) \text{ m}$ ไปยังตำแหน่ง $(u_d, v_d) = (0.210, 0.3) \text{ m}$ ในระบบพิกัด uv ค่าตำแหน่งในระบบพิกัด (u, v) นั้นได้จากการคำนวณด้วยความสัมพันธ์ทางทางฟังกซ์คณิตศาสตร์ และซึ่งระยะที่แขนกลลดลงไปบนแผ่นโฟมอยู่ที่ 0.002 m หรือ 2 mm จากสมการที่ 4.1 สำหรับความยืดหยุ่นของฟองน้ำสามารถคำนวณหาแรงที่แขนกลกระทำกับแผ่นฟองน้ำเมื่อค่า $x = 0.002 \text{ m}$ ผลการทดลองของตำแหน่งแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ค่าผลการทดลองที่ได้จากการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์จริงเทียบแบบจำลอง ในการเคลื่อนที่บนระนาบเอียง 45° บนแผ่นฟองน้ำ

| พารามิเตอร์ | ที่ต้องการ | | ที่ได้จากการทดลอง | | ค่าความคลาดเคลื่อน | | แรงกดในทิศตั้งฉากจากภาพที่ 4.2 |
|---------------|--------------|--------------|-------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------------------|
| | u_d (m) | v_d (m) | u_c (m) | v_c (m) | u_e (m) | v_e (m) | |
| การเคลื่อนที่ | u_d (m) | v_d (m) | u_c (m) | v_c (m) | u_e (m) | v_e (m) | f_1 (N) |
| แขนกลจริง | 0.210 | 0.3 | 0.2099 | 0.3066 | 0.0001 | -0.0066 | 15.81 |
| แบบจำลอง | 0.210 | 0.3 | 0.2101 | 0.2897 | -0.0001 | 0.0103 | 16.93 |

จากตารางที่ 4.8 ในการควบคุม การเคลื่อนที่ของแขนกลจริงผลการเคลื่อนที่ จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งที่ต้องการ จะเห็นได้ว่าแขนกลสามารถเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้โดยมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งอยู่ที่ $(u_e, v_e) = (0.0001, -0.0066) \text{ m}$ ในระบบพิกัด uv เมื่อนำมาคิดเป็นค่าเปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด จะมีค่าเป็น $(0.05\%, 2.22\%)$ ในส่วนของแบบจำลองมีค่าความผิดพลาดการเคลื่อนที่อยู่ที่ $(u_e, v_e) = (-0.0001, 0.0103) \text{ m}$ หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจะได้เป็น $(-0.05\%, 3.43\%)$ จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของแบบจำลองในแนวแกน u มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแขนกลจริงและแบบจำลองที่เท่ากันซึ่งน้อยกว่า 1% ส่วนในแนวแกน v มีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของแขนกลจริงและของแบบจำลอง นั้นจะ มากกว่าเมื่อเทียบค่าความผิดพลาดในแนวแกน u แต่ยังคงอยู่ในช่วงค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่า 5% เมื่อพิจารณาค่าแรงกระทำที่ปลายแขนจะเห็นได้ว่าค่าแรงกระทำที่ปลายแขนกลจริงกับแบบจำลองมีค่าต่างกันเพียง 1.12 N-m เนื่องจากตำแหน่งที่ปลายแขนของแขนกลจริงและแบบจำลองในระบบพิกัด u มีค่าใกล้เคียงกันมาก

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง ปัญหาที่พบในการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปการทดลอง

จากการนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมความยืดหยุ่น (Stiffness Control) เพื่อใช้ในการควบคุมแขนกล CRS A255 แบบ 3 แกนให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนด ในระบบ 2 มิติ และสามารถควบคุมแรงกดในทิศตั้งฉากโดยอ้อม และได้ทำการเปรียบเทียบการควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและแรง ที่กระทำในแนวตั้งฉาก กับผิวสัมผัส ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล CRS แบบ 3 แกนและแขนกล CRS จริง โดยระบบควบคุมความยืดหยุ่นของแขนกลจริงได้ทำการออกแบบด้วยโปรแกรม LabVIEW และในส่วนของระบบควบคุมความยืดหยุ่นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลได้ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 เป็นการทดลองการทำงานของระบบควบคุมแขนกลด้วยแบบจำลองทางพลวัต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกล และเพื่อทดสอบระบบควบคุมความยืดหยุ่นแขนกล โดยคำนวณหาสมการของแขนกล CRS แบบ 3 แกน และได้สร้างแบบจำลอง ขึ้นในโปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อดูว่าระบบควบคุมความยืดหยุ่นของแขนกลสามารถ ควบคุมการเคลื่อนที่และแรงกดบนวัสดุ ได้จริงหรือไม่ สำหรับส่วนที่ 2 เป็นการทดลองการทำงานจริงของ แขนกลโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา และทดสอบประสิทธิภาพ ระบบควบคุมความยืดหยุ่น แขนกลจริงที่ออกแบบระบบด้วยโปรแกรม LabVIEW ว่าสามารถควบคุมการเคลื่อนที่และแรงกดบนวัสดุของแขนกลจริงได้หรือไม่

ผลการทดลองในตารางที่ 5.1 ให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่บนพื้นระนาบ เอียง 45° บนผิววัสดุสองชนิด คือ โฟม (ครั้งที่ 1 ถึง ครั้งที่ 5) และฟองน้ำ (ครั้งที่ 6) จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของระบบควบคุมความยืดหยุ่นของแขนกล CRS จริงสามารถเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งที่ต้องการโดยมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในแกน u และแกน v ที่น้อยกว่า 5 % แต่ในการควบคุมความยืดหยุ่นโดยใช้แบบจำลองทางพลวัตของแขนกลนั้นจะมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในแกน u และแกน v น้อยกว่า 4 % พิจารณาค่าแรงกดในทิศตั้งฉากกระทำกับผนังของแขนหุ่นยนต์จริงในช่วงแรกค่าแรงมีค่ามากเนื่องจากแขนหุ่นยนต์เกิดการกระตุก จากนั้นจึงลดลงมาอยู่ในระดับที่ต้องการควบคุม ส่วนค่าแรงของแขนกลในแบบจำลองสามารถควบคุมได้แบบราบเรียบไม่มีการกระตุกตลอดการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์

ตารางที่ 5.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดการเคลื่อนที่และค่าแรงกดในทิศตั้งฉาก ของการทดลองครั้งที่ 1-5 เมื่อวัสดุสัมผัสเป็นโฟมและครั้งที่ 6 เมื่อวัสดุสัมผัสเป็นฟองน้ำบนพื้นระนาบเอียง 45° บนวัสดุทั้งสองชนิด

| | | ครั้งที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------|--|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| แกนกล จริง | ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดการเคลื่อนที่ | u_c | 0.51 | 0.36 | 0.36 | 0.05 | 0.10 | 0.05 |
| | | v_c | 4.47 | 3.03 | 3.9 | 1.6 | 1.77 | 2.22 |
| | แรงกดในทิศตั้งฉากที่ตำแหน่งหยุดนิ่ง | f_1 (N) | 32.10 | 24.45 | 24.73 | 15.47 | 14.44 | 15.81 |
| แบบจำลอง | ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดการเคลื่อนที่ | u_c | 0 | 0.05 | 0 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| | | v_c | 3.4 | 3.43 | 3.4 | 3.5 | 3.53 | 3.43 |
| | แรงกดในทิศตั้งฉากที่ตำแหน่งหยุดนิ่ง | f_1 (N) | 15.87 | 17.73 | 16.64 | 17.23 | 17.16 | 16.93 |

จากตารางที่ 5.1 เมื่อพิจารณาค่าแรงกดในทิศตั้งฉากจะเห็นได้ว่าจากการทดลองซ้ำเดิม ค่าแรงกดในทิศตั้งฉากของแกนกลจริงและแบบจำลองมีค่าที่ใกล้เคียงกันโดย ผลต่างของแรงกดจะ อยู่ในช่วง 1-8 N แต่มีบางครั้งที่มีความแตกต่างของแกนกลจริง และแบบจำลองต่างกัน 16 N และจะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ ของแกนกลจริง ในแกน u และแกน v บนวัสดุทั้ง 2 ชนิด เมื่อเปรียบเทียบในแกนเดียวกันจะ มีค่าอยู่ช่วงเดียวกันอันเนื่องมาจาก ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของแผ่นโฟมและฟองน้ำที่ระยะ $x = 2$ mm มีค่า 16.15 N/m และ 16.16 N/m ซึ่งดูได้จากภาพที่ 4.2 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันมากจึงไม่ส่งผลต่อค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ของแกนกลจริงเมื่อเปลี่ยนวัสดุสัมผัส

5.2 ปัญหาที่พบในการทดลอง

5.2.1 จากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าแรงกระทำต่อปลายแขนที่กระทำต่อผนังมีค่ามากในช่วงแรก เนื่องจากค่าแรงบิดของแต่ละข้อต่อเปลี่ยนแปลงมากขึ้นอย่างทันทีทันใดส่งผลให้แขน กลเกิดการกระชากมีผลต่อความตึงของโซ่ส่งผลทำให้ตำแหน่งเอ็น โค้ดเดอร์มีการเปลี่ยนแปลงมากในขณะที่ตำแหน่งปลายแขนจริงมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเนื่องจากระยะคลอนของจุดต่อและโซ่ ทำให้ตำแหน่งปลายแขนในช่วงแรกเป็นตำแหน่งที่มีความผิดพลาดจากความเป็นจริงที่เกิดขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าตำแหน่งในระบบพิกัด u มีค่ากดเข้าไปในผนังมากในช่วงแรกทำให้ค่าแรง กดที่ตำแหน่งปลายแขนมี

ค่ามาก การวัดค่าตำแหน่งของปลายแขนไม่สามารถวัดและบันทึกได้โดยใช้เครื่องมือ ที่ตำแหน่งปลายแขน แต่สามารถหาได้จาก การใช้สมการจลศาสตร์ทางตรงของแขนกลโดยใช้ตำแหน่งเอ็นโค้ดเคอร์มาแปลงเป็นองศาเพื่อใช้คำนวณ หาตำแหน่งปลายแขนกลจริง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแขนกลที่ใช้ระบบโซ่ไม่เหมาะสำหรับงานวิจัยนี้จึงควรเปลี่ยนแขนหุ่นยนต์ที่ใช้ระบบเฟืองเกียร์จึงจะเหมาะสมเพื่อตัดปัญหาการกระชากอันเนื่องมาจากความตึงของโซ่

5.2.2 การทดลองในหัวข้อ 4.1 การทดสอบหาค่าความยืดหยุ่นของแผ่นโฟมและแผ่นฟองน้ำได้ทดสอบหาค่าความยืดหยุ่นของวัสดุทั้ง 2 ชนิด ได้ทดสอบที่ระยะกดลงยังผิววัสดุ เป็นระยะทาง 2 mm แล้วนำค่าที่ได้มาหาสมการการประมาณค่าแรงในช่วงดังกล่าวโดยใช้สมการพหุนามอันดับ 3 ดังนั้นค่าแรงที่สามารถเชื่อถือได้จึงอยู่ในช่วง 2 mm หรือจากสมการที่ 4.1 และสมการที่ 4.2 สามารถคิดเป็นค่าแรงที่น่าเชื่อถืออยู่ในช่วง 0 ถึง 69.880 N สำหรับโฟม และ 0 ถึง 63.689 N สำหรับฟองน้ำ หากค่าแรงเกินค่าดังกล่าวจะอยู่นอกช่วงการประมาณค่าจึงไม่มีความน่าเชื่อถือ และจากการทดลองบนแผ่นโฟมทั้ง 5 ครั้งจะเห็นได้ว่าค่าแรงมีช่วงติดลบอันเนื่องมาจากสมการพหุนามอันดับ 3 เครื่องหมายหน้าอันดับที่ 3 มีค่าติดลบทำให้กราฟโค้งคว่ำหรือกล่าวคือค่าแรงที่ได้จากการคำนวณของสมการ ที่ 4.1 และ สมการที่ 4.2 จะมีค่าแรงเป็นบวกในช่วงระยะแรกจากนั้นค่าแรงจะติดลบ

5.2.3 เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทดสอบทั้ง 2 ชนิดมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงควรทดสอบระบบควบคุมความยืดหยุ่นกับวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ ความยืดหยุ่นที่น้อยๆ เพื่อตรวจสอบว่าระบบควบคุมนั้นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจริง

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากที่ได้ทำการทดลอง การออกแบบระบบควบคุมแบบ ยืดหยุ่น ในการควบคุมแขน กล CRS A255 แบบ 3 แกน ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนด มีข้อเสนอแนะคือ การควบคุม ความยืดหยุ่นในงานวิจัยนี้เป็นลักษณะการควบคุมแรงที่ปลายแขนหุ่นยนต์โดยอ้อม ดังนั้นหากต้องการทราบค่าแรงในแนวตั้งจากที่ปลายแขนหุ่นยนต์กระทำกับผนังที่เที่ยงตรง มีข้อเสนอแนะคือ ให้ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดแรงที่ปลายแขนกลแล้วหาสมการทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณแรงที่วัดได้มาอยู่ในแนวตั้งจากกับผนังของวัตถุ

รายการอ้างอิง

- [1] Wang, Q., Schutter, J.D., Witvrouw, W. and Graves, S., “Derivation of compliant motion programs based on human demonstration,” **The Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation**, April 1996, Minneapolis, Minnesota, 1996. pp. 2616-2621.
- [2] Kazanzides, P., Zuhars, J., Mittelstadt, B. and Taylor, R.H., “Force sensing and control for a surgical robot,” **the Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation**, May 1992, Nice, France, 1992. pp. 612-617.
- [3] Du, Q., Huang, Q., Tian, L. and Liu, C., “Mechanical Design and Control System of a Minimally Invasive Surgical Robot System,” **the Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation**, 25-28 June 2006, Luoyang, China, 2006. pp.1120-1125.
- [4] Komada, S., Nomura, K., Ishida, M., Ohnishi, K. and Hori, T., “Robust Force Control Based on Estimation of Environment,” **the Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation**, May 1992, Nice, France, 1992. pp. 1362-1367.
- [5] ผศ.ดร.สถาพร ลักษณะเจริญ, **วิศวกรรมหุ่นยนต์ Robotics Engineering**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. (ไทย-ญี่ปุ่น), 2548. หน้า 21-74.
- [6] Craig, J.J., **Introduction to robotics: mechanics and control**, 2nd edition, ISBN: 0-201-09528-9, Addison-Wesley Publishing Company, 1989. pp. 65-92.
- [7] คมกฤช อาษากิจ, **การออกแบบระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ เพื่อใช้ในการควบคุมแขนกล CRS A255 แบบ 3 แกน ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด**, ปรินธิญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2554.
- [8] Siciliano, B., Scicavicco, L., Villani, L. and Oriolo, G., **Robotics Modelling, Planning and Control**, 2nd edition, ISBN: 987-1-84628-641-4, Springer Publishing Company, 2009. pp. 247-24.

- [9] Frank, L.Lewis, Darren, M.Dawson and Chaouki, T.Abdallah, **Robot Manipulator Control Theory And Practice**, 2nd edition, ISBN: 0-8247-4072-6, CRC Press. New York, 2003 pp. 463-477.
- [10] บรรจง กะการดี, การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล 3 แกน แบบสไลด์ดิงโฮมด, ปรินญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2555.



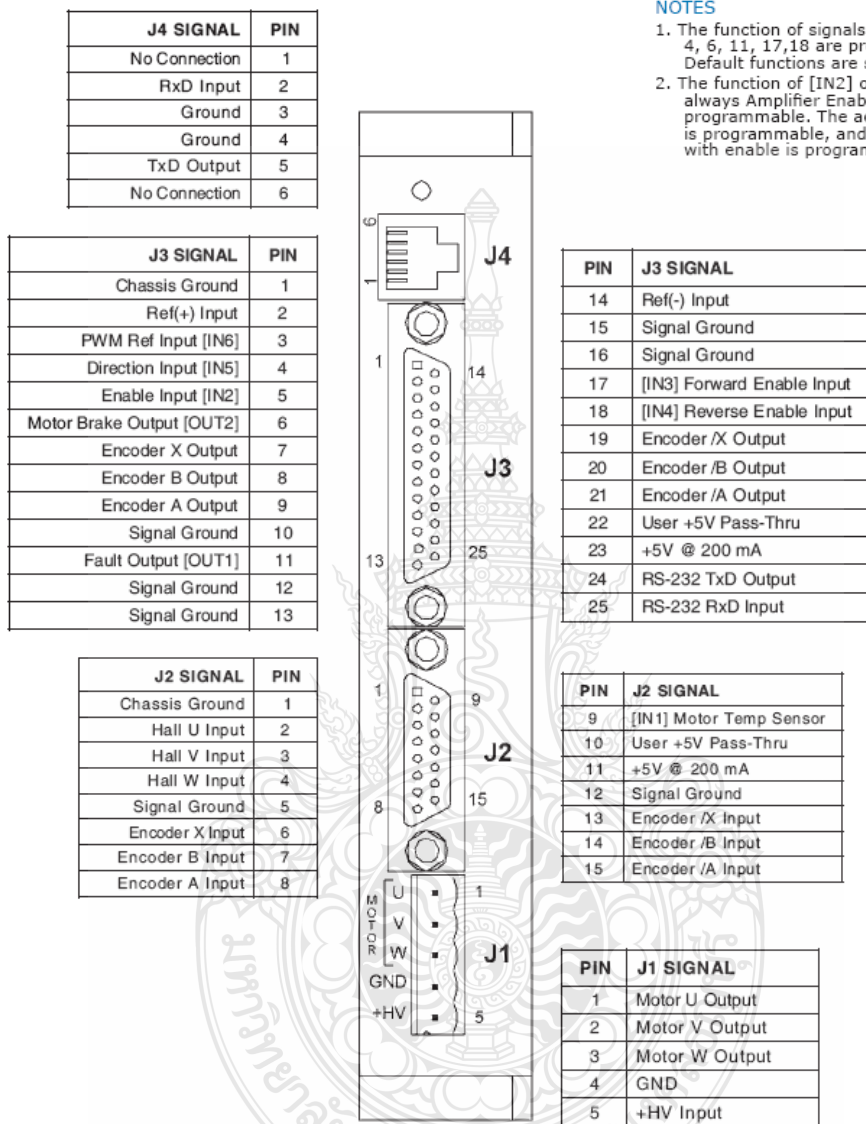
ภาคผนวก



ภาคผนวก ก
ตารางข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง



ตารางที่ ก.1 ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์ไดรฟ์รุ่น ASP – 090 – 18 และ ASP – 090 – 36 ซึ่งผลิตโดย Copley Controls Corp.



ตารางที่ ก.1 ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์โร้ตริวุ่น ASP – 090 – 18 และ ASP – 090 – 36 ซึ่งผลิตโดย

Copley Controls Corp. (ต่อ)



Accelus Panel

DIGITAL SERVOAMPLIFIER
for BRUSHLESS/BRUSH MOTORS



GENERAL SPECIFICATIONS

Test conditions: Load = 3-phase Wye connected load, 2 mH line-line. Ambient temperature = 25 °C. +HV = HVmax

| MODEL | ASP-055-18 | ASP-090-09 | ASP-090-18 | ASP-090-36 | ASP-180-09 | ASP-180-18 | |
|--|---|------------|---|------------|-------------|-------------|---------------------------|
| OUTPUT POWER | | | | | | | |
| Peak Current | 18 (12.7) | 9 (6.4) | 18 (12.7) | 36 (25.5) | 9 (6.4) | 18 (12.7) | Adc (Arms) |
| Peak time | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | s |
| Continuous current | 6 (4.2) | 3 (2.1) | 6 (4.2) | 12 (8.5) | 3 (2.1) | 6 (4.2) | Adc (Arms) per phase |
| Peak Output Power | 0.92 | 0.79 | 1.55 | 2.95 | 1.59 | 3.15 | kW |
| Continuous Output Power | 0.32 | 0.27 | 0.53 | 1.0 | 0.53 | 1.06 | kW |
| INPUT POWER | | | | | | | |
| HV _{min} to HV _{max} | +20 to +55 | +20 to +90 | +20 to +90 | +20 to +90 | +20 to +180 | +20 to +180 | Vdc, Transformer-isolated |
| Peak current | 20 | 10 | 20 | 40 | 10 | 20 | Adc (1 sec) peak |
| Continuous current | 6.7 | 3.3 | 6.7 | 13.3 | 3.3 | 6.7 | Adc continuous |
| PWM OUTPUTS | | | | | | | |
| Type | 3-phase MOSFET inverter, 20 kHz center-weighted PWM, space-vector modulation | | | | | | |
| PWM ripple frequency | 40 kHz | | | | | | |
| COMMUTATION & CONTROL | | | | | | | |
| Current loop | 20 kHz (50 µs period) update rate | | | | | | |
| Velocity & position loop | 4 kHz (250 µs period) update rate | | | | | | |
| Commutation | Sinusoidal, field-oriented control of DC brushless motor | | | | | | |
| Phase Initialization | Amplifier initializes in trapezoidal commutation until a Hall transition occurs, then switches to sinusoidal commutation with phase-correction at each Hall signal transition | | | | | | |
| BANDWIDTH | | | | | | | |
| Current loop, small signal | 3 kHz typical, bandwidth will vary with tuning & load inductance | | | | | | |
| HV Compensation | Changes in HV do not affect bandwidth | | | | | | |
| REFERENCE INPUTS (NOTE 1) | | | | | | | |
| Analog torque/velocity | ±10Vdc, 12 bit resolution | | Differential (J3-2,14) | | | | |
| Input impedance | 66 kΩ | | Between Ref(+), Ref(-) | | | | |
| Digital position reference | Pulse/Direction, CW/CCW | | Stepper commands (2 MHz maximum rate) | | | | |
| | Quad A/B Encoder | | 20 Mcount/sec (after quadrature), 5 Mline/sec | | | | |
| Digital torque & velocity reference | PWM, Polarity | | PWM = 0~100%, Polarity = 1/0 | | | | |
| | PWM | | PWM = 50% +/-50%, no polarity signal required | | | | |
| | PWM frequency range | | 1 kHz minimum, 100 kHz maximum | | | | |
| | PWM minimum pulse width | | 220 ns | | | | |
| DIGITAL INPUTS (NOTE 1) | | | | | | | |
| All inputs | 74HC14 Schmitt trigger operating from 5.0 Vdc with RC filter on input | | | | | | |
| Logic levels | Vin-LO < +1.35 Vdc, Vin-HI > +3.65 Vdc, Input voltage range 0 to +24 Vdc | | | | | | |
| Pull-up, pull-down control | [IN2,3,4] have ground selectable connection of 10 kΩ input pull-up/down resistor to +5 Vdc or ground | | | | | | |
| Enable [IN2] | Dedicated input with 330us RC filter for amplifier enable, active level programmable | | | | | | |
| GP [IN1,2,3,4] | General Purpose inputs with 330us RC filter and active level select, [IN1,3,4] have programmable functions | | | | | | |
| HS [IN5,6] | High-Speed Inputs inputs with 100ns RC filter, active level select, and programmable functions | | | | | | |
| SERIAL DATA INPUT | | | | | | | |
| RS-232 | Rx/D, Tx/D, Gnd in 6-position, 4-contact RJ-11 type modular connector, and on J3-24, 25, & 13 Full-duplex, serial communication port for amplifier setup and control, 9600 to 115200 baud Data protocol: binary | | | | | | |
| MOTOR CONNECTIONS | | | | | | | |
| Phase U, V, W | Amplifier outputs to 3-phase Wye or delta connected brushless motors with floating neutral | | | | | | |
| Hall U, V, W | Digital Hall signals | | | | | | |
| Encoder A, /A, B, /B, (X, /X) | Quadrature encoder signals, single-ended or differential (X or Index signal not required) | | | | | | |
| | 5 MHz maximum line frequency (20 Mcount/s) when driven from active differential outputs | | | | | | |
| [IN1] Motemp | See Digital Inputs (above) for details (Note 1) | | | | | | |
| STATUS INDICATORS | | | | | | | |
| Amp Status | Bicolor LED. Amplifier status indicated by color, and blinking or non-blinking condition | | | | | | |
| DIGITAL OUTPUTS (NOTE 1) | | | | | | | |
| Type | Current-sinking MOSFET open-drain output with 1kΩ pullup to +5 V through diode, 1 Adc sink max, +30 Vdc max. | | | | | | |
| [OUT1,2] | Programmable | | | | | | |
| | External flyback diode required with inductive loads | | | | | | |
| PROTECTIONS | | | | | | | |
| HV Overvoltage | +HV > HV _{max} | | Amplifier outputs turn off until +HV < HV _{max} (See Input Power for HV _{max}) | | | | |
| HV Undervoltage | +HV < 20 Vdc | | Amplifier outputs turn off until +HV > 20 Vdc | | | | |
| Amplifier over temperature | PC Board > 70 °C. | | | | | | |
| Short circuits | Output to output, output to ground, internal PWM bridge faults | | | | | | |
| I ² T Current limiting | Programmable: continuous current, peak current, peak time | | | | | | |
| Motor over temperature | Digital inputs programmed for overtemp function will disable amplifier | | | | | | |
| MECHANICAL & ENVIRONMENTAL | | | | | | | |
| Size | 6.58 in (167.1 mm) X 3.89 in (98.81 mm) X 1.17 in (29.72 mm) | | | | | | |
| Weight | 0.94 lb (0.43 kg) for amplifier without heatsink | | | | | | |
| Ambient temperature | 0 to +45 °C operating, -40 to +85 °C storage | | | | | | |
| Humidity | 0% to 95%, non-condensing | | | | | | |
| Contaminants | Pollution degree 2 | | | | | | |
| Environment | IEC68-2: 1990 | | | | | | |
| Cooling | Heat sink and/or forced air cooling may be required for continuous power output (see pg. 8 & 9) | | | | | | |

Notes

1. Digital input & output functions are programmable. Default functions are shown here.

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลจำเพาะของ DAQ card รุ่น PCI – 6221 ผลิตโดย National Instruments

| General | |
|-----------------------------------|--|
| Product Name | PCI-6221 |
| Product Family | Multifunction Data Acquisition |
| Form Factor | PCI |
| Part Number | 779066-01 |
| Operating System/Target | Real-Time , Linux , Mac OS , Windows |
| LabVIEW RT Support | Yes |
| DAQ Product Family | M Series |
| Measurement Type | Digital , Voltage , Frequency , Quadrature encoder |
| RoHS Compliant | Yes |
| Analog Input | |
| Channels | 16 , 8 |
| Single-Ended Channels | 16 |
| Differential Channels | 8 |
| Resolution | 16 bits |
| Sample Rate | 250 kS/s |
| Max Voltage | 10 V |
| Maximum Voltage Range | -10 V , 10 V |
| Maximum Voltage Range Accuracy | 3100 μ V |
| Maximum Voltage Range Sensitivity | 97.6 μ V |
| Minimum Voltage Range | -200 mV , 200 mV |
| Minimum Voltage Range Accuracy | 112 μ V |
| Minimum Voltage Range Sensitivity | 5.2 μ V |
| Number of Ranges | 4 |
| Simultaneous Sampling | No |
| On-Board Memory | 4095 samples |

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลจำเพาะของ DAQ card รุ่น PCI – 6221 ผลิตโดย National Instruments (ต่อ)

| | |
|---|---------------------|
| Analog Output | |
| Channels | 2 |
| Resolution | 16 bits |
| Max Voltage | 10 V |
| Maximum Voltage Range | -10 V , 10 V |
| Maximum Voltage Range Accuracy | 3230 μ V |
| Minimum Voltage Range | -10 V , 10 V |
| Minimum Voltage Range Accuracy | 3230 μ V |
| Update Rate | 833 kS/s |
| Current Drive Single | 5 mA |
| Digital I/O | |
| Bidirectional Channels | 24 |
| Input-Only Channels | 0 |
| Output-Only Channels | 0 |
| Number of Channels | 24 , 0 |
| Timing | Software , Hardware |
| Max Clock Rate | 1 MHz |
| Logic Levels | TTL |
| Input Current Flow | Sinking , Sourcing |
| Output Current Flow | Sourcing , Sinking |
| Programmable Input Filters | Yes |
| Supports Programmable Power-Up States? | Yes |
| Current Drive Single | 24 mA |
| Current Drive All | 448 mA |
| Watchdog Timer | No |
| Supports Handshaking I/O? | No |
| Supports Pattern I/O? | Yes |
| Maximum Input Range | 0 V , 5 V |
| Maximum Output Range | 0 V , 5 V |

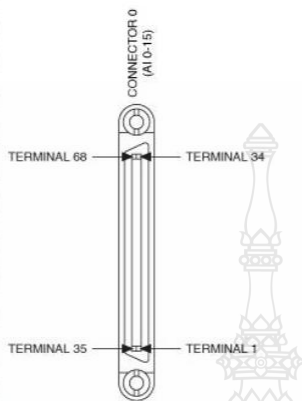
ตารางที่ ก.2 ข้อมูลจำเพาะของ DAQ card รุ่น PCI – 6221 ผลิตโดย National Instruments (ต่อ)

| | |
|--|---------------------|
| Counter/Timers | |
| Counters | 2 |
| Number of DMA Channels | 2 |
| Buffered Operations | Yes |
| Debouncing/Glitch Removal | Yes |
| GPS Synchronization | No |
| Maximum Range | 0 V , 5 V |
| Max Source Frequency | 80 MHz |
| Pulse Generation | Yes |
| Resolution | 32 bits |
| Timebase Stability | 50 ppm |
| Logic Levels | TTL |
| Physical Specifications | |
| Length | 15.5 cm |
| Width | 9.7 cm |
| I/O Connector | 68-pin VHDCI female |
| Timing/Triggering/Synchronization | |
| Triggering | Digital |
| Synchronization Bus (RTSD) | Yes |

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลจำเพาะของ DAQ card รุ่น PCI-6221 ผลิตโดย National Instruments (ต่อ)

NI PCI/PXI-6221 (68-Pin)

| | | | |
|-------------|----|----|-------------|
| AI 0 | 68 | 34 | AI 8 |
| AI GND | 67 | 33 | AI 1 |
| AI 9 | 66 | 32 | AI GND |
| AI 2 | 65 | 31 | AI 10 |
| AI GND | 64 | 30 | AI 3 |
| AI 11 | 63 | 29 | AI GND |
| AI SENSE | 62 | 28 | AI 4 |
| AI 12 | 61 | 27 | AI GND |
| AI 5 | 60 | 26 | AI 13 |
| AI GND | 59 | 25 | AI 6 |
| AI 14 | 58 | 24 | AI GND |
| AI 7 | 57 | 23 | AI 15 |
| AI GND | 56 | 22 | AO 0 |
| AO GND | 55 | 21 | AO 1 |
| AO GND | 54 | 20 | NC |
| D GND | 53 | 19 | P0.4 |
| P0.0 | 52 | 18 | D GND |
| P0.5 | 51 | 17 | P0.1 |
| D GND | 50 | 16 | P0.6 |
| P0.2 | 49 | 15 | D GND |
| P0.7 | 48 | 14 | +5 V |
| P0.3 | 47 | 13 | D GND |
| PFI 11/P2.3 | 46 | 12 | D GND |
| PFI 10/P2.2 | 45 | 11 | PFI 0/P1.0 |
| D GND | 44 | 10 | PFI 1/P1.1 |
| PFI 2/P1.2 | 43 | 9 | D GND |
| PFI 3/P1.3 | 42 | 8 | +5 V |
| PFI 4/P1.4 | 41 | 7 | D GND |
| PFI 13/P2.5 | 40 | 6 | PFI 5/P1.5 |
| PFI 15/P2.7 | 39 | 5 | PFI 6/P1.6 |
| PFI 7/P1.7 | 38 | 4 | D GND |
| PFI 8/P2.0 | 37 | 3 | PFI 9/P2.1 |
| D GND | 36 | 2 | PFI 12/P2.4 |
| D GND | 35 | 1 | PFI 14/P2.6 |

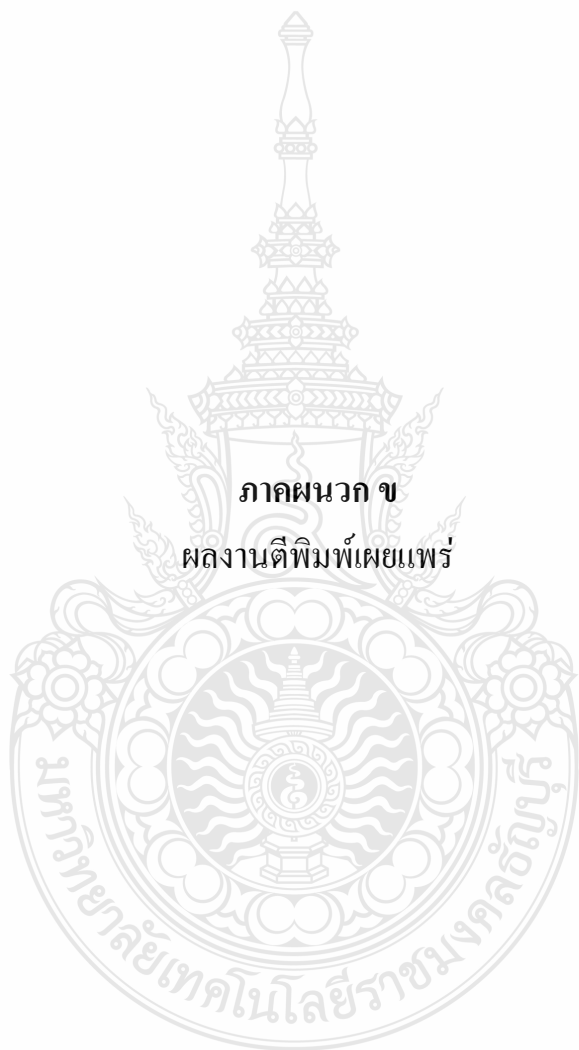


Default NI-DAQmx Counter Terminals

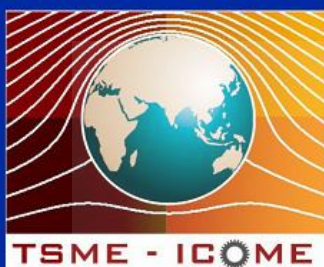
| Counter/Timer Signal | Default Pin Number | Signal Name |
|----------------------|--------------------|-------------|
| CTR 0 SRC | 37 | PFI 8 |
| CTR 0 GATE | 3 | PFI 9 |
| CTR 0 AUX | 45 | PFI 10 |
| CTR 0 OUT | 2 | PFI 12 |
| CTR 0 A | 37 | PFI 8 |
| CTR 0 Z | 3 | PFI 9 |
| CTR 0 B | 45 | PFI 10 |
| CTR 1 SRC | 42 | PFI 3 |
| CTR 1 GATE | 41 | PFI 4 |
| CTR 1 AUX | 46 | PFI 11 |
| CTR 1 OUT | 40 | PFI 13 |
| CTR 1 A | 42 | PFI 3 |
| CTR 1 Z | 41 | PFI 4 |
| CTR 1 B | 46 | PFI 11 |
| FREQ OUT | 1 | PFI 14 |



ภาคผนวก ข
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่



BOOK OF ABSTRACTS



The 2nd TSME International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 2011)

Sheraton Krabi Beach Resort, Krabi, Thailand

October 19-21, 2011

Organizer :



The Thai Society of Mechanical Engineers

Co-sponsored by :



**Institution of
MECHANICAL
ENGINEERS**

Reviewer Lists

The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering

Alternative Energy and Combustion (AEC)

| | |
|---------------------------------------|---|
| Prof. Dr. Sumrerng Jugjai | Assoc. Prof. Dr. Cattaleeya Pattamaprom |
| Prof. Dr. Ali Turan | Assoc. Prof. Dr. Satha Aphomratana |
| Prof. Dr. Ashwani K. Gupta | Assoc. Prof. Dr. Somchai Chanchaona |
| Prof. Dr. Chou S.K. | Assoc. Prof. Dr. Kanit Wattanavichien |
| Prof. Dr. Hiroshi Takami | Asst. Prof. Dr. Wichai Siwakosit |
| Prof. Dr. Kimio Takanaka | Dr. Yossapong Laonual |
| Prof. Dr. Satoshi Matsumoto | Dr. James Moran |
| Prof. Dr. Mishra D.P. | Dr. Isares Duchallaya |
| Prof. Dr. Pierre Joulain | Dr. Natt Makul |
| Assoc. Prof. Dr. Budit Limmeechokchai | |

Aerospace and Marine Engineering (AME)

| | |
|----------------------------------|--|
| Asst. Prof. Somchai Hanklar | Asst. Prof. Dr. Boonchai Watjatrakul |
| Asst. Prof. Dr. Annop Ruangwiset | Asst. Prof. Dr. Bunyong Rungroundouyboon |

Applied Mechanics, Materials and Manufacturing (AMM)

| | |
|---|----------------------------------|
| Prof. Dr. Otani Yoshio | Asst. Prof. Dr. Apiwat Muttamara |
| Prof. Dr. Fujimori Atsushi | Dr. Thanyarat Singhanart |
| Assoc. Prof. Dr. Chatchapol Chungchoo | Dr. Kunayut Eiamsa-ard |
| Assoc. Prof. Dr. Chaosuan Kanchanomai | Dr. Jirachai Mingbunjerdsuk |
| Assoc. Prof. Dr. Dulyachot Cholaseuk | Dr. Bumroong Puangkird |
| Assoc. Prof. Dr. Mongkol Mongkolwongrojn | Dr. Paiboon Sreearunothai |
| Assoc. Prof. Dr. Thananchai Leephakpreeda | Dr. Yutthapong Pianroj |
| Assoc. Prof. Dr. Sirisak Hamchoowong | Dr. Piyamon Poapongsakorn |
| Assoc. Prof. Dr. Pairod Singhatanadgid | Dr. Suvanit Chitsiriphanit |
| Asst. Prof. Dr. Sujin Bureerat | Dr. Alongkorn Pimpin |
| Asst. Prof. Dr. Jirapong Kasivitamnuy | Dr. Petch Jearanaisilawong |
| Asst. Prof. Dr. Supasit Rodkwan | Dr. Saysunee Jumrat |
| Asst. Prof. Dr. Sontipee Aimmanee | |

Biomechanics (BME)

| | |
|--|--------------------------|
| Prof. Dr. Phadungsak Rattanadecho | Dr. Chirdpun Vitooraporn |
| Assoc. Prof. Dr. Sirikul Wisutmethangoon | Dr. Teerapot Wessapan |
| Assoc. Prof. Dr. Worawut Wisutmethangoon | |

Computation and Simulation Technique (CST)

| | |
|---------------------------------------|--|
| Prof. Dr. Phadungsak Rattanadecho | Asst. Prof. Dr. Nat Kasayapanand |
| Prof. Dr. Khalil M Khanafer | Asst. Prof. Dr. Angkee (Paiboon) Sripakagorn |
| Prof. Dr. Kimio Takanaka | Asst. Prof. Dr. Boonchai Lertnuwat |
| Prof. Dr. Makoto Mizukawa | Asst. Prof. Dr. Niphon Wansophark |
| Prof. Dr. Satoshi Matsumoto | Asst. Prof. Dr. Sompong Putivisutisak |
| Assoc. Prof. Dr. Varangrat Juntasaro | Asst. Prof. Dr. Nopdanai Ajavakom |
| Assoc. Prof. Dr. Ekachai Juntasaro | Asst. Prof. Dr. Supavut Chantranuwathana |
| Assoc. Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk | Asst. Prof. Dr. Sontipee Aimmanee |
| Assoc. Prof. Dr. Kontom Chamniprasart | Dr. Phongsaen Pitakwatchara |
| Assoc. Prof. Dr. Kulachate Pianthong | Dr. Petch Jearanaisilawong |
| Asst. Prof. Somchai Hanklar | Dr. Suvanit Chitsiriphanit |
| Asst. Prof. Dr. Nattawoot Depaiwa | Dr. Alongkom Pimpin |

Dynamic System, Robotics and Control (DRC)

| | |
|--|--|
| Prof. Dr. Viboon Sangveraphunsiri | Asst. Prof. Dr. Nopdanai Ajavakom |
| Prof. Dr.-Ing. Helmut Maier | Asst. Prof. Dr. Supavut Chantranuwathana |
| Assoc. Prof. Dr. Yoshinobu Ando | Asst. Prof. Dr. Nattawoot Depaiwa |
| Assoc. Prof. Dr. Ratchatin Chanchareon | Asst. Prof. Dr. Thira Jiasiripongkul |
| Assoc. Prof. Dr. Djitt Laowattana | Asst. Prof. Dr. Annop Ruangwiset |
| Assoc. Prof. Dr. Kontom Chamniprasart | Dr. Paul W. Bland |
| Assoc. Prof. Dr. Puditt Laksanacharoen | Dr. Phongsaen Pitakwatchara |
| Assoc. Prof. Dr. Suwat Kuntanapreeda | |

Energy Technology and Management (ETM)

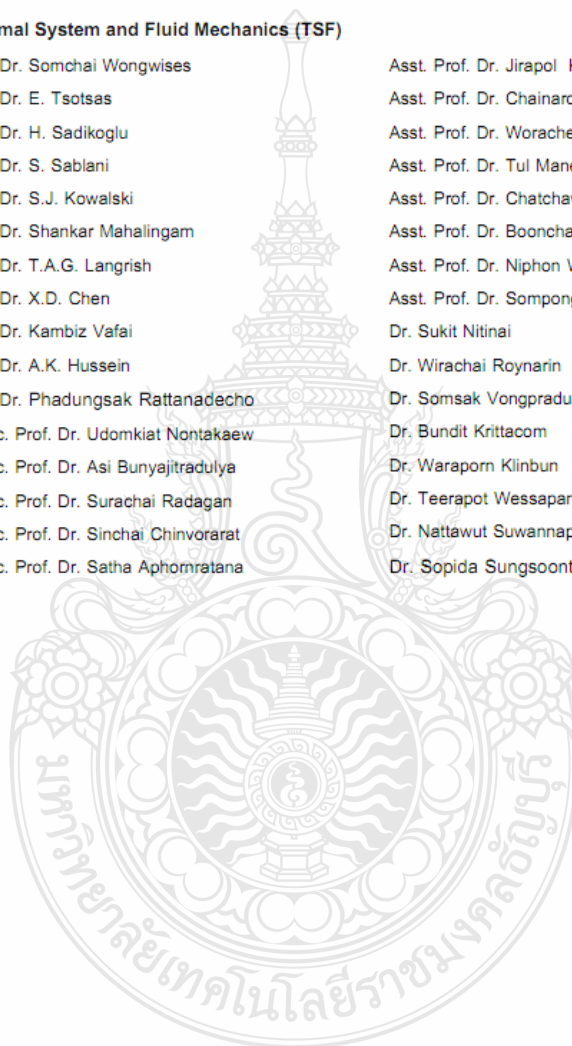
| | |
|---|--|
| Prof. Dr. Somchart Chantasiriwan | Assoc. Prof. Dr. Supachart Chungpaibulpatana |
| Prof. Dr. Tanongkiat Kiatsiriroat | Assoc. Prof. Dr. Sakamon Devahastin |
| Prof. Dr. Kimio Takanaka | Assoc. Prof. Dr. Satha Aphomratana |
| Prof. Dr. Otani Yoshio | Assoc. Prof. Dr. Udomkiat Nontakaew |
| Prof. Dr. Fujimori Atsushi | Assoc. Prof. Dr. Pongjet Promvonge |
| Prof. Dr. Joseph Khedari | Assoc. Prof. Dr. Smith Elamsa-ard |
| Prof. Dr. Kimio Takanaka | Asst. Prof. Dr. Tul Manewattana |
| Prof. Dr. Otani Yoshio | Asst. Prof. Dr. Chatchawan Chaichana |
| Prof. Dr. Joseph Khedari | Asst. Prof. Dr. Kriengkrai Assawamartbunlue |
| Prof. Dr. Fujimori Atsushi | Asst. Prof. Dr. Chinda Charoenphonphanich |
| Prof. Dr. Satoshi Matsumoto | Asst. Prof. Dr. Watit Pakdee |
| Assoc. Prof. Dr. Shinji Kimijima | Asst. Prof. Dr. Malee Santikunaporn |
| Assoc. Prof. Dr. Thanakom Soontornchainacksaeng | Dr. Chawin Chantharasenawong |

Energy Technology and Management (ETM) (Continue)

| | |
|-------------------------|------------------------------|
| Dr. Sarocha Jareanwai | Dr. Yossapong Laoonual |
| Dr. Sutapat Kwankaomeng | Dr. Pisit Yongyingsakthavorn |
| Dr. Nuparb Yamtraipat | Dr. Nattawut Suwannapum |
| Dr. Saysunee Jumrat | Dr. Rattasak Prommas |

Thermal System and Fluid Mechanics (TSF)

| | |
|--------------------------------------|--|
| Prof. Dr. Somchai Wongwises | Asst. Prof. Dr. Jirapol Klinbun |
| Prof. Dr. E. Tsotsas | Asst. Prof. Dr. Chainarong Chaktranond |
| Prof. Dr. H. Sadikoglu | Asst. Prof. Dr. Worachest Pirompugd |
| Prof. Dr. S. Sablani | Asst. Prof. Dr. Tul Manewattana |
| Prof. Dr. S.J. Kowalski | Asst. Prof. Dr. Chatchawan Chaichana |
| Prof. Dr. Shankar Mahalingam | Asst. Prof. Dr. Boonchai Lertnuwat |
| Prof. Dr. T.A.G. Langrish | Asst. Prof. Dr. Nippon Wansophark |
| Prof. Dr. X.D. Chen | Asst. Prof. Dr. Sompong Putivisutisak |
| Prof. Dr. Kambiz Vafai | Dr. Sukit Nitinai |
| Prof. Dr. A.K. Hussein | Dr. Wirachai Roynarin |
| Prof. Dr. Phadungsak Rattanadecho | Dr. Somsak Vongpradubchai |
| Assoc. Prof. Dr. Udomkiat Nontakaew | Dr. Bundit Krittacom |
| Assoc. Prof. Dr. Asi Bunyajitradulya | Dr. Waraporn Klinbun |
| Assoc. Prof. Dr. Surachai Radagan | Dr. Teerapot Wessapan |
| Assoc. Prof. Dr. Sinchai Chinvorarat | Dr. Nattawut Suwannapum |
| Assoc. Prof. Dr. Satha Aphomratana | Dr. Sopida Sungsoontorn |



| | | |
|-------|---|-----|
| DRC03 | Design and Development of a Remotely Operated Vehicle Pakpong Jantapremjit* | 119 |
| DRC04 | Robust Controller Design for an Autonomous Underwater Vehicle Pakpong Jantapremjit* | 120 |
| DRC05 | Design and Analysis of a Two-Degree of Freedom Cable Driven Compound Joint System Phongsaen Pitakwatchara | 121 |
| DRC06 | An iPhone-Based Device to Give Surrounding Area Information for Guiding Tourist or Aiding Visually Impaired Thanawat Nucheen* and Ittichote Chuckpaiwong | 122 |
| DRC07 | Sliding Mode Control for Humidity and Temperature Control in an Evaporative Cooling System of a Poultry house Kritsadang Senawong, Ratchapol Suntivarakorn, and Thana Radpukdee* | 123 |
| DRC08 | Communication Design of Human-Hardware-In-the-Loop simulator (HHILs) for Steer-by-Wire Testing Panus lemvarapong, Nuksit Noomwongs, Ratchatin Chanchareon, and Sunhapos Chantranuwathana* | 124 |
| DRC09 | Study on Driving Behavior in Follow State Driving Condition in Bangkok Vachirawat Lertsilpachalearn, Kanin Patikanskul , Chayuti Punyatanasakchai ,Narip Smitaveja, Nuksit Noomwongs* and Sunhapos Chantranuwathana | 125 |
| DRC10 | Air-Path Control in Diesel-Dual-Fuel Premixed-Charge-Compression-Ignition (DF- PCCI) Engine Using Supervisory Fuzzy System Kittipong Yaovaja*, Withit Chatlatanagulchai, Shinapat Rhienprayoon and Krisada Wannatong | 126 |
| DRC11 | Design of Driving Simulator for Studying Vehicle Rollover Pichaya Manasveepongsakul, Nuksit Noomwongs* and Sunhapos Chantranuwathana | 127 |
| DRC12 | Design and Construction and Motion Control of 6-Axis Robot Manipulator for Industrial Applications Supachock Tuntivivat*, Pradya Prempraneerach | 128 |

DRC12



The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering
October 19-21, 2011, Krabi, Thailand

Design and Construction and Motion Control of 6-Axis Robot Manipulator for Industrial Applications

Supachock Tuntivivat*, Pradya Prempraneerach

Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani, Thailand
12110

*Corresponding Author: supachock_chock@hotmail.com, 085-0471123, 02-549-3430

Abstract

In this research, a 6-axis robot manipulator arm is designed and constructed for industrial applications. Then, the robot arm motion is controlled in a position mode by users' specified angular motion of each joint so that the robot arm can move to desired locations with high accuracy even with load variation and repeatability less than 10 micrometer. A motion control has been developed within Visual C++.NET to control individual or combined joints' position, velocity, acceleration. The purposes of this robot-arm motion-control implementation are to accelerate users' learning process and to interact with the industrial robot in a user-friendly environment.

Keywords: Industrial Manipulator Arm, Motion Control Software, Accuracy and Repeatability. Thailand.



Design and Construction and Motion Control of 6-Axis Robot Manipulator for Industrial Applications

Supachock Tuntivivat*, Pradya Prempraneerach

Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani, Thailand 12110

*Corresponding Author: supachock_chock@hotmail.com, 085-0471123, 02-549-3430

Abstract

In this research, a 6-axis robot manipulator arm is designed and constructed for industrial applications. Then, the robot arm motion is controlled in a position mode by users' specified angular motion of each joint so that the robot arm can move to desired locations with high accuracy even with load variation and repeatability less than 10 micrometer. A motion control has been developed within Visual C++.NET to control individual or combined joints' position, velocity, acceleration. The purposes of this robot-arm motion-control implementation are to accelerate users' learning process and to interact with the industrial robot in a user-friendly environment.

Keywords: Industrial Manipulator Arm, Motion Control Software, Accuracy and Repeatability.

1. Introduction

In past decades, industrial robot manipulator arms have revolutionized various industrial applications, especially in high-technology factories, because of their high-yield production capability, high-accuracy repeatability, flexibility and small contamination in clean environment. However, a lacking of specialized personals in the robot control field and a high investment cost and maintenance cost are major obstacles for a wide-spread use of the industrial manipulator arms in Thailand.

Chandrakasem Rajabhat University [5] has proposed to develop 5-axis robot arms for the educational purpose so that students might be able to transfer knowledge to their future industrial workplaces. Institute of Field roBOTics [6] has designed and constructed the industrial

6-axis robot arm that can perform a welding process for automotive industries.

Therefore, this research focuses on the design and construction of the industrial robot arm as well as the motion-control software development using Visual C++.NET, which has user friendly interface. As a result, any person without a prior knowledge can comprehend and control the robot arm control with a minimal learning time.

This paper can be subdivided into four sections. Section 2 reviews the design and construction of robot mechanisms and motion controller units. Section 3 emphasizes on the implementation of the motion-control software. Lastly, the performance tests of this robot arm are summarized in Section 4.



2. Robot Arm Construction

The construction of the 6-axis robot manipulator arm is divided into two main parts: 1) robot mechanism construction and 2) controller and drive construction. Both constructions can be carried out at the same time and then assembled together afterward. Fig. 1 shows an overall schematic diagram of this 6-axis manipulator arm, where circles represent each joint of the robot arm. A computer passes user commands through the SPiPlus Motion Controller [2] to control motor drives, connecting with 6 DC and AC motors and 6 optical encoders. All DC and AC motors coupling with harmonic gears provide torque to each axis of the robot arm and encoder signal is used as feedback joint angular position.

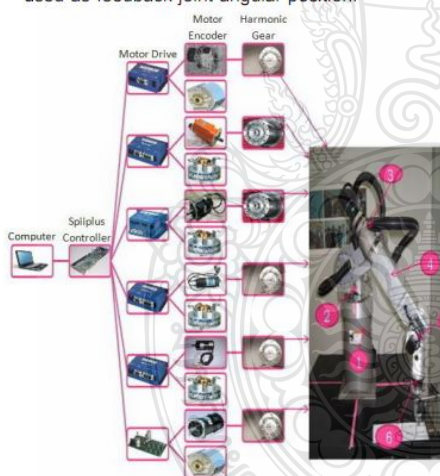


Fig. 1 Overall schematic diagram of the 6-axis manipulator arm.

2.1 Robot Mechanism Construction

Originally, this manipulator arm is designed and assembled in Solidwork, shown in

Fig. 2, to test feasibilities of individual joint movement, robot material strength, motor sizing, and robot workspace. Each joint angle is limited by two limit switches such that a wire entangling problem can be avoided during the robot operation. For the joint construction, motors are attached to flanges before assembling to machined parts and then the encoders are coupled to the motor shafts. The 6-axis joint space of the robot arm is exhibited in Table.1.

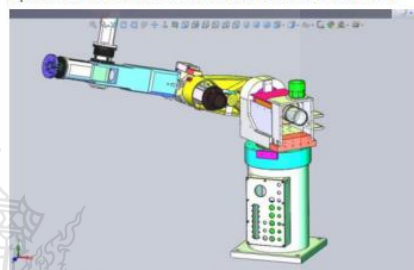


Fig. 2 Design of the 6-axis manipulator arm

To achieve high accuracy at the robot end effector within micrometer range, high resolution encoders as well as precision harmonic gears, as shown in Table. 2, must be employed in each joint of the robot arm.

Table. 1 The 6-axis joint space of the robot arm

| Axis | Joint Angle (degree) | |
|------|----------------------|-------------------|
| | Clockwise | Counter-clockwise |
| 1 | 145 | 150 |
| 2 | 45 | 115 |
| 3 | 110 | 110 |
| 4 | 175 | 85 |
| 5 | 85 | 80 |
| 6 | 160 | 175 |



Table. 2 The encoder resolution and gear ratio for each axis of the robot arm

| Axis | Encoder Resolution | Gear Ratio |
|------|--------------------|------------|
| 1 | 2048 | 1:78 |
| 2 | 2500 | 1:80 |
| 3 | 2500 | 1:50 |
| 4 | 2500 | 1:50 |
| 5 | 2500 | 1:50 |
| 6 | 2048 | 1:50 |

2.2. Controller and Drive Construction

Two main components of the motion control unit are 1) SPiiPlus Motion Controller compartment and 2) Motor Drive compartment. First, Inside the SPiiPlus Motion Controller unit in Fig. 3, there are 24V and 5V DC power supplies and SPiiPlus PCI 8 from ACS Motion Control, which acts as the robot-arm main supervisory and connects to the user's computer through ethernet. Moreover, amplify circuits using op-amp, included in this unit, help amplifying the signal from all limit switches before passing through the SPiiPlus board.



Fig. 3 SPiiPlus Motion Controller compartment

Second, the Motor Drive compartments for 6 axes in Fig. 4 and 5 are composed of power supply circuits, noise reduction circuits, 6 motor drives and connection terminals. Model for motor

drives for axis 1 to 6 are Junus, Accelus, Xenus, 2 Accelus, and Accelus card [1], respectively.

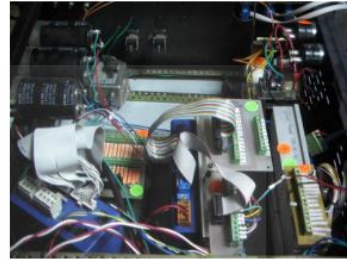


Fig. 4 Motor drive compartment for joint 1, 2, 3.



Fig. 5 Motor drive compartment for joint 4, 5, 6.

3. Motion Control Software Development

To be able to control the robot-arm motion, users must learn new syntax and commands of the original SPiiPlus Controller software, which is similar to C commands. And all programming codes must be written in a command line window shown in Fig. 6. As a result, the user must go through a steep learning curve of SPiiPlus programming before they can operate the robot arm safely and properly.

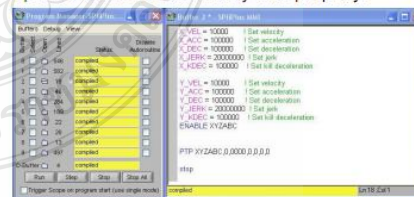


Fig. 6 Original Interface of the SPiiPlus Motion Controller Software.



To shorten this period, the motion control software has been developed using Visual C++.NET [4] from Microsoft Visual Studio 2008 based on SPiiPlus Motion Control library that provides a user-friendly interface, as shown in Fig. 7. The motion control software for individual or combined joints employs the SPiiPlus MMI commands [2] of the SPiiPlus Motion Controller. The user can select the joint axes and specify the joint acceleration, velocity, position without learning SPiiPlus programming commands. Moreover, users can record sequences of the joint angular positions after the robot end-effector is moved to desired locations. And then, users can playback different motion sequences from recorded lists. During the robot-arm movement, the feedback angular positions of each joint are also shown on the screen in real time. Fig. 8 demonstrates the robot-arm playback movement, drawing a segment of circle, from the recorded sequence.

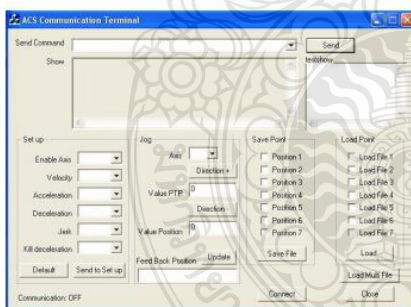


Fig. 7 Developed motion control software using Visual C++.NET for this robot arm

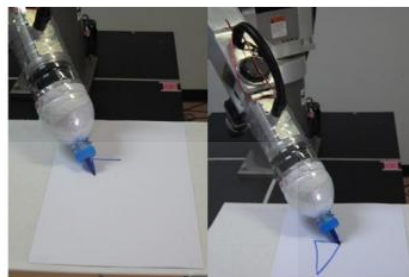


Fig. 8 Playback motion of the robot end effector

4. Experimental Results

The robot arm performances are tested on the motion repeatability, accuracy, and different load handling. In the first test, the joint velocity errors are measured

4.1 Repeatability Test

To measure a motion accuracy of the robot-arm end effector in performing a repetitive task, the robot arm is programmed to touch a dial gauge, attached at the end of table as shown in Fig. 9, from a pointing-upward position. This motion is repeated for 15 times and the readings from the dial gauge are recorded and shown in Fig. 10. The result reveals that the motion error of the end effector is bounded within 0.002 mm or 2 μm and a variation from its mean position are also small. This implies that the accumulative error from all joints must be very small as well.



Fig. 9 Motion repeatability test of the robot arm touching the dial gauge.



4.2 Load Handling Test

To measure the motion accuracy of the robot arm subjected to various loads, three different weights: 1.2, 1.6 and 2.0 kg, are attached to the end effector and both joint commanded velocity from the SPiPlus controller and feedback velocities from encoders are recorded during the upward motion. Then the joint velocity error is computed from the difference between the commanded and feedback velocities for 5 axes. Results in Table 3 show that the larger the load attached to the end effector is, the larger the velocity error becomes.

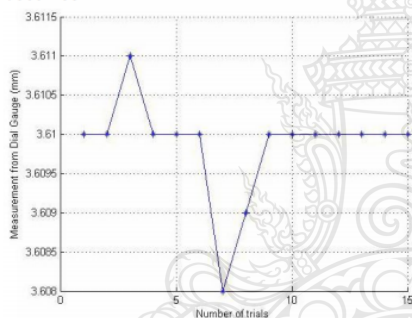


Fig. 10 Dial gauge readings from 15 trails in repeatability test

Table. 3 Joint angular velocity errors of the 5-axis robot arm tests with three different loads (1.2, 1.6, and 2.0 kg) attached to the end effector

| Joint | Velocity Error (rad/sec) | | | |
|-------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | No Mass | Mass 1.2 kg | Mass 1.6 kg | Mass 2.0 kg |
| | 1 | 0.00079 | 0.00085 | 0.00098 |
| 2 | 0.00019 | 0.00063 | 0.00021 | 0.00024 |
| 3 | 0.00002 | 0.00007 | 0.00092 | 0.00003 |
| 4 | 0.00232 | 0.00302 | 0.00258 | 0.00244 |
| 5 | 0.00004 | 0.00005 | 0.00005 | 0.00007 |

4.3 Motion Accuracy of Iterative Inverse Kinematics Computation

An inverse kinematics, based on the Resolved Motion Rate Controller (RMRC) technique [7], of this robot arm has been implemented using the Jacobian singularity-robust inverse. The RMRC technique is one of the iterative inverse kinematic methods to compute the position of end effector given the desired joint angular position and velocity. The joints' angular velocities in this experiment are set equal to [0.098, 0.078, 0.295, 0.295, 0.295, 0.295] rad/s. The motion discrepancy of the end effector between the commanded joint positions calculated from the RMRC technique and the measured position are tested for 8 different positions, as shown in Table 4. The error is defined using a root sum square, as in Eq (1).

$$error = \sqrt{(X_d - X_m)^2 + (Y_d - Y_m)^2 + (Z_d - Z_m)^2} \quad (1)$$

From Table 4, the difference between the measured and command position are very small, the main source of error in this test is from the measurement error and from link parameter error.

Table. 4 Desired and measured end effector positions using the RMRC technique.

| Command Position (cm) | | | Measured Position (cm) | | | Error (cm) |
|--------------------------|----------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|---------------|
| X _d | Y _d | Z _d | X _m | Y _m | Z _m | |
| 55 | 40 | 70 | 55.3 | 38.4 | 70.3 | 1.602 |
| -55 | 40 | 70 | -54.2 | 39.6 | 71.0 | 1.337 |
| 55 | -40 | 70 | 54.3 | -41.1 | 70.7 | 1.472 |
| -55 | -40 | 70 | -54.6 | -38.1 | 70.1 | 1.904 |
| 50 | 50 | 50 | 50.0 | 48.0 | 50.7 | 2.119 |
| -50 | 50 | 50 | -49.4 | 50.0 | 51.9 | 1.971 |
| 50 | -50 | 50 | 49.3 | -51.0 | 51.8 | 2.213 |
| -50 | -50 | 50 | -49.9 | -46.9 | 51.4 | 3.431 |



6. Summary

The 6-axis robot manipulator arm has been designed, constructed, and tested on high motion accuracy, precision repeatability, and load variation handling capability. Moreover, the motion control software, emphasized on the user-friendly interface, has been developed using Visual C++.NET such that new users can learn how to control this robot arm quickly, record the motion sequences, as well as playback those different sequences as desired.

6. Acknowledgement

The authors would like to thank the National Research Council of Thailand (NRCT) for a research grant 2553 to support this research.

7. References

- [1] Copley Controls, Accelus & Junus, URL:<http://www.copleycontrols.com/motion/Products/Drives/Digital/accelus-junus.html>, access on 12/07/2011.
- [2] ACS Motion Control, Downloads, URL: http://www.acsmotioncontrol.com/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=5:user-guides&start=20&Itemid=34, access on 12/07/2011.
- [3] Craig, J.J. (1989). Introduction to robotics: mechanics and control, 2nd edition, ISBN: 0-201-09528-9, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- [4] นิรุช อำนาจศิลป์. เขียนโปรแกรมบนวินโดวส์ด้วย Visual C++ และ MFC, กรุงเทพฯ:THAIDEV.COM.
- [5] Reocities, research, URL: http://reocities.com/SiliconValley/Screen/8319/research/robot/5_axis_robot_proposal.html, access on 14/07/2011.
- [6] FIBO , แขนกลอุตสาหกรรม, URL: http://fibo.kmutt.ac.th/thai/index.php?option=co_content&task=view&id=302&Itemid=0, access on 12/07/2011.
- [7] Prempraneerach, P. and Kulvanit, P. (2010) Implementation of Resolved Motion Rate Controller with 5-Axis Robot Manipulator Arm, *The first TSME international conference on mechanical engineering 2010*, Ubon Ratchathani, Thailand.



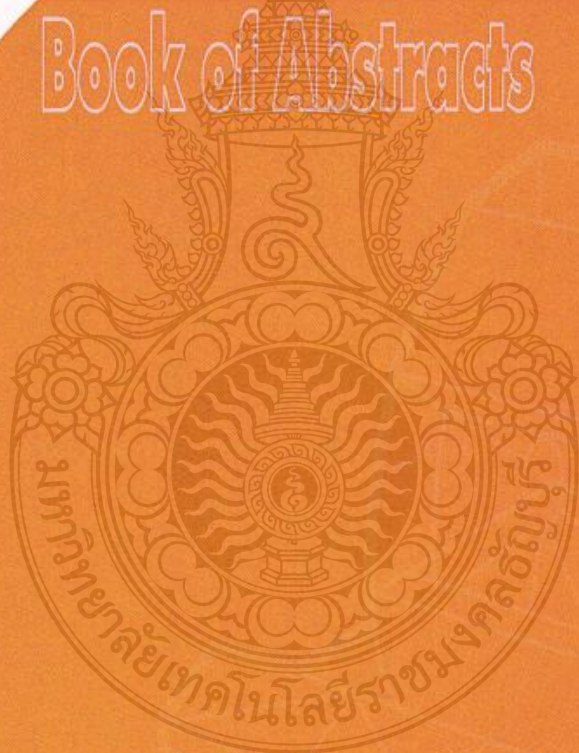
Following His Majesty's Footsteps:
Sustainable development through research



3rd TSME- ICoME

the 3rd TSME International Conference on Mechanical Engineering

Book of Abstracts



by

Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering
King Mongkut's University of Technology Thonburi
and The Thai Society of Mechanical Engineers

Reviewer Lists

AEC Alternative Energy and Combustion

| | |
|--|---|
| Prof. Dr. Sumrerng Jugjai | Asst. Prof. Dr. Kulachate Pianthong |
| Assoc. Prof. Dr. Kanit Wattanavichien | Asst. Prof. Dr. Cattaleeya Pattamaprom |
| Assoc. Prof. Dr. Jaruwat Charoensuk | Asst. Prof. Dr. Chinda Charoenphonphanich |
| Assoc. Prof. Dr. Thanid Madhiyanon | Asst. Prof. Dr. Tanet Aroonsrisopon |
| Assoc. Prof. Dr. Bundit Fungtammasan | Asst. Prof. Dr. Wichai Siwakosit |
| Assoc. Prof. Dr. Bundit Limmeechokchai | Asst. Prof. Dr. Surachai Sanitjai |
| Assoc. Prof. Dr. Satha Aphornratana | Asst. Prof. Phichai Leelapatana |
| Assoc. Prof. Dr. Somchai Chanchaona | Asst. Prof. Dr. Wisanuruk Wechsatol |
| Assoc. Prof. Dr. Suebsak Nanthavanij | Dr. Jay Tawee Pukrushpan |
| Asst. Prof. Dr. Wasan Jompakdee | Dr. Natt Makul |
| Prof. Dr. Ali Turan | Dr. Yossapong Laoonual |
| Prof. Dr. Ashwani K. Gupta | Dr. Isaacs Duchallaya |
| Prof. Dr. Chou Siaw Kiang | Dr. James Moran |
| Prof. Dr. Hiroshi Takami | Prof. Dr. Wlodzimierz Blaziak |
| Prof. Dr. Mishra D.P. | Assoc. Prof. Dr. Shinji Kimijima |
| Prof. Dr. Pierre Joulain | Assoc. Prof. Dr. Zhibin Yu |
| Prof. Dr. Satoshi Matsumoto | |

AME Aerospace and Marine Engineering

| | |
|---|---|
| Gp. Capt. Assoc. Prof. Dr. Somchai Hangla | Asst. Prof. Dr. Boonchai Watjatrakul |
| Assoc. Prof. Dr. Sumpun Chaitep | Asst. Prof. Dr. Annop Ruangwiset |
| Asst. Prof. Dr. Bunyong Rungroungdouyboon | Asst. Prof. Dr. Chawin Chantarasenawong |

AMM Applied Mechanics, Materials and Manufacturing

| | |
|--|---|
| Emer. Prof. Dr. Variddhi Ungbhakorn | Asst. Prof. Dr. Vitoon Uthaisangsuk |
| Prof. Dr. Thananchai Leephakpreeda | Asst. Prof. Dr. Pattaramon Jongpradist |
| Assoc. Prof. Dr. Chatchapol Chungchoo | Asst. Prof. Dr. Apiwat Muttamara |
| Assoc. Prof. Dr. Chaosuan Kanchanomai | Asst. Prof. Dr. Apiwon Polchai |
| Assoc. Prof. Dr. Dulyachot Cholaseuk | Asst. Prof. Dr. Arisara Chaikittiratana |
| Assoc. Prof. Dr. Thongchai Fongsamootr | Asst. Prof. Dr. Sujin Bureerat |
| Assoc. Prof. Dr. Thanya Kiatiwat | Dr. Kummun Chooprasird |

- Assoc. Prof. Dr.Pongpan Kaewtatip
 Assoc. Prof. Dr. Pairod Singhatanadgid
 Assoc. Prof. Dr. Mongkol Mongkolwongrojn
 Assoc. Prof. Dr. Worawut Wisutmetthangoon
 Assoc. Prof. Dr.Varunee Premanond
 Assoc. Prof. Dr. Sirisak Harnchoowong
 Assoc. Prof. Dr. Sommai Priprem
 Assoc. Prof. Dr. Surapol Raadnui
 Assoc. Prof. Dr. Itthichai Preechawuttipong
 Assoc. Prof. Dr.Pairoj Kirirat
 Assoc. Prof. Dr. Chanyut Kolutawong
 Asst. Prof. Dr. Jirapong Kasivitamnuay
 Asst. Prof. Dr.Nathasak Boonmee
 Asst. Prof. Dr.Det Damrongsak
 Asst. Prof. Dr. Bunyong Rungrongdouyboon
 Asst. Prof. Dr. Patrapon Kamonpet
 Asst. Prof. Dr. Wiriya Thongruang
 Asst. Prof. Dr. Supasit Rodkwan
 Asst. Prof. Dr. Sate Sampattagul
 Asst. Prof. Dr. Sontipee Aimmanee
 Asst. Prof. Dr. Surachai Sanitjai
 Asst. Prof. Dr. Anak Khantachawana
 Asst. Prof. Dr. Monchai Pruekwilailert
 Asst. Prof. Petch Jearanaisilawong
- BME Biomechanics**
 Prof. Dr. Phadungsak Rattanadecho
 Assoc. Prof. Dr. Worawut Wisutmethangoon
 Assoc. Prof. Dr. Sirikul Wisutmethangoon
 Assoc. Prof. Dr. Anak Khantachawana
- CST Computation and Simulation Techniques**
 Prof. Dr. Jongjit Hirunlabh
- Asst. Prof. Dr.Chanat Ratanasumawong
 Dr. Kengkamol Wiratkasem
 Dr. Kunayut Eiamsa-ard
 Dr. Jirachai Mingbunjerd
 Dr. Kittipong Boonlong
 Dr.Chinarong Srikunwong
 Dr. Chaikorn Jansuwan
 Dr. Natt Makul
 Dr. Thanyarat Singhanart
 Dr. Bumroong Puangkird
 Dr. Prapot Kunthong
 Dr. Paiboon Sreearunothai
 Dr. Rung Kittipichai
 Dr. Wiboon Lertwimolnun
 Dr.Wetchayan Rangsi
 Dr.Somsak Siwadamrongpong
 Dr. Sirivit Teachajedcadarungsri
 Dr.Suvanit Chitsiriphanit
 Dr.Alongkorn Pimpin
 Dr.Anchana Wongsto
 Prof. Dr. Otani Yoshio
 Prof. Dr. Fujimori Atsushi
 Asst. Prof. Dr. Shoji Koichi
 Asst. Prof. Dr. Thoatsanope Kamnerdtong
- Asst. Prof. Dr. Teeranoot Chanthasopeephan
 Dr. Chirdpun Vitooraporn
 Dr. Teerapot Wessapan
- Asst. Prof. Dr. Charoenyut Dechwayukul

| | |
|---|--|
| Prof. Dr. Pramote Dechaumphai | Asst. Prof. Dr. Nattawoot Depaiwa |
| Prof. Dr. Phadungsak Rattanadecho | Asst. Prof. Dr. Tumrong Puttapitukporn |
| Prof. Dr. Somchart Chantasiriwan | Asst. Prof. Dr. Nopdanai Ajavakom |
| Prof. Dr. Sompong Putvisutisak | Asst. Prof. Dr. Niphon Wansophark |
| Assoc. Prof. Dr. Kuntinee Maneeratana | Asst. Prof. Dr. Boonchai Lertnuwat |
| Assoc. Prof. Dr. Jarruwat charoensuk | Asst. Prof. Dr. Monsak Pimsarn |
| Assoc. Prof. Dr. Thitima Jintanawan | Asst. Prof. Dr. Virat Chomkwah |
| Assoc. Prof. Dr. Nat Kasayapanand | Asst. Prof. Dr. Supavut Chantranuwathana |
| Assoc. Prof. Dr. Thawatchai Onjun | Asst. Prof. Dr. Sontipee Aimmanee |
| Assoc. Prof. Dr. Thanya Kiatiwat | Asst. Prof. Dr. Seney Sirichai |
| Assoc. Prof. Dr. Poranat Visuwan | Asst. Prof. Dr. Anusarn Permsuwan |
| Assoc. Prof. Dr. Pongpan Kaewtatip | Asst. Prof. Dr. Arisara Chaikittiratana |
| Assoc. Prof. Dr. Pongjet Promvonge | Asst. Prof. Dr. Angkee (Paiboon) Sripakagorn |
| Assoc. Prof. Dr. Perapong Tekasakul | Asst. Prof. Dr. Charoenyut Dechwayukul |
| Assoc. Prof. Dr. Worawut Wisutmetthangoon | Asst. Prof. Dr. Pattaramon Jongpradist |
| Assoc. Prof. Dr. Varangrat Juntasaro | Asst. Prof. Dr. Petch Jearanaisilawong |
| Assoc. Prof. Dr. Viboon Sangveraphunsiri | Dr. Passakorn Vessakosol |
| Assoc. Prof. Dr. Wiroj Limtrakarn | Dr. Sujint Suwanna |
| Assoc. Prof. Dr. Surachate Chutima | Dr. Suvanit Chitsiriphanit |
| Assoc. Prof. Dr. Ekachai Juntasaro | Dr. Attaporn Wisessint |
| Assoc. Prof. Gp. Capt. Somchai Hanklar | Dr. Alongkorn Pimpin |
| Flt. Lt. Assoc. Prof. Dr. Kontorn Chamniprasart | Dr. Apirak Hokpanna |
| Asst. Prof. Dr. Kulachate Pianthong | Dr. Phongsaeen Pitakwatchara |
| Asst. Prof. Dr. Chittin Tangthieng | Prof. Dr. Khalil M Khanafer |
| Assoc. Prof. Dr. Wanchai Asvapoositkul | Prof. Dr-Ing. Helmut Maier |
| Prof. Dr. Satoshi Matsumoto | Assoc. Prof. Dr. Shinji Kimijima |
| Prof. Dr. Shankar Mahalingam | |

DRC Dynamic System, Robotics and Control

| | |
|------------------------------------|--|
| Prof. Dr. Stanislav S. Makhanov | Asst. Prof. Dr. Theeraphong Wongratanaphisan |
| Prof. Dr. Thananchai Leephakpreeda | Asst. Prof. Dr. Nopdanai Ajavakom |
| Assoc. Prof. Dr. Djitt Laowattana | Asst. Prof. Dr. Phongsaeen Pitakwatchara |

Assoc. Prof. Dr. Thanu CHOUYCHAI
 Assoc. Prof. Dr. Pudit Laksanacharoen
 Assoc. Prof. Dr. Manukid Parnichkun
 Assoc. Prof. Dr. Radom Pongvuthitham
 Assoc. Prof. Dr. Ratchatin Chanchareon
 Assoc. Prof. Dr. Viboon Sangveraphunsiri
 Assoc. Prof. Dr. Suteera Prasertsan
 Assoc. Prof. Dr. Suwat Kuntanapreeda
 Assoc. Prof. Dr. Panyarak Ngamsritragul
 Capt. Assoc. Prof. Dr. Kontorn Chamniprasart.
 Assoc. Prof. Dr. Matthew O. T. Cole
 Asst. Prof. Dr. Steven Gordon
 Asst. Prof. Dr. Chak Chantalakhana
 Prof. Dr.-Ing. Helmut Maier

Asst. Prof. Dr. Pruittikorn Smithmaitrie
 Asst. Prof. Dr. Witaya Wannasuphoprasit
 Asst. Prof. Dr. Withit Chatlatanagulchai
 Asst. Prof. Dr. Supavut Chantranuwathana
 Asst. Prof. Dr. Szathys Songschon
 Asst. Prof. Dr. Saroj Saimek
 Dr. Nuksit Noomwongs
 Dr. Nyesunthi Apiwattanalunggrarn
 Dr. Pairat Tangpornprasert
 Dr. Pinyo Puangmali
 Dr. Mana Saedan
 Dr. Sawat Luengruengrit
 Dr. Sappinandana Akamphon

ETM Energy Technology and Management

Prof. Dr. Tanongkiat Kiatsiriroat
 Prof. Dr. Pradit Terdtoon
 Prof. Dr. Phadungsak Rattanadecho
 Prof. Dr. Somchart Chantasirivan
 Assoc. Prof. Dr. Chukiatt Kooptanond
 Assoc. Prof. Dr. Thanakom Soontornchainacksaeng
 Assoc. Prof. Dr. Thawatchai Onjun
 Assoc. Prof. Dr. Pongjet Promvonge
 Assoc. Prof. Dr. Withaya Yongchareon
 Assoc. Prof. Dr. Satha Aphornratana
 Assoc. Prof. Dr. Supachart Chungpaibulpatana
 Assoc. Prof. Dr. Somrote Komolavanij
 Assoc. Prof. Dr. Smith Aemsaard
 Assoc. Prof. Dr. Wanchai Asvapoositkul
 Prof. Dr. Tanongkiat Kiatsiriroat
 Assoc. Prof. Dr. Sakamon Devahastin

Assoc. Prof. Dr. Suteera Prasertsan
 Assoc. Prof. Dr. Asi Bunyajitradulya
 Asst. Prof. Dr. Kriengkrai Assawamartbunlue
 Asst. Prof. Dr. Chinda Charoenphonphanich
 Asst. Prof. Dr. Chatchawan Chaichana
 Asst. Prof. Dr. Charnnarong Assavatesanupap
 Asst. Prof. Dr. Tul Manewattana
 Asst. Prof. Dr. Nuparb Yamtraipat
 Asst. Prof. Dr. Malee Santikunaporn
 Asst. Prof. Dr. Watit Pakdee
 Asst. Prof. Dr. Somchai Maneewan
 Asst. Prof. Dr. Udomkiat Nontakaewa
 Asst. Prof. Dr. Surachai Sanitjai
 Dr. Chirdpun Vitooraporn
 Dr. Pramote Laipradit
 Prof. Dr. Joseph Khedari

Assoc. Prof. Dr. Suebsak Nanthavanij

Prof. Dr. Fujimori Atsushi

Prof. Dr. Otani Yoshio

Prof. Dr. Satoshi Matsumoto

Assoc. Prof. Dr. Suteera Prasertsan

Dr. Amornrat Kaewpradap

Assoc. Prof. Dr. Shinji Kimijima

Asst. Prof. Dr. Shoji Koichi

TSF Thermal Systems and Fluid Mechanics

Prof. Dr. Phadungsak Rattanadecho

Prof. Dr. Somchai Wongwises

Prof. Dr. Somsak Chaiyapinunt

Assoc. Prof. Dr. Chamlong Prabkeao

Assoc. Prof. Dr. Jumlong Limtragool

Assoc. Prof. Dr. Chawalit Kittichaikarn

Assoc. Prof. Dr. Chairote Kunpanitchakit

Assoc. Prof. Dr. Chaisin Chinporncharoenpong

Assoc. Prof. Dr. Chinaruk Thianpong

Assoc. Prof. Dr. Tawit Chitsomboon

Assoc. Prof. Dr. Bundit Limmeechokchai

Assoc. Prof. Dr. Prakob Surawattanawan

Assoc. Prof. Dr. Pongjet Promvonge

Assoc. Prof. Dr. Perapong Teakasakul

Assoc. Prof. Dr. Paisarn Naphon

Assoc. Prof. Dr. Mongkol Mongkolwongrojn

Assoc. Prof. Dr. Montri Thumrongpirun

Assoc. Prof. Dr. Manit Thongprasert

Assoc. Prof. Dr. Wanchai Asvapoositkul

Asst. Prof. Dr. Surachai Sanitjai

Prof. Dr. Hiroshi Takami

Prof. Dr. Kambiz Vafai

Prof. Dr. Khalil M Khanafer

Prof. Dr. Otani Yoshio

Prof. Dr. S. Sablani

Prof. Dr. S.J. Kowalski

Assoc. Prof. Dr. Satha Aphornratana

Assoc. Prof. Dr. Somchai Norasethasopon

Assoc. Prof. Dr. Somnuk Theragulpisut

Assoc. Prof. Dr. Sombat Teekasap

Assoc. Prof. Dr. Somrat Kerdsuwan

Assoc. Prof. Dr. Sakamon Devahastin

Assoc. Prof. Dr. Santi Laksitanonta

Assoc. Prof. Sinchai Chinvorarat

Assoc. Prof. Suebsak Nanthavanij

Assoc. Prof. Surachai Radagan

Assoc. Prof. Anusorn Chinsuwan

Assoc. Prof. Asi Bunyajitradulya

Assoc. Prof. Issaree Hunsacharoonroj

Assoc. Prof. Richakorn Chirakalwasan

Assoc. Prof. Veera Charvattana

Assoc. Prof. Samruad Inban

Asst. Prof. Dr. Wisanuruk Wechsathol

Dr. Yossapong Laonual

Dr. Atikorn Wongsatanawarid

Prof. Dr. Satoshi Matsumoto

Prof. Dr. Shankar Mahalingam

Prof. Dr. Tim A.G. Langrish

Prof. Dr. Xiao Dong Chen

Prof. Dr.-Ing. Helmut Maier

Assoc. Prof. Dr. Shinji Kimijima

CST: Computation and Simulation Techniques

| | | |
|---------|--|----|
| CST1002 | Development of CFD Software for Predicting Three-Dimensional Complex Geometry Flows | 57 |
| CST1004 | Design of Insert Molds for Flow Stress Determination of Steel Tube in Hydroforming Bulge Test | 58 |
| CST1010 | Cooling Optimization Simulation with Finite Element Method Used for Manufacturing of Polycarbonate Lens. | 59 |
| CST1011 | Application of Space-Time Finite Element Method for Two-Dimensional Heat Conduction Problems | 60 |
| CST1015 | Numerical Analysis of Laminar Heat Transfer in a Circular Tube with Orifices Plate | 61 |
| CST1016 | 3D Analysis of Laminar Flow, Pressure Loss and Heat Transfer in a Tube with U-Inclined Thin Ribs | 62 |
| CST1018 | Brake Force Control Scheme for Integration of Conventional and Regenerative Braking Systems of Retrofitted Electric Vehicles | 63 |
| CST1019 | Development of Adaptive Meshing within LS-DYNA with Application to Impact Mechanics | 64 |
| CST1020 | Finite Element Analysis of an Electric Bus Body Structure in Real Driving Conditions | 65 |
| CST1023 | Improved Structural Solution Accuracy with Adaptive Quadrilateral Elements by Flux-based Formulation | 66 |
| CST1027 | Three-dimensionalities of vortex cell flow: Effects of oblique incoming boundary layer. | 67 |

DRC: Dynamic System, Robotics and Control

| | | |
|---------|---|----|
| DRC1001 | Development of an Intelligent Steering System for Light Passenger Car | 68 |
| DRC1002 | Robust Inverse Dynamics Control and Vibration Rejection for Inertial Stabilization Systems | 69 |
| DRC1003 | An Improved Visual Tracking Algorithm for An Inertial Stabilization System | 70 |
| DRC1004 | Multiple Objects Tracking using a Kalman Filter on a PC-Cluster based Multi-Camera System | 71 |
| DRC1005 | Control of a Telemanipulator using Freehand and Force/Visual Feedback | 72 |
| DRC1007 | Directing Mobile Robot Roaming Path Based on the Skinner Automation | 73 |
| DRC1009 | Control of a Two-Degree of Freedom Cable Driven Compound Joint System: Preliminary Results | 74 |
| DRC1013 | Robust and Quadratic Stabilization of TORA System via Dynamic Surface Control Technique | 75 |
| DRC1017 | Design of a Hospital Stretcher with a Semi-Active Vibration Absorption System | 76 |
| DRC1018 | Tire Test for Drifting Dynamics of a Scaled Vehicle | 77 |
| DRC1020 | Parabolic Backstepping Boundary Control : An Application to One-dimensional Heat-generating Rod Temperature Control | 78 |
| DRC1024 | Development of Driving Simulator for Eco-Driving Evaluation | 79 |
| DRC1026 | Wearable Wireless Fall Detector for the Elderly | 80 |
| DRC1027 | Frontage Camera System for Passenger Car | 81 |
| DRC1030 | Compliant Control of CRS Manipulator Arm | 82 |
| DRC1032 | Remotely Operated Vehicle with Depth Control | 83 |
| DRC1033 | Three-Wheel Robot Driven by Inertial Actuator | 84 |

DRC 1030

The 3rd TSME International Conference on Mechanical Engineering
October 2012, Chiang Rai

Compliant Control of CRS Manipulator Arm

Supachock Tuntivivat, Pradya Prempraneerach*

Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi,
Pathumthani, thailand 12110

*Corresponding Author: ppradya@gmail.com, +66-(0)-2549-4415

Abstract

Position and force control of a planar robot has been implemented in this research such that the end effector can follow a specified trajectory and the xy-plane force at the tip of end effector can maintain at a constant level. A compliant control uses a force sensor attached at the end effector to perform a force feedback. First the position and force controls of the end effector are designed using a mathematical model of a A255 CRS 4-axis manipulator arm in Matlab/Simulink, then these controllers are applied to a real CRS arm with motion constraint only in the vertical or xy-plane, using LabVIEW 2010. An application of this CRS arm control is to simulate a small surgery operation.

Keywords: Compliant control, CRS manipulator arm, motion trajectory



Compliant Control of CRS Manipulator Arm

Supachock Tuntivivat, Pradya Prempraneerach*

Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi,
Pathumthani, thailand 12110

*Corresponding Author: ppradya@gmail.com, 02-549-4415

Abstract

Position and force control of a planar robot has been implemented in this research such that the end effector can follow a specified trajectory and the xy-plane force at the tip of end effector can maintain at a constant level. A compliant control uses a force sensor attached at the end effector to perform a force feedback. First the position and force controls of the end effector are designed using a mathematical model of a A255 CRS 4-axis manipulator arm in Matlab/Simulink, then these controllers are applied to a real CRS arm with motion constraint only in the vertical or xy-plane, using LabVIEW 2010. An application of this CRS arm control is to simulate a small surgery operation.

Keywords: Compliant control, CRS manipulator arm, motion trajectory

1. Introduction

Both industry and medical applications move toward automated systems for various tasks. Robots, especially a manipulator arm, are one of the key components in automation; for example, pick-and-place, welding, small surgery. Main advantages of robotic arm are its precision, accuracy, and extended operational period.

Recently, researches on force control of robot manipulator arm have been implemented for various applications. Wim Witvrouw and Sean Graves and etc. [1] developed a joystick controller for operators that can sense force from robot end effector. A force sensing and control of a surgical robot were studied by Peter Kazanzides and etc. [2] such that artificial organs can be transplanted. Qinjun DU designed a minimally invasive surgical robot along with its force control, this robot can be controlled by a surgeon to perform a tumor operation with good accuracy for a small wound. Moreover, Satoshi Komada and etc. [3] has worked on a robust force control based on estimation of environment, all external disturbances; such as friction force, gravity and external force, were compensated in the controller.

This research focuses on a compliant control of A255 CRS 4-axis manipulator arm. Section 2 introduces the mathematical model and associated parameters as well as hardware component of the CRS robot arm. The dynamic simulation of the compliant control, implemented by Matlab/Simulink, is described in Section 3. The experimental results of the compliant control are performed by LabVIEW 2010 on the CRS robot arm in Section 4. Finally, Section 5 summarizes

all results of the compliant control as well as states future improvement.

2. Modeling and Hardware

The A255 CRS robot arm has 5 degree of freedom as well as consists of three main linkages and 5 revolute joints. Mass and moment of inertia of all links are estimated to be $m_1 = 0.81$ kg, $m_2 = 0.52$ kg, $m_3 = 0.35$ kg, $I_1 = 0.39$ kg-m², $I_2 = 0.27$ kg-m², and $I_3 = 0.18$ kg-m², using the SolidWorks, as shown in Fig. 1. However, in this research the CRS robot motion is constrained with the vertical or xy-plane, only 3 links or 3 rotation angles, represented in Fig. 2, are employed for the compliant control.

The Denavit-Hartenberg parameters [1] for the CRS robot arm are given in Table 1.

Table. 1 Denavit-Hartenberg parameters of CRS robot arm

| Axis | α_i | a_i | d_i | θ_i |
|------|------------|-----------------|-------|------------|
| 1 | 0 | $l_1 = 0.255$ m | 0 | q_1 |
| 2 | 0 | $l_2 = 0.254$ m | 0 | q_2 |
| 3 | 0 | $l_3 = 0.252$ m | 0 | q_3 |

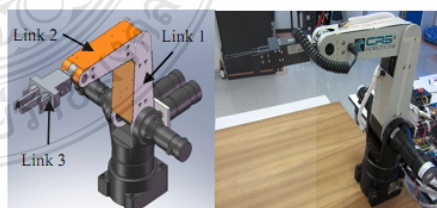


Fig. 1 All three links of the CRS arm in SolidWorks (left) and the CRS arm and its hardware (right)

where l_i is the i -th link length and t_i is the i -th rotation joint angle. According to Table 1, all α and d parameters are set to zero because the robot motion is restricted only in the vertical plane.

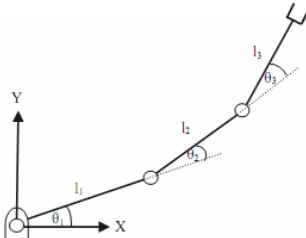


Fig. 2 Frame assignment and three degree-of-freedom of the CRS robot arm for the compliant control

A position of the CRS end effector can be calculated using a forward kinematics. The end effector position can be obtained by multiplying the following rotation matrix, given in Eq. (1), with a vector of the robot base.

$$\begin{pmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & l_2*c_{12}+l_1*c_1+l_3*c_{123} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & l_2*s_{12}+l_1*s_1+l_3*s_{123} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Using the Lagrangian mechanics, a dynamic equation of the robot arm can be computed from total energy or Lagrangian function (L), which consists of the kinetic energy (K) and potential energy (U) in Eq. (2).

$$L = K - U \quad (2)$$

Then, the robot dynamics can be derived from the Lagrange's equation, given by the following

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_r} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_r} \right) = Q_r \quad r = 1, 2, 3 \quad (3)$$

where q_r, \dot{q}_r are correspondingly the r -th joint rotation angle and angular velocity. Q_r is the r -th joint torque. Vectors of the joint angle vector and angular velocity are denoted by $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}$, respectively. Finally, the robot dynamic equation can be rewritten in terms of a mass matrix ($\mathbf{M}(\mathbf{q})$), coriolis and centripetal matrix ($\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$), gravitational matrix ($\mathbf{G}(\mathbf{q})$), and joint torque vector (\mathbf{Q}), as in Eq. (4) below. All matrices are described in detail in Appendix.

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{Q} \quad (4)$$

Three motors of the A255 CRS robot arm are driven by ASP-090-36 Accelus motor drive in a torque mode for 3-axis torque control. A NI PCI-6221 data acquisition card is interfaced between motor drives and a computer that uses LabVIEW as the control software. Two ARM7 microcontrollers are employed to count motors' encoder pulses. Fig. 3 shows the A255 CRS robot hardware connection.

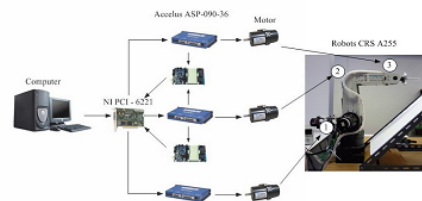


Fig. 3 Overall schematic diagram of the CRS arm hardware connection.

3. Dynamic Simulation of Compliant Control

For the force control of the CRS robot arm, a stiffness or compliant control is selected for implementation simplicity in this research. To perform the dynamic simulation of the force control, a stiffness of the contacted object (K_c) is assumed to be a constant. Thus, the normal force from the robot end effector acts on the contacted surface, is expressed by Eq. (5).

$$f = K_c(x - x_e) \quad (5)$$

where x_e, x_c , and x_d are the equilibrium position of the contacted surface, instantaneous position of the end effector, and desired or command position of the end effector, respectively, as shown in Fig. 4.

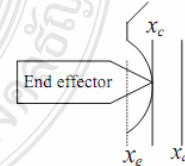


Fig. 4 Compliance of the contacted surface due to the end effector motion

A control law for the compliant control with gravity and friction compensation is given in Eq. (5) so that the normal force from the end effector can be specified.



$$\tau = J^T(q)(-K_v \dot{x} + K_p \bar{x}) + G(q) + F(\dot{q}) \quad (5)$$

where $\bar{x} = x_d - x_c$ is the position error along the perpendicular direction to the contacted surface. $J(q)$ is a task-space jacobian of the end effector. A joint kinetic friction, $F(\dot{q})$, is neglected in this study. K_v and K_p are correspondingly diagonal derivative and proportional gains.

Let consider the end-effector motion along a slant or contacted surface that tilts 45 degree up from the x-axis, as shown in Fig. 5. First, a coordinate that is tangential and perpendicular to the slant surface is defined to be (u,v). Second, initial joint angles $(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = (90^\circ, -90^\circ, 0^\circ)$ for a CRS arm pose, displayed in Fig. 5, gives $(u_i, v_i) = (0,0)$ or a starting location. Third, an end location is at $(u_f, v_f) = (0.19, 0.3)$. The compliant control regulates all three-motor torque such that the end effector moves from the initial position along the slant surface. Moreover, the contact forces in tangential direction (f_2) and in normal direction (f_1) are maintained at constant levels.

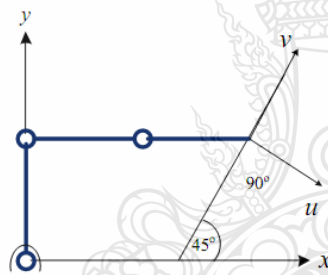


Fig. 5 Coordinate of the robot base (x,y) and of the slant surface (u,v).

Dynamic simulations of the compliant control using Eq. (4) and (5) are implemented in Matlab/Simulink. Fourth, assuming the stiffness of the contacted surface, K_s , equals to 200 N/m and tuning controller gains, $(K_p, K_v) = (150, 300)$, the CRS robot arm motion from the dynamic simulation is shown in Fig. 6. The result reveals that the controller kept the end-effector contacting with the 45° incline surface from the initial to end position very well. Three joint torques are shown in Fig. 7. The torque from the first joint varies from 2 N-m to about 0 N-m within 5 seconds during the contact operation. For the second joint, the torque maintains at a constant value of 1.98 N-m until 3 sec then decreases to 1.5 N-m.

Torque of three joints is shown in Fig. 7. The torque from the first joint varies from 2 N-m to a small value close to 0 N-m within 5 seconds during the contact operation. For the second joint, the torque maintains at a constant value of 1.98 N-m until 3 sec then decreases to 1.5 N-m. Torque in the third joint is kept constant at 0.4 N-m, which make the end effector contact the incline surface at all time. Fig. 8 displays the normal force (f_1) and tangential force (f_2) at the end effector. The normal force initially equals to 0 and approaches its steady state value of 0.85 N within the first 3 sec. Similarly, the tangential force increases from 0 to 0.18 N after 3 sec as well. This dynamic simulation result confirms that the end effector force can be controlled at the specified value.

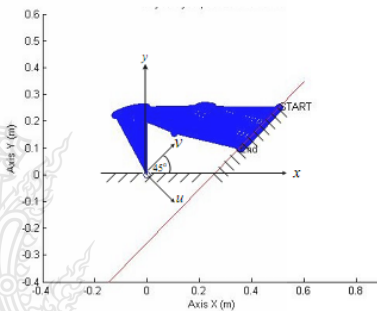


Fig. 6 Dynamic simulation of the CRS robot arm trajectory using the compliant control along the 45° incline surface.

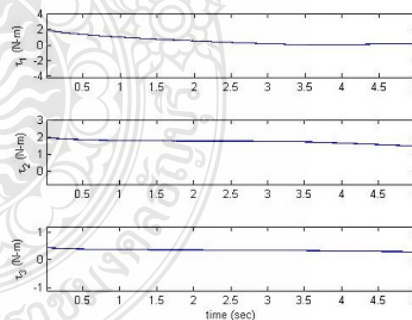


Fig. 7 Three joint torques computed from the compliant control

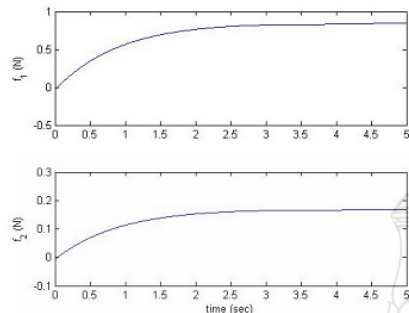


Fig. 8 Normal force (f_1) and tangential forces (f_2) of the CRS end effector exerting on the 45° incline surface

4. Experimental Results

The stiffness controller of A255 CRS robot arm is developed in LabVIEW 2010. The control law with gravity compensation in Eq. (5) is a main controller with 1) three joint angles ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$), calculated from three encoders and 2) the desired position (x_d, y_d) that is needed to transform to (u_d, v_d) in the tangential and perpendicular coordinate of the slant surface, as inputs. Outputs of the compliant controller are three joint torques, which need to convert to current commands in the form of PWM and analog signals for three Accelus drives. A simplified block diagram is shown in Fig. 9 for the compliant control of the CRS robot arm.

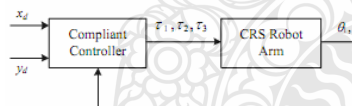


Fig. 9 Block diagram for the compliant control along with input and output for the controller

For the compliant control of the CRS robot arm along the 45° slant surface similar to the dynamic simulation, 1-inch thick foam board is used as a contacted surface on the incline plane and initial joint angles ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) are (66°, -65°, 6°). When the end effector of the CRS arm pushes and drags along the incline foam board, the joint angles, shown in Fig. 10, and joint torque, shown in Fig. 11, can be measured from motor encoders and computed from the compliant controller, respectively. According to Fig. 10, the first joint angle increases 20°, the second joint decreases 50°, and the third joint increases 35° during the

compliant control operation between 2 and 2.7 sec. In the steady-state position after 3 sec, the end effector of the CRS robot arm approaches a position (u, v) = (0.184, 0.3) m along the slant surface. These experimental results well agree with the dynamic simulation results, shown in Fig. 6. Note that before 2.1 sec, the CRS end effector approaches and maintains the initial position or initial joint angles using the PID position and then at 2.1 sec, the CRS arm is controlled by the compliant control. Furthermore, Fig. 11 exhibits the joint torque, computed by the compliant control. During the compliant control operation, all joint torques decrease from positive to negative values. The first joint produces the largest increment of -7 N-m at 2.1 sec, while torque difference of the second and third joints is decreased by 1.5 N-m.

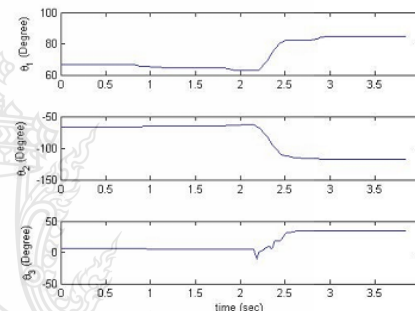


Fig. 10 Joint angles during the compliant control operation between 2.1 and 2.7 sec.

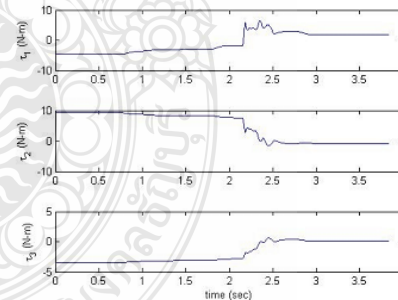


Fig. 11 Joint torques during the compliant control operation between 2.1 and 2.5 sec.

5. Conclusion

Using the compliant or stiffness controller, the A255 CRS robot arm can be controlled from the initial position (u, v) = (0, 0) to the final position (u, v) = (0.19, 0.3) m as well as



can maintain the contacted force both in the dynamic simulation and the experimental result. However, the response in the experimental result is much faster than that in the dynamic simulation by at least 4 sec.

To further compare between dynamic simulation and experiment, the force sensor will be attached to the end effector of CRS robot arm. Moreover, different geometries of the contacted surface will be employed to demonstrate the compliant control operation of the A255 CRS robot arm.

6. Acknowledgement

The authors would like to thank the National Research Council of Thailand (NRCT) for a research grant 2553 to support this research.

7. References

- [1] Craig, J.J. (1989). Introduction to robotics: mechanics and control, 2nd edition, ISBN: 0-201-09528-9, Addison-Wesley Publishing Company,
- [2] Kazanzides, P., Zuhars, J., Mittelstadt, B. and Taylor, R.H. (1992). Force sensing and control for a surgical robot, paper presented in the *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice, France.
- [3] Wang, Q., Schutter, J.D., Witvrouw, W. and Graves, S. (1996). Derivation of compliant motion programs based on human demonstration in the *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, Minnesota.
- [4] Frank, L.Lewis, Darren, M.Dawson and Chao uki, T.Abdallah. (2003). Robot Manipulator Control Theory And Practice, 2nd edition, ISBN: 0-8247-4072-6, CRC Press, New York.
- [5] Du, Q., Huang, Q., Tian, L. and Liu, C. (2006). Mechanical Design and Control System of a Minimally Invasive Surgical Robot System in the *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Luoyang, China.
- [6] Komada, S., Nomura, K., Ishida, M., Ohnishi, K. and Hori, T. (1992). Robust Force Control Based on Estimation of Environment, paper presented in the *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice, France.

8. Appendix

The mass matrix ($\mathbf{M}(\mathbf{q})$) is

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix}, \text{ where}$$

$$\begin{aligned} M_{11} &= I_1 + I_2 + I_3 + \left(\frac{L_1^2 m_1}{4}\right) + L_1^2 m_2 + L_1^2 m_3 + \left(\frac{L_2^2 m_2}{4}\right) + L_2^2 m_3 \\ &+ \left(\frac{L_3^2 m_3}{4}\right) + L_1 L_3 m_3 \cos(q_2 + q_3) + L_1 L_2 m_2 \cos(q_2) \\ &+ 2L_1 L_2 m_3 \cos(q_2) + L_2 L_3 m_3 \cos(q_3) \\ M_{12} &= I_2 + I_3 + \left(\frac{L_2^2 m_2}{4}\right) + L_2^2 m_3 + \left(\frac{L_3^2 m_3}{4}\right) + \left(\frac{L_1 L_3 m_3 \cos(q_2 + q_3)}{2}\right) \\ &+ \left(\frac{L_1 L_2 m_2 \cos(q_2)}{2}\right) + L_1 L_2 m_3 \cos(q_2) + L_2 L_3 m_3 \cos(q_3) \\ M_{13} &= I_3 + \left(\frac{L_3^2 m_3}{4}\right) + \left(\frac{L_1 L_3 m_3 \cos(q_2 + q_3)}{2}\right) + \left(\frac{L_2 L_3 m_3 \cos(q_3)}{2}\right) \\ M_{21} &= I_2 + I_3 + \left(\frac{L_2^2 m_2}{4}\right) + L_2^2 m_3 + \left(\frac{L_3^2 m_3}{4}\right) + \left(\frac{L_1 L_3 m_3 \cos(q_2 + q_3)}{2}\right) \\ &+ \left(\frac{L_1 L_2 m_2 \cos(q_2)}{2}\right) + L_1 L_2 m_3 \cos(q_2) + L_2 L_3 m_3 \cos(q_3) \\ M_{22} &= I_2 + I_3 + \left(\frac{L_2^2 m_2}{4}\right) + L_2^2 m_3 + \left(\frac{L_3^2 m_3}{4}\right) + L_2 L_3 m_3 \cos(q_3) \\ M_{23} &= \left(\frac{m_3 L_3^2}{4}\right) + \left(\frac{L_2 m_3 \cos(q_3) L_3}{2}\right) + I_3 \\ M_{31} &= I_3 + \left(\frac{L_3^2 m_3}{4}\right) + \left(\frac{L_1 L_3 m_3 \cos(q_2 + q_3)}{2}\right) + \left(\frac{L_2 L_3 m_3 \cos(q_3)}{2}\right) \\ M_{32} &= \left(\frac{m_3 L_3^2}{4}\right) + \left(\frac{L_2 m_3 \cos(q_3) L_3}{2}\right) + I_3 \\ M_{33} &= \left(\frac{m_3 L_3^2}{4}\right) + I_3 \end{aligned}$$

The coriolis and centripetal matrix ($\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$) is

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}, \text{ where}$$

$$\begin{aligned} C_{11} &= \left(\frac{3L_1 L_3 m_3 \sin(q_1 + q_3)}{2}\right) - \left(\frac{3L_1 L_2 m_2 \sin(q_1)}{2}\right) - 3L_1 L_2 m_3 \sin(q_1) \\ C_{12} &= 0 \\ C_{13} &= \left(\frac{L_1 L_3 m_3 \sin(q_1 + q_3)}{2}\right) - \left(\frac{L_2 L_3 m_3 \sin(q_3)}{2}\right) \\ C_{21} &= L_1 L_2 m_3 \sin(q_2) \left(\frac{L_1 L_2 m_2 \sin(q_1)}{2}\right) - L_1 L_2 m_3 \sin(q_1) \\ &- \left(\frac{L_1 L_3 m_3 \sin(q_1 + q_3)}{2}\right) + \left(\frac{L_1 L_3 m_3 \sin(q_2 + q_3)}{2}\right) \\ &- \left(\frac{L_1 L_2 m_2 \sin(q_2)}{2}\right) \\ C_{22} &= 0 \end{aligned}$$



$$C_{23} = \left(\frac{L_2 L_3 m_3 \sin(q_3)}{2} \right)$$

$$C_{31} = \left(\frac{L_1 L_3 m_3 (\sin(q_2 + q_3))}{2} \right) - \left(\frac{L_1 L_3 m_3 \sin(q_1 + q_3)}{2} \right)$$

$$+ \left(\frac{L_2 L_3 m_3 (\sin(q_3))}{2} \right)$$

$$C_{32} = \left(\frac{L_2 L_3 m_3 (\sin(q_3))}{2} \right)$$

$$C_{33} = 0$$

The gravitational matrix ($\mathbf{G}(\mathbf{q})$) is

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix}, \text{ where}$$

$$G_1 = \left(\frac{g * l_2 * m_2 * \cos(q_1 + q_2)}{2} \right)$$

$$+ g * l_2 * m_3 * \cos(q_1 + q_2) + \left(\frac{g * l_1 * m_1 * \cos(q_1)}{2} \right)$$

$$+ g * l_1 * m_2 * \cos(q_1) + g * l_1 * m_3 * \cos(q_1)$$

$$+ \left(\frac{g * l_3 * m_3 * \cos(q_1 + q_2 + q_3)}{2} \right)$$

$$G_2 = \left(\frac{g * l_2 * m_2 * \cos(q_1 + q_2)}{2} \right) + g * l_2 * m_3 * \cos(q_1 + q_2)$$

$$+ \left(\frac{g * l_3 * m_3 * \cos(q_1 + q_2 + q_3)}{2} \right)$$

$$G_3 = \left(\frac{g * l_3 * m_3 * \cos(q_1 + q_2 + q_3)}{2} \right)$$

The task-space jacobian ($\mathbf{J}(\mathbf{q})$) is

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \end{bmatrix}, \text{ where } \theta = 45^\circ$$

$$J_{11} = -l_2 * \cos(q_1 + q_2 - \theta)$$

$$- l_3 * \cos(q_1 + q_2 + q_3 - \theta) - l_1 * \cos(q_1 - \theta)$$

$$J_{12} = -l_2 * \cos(l_1 + l_2 - \theta)$$

$$- l_3 * \cos(l_1 + l_2 + l_3 - \theta)$$

$$J_{13} = -l_3 * \cos(q_1 + q_2 + q_3 - \theta)$$

$$J_{21} = -l_2 * \sin(q_1 + q_2 - \theta)$$

$$- l_3 * \sin(q_1 + q_2 + q_3 - \theta) - l_1 * \sin(q_1 - \theta)$$

$$J_{22} = -l_2 * \sin(q_1 + q_2 - \theta)$$

$$- l_3 * \sin(q_1 + q_2 + q_3 - \theta)$$

$$J_{23} = -l_3 * \sin(q_1 + q_2 + q_3 - \theta)$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล นายสุก โชค ตันตวิวัฒน์

วัน เดือน ปีเกิด 3 กรกฎาคม 2530

ที่อยู่ 47/1 ถนน ศรีสมบูรณ์ ตำบล ปากพ่น้ำ อำเภอ ปากพ่น้ำ
จังหวัด นครศรีธรรมราช 80140

การศึกษา

พ.ศ.2551 – พ.ศ.2553 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี บัณฑิต

สาขา วิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

