

การออกแบบโครงสร้างกายภาพและเครือข่ายสื่อสารหุ่นยนต์อ่อนตัว

DESIGN OF PHYSICAL AND COMMUNICATION STRUCTURE OF FLEXIBLE
MANIPULATORS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-M-707-161

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF PHYSICAL AND COMMUNICATION STRUCTURE OF FLEXIBLE
MANIPULATORS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN COMPUTER ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

KMITL-2015-EN-M-707-161

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบโครงสร้างกายภาพและเครือข่ายสื่อสารหุ่นยนต์แขนกลอ่อนตัว
Thesis Title Design of Physical and Communication Network Structure of Flexible Manipulators
นักศึกษา นายณัฐพล ผลเจริญพงศ์
รหัสประจำตัว 53611126
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-070-161

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.บุญวัฒน์	อัครุ	
รศ.ดร.บุญธีร์	เครือตราชู	
ดร.วีระพล	โมนะกุล	
รศ.ดร.อรฉัตร	จิตต์โสภักตร์	
รศ.ดร.ปิติเขต	สุรักษา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร ECC ห้อง ECC-808

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วันที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบโครงสร้างกายภาพและเครือข่ายสื่อสารหุ่นยนต์อัตโนมัติ อัตโนมัติ
นักศึกษา	นายณัฐพล ผลเจริญพงศ์
รหัสประจำตัว	53611126
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา

บทคัดย่อ

ปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพให้แขนกลในงานเคลื่อนย้ายสิ่งของให้มากขึ้นเป็นที่สนใจเป็นเวลากว่าสามทศวรรษ งานวิจัยที่ผ่านมาเน้นไปที่การเปลี่ยนแขนกลจากโลหะหนักมาเป็นวัสดุเบาประเภทยืดหยุ่นอ่อนตัว ทว่า แขนกลแบบใหม่นี้มีปัญหาด้านการสั่น วิทยานิพนธ์นี้แก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธีการใช้โครงสร้างขนาน ระเบียบวิธีที่ใช้ครอบคลุมถึงการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ การสร้างจริงและเปรียบเทียบความคุ้มค่าเชิงผลตอบแทนกับระบบแบบดั้งเดิม รวมถึงการศึกษาเบื้องต้นในการส่งสัญญาณควบคุมจากแขนกลที่นำเสนอผ่านระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายระยะไกลภายในเครือข่ายหุ่นยนต์ ผลการวิจัยพบว่าแขนกลอ่อนตัวชนิดใหม่สามารถทดแทนแขนกลแบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางด้านการลดน้ำหนักตัว การขยายขีดความสามารถในการรับภาระงาน การประหยัดค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ และความคุ้มค่าเชิงผลตอบแทนจากการลดค่าใช้จ่ายในการสร้างและปฏิบัติงาน นอกจากนี้ แขนกลที่นำเสนอสามารถรับส่งสัญญาณควบคุมได้ในระยะไกลภายในระบบสื่อสารในเครือข่ายหุ่นยนต์ได้ผลในช่วงเวลาที่ใช้งานได้จริง

Thesis	Design of physical and communication network structure of flexible manipulator robots
Student	Mr. Nuttapon Poncharenpong
Student ID.	53611126
Degree	Master of Engineering
Program	Computer Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Pitikhate Suraksa

ABSTRACT

Having enhanced and extended productivity of manipulators for moving tasks have been an interesting issue more than three decades. Past literature focused on changing material from metal heavy weight to flexible-light one. In doing so, the new robot arm introduces vibration during operation. This thesis proposes a solution to cope with the vibration in the arm using paralleled structures. Research methodology includes mathematical modeling, computer simulation, parameter analysis, implementation, and comparison on return of interest compared to the classical one. In addition, the study also includes an experiment on transmitting and receiving control signals via remotely wireless communication among the proposed robotic networks. The findings reveal that the proposed flexible manipulator significantly outperforms the conventional one in reducing body weight, increasing workload performance, less energy consumption, and better return of interest for implementation and operation. Moreover, the proposed communication for controlling signals via remotely wireless operation among the proposed robotic network yields a satisfactory result within acceptable time during operation.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอบคุณ ผศ.เตือนใจ อาชีวนิช และ ผศ.บุญชนะ ภูระหงษ์ ที่คอยให้คำปรึกษา ให้กำลังใจ และ คอยเป็นที่ปรึกษาตลอดการวิจัย ขอขอบคุณ นักศึกษาจากภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ และสมาชิกชุมนุม วิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ร่วมแรงร่วมใจกันสร้างงานชิ้นนี้ให้สมบูรณ์ขึ้นมา

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง จากแหล่งทุน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๕๔ ทุนสนับสนุนการศึกษาจาก วัดประยงค์ กิตติวราราม และทุนการศึกษาจาก รศ.ดร.ปิติเขต สุรักษา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และ ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ณัฐพล ผลเจริญพงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ประเภทของแขนงกล.....	5
2.2 ภูมิหลังของแขนงกลแบบขนาน.....	5
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัยและแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์.....	11
3.1 วิธีดำเนินการวิจัย.....	11
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนงกล.....	12
บทที่ 4 ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์และการสร้างจริง.....	28
4.1 วัสดุที่ใช้ในการออกแบบ.....	28
4.2 ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์.....	30
4.3 ผลการสร้างแขนงกลจริง.....	32
4.4 การเปรียบเทียบข้อดีของระบบที่นำเสนอกับระบบแบบดั้งเดิม.....	35
4.5 ผลของการศึกษาการสื่อสารระหว่างแขนงกล.....	36
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	39
5.1 บทสรุป.....	39

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 ข้อเสนอแนะ.....	40
บรรณานุกรม.....	42
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่อโยง.....	47
ก.1 การจำลองความแข็งแรงเมื่อมีแรงกดขนาด 1 นิวตัน.....	49
ก.2 การจำลองความแข็งแรงเมื่อมีแรงกดขนาด 10 นิวตัน.....	50
ก.3 การจำลองความแข็งแรงเมื่อมีแรงกดขนาด 100 นิวตัน.....	51
ก.4 การจำลองความแข็งแรงเมื่อมีแรงดึงขนาด 1 นิวตัน.....	52
ก.5 การจำลองความแข็งแรงเมื่อมีแรงดึงขนาด 10 นิวตัน.....	53
ก.6 การจำลองความแข็งแรงเมื่อมีแรงดึงขนาด 100 นิวตัน.....	54
ก.7 ผลการจำลองความแข็งแรง.....	55
ภาคผนวก ข การคำนวณต้นทุนรวมจากการใช้แขนกลอัตโนมัติ.....	57
ข.1 ต้นทุนจากการสร้างหรือจัดหา.....	57
ข.2 การลดค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน.....	58
ประวัติผู้เขียน.....	60

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 คุณสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมหมายเลข 6061.....	29
4.2 ขนาดความยาวของแต่ละส่วนต่อโยง.....	32
4.3 ข้อมูลของมอเตอร์ในแขนกล PUMA 560.....	35
4.4 ข้อมูลของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	35
4.5 ผลการทดสอบการสื่อสารแบบตามลำดับ.....	37
4.6 ผลการทดสอบการสื่อสารแบบดาว.....	38
ก.1 ประเภทและขนาดของแรงที่จะทำการวิเคราะห์.....	48
ก.2 ผลของการจำลองความแข็งแรงของวัสดุ.....	55



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แขนกลแบบอนุกรม.....	6
2.2 หุ่นยนต์แบบขนานตัวแรก.....	7
2.3 หุ่นยนต์แบบขนานของ Willard L. V. Pollard.....	7
2.4 แขนกลของ Willard L. G. Pollard Jr.....	8
2.5 โครงสร้างแขนกลของ Hongnian Yu.....	9
2.6 แขนกลที่ใช้กลไกของส่วนต่อต่อโยง 5 ชั้นในงานวิจัย.....	10
3.1 โครงสร้างแขนกลที่ใช้กลไกของส่วนต่อต่อโยง 5 ชั้น.....	12
3.2 คำตอบที่เป็นไปได้สองคำตอบสำหรับปัญหาจลศาสตร์ผกผัน.....	15
4.1 อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน หมายเลข 6061.....	29
4.2 ภาพหน้าตัดของโครงสร้างอลูมิเนียม.....	30
4.3 แขนกล PUMA 560.....	31
4.4 โครงสร้างแขนกลอ่อนตัวแบบขนาน.....	31
4.5 การออกแบบแขนกลด้วยคอมพิวเตอร์.....	32
4.6 โครงสร้างของหุ่นยนต์ที่มีแขนกลอ่อนตัวสองชุด.....	33
4.7 ผลการสร้างหุ่นยนต์จริงตามแบบจำลอง.....	34
4.8 แขนกลและมอเตอร์ต้นกำลังของหุ่นยนต์.....	34
4.9 โครงข่ายการสื่อสารของแขนกลแบบตามลำดับ.....	36
4.10 โครงข่ายการสื่อสารของแขนกลแบบดาว.....	37
ก.1 ชั้นส่วนต่อโยงที่นำมาวิเคราะห์.....	47
ก.2 การแบ่งวัตถุที่จะวิเคราะห์เป็นส่วนๆ.....	48
ก.3 ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงกดขนาด 1 นิวตัน.....	49
ก.4 ผลของระยะจัดของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงกดขนาด 1 นิวตัน.....	49
ก.5 ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงกดขนาด 10 นิวตัน.....	50
ก.6 ผลของระยะจัดของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงกดขนาด 10 นิวตัน.....	50
ก.7 ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงกดขนาด 100 นิวตัน.....	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.8 ผลของระยะขจัดของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงกดขนาด 100 นิวตัน.....	51
ก.9 ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงดึงขนาด 1 นิวตัน.....	52
ก.10 ผลของระยะขจัดของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงดึงขนาด 1 นิวตัน.....	52
ก.11 ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงดึงขนาด 10 นิวตัน.....	53
ก.12 ผลของระยะขจัดของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงดึงขนาด 10 นิวตัน.....	53
ก.13 ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงดึงขนาด 100 นิวตัน.....	54
ก.14 ผลของระยะขจัดของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงดึงขนาด 100 นิวตัน.....	54



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอุตสาหกรรมการผลิต หุ่นยนต์ได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้น อันเนื่องมาจากการแข่งขันของธุรกิจและความต้องการผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองความต้องการของตลาดที่เพิ่มมากขึ้น [1] ภาคอุตสาหกรรมต้องการประสิทธิภาพในการผลิตที่รวดเร็ว แม่นยำ ในทางกลับกัน ก็ต้องการลดต้นทุนการผลิตให้มากที่สุดด้วย ดังนั้นการวิจัยและพัฒนาความสามารถ รูปแบบ หรือประสิทธิภาพ การทำงานของหุ่นยนต์ จึงเป็นกิจกรรมการเชิงการผลิตที่ต้องพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

ในหุ่นยนต์ศาสตร์ (Robotics) แขนกล (manipulator) หรือแขนหุ่นยนต์ (robot arm) [2-3] ที่ใช้แพร่หลายและหลากหลายการประยุกต์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ทว่า แขนกลในยุคแรกนั้นทำมาจากวัสดุแข็งเกร็ง (rigid body) ซึ่งมีโครงสร้างที่ทำมาจากเหล็ก จึงทำให้ต้องการตัวขับเคลื่อน (actuator) ซึ่งอาจเป็นมอเตอร์ กระจบกลมหรือกระจบอไฮดรอลิกที่มีขนาดใหญ่ ส่งผลให้น้ำหนักมากขึ้นทำให้รับภาระ (load) ได้น้อยลง ซึ่งส่งผลต่อการสิ้นเปลืองพลังงานในการขับเคลื่อน และส่งผลถึงค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานอินพุตสำหรับขับเคลื่อนแขนกลขณะทำงาน

เพื่อให้แขนกลสามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น มีน้ำหนักหรือขนาดลดลง และมีความแม่นยำมากขึ้น จึงมีผู้นำเสนอแขนกลอ่อนตัว (flexible manipulator) [4] ซึ่งทำจากวัสดุเบาประเภทอลูมิเนียมหรือวัสดุอื่น ๆ ที่มีน้ำหนักเบาแทนโครงสร้างที่เป็นเหล็ก ทว่า วัสดุประเภทดังกล่าวนี้มีความอ่อนตัวเป็นธรรมชาติ แม้จะมีข้อได้เปรียบจากการที่น้ำหนักเบาอันทำให้ระบบแขนกลสามารถลดขนาดของตัวขับเคลื่อน อันเป็นผลให้ประหยัดการใช้พลังงานและช่วยลดค่าใช้จ่ายระหว่างการใช้งาน ซึ่งความอ่อนตัวอันเป็นธรรมชาติของแขนกลประเภทนี้ก่อให้เกิดปัญหาการสั่นในโครงสร้าง ซึ่งงานวิจัยในอดีตมักมุ่งเน้นไปที่การใช้วิธีการควบคุมแก้ปัญหาดังกล่าว [5-11] ดังจะเห็นได้ว่าเป็นการแก้ปัญหาเชิงสัญญาณควบคุม ซึ่งอาจไม่มีความจำเป็นและอาจเป็นการสิ้นเปลืองหรือไม่เหมาะสมในการออกแบบระบบควบคุมในงานประยุกต์หลายประเภท

ความท้าทายของโจทย์วิจัยนี้คือ จะเป็นไปได้หรือไม่ที่จะศึกษาวิธีการและสามารถสร้างซอฟต์แวร์เพื่อใช้ออกแบบและใช้การแก้ปัญหาเชิงโครงสร้างเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแขนกลอ่อนตัวหลากข้อต่อที่ใช้กลไกของส่วนต่อโยง (linkage mechanism) และเพื่อศึกษาผลกระทบของโครงสร้างที่ได้ ออกแบบดังกล่าวว่ามีผลต่อการส่งสัญญาณระยะไกลที่นิยมใช้กันแพร่หลายในปัจจุบันในรูปแบบโครงสร้างเครือข่ายการสื่อสารของหุ่นยนต์ งานวิจัยนี้จึงเพิ่มประเด็นศึกษาให้ครอบคลุมเพื่อตรวจดูความเร็วและ

รูปแบบเครือข่ายสื่อสารและระยะเวลาการส่งรับสัญญาณสื่อสารระยะไกลภายใต้สิ่งแวดล้อมที่เป็นแขนกลอ่อนตัว

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาแนวทางการออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับโครงสร้างทางกายภาพของแขนกลอ่อนตัวหลายข้อต่อ

1.2.2 เพื่อศึกษาการรับส่งสัญญาณสื่อสารระยะไกลภายใต้โครงสร้างเครือข่ายการสื่อสารในสิ่งแวดล้อมใช้งานแขนกลอ่อนตัวหลายข้อต่อ

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

1.3.1 โครงสร้างทางกายภาพของแขนกลอ่อนตัวหลายข้อต่อแบบใช้กลไกของส่วนต่อโยงสามารถนำมาเป็นแนวทางในการออกแบบซอฟต์แวร์เพื่อสร้างแขนกลอ่อนตัวหลายข้อต่อให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3.2 โครงสร้างเครือข่ายการสื่อสารในสภาพแวดล้อมที่มีแขนกลอ่อนตัวยังคงทำให้หุ่นยนต์สามารถสื่อสารกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

มีนักวิจัยหลายท่าน ได้พัฒนาแขนกลรูปแบบต่างๆ ที่ใช้กลไกของส่วนต่อโยง (Linkage mechanism) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแขนกล [12-20]

Hongnian Yu ได้แสดงวิธีการหา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิธีควบคุมการเคลื่อนที่สำหรับแขนกลที่ใช้ที่ใช้กลไกของส่วนต่อโยงห้าชิ้น (Five-bar-linkage mechanism) โดยการควบคุมใช้วิธี computed torque และ sliding mode control [21]

Hongen Liao, Kazuhisa Yoshimura, Tomoki Utsugida, Kiyoshi Matsumiya, Ken Masamune และ Takeyoshi Dohi [22] ได้ร่วมกันวิจัยและออกแบบ แขนกลที่ใช้สำหรับการผ่าตัด โดยใช้กลไกของ ส่วนต่อโยงห้าชิ้น จำนวน 2 ชุด และมีการทำส่วนเชื่อมต่อกับผู้ใช้ (User interface) โดยการออกแบบมุ่งเน้นไปที่ ความปลอดภัย และความสะอาด เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้กับผู้ป่วยได้

F. X. Wu, W. J. Zhang, Q. Li, P. R. Ouyang, และ Z. X. Zhou [23] แสดงวิธีการควบคุม การควบคุม แขนกล ด้วยปัญหาการติดตามแนววิถี (Trajectory Tracking) บนระนาบ และมีจำนวนองศา อิสระ (Degree of Freedom) เท่ากับ 2

แขนกลแบบผสมอย่างทีกล่าวมามีข้อดีคือ มีน้ำหนักน้อยกว่าแขนกลปกติ เพราะตัวขับเคลื่อน (Actuator) ที่เป็นมอเตอร์ ทั้งหมดของระบบอยู่รวมกันที่จุดฐานของแขนกล แล้วใช้การส่งแรงผ่านทางข้อ ต่อ (Joint) และส่วนต่อโยง (Linkage) ในการควบคุมตำแหน่งของการเคลื่อนที่ ทำให้ไม่สิ้นเปลือง พลังงานที่ต้องป้อนให้กับมอเตอร์ของแขนกลมากเกินไป อีกรังยังทำให้ปลายสุดของแขนกล เคลื่อนที่ได้รวดเร็วกว่าแบบเดิม งานวิจัยนี้จะบูรณาการงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นมาเป็นแนวทางในการ ออกแบบและทดลองตามความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์การศึกษาในหัวข้อ 1.2

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในการศึกษาการออกแบบ โครงสร้างทางกายภาพของแขนกลอ่อนตัวนั้น เน้นไปที่การคำนวณหา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ การจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ การจำลองความแข็งแรง ของโครงสร้างหุ่นยนต์ และการทดลองหารูปแบบที่เหมาะสมของการสื่อสารระหว่างสิ่งแวดล้อมที่ ประกอบด้วยระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ การวิจัยนี้ไม่ครอบคลุมถึงหุ่นยนต์ที่ใช้วัสดุแข็งเกร็ง และ การศึกษาเรื่องการส่งสัญญาณระหว่างหุ่นยนต์ในเครือข่ายสื่อสารเป็นการศึกษาเบื้องต้นเพื่อให้ตรวจสอบ สัญญาณการรับส่งระยะไกลเพื่อใช้กับหุ่นยนต์ที่มีแขนกลอ่อนตัวในโครงสร้างน้ำหนักเบา เป็นการศึกษา เชิงการรับส่งสัญญาณเท่านั้น ไม่ครอบคลุมถึงการเข้ารหัส (coding) และโพรโตคอลสื่อสาร (communication protocol)

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.6.1 ทำวรรณกรรมปริทัศน์เพื่อทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.6.2 สร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแขนกลที่นำเสนอ
- 1.6.3 ออกแบบโครงสร้างของกลไกส่วนต่อโยงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแขนกลด้วยวัสดุอ่อนตัว
- 1.6.4 คำนวณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลในข้อ 1.6.3
- 1.6.5 ออกแบบโครงสร้างเครือข่ายการสื่อสาร
- 1.6.6 จำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลดังกล่าวจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- 1.6.7 จำลองความแข็งแรงของโครงสร้างแขนกลอ่อนตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6.8 ทดลองตรวจสอบความสามารถในการรับส่งสัญญาณสื่อสารระหว่างแขนกลที่ทำงานระยะไกล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้แสดงวรรณกรรมปริทัศน์ในส่วนของงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง หัวข้อ 2.1 กล่าวถึงประเภทของแขนกลโดยสังเขปเพื่อแสดงองค์ความรู้พื้นฐานในเชิงโครงสร้างของแขนกล ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้โครงสร้างแขนกลที่กล่าวถึงจะเป็นโครงสร้างแขนแบบขนาน โดยภูมิหลังของแขนกลแบบขนานแสดงในหัวข้อที่ 2.2

2.1 ประเภทของแขนกล

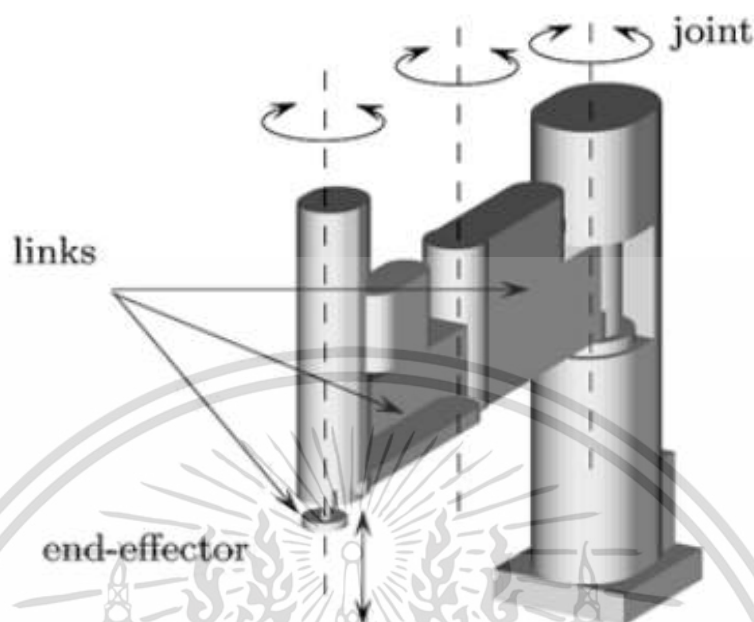
แขนกลที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม สามารถจำแนกตามลักษณะโครงสร้างโดยแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือ

2.1.1 แขนกลแบบอนุกรม

แขนกลแบบอนุกรมนี้เป็นประเภทที่พบในโรงงานอุตสาหกรรมมากที่สุด ลักษณะของแขนกลแบบอนุกรมประกอบด้วยตัวขับเคลื่อนที่ทำหน้าที่ส่งแรงผ่านไปยังส่วนต่อโยงหรือข้อต่อเพื่อให้ส่วนปลายของหุ่นยนต์หรือมือจับ (end effector) เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่กำหนด อาจมีตัวขับเคลื่อนมากกว่าหนึ่งตัวเชื่อมต่อกันในลักษณะอนุกรม เช่น ตัวขับเคลื่อนที่สองอาจอยู่บนส่วนต่อโยงของตัวขับเคลื่อนตัวแรก

ข้อดีของแขนกลประเภทนี้คือมีความยืดหยุ่นสูง สามารถนำมาประยุกต์ใช้ตามความต้องการของอุตสาหกรรมได้ง่าย เช่น ใช้เป็นแขนกลสำหรับเชื่อมโลหะ ใช้เป็นแขนกลสำหรับประกอบชิ้นส่วน เป็นต้น ส่วนข้อเสียของแขนกลแบบอนุกรมคือ ความเร็ว เพราะในแต่ละส่วนต่อโยงจะมีโครงสร้างที่ใหญ่และมีน้ำหนักมากเพื่อรองรับ ตัวขับเคลื่อนอีกตัว ทำให้การเคลื่อนที่ส่วนปลายของแขนกล ทำได้ช้า

ตัวอย่างของแขนกลแบบอนุกรมเป็นไปตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แขนกลแบบอนุกรม [24]

2.1.2 แขนกลแบบขนาน

แขนกลแบบขนาน เป็นอีกหนึ่งประเภทของแขนกลที่เหมาะสมสำหรับงานเฉพาะทางเช่นการหยิบและวางวัตถุ เป็นแขนกลที่ใช้กลไกของส่วนต่อโยงทำหน้าที่ส่งแรงจากตัวขับเคลื่อนไปยังส่วนปลายของแขนกล โดยส่วนมากตัวขับเคลื่อนจะอยู่รวมกันที่ฐานของหุ่นยนต์

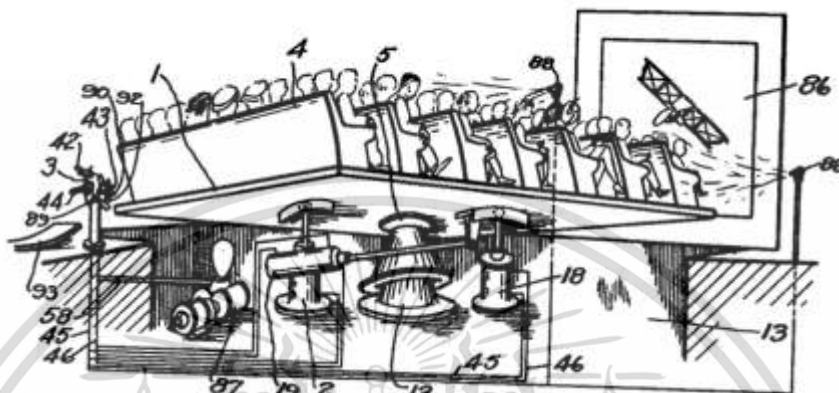
ข้อดีของแขนกลแบบขนานคือ ส่วนปลายของแขนกลสามารถเคลื่อนที่ได้เร็ว เพราะกลไกมีน้ำหนักเบา ส่วนข้อเสียของแขนกลแบบขนานคือ ความไม่ยืดหยุ่นในการใช้งาน และเหมาะกับงานเฉพาะทาง

2.2 ภูมิหลังของแขนกลแบบขนาน

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์แบบขนาน ดังนั้นในหัวข้อนี้เป็นการกล่าวถึงภูมิหลังหรือที่มาหรือจุดเริ่มต้นของ หุ่นยนต์แบบขนาน โดยในที่นี้จะเน้นโครงสร้างที่มีการเชื่อมโยงอิสระ (element) ทำขึ้นเข้าด้วยกัน โดยจากประวัติของงานวิจัยทางด้านกลไกแบบขนานที่มีรูปแบบโครงสร้างคล้ายกับแขนกลที่นำเสนอนี้คิดค้นโดยนักเรขาคณิตชาวอังกฤษ และชาวฝรั่งเศสมานานหลายร้อยปีแล้ว [24] แต่อย่างไรก็ตาม หุ่นยนต์แบบขนานที่สามารถใช้ได้จริงเป็นครั้งแรกประดิษฐ์โดย James E. Gwinnett จากสหรัฐอเมริกา ผลงานของเขาได้รับสิทธิบัตร (Patent) ในปี ค.ศ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1928 (พ.ศ. 2471) [25] โดยสิ่งประดิษฐ์ของเขาชื่อแพลตฟอร์ม (Platform) ที่ใช้สำหรับเคลื่อนเบาะนั่งของผู้ชมในโรงภาพยนตร์ แบบการเคลื่อนที่เป็นทรงกลมที่องศาอิสระเท่ากับ 3 สิ่งประดิษฐ์ของ James E. Gwinnett แสดงในรูปที่ 2.2 และถือว่าเป็นหุ่นยนต์แบบขนานเครื่องแรกเท่าที่มีการบันทึกไว้



รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์แบบขนานตัวแรก [25]

ในปี ค.ศ. 1942 (พ.ศ. 2485) มีผู้คิดค้นหุ่นยนต์แบบขนานแบบใหม่ออกมาอีก โดยผลงานนี้เป็นของ Willard L. V. Pollard [26] คือ หุ่นยนต์สำหรับพ่นสีสเปรย์แบบอัตโนมัติ ที่มีแขนกลแบบขนานสามชุด มีองศาอิสระเท่ากับ 5 แสดงในรูปที่ 2.3

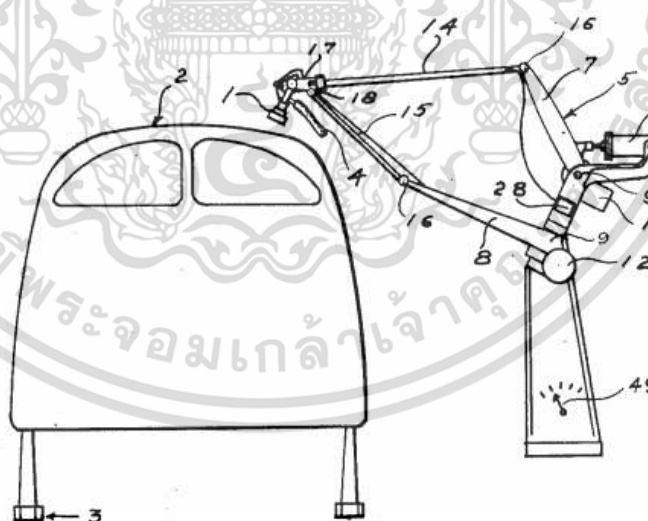


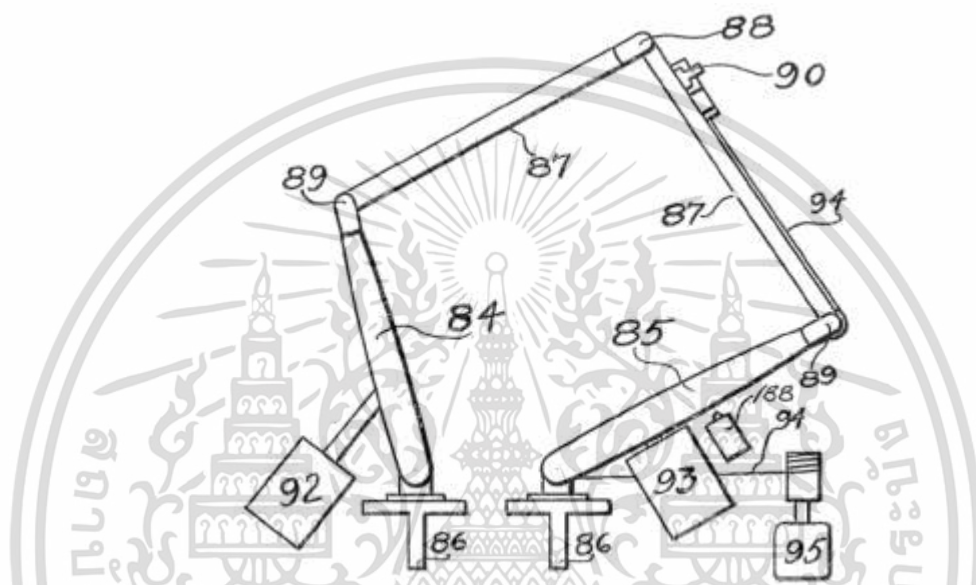
Fig. 2

INVENTOR
Willard L. V. Pollard
BY
Amos, Thies, Olson and Mackelburg
ATTORNEYS

รูปที่ 2.3 หุ่นยนต์แบบขนานของ Willard L. V. Pollard [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

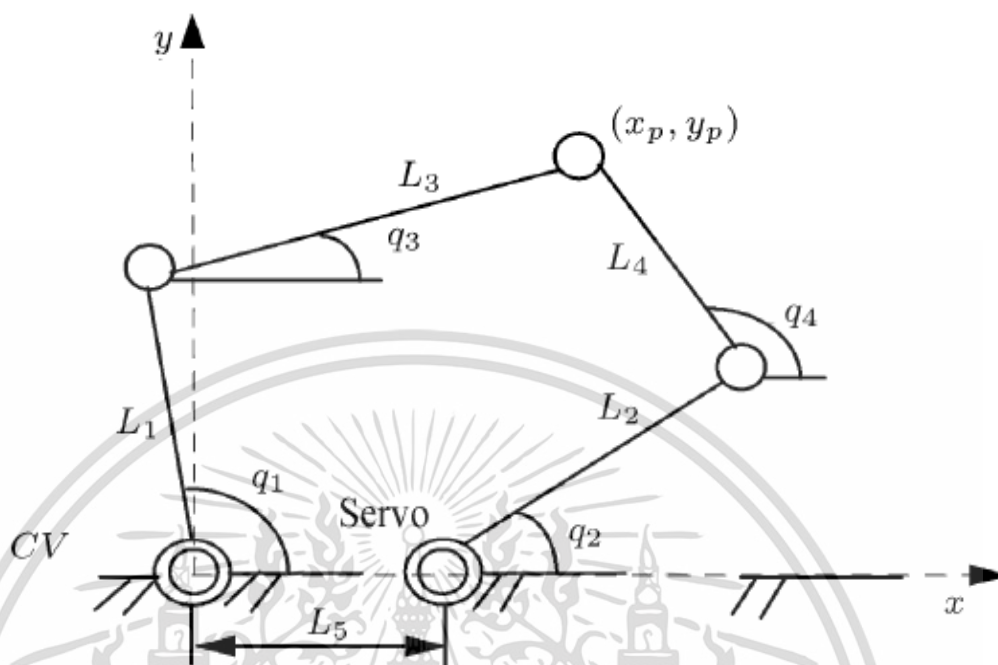
ก่อนหน้านั้นในปี ค.ศ. 1934 (พ.ศ. 2477) Willard L. G. Pollard Jr. ซึ่งเป็นลูกชายของ Willard L. V. Pollard ได้จดสิทธิบัตรของหุ่นยนต์สำหรับพ่นสีเช่นกัน [27] แต่สิ่งประดิษฐ์ของ Pollard Jr. ประกอบไปด้วยตัวแขนกล และระบบควบคุมของแขนกล โดยระบบควบคุมนั้นใช้แผ่นฟิล์มที่เจาะรูเป็นหลัก ส่วนโครงสร้างของแขนกลใช้ กลไกของส่วนต่อโยงทำขึ้นในการควบคุมส่วนปลายของแขน รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของแขนกลของ Willard L. G. Pollard Jr.



รูปที่ 2.4 แขนกลของ Willard L. G. Pollard Jr. [27]

หลังจากนั้น Pollard Jr. ได้มอบลิขสิทธิ์สิ่งประดิษฐ์ชิ้นนี้ให้กับบริษัท DeVilbiss ในปี ค.ศ. 1937 (พ.ศ. 2480) หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1941 (พ.ศ. 2484) บริษัท DeVilbiss ผู้ผลิตหุ่นยนต์ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ก็ได้สร้างต้นแบบของ หุ่นยนต์สำหรับพ่นสีสเปรย์ [28]

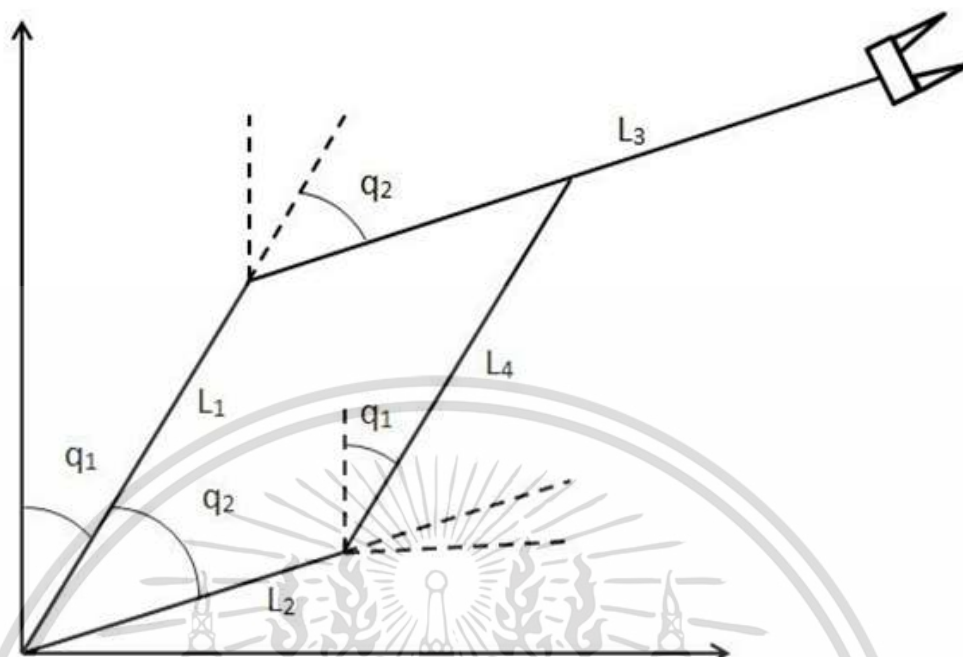
ด้วยเทคโนโลยีและวิทยาการต่างๆ ที่ก้าวหน้ามากขึ้นทำให้ การควบคุมของแขนกลที่ใช้กลไกของส่วนต่อโยงทำขึ้นมีการพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง และในปี ค.ศ. 2006 (พ.ศ. 2549) Hongnian Yu ได้แสดงวิธีการหา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิธีควบคุมการเคลื่อนที่ สำหรับแขนกลที่ใช้ที่ใช้กลไกของส่วนต่อโยงทำขึ้นตามโครงสร้าง ในรูปที่ 2.5 โดยการควบคุมใช้วิธีคำนวณแรงบิด (computed torque) และใช้การควบคุมแบบโหมดสไลด์ (sliding mode control) [21]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างแขนกลของ Hongnian Yu [21]

โครงสร้างของกลไกตามรูปที่ 2.5 ประกอบไปด้วย ส่วนต่อโยง ทั้งหมด 5 ชิ้น ที่ทำงานสัมพันธ์กัน โดยมีตัวขับเคลื่อนเป็นมอเตอร์สองชนิดคือ ชนิดที่มีความเร็วคงที่ (Constant velocity) และแบบเซอร์โว (Servo motor) สร้างเพื่อทดสอบการเคลื่อนที่เป็นกรณีศึกษาในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทั้งทางจลศาสตร์ (Kinetics) และพลศาสตร์ (Dynamics) เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการควบคุมการทำงานของแขนกล

งานวิจัยนี้ดัดแปลงโครงสร้างที่นำเสนอโดย Hongnian Yu [21] โดยจะใช้แนวทางปรับปรุงแขนกลอ่อนตัวที่ใช้กลไกของส่วนต่อโยง 5 ชิ้นให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในเชิงน้ำหนัก และการรับภาระในการคำนวณการเคลื่อนที่ของซอฟต์แวร์ ด้วยการย้ายมอเตอร์ทั้งสองตัวมาอยู่ในตำแหน่งเดียวกันตามระนาบ และปรับระยะของส่วนต่อโยงให้มีความสัมพันธ์กัน ตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แขนกลที่ใช้กลไกของส่วนต่อต่อโยง 5 ชั้นในงานวิจัย

นอกจากการพัฒนาโครงสร้างของแขนกลให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในเชิงน้ำหนัก และการรับภาระในการคำนวณการเคลื่อนที่ของซอฟต์แวร์แล้ว การสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์ก็เป็นประเด็นที่งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญ เพราะนอกจากการทำงานให้ได้ตรงตามจุดประสงค์แล้ว การสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์ระยะไกล จะทำให้สามารถพัฒนาประสิทธิภาพการทำงานและการประยุกต์ใช้แขนกลให้มากขึ้นกว่าเดิม ได้มีนักวิจัยหลายท่านเพิ่มการสื่อสารให้กับหุ่นยนต์ [29-39] ด้วย อินเทอร์เน็ต (Internet) , สัญญาณไวไฟ (WIFI), การสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ (ad-hoc network) และ การสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless communication)

ในบทถัดไปเป็นการอธิบายถึงระเบียบวิธีวิจัยและการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแขนกลในรูปที่ 2.6 เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงในการสร้างแขนกลด้วยวัสดุเบา

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัยและแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

บทนี้กล่าวถึงระเบียบวิธีวิจัยของการสร้างแขนกลอ่อนตัวตามโครงสร้างจากรูปที่ 3.1 แสดงแสดงวิธีการคำนวณหาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแขนกลอ่อนตัว เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการสร้างซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ และการสร้างแขนกลอ่อนตัวด้วยวัสดุน้ำหนักเบา

3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

จากการแสดงวรรณกรรมปริทัศน์ในบทที่ 2 ซึ่งเริ่มต้นจากการสร้างแขนกลแบบขนานที่มีข้อดีในด้านความแข็งแรงของโครงสร้าง และแขนกลอ่อนตัวที่มีข้อดีคือน้ำหนักเบา งานวิจัยนี้จึงได้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบแขนกล ที่ผสมผสานระหว่าง แขนกลแบบขนาน และแขนกลอ่อนตัวเข้าด้วยกัน โดยวิธีดำเนินการวิจัยเป็นไปตามหัวข้อต่อไปนี้

3.1.1 สร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแขนกล

ในการสร้างแขนกลไม่ว่าจะเป็นชนิดใดก็ตาม แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ถือว่าเป็นส่วนสำคัญ เพราะช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์หา แบบจำลองทางจลศาสตร์ แบบจำลองทางพลศาสตร์ อันมีประโยชน์ในการสร้างซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุมแขนกล ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด และลดภาระการคำนวณของเฟิร์มแวร์ (firmware) ในการพัฒนาระบบสมองกลฝังตัว (embedded system) สำหรับหุ่นยนต์

3.1.2 การเลือกวัสดุ การออกแบบแขนกล และการสร้างแขนกล

เมื่อได้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มาแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการเลือกใช้วัสดุให้สอดคล้องกับแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์นั้น ทั้งในด้านน้ำหนักของวัสดุ ความแข็งแรงของวัสดุและความสามารถในการรับแรงต่างๆของวัสดุ หลังจากนั้นเป็นการออกแบบแขนกลอ่อนตัวด้วยวัสดุที่เลือก โดยควบคุมตัวแปรต่างๆตามแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้คำนวณมา

3.1.3 การออกแบบโครงสร้างเครือข่ายการสื่อสารของแขนกล

เนื่องจากต้องการเพิ่มความสามารถให้กับแขนกล ในด้านการสื่อสาร ให้แขนกลสามารถส่งข้อมูลต่างๆผ่านทางเครือข่ายสื่อสารแบบไร้สาร รวมไปถึงการที่ผู้ใช้สามารถควบคุมและเฝ้าดูแขนกลจากระยะไกลได้ ในหัวข้อนี้จึงเป็นการทดลองหาความสามารถในการสื่อสารของแขนกลตามโครงสร้างการสื่อสารรูปแบบต่างๆ

3.1.4 การแสดงผลการเปรียบเทียบการทำงานของแขนกล

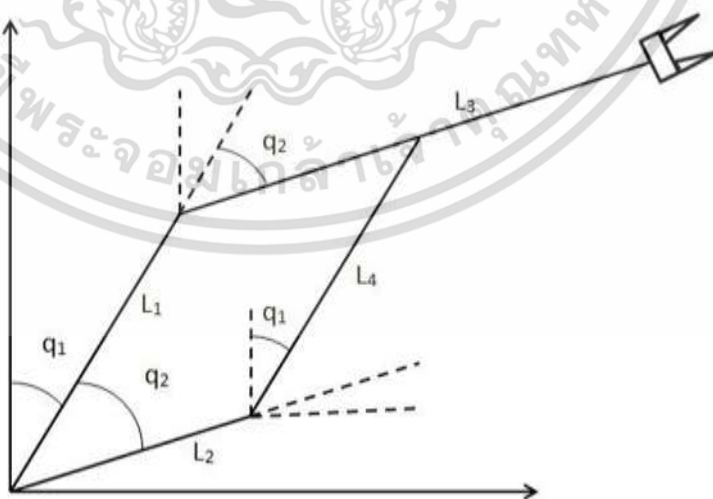
วิธีการวัดประสิทธิภาพการทำงานของแขนกลในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่ด้านของประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้า (Power Consumption) ของแขนกล และการลดต้นทุนรวม ทั้งส่วนที่เป็นค่าใช้จ่ายตายตัว (fixed cost) ซึ่งก็คือฮาร์ดแวร์ต่าง ๆ และค่าใช้จ่ายผันแปรในการดำเนินงาน (variable operation cost) และสัดส่วนการรับภาระที่ส่วนปลายต่อน้ำหนักของแขนกล ซึ่งเปรียบเทียบกับแขนกลที่มีลักษณะใกล้เคียงกันคือ แขนกลแบบดั้งเดิมที่มีโครงสร้างที่ทำมาจากวัสดุหนักเช่น เหล็ก ที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม

3.1.5 ผลการทดลองหาความสามารถในการสื่อสาร

หัวข้อนี้แสดงผลการทดลองหาความสามารถในการสื่อสารในรูปแบบที่กำหนด ผลการทดลองจะบันทึกระยะเวลาในการสื่อสารและ ระยะเวลาในการสื่อสาร เพื่อตรวจสอบคำสั่งตอบสนองในเบื้องต้น ซึ่งต้องการรับส่งชุดคำสั่งการทำงานที่ใช้ความจุช่องสัญญาณ (bandwidth) ในการสื่อสารและควบคุมขนาดไม่มากนัก การทดลองนี้เป็นเพียงตรวจสอบการรับส่งสัญญาณว่าเบื้องต้นสำหรับหุ่นยนต์ที่ได้ออกแบบและสร้างจริง แต่ไม่ได้มุ่งเน้นการสร้างโปรโตคอลและการเข้ารหัสคำสั่งในงานวิจัยนี้

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล

ในบทนี้กล่าวถึงการคำนวณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งใช้กลไกของส่วนต่อต่อโยง 5 ชิ้น ตามรูปที่ 3.1 โดยรูปแบบของกลไกนี้มีตัวขับเคลื่อนที่เป็นมอเตอร์กระแสตรงอยู่ที่ฐาน ส่งแรงไปยังส่วนต่อต่อโยงต่างๆ เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่



รูปที่ 3.1 โครงสร้างแขนกลที่ใช้กลไกของส่วนต่อต่อโยง 5 ชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปแขนกลที่ใช้กลไกของส่วนต่อโยง 5 ชั้น กำหนดให้

q_i คือ มุมของมอเตอร์ที่กระทำกับส่วนต่อโยง โดยที่ $i=1,2$

L_i คือ ความยาวของแต่ละส่วนต่อโยง โดยที่ $i=1,2,3,4$

L_{ci} คือ ระยะจากจุดปลายจนถึงจุดศูนย์กลางมวลของส่วนต่อโยงแต่ละชั้น โดยที่ $i=1,2,3,4$

วงปิดที่เกิดขึ้นในกลไกเป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านขนาน โดยที่ $L_1 = L_4$ ด้วยคุณสมบัติต่างๆของสี่เหลี่ยมด้านขนานทำให้สามารถอ้างอิงมุมของข้อต่อต่างได้ตามรูปที่ 3.1

3.2.1 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ (Kinematics Models)

เป็นการหาตำแหน่งที่เป็นพิกัดตามแนวแกนในระนาบ 2 มิติ เมื่อรู้มุมของตัวขับเคลื่อน (actuator) ที่เป็นมอเตอร์ โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$\begin{bmatrix} x_E \\ y_E \end{bmatrix} = \varphi(q_1, q_2) \quad (3.1)$$

โดยที่ $\varphi: R^2 \rightarrow R^2$

x_E คือ ระยะที่ปลายสุดของแขนกล ตามแนวแกน x

y_E คือ ระยะที่ปลายสุดของแขนกล ตามแนวแกน y

ดังนั้นสมการแสดงตำแหน่งที่ปลายสุดของแขนกลคือ

$$x_E = L_1 S_1 + L_3 S_{1+2} \quad (3.2)$$

$$y_E = L_1 C_1 + L_3 C_{1+2} \quad (3.3)$$

โดยที่

$$S_i = \sin(q_i)$$

$$C_i = \cos(q_i)$$

$$i=1,2$$

จากสมการ (3.2) และ สมการ (3.2) นำมาหาอนุพันธ์เทียบกับเวลา เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ปลายสุดของแขนกล กับ ความเร็วเชิงมุมที่ตัวขับเคลื่อนทั้ง 2 ตัวกระทำกับกลไกของแขนกล

$$\dot{x}_E = (L_1 C_1 + L_3 C_{1+2})\dot{q}_1 + L_3 C_{1+2}\dot{q}_2 \quad (3.4)$$

$$\dot{y}_E = (-L_1 S_1 - L_3 S_{1+2})\dot{q}_1 - L_3 S_{1+2}\dot{q}_2 \quad (3.5)$$

เขียนสมการ (3.4) และ สมการ (3.5) ให้อยู่ในรูปเมทริก (Matrix) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของความเร็วที่จุดปลายสุดของแขนกล

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_E \\ \dot{y}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 C_1 + L_3 C_{1+2} & L_3 C_{1+2} \\ -L_1 S_1 - L_3 S_{1+2} & -L_3 S_{1+2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

หรือ เขียนสมการ (3.6) เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_E \\ \dot{y}_E \end{bmatrix} = J(q) \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

โดยที่

$$J(q) = \begin{bmatrix} L_1 C_1 + L_3 C_{1+2} & L_3 C_{1+2} \\ -L_1 S_1 - L_3 S_{1+2} & -L_3 S_{1+2} \end{bmatrix}$$

$J(q)$ นั้นเรียกว่า จาโคเบียนเมทริก (Jacobian Matrix) หรือ จาโคเบียน (Jacobian) ของแขนกล จากสมการ (3.7) เมื่อหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาอีกครั้ง ทำให้ได้ความสัมพันธ์ในรูปของความเร่งที่ตำแหน่งปลายสุดของแขนกล

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_E \\ \ddot{y}_E \end{bmatrix} = \left[\frac{d}{dt} J(q) \right] \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + J(q) \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

โดยที่

$$\frac{d}{dt} J(q) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial J(q)}{\partial q_i} \dot{q}_i$$

3.2.2 จลศาสตร์ผกผัน (Inverse Kinematic)

ในหัวข้อที่แล้วเป็นการกล่าวถึงการหาดำแหน่งที่ส่วนปลายสุดของแขนกล เมื่อตัวขับเคลื่อนที่ด้วยมุมต่าง แต่ในหัวข้อนี้เป็นการหามุมที่ตัวขับเคลื่อนจะต้องเคลื่อนที่ไป เมื่อมีพิกัดของปลายสุดของแขนกล จึงเรียกว่า จลศาสตร์ผกผัน ในการคำนวณหาสมการเกี่ยวกับจลศาสตร์ผกผันนั้น สมการจะอยู่ในรูป

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \varphi^{-1}(x_E, y_E) \quad (3.9)$$

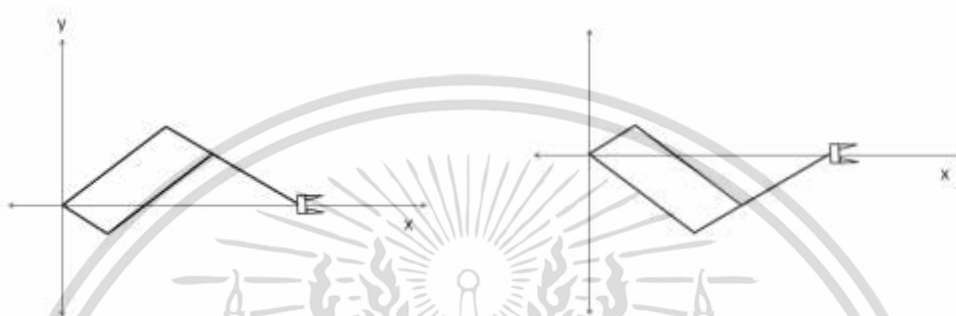
โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\varphi^{-1} : \Theta \rightarrow R^2$$

$$\text{และ } \Theta \subseteq R^2$$

แต่ทุกปัญหาในการหาค่ามุมที่มอเตอร์ต้องกระทำ เพื่อให้ปลายสุดของแขนกลเคลื่อนที่ไปยังที่กำหนด มีคำตอบที่ได้ 2 คำตอบดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 คำตอบที่เป็นไปได้สองคำตอบสำหรับปัญหาจลศาสตร์ผกผัน

สามารถเริ่มต้นหาสมการจลศาสตร์ผกผันได้จากการยกกำลังสองทั้งสองข้างของสมการ (3.2) และสมการ (3.3) ตามลำดับ

$$x_E^2 = L_1^2 S_1^2 + L_3^2 S_{1+2}^2 + 2L_1 L_3 S_1 S_{1+2} \quad (3.10)$$

$$y_E^2 = L_1^2 C_1^2 + L_3^2 C_{1+2}^2 + 2L_1 L_3 C_1 C_{1+2} \quad (3.11)$$

บวกสมการ (3.10) กับ สมการ (3.11) เข้าด้วยกัน

$$x_E^2 + y_E^2 = L_1^2 + L_3^2 + 2L_1 L_3 C_2$$

$$C_2 = \frac{x_E^2 + y_E^2 - L_1^2 - L_3^2}{2L_1 L_3} \quad (3.12)$$

จากเอกลักษณ์ตรีโกณมิติ $S_2^2 + C_2^2 = 1$

$$S_2 = \pm \sqrt{1 - C_2^2} \quad (3.13)$$

ดังนั้น เมื่อแทนค่าสมการ (3.12) ลงใน สมการ (3.13) จึงได้ว่า

$$S_2 = \pm \sqrt{1 - \left(\frac{x_E^2 + y_E^2 - L_1^2 - L_3^2}{2L_1 L_3} \right)^2} \quad (3.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายได้ 2 คำตอบที่เป็นไปได้ของ q_2 ดังนี้

$$q_2 = \tan^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{x_E^2 + y_E^2 - L_1^2 - L_3^2}{2L_1L_3} \right)^2} / \frac{x_E^2 + y_E^2 - L_1^2 - L_3^2}{2L_1L_3} \right)$$

$$q_2 = \tan^{-1} \left(-\sqrt{1 - \left(\frac{x_E^2 + y_E^2 - L_1^2 - L_3^2}{2L_1L_3} \right)^2} / \frac{x_E^2 + y_E^2 - L_1^2 - L_3^2}{2L_1L_3} \right) \quad (3.15)$$

จากเอกลักษณ์ตรีโกณมิติ $C_{1+2} = C_1C_2 - S_1S_2$ และ $S_{1+2} = S_1C_2 + S_2C_1$ ทำให้เขียนสมการ (3.2) และสมการ (3.3) ตามลำดับ ได้เป็น

$$x_E = L_1S_1 + L_3S_1C_2 + L_3S_2C_1 \quad (3.16)$$

$$y_E = L_1C_1 + L_3C_1C_2 - L_3S_1S_2 \quad (3.17)$$

คูณสมการ (3.16) ด้วย C_1 และคูณสมการ (3.17) ด้วย S_1

$$x_E C_1 = L_1S_1C_1 + L_3S_1C_1C_2 + L_3S_2C_1^2 \quad (3.18)$$

$$y_E S_1 = L_1S_1C_1 + L_3S_1C_1C_2 - L_3S_1^2S_2 \quad (3.19)$$

ลบ สมการ (3.18) ด้วยสมการ (3.19)

$$x_E C_1 - y_E S_1 = L_3S_2 \quad (3.20)$$

คูณสมการ (3.16) ด้วย S_1 และคูณสมการ (3.17) ด้วย C_1

$$x_E S_1 = L_1S_1^2 + L_3S_1^2C_2 + L_3S_1S_2C_1 \quad (3.21)$$

$$y_E C_1 = L_1C_1^2 + L_3C_1^2C_2 - L_3S_1S_2C_1 \quad (3.22)$$

บวก สมการ (3.21) ด้วยสมการ (3.22)

$$x_E S_1 + y_E C_1 = L_1 + L_3C_2 \quad (3.23)$$

คูณสมการ (3.20) ด้วย y_E และคูณสมการ (3.23) ด้วย x_E

$$x_E y_E C_1 - y_E^2 S_1 = y_E L_3 S_2 \quad (3.24)$$

$$x_E^2 S_1 + x_E y_E C_1 = x_E (L_1 + L_3 C_2) \quad (3.25)$$

ลบ สมการ (3.25) ด้วยสมการ (3.24)

$$\begin{aligned} x_E^2 S_1 + y_E^2 S_1 &= x_E(L_1 + L_3 C_2) - y_E L_3 S_2 \\ S_1 &= \frac{x_E(L_1 + L_3 C_2) - y_E L_3 S_2}{x_E^2 + y_E^2} \end{aligned} \quad (3.26)$$

ในทำนองเดียวกันกับสมการ (3.14)

$$C_1 = \pm \sqrt{1 - \left(\frac{x_E(L_1 + L_3 C_2) - y_E L_3 S_2}{x_E^2 + y_E^2} \right)^2} \quad (3.27)$$

สุดท้ายได้ 2 คำตอบที่เป็นไปได้ของ q_1 ดังนี้

$$\begin{aligned} q_1 &= \tan^{-1} \left(-\frac{x_E(L_1 + L_3 C_2) - y_E L_3 S_2}{x_E^2 + y_E^2} / \sqrt{1 - \left(\frac{x_E(L_1 + L_3 C_2) - y_E L_3 S_2}{x_E^2 + y_E^2} \right)^2} \right) \\ q_1 &= \tan^{-1} \left(\frac{x_E(L_1 + L_3 C_2) - y_E L_3 S_2}{x_E^2 + y_E^2} / \sqrt{1 - \left(\frac{x_E(L_1 + L_3 C_2) - y_E L_3 S_2}{x_E^2 + y_E^2} \right)^2} \right) \end{aligned} \quad (3.28)$$

เขียนสมการสำหรับหามุมของมอเตอร์ เมื่อรู้ตำแหน่งที่ปลายสุดของแขนกลที่ต้องการ ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \varphi^{-1}(x_d, y_d) \quad (3.29)$$

โดยที่

x_d คือ ระยะปลายสุดของแขนกลที่ต้องการ ตามแนวแกน x

y_d คือ ระยะปลายสุดของแขนกลที่ต้องการ ตามแนวแกน y

$$\begin{aligned} q_1 &= \tan^{-1} \left(-\frac{x_E(L_1 + L_3 C_2) - y_E L_3 S_2}{x_E^2 + y_E^2} / \sqrt{1 - \left(\frac{x_E(L_1 + L_3 C_2) - y_E L_3 S_2}{x_E^2 + y_E^2} \right)^2} \right) \\ q_1 &= \tan^{-1} \left(\frac{x_E(L_1 + L_3 C_2) - y_E L_3 S_2}{x_E^2 + y_E^2} / \sqrt{1 - \left(\frac{x_E(L_1 + L_3 C_2) - y_E L_3 S_2}{x_E^2 + y_E^2} \right)^2} \right) \end{aligned}$$

$$q_2 = \tan^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{x_E^2 + y_E^2 - L_1^2 - L_3^2}{2L_1L_3} \right)^2} / \frac{x_E^2 + y_E^2 - L_1^2 - L_3^2}{2L_1L_3} \right)$$

$$q_2 = \tan^{-1} \left(-\sqrt{1 - \left(\frac{x_E^2 + y_E^2 - L_1^2 - L_3^2}{2L_1L_3} \right)^2} / \frac{x_E^2 + y_E^2 - L_1^2 - L_3^2}{2L_1L_3} \right)$$

เขียนสมการหาความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ เมื่อรู้ความเร็วที่ปลายสุดของแขนกล ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = J^{-1}(q) \begin{bmatrix} \dot{x}_d \\ \dot{y}_d \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

เขียนสมการหาความเร่งเชิงมุมของมอเตอร์ เมื่อรู้ความเร่งที่ปลายสุดของแขนกล ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} [J^{-1}(q)] + J^{-1}(q) \begin{bmatrix} \ddot{x}_d \\ \ddot{y}_d \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

3.2.3 แบบจำลองทางพลศาสตร์ (Dynamics Models)

ในหัวข้อนี้ เป็นการหาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของแขนกล เมื่อมีแรงจากมอเตอร์มาเกี่ยวข้อง กับระบบกลไก การคำนวณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกลไก ใช้สมการของลากราง (Lagrangian Equation) ในการหาสมการการเคลื่อนที่ในระบบกลไก

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad (3.32)$$

โดยที่ $L = K - P$ สมการนี้รู้จักกันในชื่อของสมการของลากราง ซึ่ง K หมายถึงพลังงานจลน์ ของแต่ละชิ้นส่วนต่อโยงในระบบ P หมายถึงพลังงานศักย์ของแต่ละชิ้นส่วนต่อโยงในระบบ จากแขนกล ในรูปที่ 3.1 พลังงานจลน์ของรวมของระบบคือ

$$K(q, \dot{q}) = K_1(q, \dot{q}) + K_2(q, \dot{q}) + K_3(q, \dot{q}) + K_4(q, \dot{q}) \quad (3.33)$$

โดยที่

$K_1(q, \dot{q})$ คือ พลังงานจลน์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 1

$K_2(q, \dot{q})$ คือ พลังงานจลน์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 2

$K_3(q, \dot{q})$ คือ พลังงานจลน์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 3

$K_4(q, \dot{q})$ คือ พลังงานจลน์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.1 พลังงานจลน์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 1

โดยพลังงานจลน์รวมนั้นหาได้จาก พลังงานจลน์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ และพลังงานจลน์ที่เกิดจากการหมุน

$$K_1(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} I_1 \dot{q}_1^2 \quad (3.34)$$

โดยที่

m_i คือ มวลของส่วนต่อโยงแต่ละชิ้น

x_i คือ ระยะจุดศูนย์กลางมวลของส่วนต่อโยงแต่ละชิ้น ตามแนวแกน x

y_i คือ ระยะจุดศูนย์กลางมวลของส่วนต่อโยงแต่ละชิ้น ตามแนวแกน y

I_i คือ ความเฉื่อยของส่วนต่อโยงแต่ละชิ้น

จากแผนกลในรูปที่ 2.1 พิจารณาที่ส่วนต่อโยงชิ้นที่ 1

$$x_1 = L_{c1} S_1$$

$$y_1 = L_{c1} C_1$$

หาอนุพันธ์เทียบกับเวลาของทั้งสองสมการ

$$\dot{x}_1 = L_{c1} C_1 \dot{q}_1$$

$$\dot{y}_1 = -L_{c1} S_1 \dot{q}_1$$

ยกกำลังสองทั้งสองข้างของสมการ

$$\dot{x}_1^2 = L_{c1}^2 C_1^2 \dot{q}_1^2$$

$$\dot{y}_1^2 = L_{c1}^2 S_1^2 \dot{q}_1^2$$

หาค่าของ $\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2$ และแทนลงใน สมการ (2.35) ได้เป็นพลังงานจลน์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 1 ของแผนกล

$$K_1(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m_1 L_{c1}^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{q}_1^2 \quad (3.35)$$

3.2.3.2 พลังงานจลน์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 2

โดยพลังงานจลน์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 2 นั้นหาได้จาก พลังงานจลน์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ และ พลังงานจลน์ที่เกิดจากการหมุน

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} I_2 (q_1 + q_2)^2 \quad (3.36)$$

จากแผนกลในรูปที่ 2.1 พิจารณาที่ส่วนต่อโยงชิ้นที่ 2

$$x_2 = L_{c2} S_{1+2}$$

$$y_2 = L_{c2} C_{1+2}$$

หาอนุพันธ์เทียบกับเวลาของทั้งสองสมการ

$$\dot{x}_2 = L_{c2} C_{1+2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)$$

$$\dot{y}_2 = -L_{c2} S_{1+2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)$$

ยกกำลังสองทั้งสองข้างของสมการ

$$\dot{x}_2^2 = L_{c2}^2 C_{1+2}^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2)$$

$$\dot{y}_2^2 = L_{c2}^2 S_{1+2}^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2)$$

หาค่าของ $\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2$ และแทนลงใน สมการ (3.36) ได้เป็นพลังงานจลน์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 2 ของแผนกล

$$K_2(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m_2 L_{c2}^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) + \frac{1}{2} I_2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \quad (3.37)$$

3.2.3.3 พลังงานจลน์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 3

โดยพลังงานจลน์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 3 นั้นหาได้จาก พลังงานจลน์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ และ พลังงานจลน์ที่เกิดจากการหมุน

$$K_3 = \frac{1}{2} m_3 (\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) + \frac{1}{2} I_3 (q_1 + q_2)^2 \quad (3.38)$$

จากแผนกลในรูปที่ 3.1 พิจารณาที่ส่วนต่อโยงชิ้นที่ 3

$$x_3 = L_1 S_1 + L_{c3} S_{1+2}$$

$$y_3 = L_1 C_1 + L_{c3} C_{1+2}$$

หาอนุพันธ์เทียบกับเวลาของทั้งสองสมการ

$$\dot{x}_3 = L_1 C_1 \dot{q}_1 + L_{c3} C_{1+2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)$$

$$\dot{y}_3 = -L_1 S_1 \dot{q}_1 - L_{c3} S_{1+2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยกกำลังสองทั้งสองข้างของสมการ

$$\begin{aligned}\dot{x}_3^2 &= L_1^2 C_1^2 \dot{q}_1^2 + L_{c3}^2 C_{1+2}^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) + 2L_1 L_{c3} C_1 C_{1+2} (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \\ \dot{y}_3^2 &= L_1^2 S_1^2 \dot{q}_1^2 + L_{c3}^2 S_{1+2}^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) + 2L_1 L_{c3} S_1 S_{1+2} (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2)\end{aligned}$$

หาค่าของ $\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2$ และแทนลงใน สมการ (2.38) ได้เป็นพลังงานจลน์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 3 ของแขนกล

$$\begin{aligned}K_3(q, \dot{q}) &= \frac{1}{2} m_3 L_1^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_3 L_{c3}^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) + m_3 L_1 L_{c3} C_2 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \\ &\quad + \frac{1}{2} I_3 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2)\end{aligned}\quad (3.39)$$

3.2.3.4 พลังงานจลน์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 4

โดยพลังงานจลน์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 4 นั้นหาได้จาก พลังงานจลน์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ และ พลังงานจลน์ที่เกิดจากการหมุน

$$K_4(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m_4 (\dot{x}_4^2 + \dot{y}_4^2) + \frac{1}{2} I_4 \dot{q}_1^2 \quad (3.40)$$

จากแขนกลในรูปที่ 3.1 พิจารณาที่ส่วนต่อโยงชิ้นที่ 4

$$\begin{aligned}x_4 &= L_2 S_{1+2} + L_{c4} S_1 \\ y_4 &= L_2 C_{1+2} + L_{c4} C_1\end{aligned}$$

หาอนุพันธ์เทียบกับเวลาของทั้งสองสมการ

$$\begin{aligned}\dot{x}_4 &= L_2 C_{1+2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + L_{c4} C_1 \dot{q}_1 \\ \dot{y}_4 &= -L_2 S_{1+2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) - L_{c4} S_1 \dot{q}_1\end{aligned}$$

ยกกำลังสองทั้งสองข้างของสมการ

$$\begin{aligned}\dot{x}_4^2 &= L_2^2 C_{1+2}^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) + L_{c4}^2 C_1^2 \dot{q}_1^2 + 2L_2 L_{c4} C_1 C_{1+2} (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \\ \dot{y}_4^2 &= L_2^2 S_{1+2}^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) + L_{c4}^2 S_1^2 \dot{q}_1^2 + 2L_2 L_{c4} S_1 S_{1+2} (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2)\end{aligned}$$

หาค่าของ $\dot{x}_4^2 + \dot{y}_4^2$ และแทนลงใน สมการ (2.40) ได้เป็นพลังงานจลน์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 4 ของแขนกล

$$K_4(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} m_4 L_2^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) + \frac{1}{2} m_4 L_{c4}^2 \dot{q}_1^2 + m_4 L_2 L_{c4} C_2 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) + \frac{1}{2} I_4 \dot{q}_1^2 \quad (3.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นพลังงานจลน์รวมของทั้ง 4 ส่วนต่อโยงมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 K(q, \dot{q}) &= \frac{1}{2} m_1 L_{c1}^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 L_{c2}^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) + \frac{1}{2} I_2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \\
 &+ \frac{1}{2} m_3 L_{c3}^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_3 L_{c3}^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) + m_3 L_1 L_{c3} C_2 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) + \frac{1}{2} I_3 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \\
 &+ \frac{1}{2} m_4 L_{c4}^2 (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) + \frac{1}{2} m_4 L_{c4}^2 \dot{q}_1^2 + m_4 L_2 L_{c4} C_2 (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) + \frac{1}{2} I_4 \dot{q}_1^2
 \end{aligned}$$

จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\begin{aligned}
 K(q, \dot{q}) &= \left(\frac{1}{2} m_1 L_{c1}^2 + \frac{1}{2} m_3 L_{c1}^2 + \frac{1}{2} m_4 L_{c4}^2 + \frac{1}{2} I_1 + \frac{1}{2} I_4 \right) \dot{q}_1^2 + (m_3 L_1 L_{c3} C_2 + m_4 L_2 L_{c4} C_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \\
 &+ \left(\frac{1}{2} m_2 L_{c2}^2 + \frac{1}{2} m_3 L_{c3}^2 + \frac{1}{2} m_4 L_{c2}^2 + \frac{1}{2} I_2 + \frac{1}{2} I_3 \right) (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \quad (3.42)
 \end{aligned}$$

3.2.3.5 พลังงานศักย์ของแต่ละส่วนต่อโยง

เมื่อแขนกล มีการเคลื่อนที่ในแนวที่ไม่ใช่แนวระนาบ ทำให้แขนกลมีพลังงานศักย์เกิดขึ้น จึงมีความจำเป็นต้องหาค่าพลังงานศักย์รวม ของแต่ละส่วนต่อโยง เพื่อใช้ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของแขนกลต่อไป พลังงานศักย์รวมหาได้จาก

$$P(q) = P_1(q) + P_2(q) + P_3(q) + P_4(q) \quad (2.43)$$

โดยกำหนดให้

$P_1(q)$ คือ พลังงานศักย์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 1

$P_2(q)$ คือ พลังงานศักย์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 2

$P_3(q)$ คือ พลังงานศักย์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 3

$P_4(q)$ คือ พลังงานศักย์ของส่วนต่อโยงชิ้นที่ 4

จากรูปที่ 2.1 เมื่อ g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก พลังงานศักย์ของแต่ละส่วนต่อโยงมีค่าดังนี้

$$P_1(q) = m_1 g L_{c1} C_1 \quad (3.44)$$

$$P_2(q) = m_2 g L_{c2} C_{1+2} \quad (3.45)$$

$$P_3(q) = m_3 g L_1 C_1 + m_3 g L_{c3} C_{1+2} \quad (3.46)$$

$$P_4(q) = m_4 g L_2 C_{1+2} + m_4 g L_{c4} C_1 \quad (3.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าสมการ (3.44) สมการ (3.45) สมการ (3.46) และ สมการ (3.47) ลงในสมการ (3.43) แล้วจัดรูป ทำให้ได้ค่าของพลังงานศักย์รวมของแต่ละส่วนต่อโยงดังนี้

$$P(q) = (m_1 g L_{c1} + m_3 g L_1 + m_4 g L_{c4}) C_1 + (m_2 g L_{c2} + m_3 g L_{c3} + m_4 g L_2) C_{1+2} \quad (3.48)$$

3.2.3.6 สมการลากราน

สมการ (3.42) และ สมการ (3.48) คือพลังงานจลน์และ พลังงานศักย์รวมของแต่ละส่วนต่อโยง ทุกชิ้น ในแขนกล ในการจะได้มาซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ของแขนกล เมื่อมีแรงมากระทำกับระบบกลไก นั้นใช้สมการของลากรานเป็นหลักในการหา ซึ่งการใช้สมการของลากรานหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น ถือเป็นหนึ่งในหลายวิธีที่สามารถใช้หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - P(q) \quad (3.49)$$

แทนค่า สมการ (3.42) และ สมการ (3.48) ลงในสมการที่ (3.49)

$$\begin{aligned} L(q, \dot{q}) = & \left(\frac{1}{2} m_1 L_{c1}^2 + \frac{1}{2} m_3 L_1^2 + \frac{1}{2} m_4 L_{c4}^2 + \frac{1}{2} I_1 + \frac{1}{2} I_4 \right) \dot{q}_1^2 + (m_3 L_1 L_{c3} C_2 + m_4 L_2 L_{c4} C_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \\ & + \left(\frac{1}{2} m_2 L_{c2}^2 + \frac{1}{2} m_3 L_{c3}^2 + \frac{1}{2} m_4 L_2^2 + \frac{1}{2} I_2 + \frac{1}{2} I_3 \right) (\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \\ & - (m_1 g L_{c1} + m_3 g L_1 + m_4 g L_{c4}) C_1 - (m_2 g L_{c2} + m_3 g L_{c3} + m_4 g L_2) C_{1+2} \end{aligned} \quad (3.50)$$

จากสมการ (3.32) เมื่อพิจารณาที่ q_1 เขียนสมการของลากรานใหม่ได้ว่า

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_1} \right) - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_1} = \tau(q, \dot{q}, \ddot{q}) \quad (3.51)$$

หาค่าของ $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_1} \right)$ จากสมการ (3.50) โดยการหาอนุพันธ์เทียบกับ \dot{q}_1 และจึงหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาตามลำดับ

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_1} \right) = & (m_1 L_{c1}^2 + m_3 L_1^2 + m_4 L_{c4}^2 + I_1 + I_4) \ddot{q}_1 + (m_3 L_1 L_{c3} C_2 + m_4 L_2 L_{c4} C_2) (2\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \\ & - (m_3 L_1 L_{c3} S_2 + m_4 L_2 L_{c4} S_2) (2\dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dot{q}_2^2) \\ & + (m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^2 + m_4 L_2^2 + I_2 + I_3) (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \end{aligned} \quad (3.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าของ $\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_1}$ จากสมการ (3.50) โดยการหาอนุพันธ์เทียบกับ q_1

$$\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_1} = (m_1 g L_{c1} + m_3 g L_1 + m_4 g L_{c4}) S_1 + (m_2 g L_{c2} + m_3 g L_{c3} + m_4 g L_2) S_{1+2} \quad (3.53)$$

หาค่าแรงบิดที่มอเตอร์ตัวที่ 1 กระทำกับกลไก ด้วยการแทนค่า สมการ (2.52) และ สมการ (2.53) ลงใน สมการ (3.51) เมื่อจัดรูปใหม่จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \tau_1 = & (m_1 L_{c1}^2 + m_3 L_1^2 + m_4 L_{c4}^2 + m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^2 + m_4 L_2^2 + 2m_3 L_1 L_{c3} C_2 + 2m_4 L_2 L_{c4} C_2 + I_1 + I_2 + I_3 + I_4) \ddot{q}_1 \\ & + (m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^2 + m_4 L_2^2 + m_3 L_1 L_{c3} C_2 + m_4 L_2 L_{c4} C_2 + I_2 + I_3) \ddot{q}_2 \\ & - (2m_3 L_1 L_{c3} S_2 \dot{q}_2 + 2m_4 L_2 L_{c4} S_2 \dot{q}_2) \dot{q}_1 - (m_3 L_1 L_{c3} S_2 \dot{q}_2 + m_4 L_2 L_{c4} S_2 \dot{q}_2) \dot{q}_2 \\ & - (m_1 g L_{c1} + m_3 g L_1 + m_4 g L_{c4}) S_1 - (m_2 g L_{c2} + m_3 g L_{c3} + m_4 g L_2) S_{1+2} \end{aligned} \quad (3.54)$$

จากสมการ (3.32) เมื่อพิจารณาที่ q_2 เขียนสมการของลากรางใหม่เป็น

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_2} \right) - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_2} = \tau(q, \dot{q}, \ddot{q}) \quad (3.55)$$

หาค่าของ $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_2} \right)$ จากสมการ (3.55) โดยการหาอนุพันธ์เทียบกับ \dot{q}_2 และจึงหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาในลำดับต่อมา

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_2} \right) = & (m_3 L_1 L_{c3} C_2 + m_4 L_2 L_{c4} C_2) \ddot{q}_1 - (m_3 L_1 L_{c3} S_2 + m_4 L_2 L_{c4} S_2) \dot{q}_1 \dot{q}_2 \\ & + (m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^2 + m_4 L_2^2 + I_2 + I_3) (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2) \end{aligned} \quad (3.56)$$

หาค่าของ $\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_2}$ จากสมการ (3.50) โดยการหาอนุพันธ์เทียบกับ q_2

$$\frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q_2} = (m_2 g L_{c2} + m_3 g L_{c3} + m_4 g L_2) S_{1+2} - (m_3 L_1 L_{c3} S_2 + m_4 L_2 L_{c4} S_2) (\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1 \dot{q}_2) \quad (3.57)$$

หาค่าแรงบิดที่มอเตอร์ตัวที่ 1 กระทำกับกลไก ด้วยการแทนค่า สมการ (3.56) และ สมการ (3.57) ลงใน สมการ (3.55) เมื่อจัดรูปใหม่จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
\tau_2 = & (m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^2 + m_4 L_2^2 m_3 L_1 L_{c3} C_2 + m_4 L_2 L_{c4} C_2 + I_2 + I_3) \ddot{q}_1 \\
& + (m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^2 + m_4 L_2^2 + I_2 + I_3) \ddot{q}_2 \\
& + (m_3 L_1 L_{c3} S_2 \dot{q}_1 + m_4 L_2 L_{c4} S_2 \dot{q}_1) \dot{q}_1 - (m_2 g L_{c2} + m_3 g L_{c3} + m_4 g L_2) S_{1+2}
\end{aligned} \tag{3.58}$$

เขียน τ_1 และ τ_2 ให้อยู่ในรูปทั่วไปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลที่มีจำนวนข้อต่อเป็นจำนวนใดๆ ซึ่งรูปทั่วไปที่กล่าวมานั้น เขียนให้อยู่ในรูปของเมทริก

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

โดยที่

$M(q)$ เป็นเมทริกแรงเฉื่อย (Inertia Matrix)

$C(q, \dot{q})$ เป็นเมทริกแรงสู่ศูนย์กลางและแรงคูลริอริส (Centrifugal and Coriolis force Matrix)

$G(q)$ เป็นเมทริกแรงที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravitational force Matrix)

τ เป็นแรง และ แรงบิด จากภายนอก (External Force and Torque)

หรือเขียนให้อยู่ในรูปของสำหรับแขนกลที่ใช้กลไกของส่วนต่อโยง 5 ชิ้น

$$\begin{bmatrix} M_{11}(q) & M_{12}(q) \\ M_{21}(q) & M_{22}(q) \end{bmatrix} \ddot{q} + \begin{bmatrix} C_{11}(q, \dot{q}) & C_{12}(q, \dot{q}) \\ C_{21}(q, \dot{q}) & C_{22}(q, \dot{q}) \end{bmatrix} \dot{q} + \begin{bmatrix} g_1(q) \\ g_2(q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$M_{11}(q) = m_1 L_{c1}^2 + m_3 L_1^2 + m_4 L_{c4}^2 + m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^2 + m_4 L_2^2 + 2m_3 L_1 L_{c3} C_2 + 2m_4 L_2 L_{c4} C_2 + I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

$$M_{12}(q) = m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^2 + m_4 L_2^2 + m_3 L_1 L_{c3} C_2 + m_4 L_2 L_{c4} C_2 + I_2 + I_3$$

$$M_{21}(q) = m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^2 + m_4 L_2^2 m_3 L_1 L_{c3} C_2 + m_4 L_2 L_{c4} C_2 + I_2 + I_3$$

$$M_{22}(q) = m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^2 + m_4 L_2^2 + I_2 + I_3$$

$$C_{11}(q, \dot{q}) = -(2m_3 L_1 L_{c3} S_2 \dot{q}_2 + 2m_4 L_2 L_{c4} S_2 \dot{q}_2)$$

$$C_{12}(q, \dot{q}) = -(m_3 L_1 L_{c3} S_2 \dot{q}_2 + m_4 L_2 L_{c4} S_2 \dot{q}_2)$$

$$C_{21}(q, \dot{q}) = m_3 L_1 L_{c3} S_2 \dot{q}_1 + m_4 L_2 L_{c4} S_2 \dot{q}_1$$

$$C_{22}(q, \dot{q}) = 0$$

$$g_1(q) = -(m_1 g L_{c1} + m_3 g L_1 + m_4 g L_{c4}) S_1 - (m_2 g L_{c2} + m_3 g L_{c3} + m_4 g L_2) S_{1+2}$$

$$g_2(q) = -(m_2 g L_{c2} + m_3 g L_{c3} + m_4 g L_2) S_{1+2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าของ เมทริก $M(q)$, $C(q, \dot{q})$ และ $G(q)$ ในสมการ (2.59) มีผลทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear) ในมิติของการผลิตและการพัฒนาในเชิงอุตสาหกรรม การออกแบบตัวควบคุมสำหรับแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้น มีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าระบบที่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการพัฒนาแขนกลประเภทนี้ จึงใช้การประมาณระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ให้กลายเป็นเชิงเส้น ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน และค่าความผิดพลาด (Error) ที่เกิดขึ้นจากการประมาณเป็นเชิงเส้น อยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ จากรูปโครงสร้างของแขนกลใน รูปที่ 3.1 เมื่อ q_i เป็นมุมที่มีขนาดเล็กมาก สามารถประมาณค่าได้ว่า

$$\cos q_i \approx 1$$

$$\sin q_i \approx \tan q_i \approx q_i$$

กำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุมที่มีค่าน้อยมาก

$$\dot{q}_i^2 \approx 0$$

ทำให้ค่าของสมการ (3.54) และ สมการ (3.58) มีค่าเปลี่ยนไปหลังจากการประมาณค่า กลายเป็นสมการเชิงเส้นที่มีรูปทั่วไปเป็น

$$\begin{aligned} \tau_1 = & (m_1 L_{c1}^2 + m_3 L_1^2 + m_4 L_{c4}^2 + m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^2 + m_4 L_2^2 + 2m_3 L_1 L_{c3} + 2m_4 L_2 L_{c4} + I_1 + I_2 + I_3 + I_4) \ddot{q}_1 \\ & + (m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^3 + m_4 L_2^2 + m_3 L_1 L_{c3} + m_4 L_2 L_{c4} + I_2 + I_3) \ddot{q}_2 \\ & - (m_1 g L_{c1} + m_3 g L_1 + m_4 g L_{c4} + m_2 g L_{c2} + m_3 g L_{c3} + m_4 g L_2) q_1 \\ & - (m_2 g L_{c2} + m_3 g L_{c3} + m_4 g L_2) q_2 \end{aligned} \quad (3.59)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = & (m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^3 + m_4 L_2^2 + m_3 L_1 L_{c3} + m_4 L_2 L_{c4} + I_2 + I_3) \ddot{q}_1 \\ & + (m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^3 + m_4 L_2^2 + I_2 + I_3) \ddot{q}_2 \\ & - (m_2 g L_{c2} + m_3 g L_{c3} + m_4 g L_2) q_1 \\ & - (m_2 g L_{c2} + m_3 g L_{c3} + m_4 g L_2) q_2 \end{aligned} \quad (3.60)$$

เขียนสมการ (3.59) และ สมการ (3.60) ให้อยู่ในรูปเมทริก

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \ddot{q} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} q = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการประมาณค่านี้ กำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุมน้อย มีผลทำให้สามารถหลีกเลี่ยงแรงสู่ศูนย์กลางและแรงค้ำคืบได้ ดังนั้นในสมการ (3.59) จึงไม่มีเทอมของ $C(q, \dot{q})$

โดยที่

$$M_{11} = m_1 L_{c1}^2 + m_3 L_1^2 + m_4 L_{c4}^2 + m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^2 + m_4 L_2^2 + 2m_3 L_1 L_{c3} + 2m_4 L_2 L_{c4} + I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

$$M_{12} = m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^2 + m_4 L_2^2 + m_3 L_1 L_{c3} + m_4 L_2 L_{c4} + I_2 + I_3$$

$$M_{21} = m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^2 + m_4 L_2^2 + m_3 L_1 L_{c3} + m_4 L_2 L_{c4} + I_2 + I_3$$

$$M_{22} = m_2 L_{c2}^2 + m_3 L_{c3}^2 + m_4 L_2^2 + I_2 + I_3$$

$$G_{11} = m_1 g L_{c1} + m_3 g L_1 + m_4 g L_{c4} + m_2 g L_{c2} + m_3 g L_{c3} + m_4 g L_2$$

$$G_{12} = -(m_2 g L_{c2} + m_3 g L_{c3} + m_4 g L_2)$$

$$G_{21} = -(m_2 g L_{c2} + m_3 g L_{c3} + m_4 g L_2)$$

$$G_{22} = -(m_2 g L_{c2} + m_3 g L_{c3} + m_4 g L_2)$$

แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้แสดงวิธีการหามาแล้วในบทนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด และนอกจากนั้นแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ยังใช้ในการอ้างอิงการออกแบบด้วยวัสดุจริง เพื่อในแขนกลมีขนาด น้ำหนัก โมเมนต์ความเฉื่อยที่เหมาะสมที่สุด ในบทต่อไปเป็นการกล่าวถึง การเลือกวัสดุในการสร้างแขนกล การออกแบบ และการสร้างแขนกล ตามที่ได้เน้นสำคัญจากการพิจารณาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์จากบทนี้ และอาศัยแบบจำลองนี้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ และจัดรูปแบบโครงสร้างให้ได้ผลเฉลยหรือคำตอบเชิงเทคนิคสำหรับการกำหนดคุณลักษณะวัสดุ เพื่อนำไปใช้สร้างจริงรวมถึงแนวทางการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับแขนกลแบบดั้งเดิมในบทถัดไป

บทที่ 4

ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์และการสร้างจริง

บทนี้กล่าวถึงการจำลองสร้างแขนกลอ่อนตัวด้วยคอมพิวเตอร์จากแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างในบทที่ 3 ซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองเชิงจลนศาสตร์ แบบจำลองเชิงจลศาสตร์ผันกลับ และแบบจำลองทางพลศาสตร์ ด้วยข้อมูลเหล่านี้ทำให้สามารถเริ่มการจำลองการสร้างด้วยคอมพิวเตอร์ โดยอาศัยพารามิเตอร์จากข้อมูลของวัสดุอ้างอิงที่ใช้ในการสร้าง และจากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เรื่องวัสดุในการสร้างซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา ด้วยการใช้โครงสร้างของแขนกลแบบขนานทำให้แขนกลมีความแข็งแรงแม้ใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา ดังนั้นหัวข้อแรกของบทนี้จึงกล่าวถึงพารามิเตอร์และค่าสมบัติเชิงกายภาพของวัสดุอ้างอิงเป็นลำดับแรกดังแสดงในหัวข้อ 4.1 ตามด้วยผลการการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ในหัวข้อ 4.2 จากนั้นจึงแสดงผลการสร้างจริงในหัวข้อ 4.3 และแสดงการเปรียบเทียบข้อดีของระบบที่นำเสนอกับระบบแบบดั้งเดิมในหัวข้อ 4.4 และในหัวข้อสุดท้ายเป็นการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการสื่อสารระหว่างแขนกลที่นำเสนอผ่านเครือข่ายหุ่นยนต์

4.1 วัสดุที่ใช้ในการออกแบบ

ในการออกแบบกลไกหรือโครงสร้างต่างๆ หัวข้อที่มีความสำคัญเป็นอันดับต้นๆ คือ วัสดุและคุณสมบัติของวัสดุเพราะเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบ ในเรื่องของน้ำหนักและโครงสร้างของกลไก ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวัสดุอ้างอิงที่ใช้ในการออกแบบ สำหรับแขนกลอ่อนตัว ที่ต้องการความแข็งแรงในการใช้งาน ในทางตรงกันข้ามก็ต้องการน้ำหนักที่น้อยเพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองพลังงานที่ป้อนให้กับต้นกำลัง จึงเลือกใช้วัสดุที่เป็นอลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน หมายเลข 6061 อ้างอิงตาม Aluminum Standards and Data 2006 Metric SI มาเป็นวัสดุอ้างอิง รูปของอลูมิเนียมชนิดนี้แสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นวัสดุที่นำมาบ่มแข็งได้ ทำให้มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการกัดกร่อน



รูปที่ 4.1 อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน หมายเลข 6061
(ที่มา <http://www.bobcometal.com/product/aluminum/6061.html>)

คุณสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมหมายเลข 6061 ที่จำเป็นในการจำลองการสร้างด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมหมายเลข 6061

คุณสมบัติ (Property)	ค่า (Value)	หน่วย (Unit)
โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Elastic Modulus)	6.9×10^{10}	นิวตันต่อตารางเมตร (N/m ²)
โมดูลัสของแรงเฉือน (Shear Modulus)	2.6×10^{10}	นิวตันต่อตารางเมตร (N/m ²)
ความหนาแน่น (Density)	2,700	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (Kg/m ³)
ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength)	1.24×10^8	นิวตันต่อตารางเมตร (N/m ²)
ความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Strength)	5.51×10^7	นิวตันต่อตารางเมตร (N/m ²)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

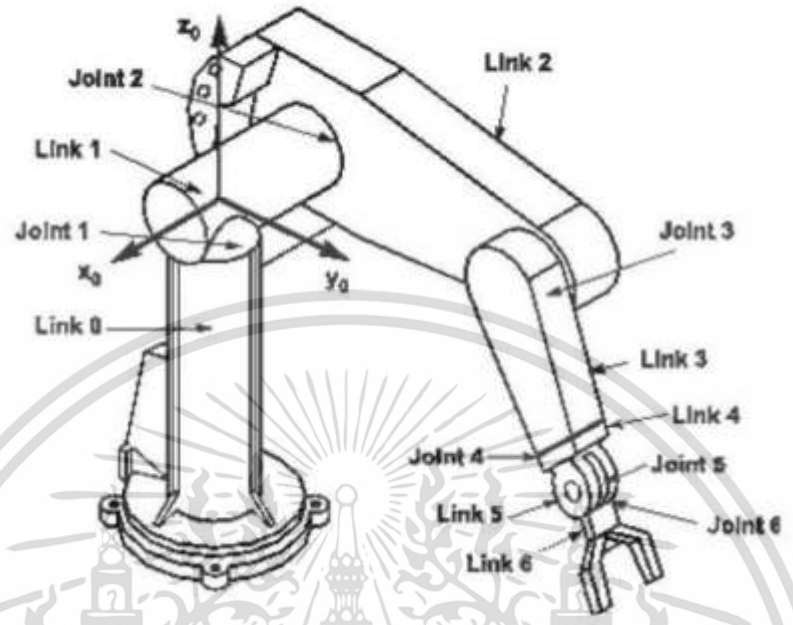
แขนกลอ่อนตัวในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลักๆที่เป็น ชิ้นส่วนต่อโยงทั้งหมด 4 ชิ้น เมื่อนับรวมเอาส่วนฐานอีก 1 ชิ้นจึงถูกเรียกว่ากลไกต่อโยง 5 ชิ้น ซึ่งเป็นกลไกแบบขนาน ดังนั้นในหัวข้อนี้เป็นการออกแบบรูปร่างลักษณะพื้นฐานของส่วนต่อโยงแต่ละชิ้น โดยใช้วัสดุที่เป็นอลูมิเนียมสีเทาสี ขนาดหนา 1 มิลลิเมตร กว้าง 25.4 มิลลิเมตร ยาว 25.4 มิลลิเมตร ภาพหน้าตัดของโครงสร้างอลูมิเนียม แสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพหน้าตัดของโครงสร้างอลูมิเนียม

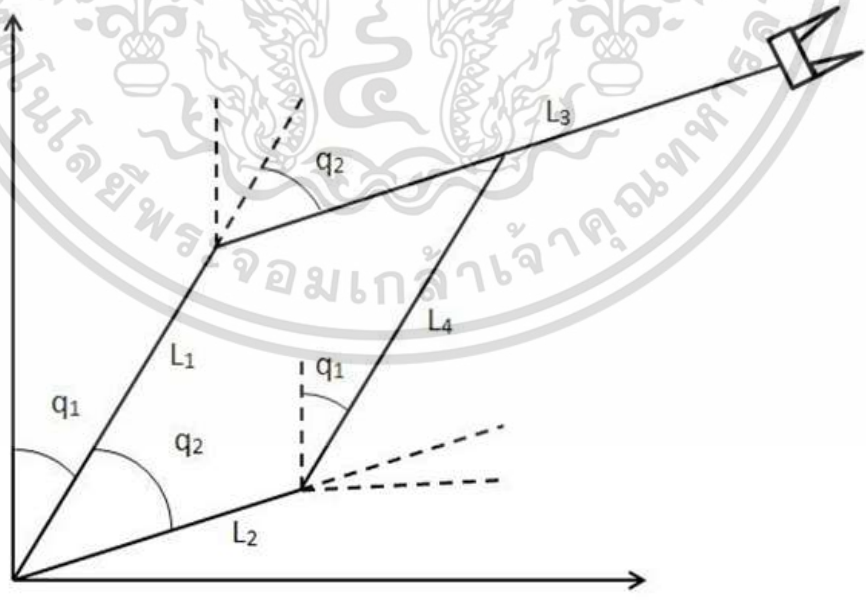
ในการกำหนดความยาวของแต่ละส่วนต่อโยง อ้างอิงจากแขนกลแบบดั้งเดิมที่ใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรม โดยงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงตาม แขนกล PUMA 560 [39] ที่มีความยาวของแต่ละส่วนต่อโยงคือ 500 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นแขนกลแบบอนุกรมที่วัสดุแข็งแรงเป็นวัสดุหลัก และอ้างอิงขนาดตามแขนกลแบบขนานของ Hongnian Yu [21] ที่มีความยาวของส่วนต่อโยงใกล้เคียงกัน และเมื่อทราบถึงภาพหน้าตัดของแต่ละส่วนต่อโยง วัสดุที่ใช้ และความยาว ทำให้สามารถคำนวณน้ำหนักของแต่ละส่วนต่อโยง รวมไปถึงจุดศูนย์กลางมวล ของแต่ละส่วนต่อโยง

Puma 560



รูปที่ 4.3 แขนกล PUMA 560 [39]

ลักษณะของแต่ละส่วนต่อโยงของแขนกลอัตโนมัติในงานวิจัยนี้ตามรูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.2 แสดงความยาวและน้ำหนักของแต่ละส่วนต่อโยง



รูปที่ 4.4 โครงสร้างแขนกลอัตโนมัติแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ขนาดความยาวของแต่ละส่วนต่อโยง

ส่วนต่อโยงที่	ขนาดความยาว (มิลลิเมตร)	น้ำหนัก (กรัม)
L ₁	500	131.76
L ₂	250	65.88
L ₃	500	131.76
L ₄	500	131.76

4.3 ผลการสร้างแขนกลจริง

ในหัวข้อนี้เป็นการนำแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์และการออกแบบในคอมพิวเตอร์มาสร้างเป็นแขนกลจริงด้วยวัสดุอลูมิเนียม โดยเมื่อทราบขนาดความยาวของแต่ละส่วนต่อโยง ผลของการออกแบบแขนกลด้วยคอมพิวเตอร์เป็นไปตามรูปที่ 4.5 และสำหรับการจำลองความแข็งแรงของการสร้างแขนกลด้วยวัสดุอลูมิเนียม สามารถดูได้ที่ภาคผนวก ก ซึ่งแสดงรายละเอียดการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแขนกลด้วยระเบียบวิธีการวิเคราะห์เชิงอินตะ (Finite element analysis) เพื่อความกระชับของการนำเสนอผลการทดลองหลัก จึงนำเสนอในส่วนภาคผนวกเพื่อความต่อเนื่องในการนำเสนอ ผู้สนใจรายละเอียดจึงสามารถดูได้ในภาคผนวกดังกล่าว



รูปที่ 4.5 การออกแบบแขนกลด้วยคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้แบบที่ออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์แล้ว การตรวจสอบว่าแขนกลที่ได้ออกแบบมานั้นมีความสอดคล้องกับแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์มากน้อยเพียงใด คือการทดลองสร้างจริงตามพารามิเตอร์ที่กำหนดโดยแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ เพื่อใช้แขนกลที่สร้างจริงในการหาประสิทธิภาพการทำงานและเพิ่มความสามารถในการสื่อสารระหว่างแขนกลต่อไป รูปที่ 4.6 แสดงการดำเนินงานสร้างและโครงสร้างของหุ่นยนต์ที่ใช้วัสดุอลูมิเนียม 6061 เป็นหลักโดยหุ่นยนต์ที่สร้างนั้นเป็นหุ่นยนต์ที่มีแขนกลอ่อนตัวสองชุด แต่ละชุดเป็นแขนกลอ่อนตัวที่มีองศาอิสระเท่ากับ 3



รูปที่ 4.6 โครงสร้างของหุ่นยนต์ที่มีแขนกลอ่อนตัวสองชุด

และในรูปที่ 4.7 แสดงหุ่นยนต์ที่มีแขนกลอ่อนตัวแบบขนาน ที่มีความยาวของแขนในส่วนต่อโยงที่ 1 (L_1) และส่วนต่อโยงที่ 3 (L_3) เท่ากับแขนกล PUMA 560 [39] ซึ่งการเปรียบเทียบข้อดีของระบบที่นำเสนอกับระบบดั้งเดิมแสดงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.7 ผลการสร้างหุ่นยนต์จริงตามแบบจำลอง

ซึ่งการใช้วัสดุเบาสามารถช่วยลดกำลังของตัวขับเคลื่อนที่เป็นมอเตอร์ที่อยู่ในฐานทั้งสองตัวได้ โดยแขนกลของหุ่นยนต์ในรูปที่ 4.7 สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยการหมุนของมอเตอร์ที่อยู่ฐานซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบทรอบด้วยเฟืองโลหะ (DC Gear motors) รูปที่ 4.8 แสดงแขนกลและมอเตอร์ต้นกำลังของหุ่นยนต์



รูปที่ 4.8 แขนกลและมอเตอร์ต้นกำลังของหุ่นยนต์

ในหัวข้อต่อไปเป็นการนำเสนอผลการเปรียบเทียบข้อดีของแขนกลในงานวิจัยกับแขนกลแบบดั้งเดิมที่ใช้วัสดุแข็งเกร็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การเปรียบเทียบข้อดีของระบบที่นำเสนอกับระบบแบบดั้งเดิม

ในการเปรียบเทียบข้อดีของระบบที่ได้ออกแบบกับระบบดั้งเดิมนั้นมุ่งเน้นไปที่ข้อดีด้านการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของแขนกล และการลดต้นทุนรวม ทั้งส่วนที่เป็นค่าใช้จ่ายตายตัว ซึ่งก็คือฮาร์ดแวร์ต่าง ๆ และค่าใช้จ่ายผันแปรในการดำเนินงาน โดยแบ่งการเปรียบเทียบเป็นหัวข้อย่อยดังนี้

4.4.1 ข้อดีด้านการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของแขนกล

การใช้พลังงานไฟฟ้าของแขนกลนั้นส่วนใหญ่่นั้น เป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าไปกับตัวขับเคลื่อนที่เป็นมอเตอร์ของแขนกล การเปรียบเทียบในหัวข้อนี้ จึงเปรียบเทียบขนาดและการใช้พลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้า โดยข้อมูลของมอเตอร์ของแขนกล PUMA 560 [39] ที่มีขนาดเท่ากับแขนกลอ่อนตัวในงานวิจัย เป็นไปตาม ตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลของมอเตอร์ในแขนกล PUMA 560 [39]

List	Unit	Value
Voltage	VDC	48
Max. Speed	RPM	3000
Rated Current	Amp	2-10
Rated Output Power	W	100

แขนกลอ่อนตัวแบบขนานที่ใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาลงแน่นอนว่า มอเตอร์ที่ใช้ในแขนกลก็มีขนาดเล็กลงไปด้วย เพราะไม่ต้องรับภาระของตัวขับเคลื่อนในส่วนต่อโยงอื่น โดยมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยมีข้อมูลตามตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

List	Unit	Value
Voltage	VDC	24
Max. Speed	RPM	3000
Rated Current	Amp	0.6-3.0
Rated Output Power	W	15

เมื่อพิจารณาที่กำลังของมอเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแขนกลพบว่าแขนกลอ่อนตัวแบบขนานนั้น ใช้มอเตอร์ที่มีกำลังไฟฟ้าน้อยกว่า ในขนาดของแขนกลที่เท่ากัน จึงสรุปได้ว่าโครงสร้างของแขนกลในงานวิจัยนี้ ช่วยให้ประหยัดไฟฟ้าในการใช้งานแขนกล โดยแขนกลสามารถรับภาระ (loads) ได้มากกว่าแขนกลคู่เทียบที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม

4.4.2 ข้อดีด้านการลดต้นทุนรวม

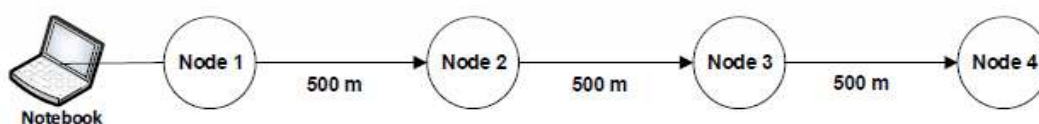
หัวข้อนี้เป็นการกล่าวถึงข้อดีของแขนกลอ่อนตัวในด้านการช่วยลดต้นทุนรวมเมื่อมีการสร้างและใช้งานแขนกลอ่อน โดยต้นทุนรวมนั้นแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ต้นทุนส่วนที่เป็นค่าใช้จ่ายตายตัวซึ่งคือค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ที่เสียไปกับการสร้างฮาร์ดแวร์ และต้นทุนที่เป็นค่าใช้จ่ายผันแปรในการดำเนินงาน เนื่องจากขนาดของมอเตอร์ที่ลดลง เพราะไม่ต้องใช้มอเตอร์ที่มีกำลังสูงมาขับเคลื่อนส่วนต่อโยงที่เป็นวัสดุแข็งเกร็ง ด้วยความต้องการกำลังมอเตอร์ที่ลดลงอ้างอิงจากหัวข้อ 4.4.1 ทำให้ต้นทุนในการสร้างแขนกลลดลงด้วยเพราะ ราคาของมอเตอร์ที่มีกำลังสูงมีราคาแพงกว่ามอเตอร์ที่มีกำลังต่ำกว่า ในด้านค่าใช้จ่ายผันแปร โดยแขนกลมีน้ำหนักที่เบาลงทำให้ค่าใช้จ่ายในเรื่องของการดำเนินการลดลงด้วย ดังแสดงตัวอย่างรายละเอียดตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ข

4.5 ผลของการศึกษาการสื่อสารระหว่างแขนกล

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงผลการศึกษาการสื่อสารระหว่างแขนกล โดยการสื่อสารนั้นเป็นการสื่อสารแบบไร้สาย ที่แขนกลอ่อนตัวมากกว่า 1 แขนสื่อสารกันด้วยโครงสร้างดังนี้

4.5.1 โครงสร้างแบบตามลำดับ (sequential pattern)

การสื่อสารระหว่างแขนกล โดยใช้โครงสร้างการสื่อสารแบบตามลำดับแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 โครงข่ายการสื่อสารของแขนกลแบบตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองโดยการส่งไฟล์ โดยใช้คำสั่ง ping (ping command) จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 2 และส่งต่อไปยังโหนดอื่นๆตามลำดับ โดยกำหนดขนาดของข้อมูลที่ส่งคงที่ ขนาด 65,500 ไบต์ ผลของการทดลองแสดงในตารางที่ 4.5

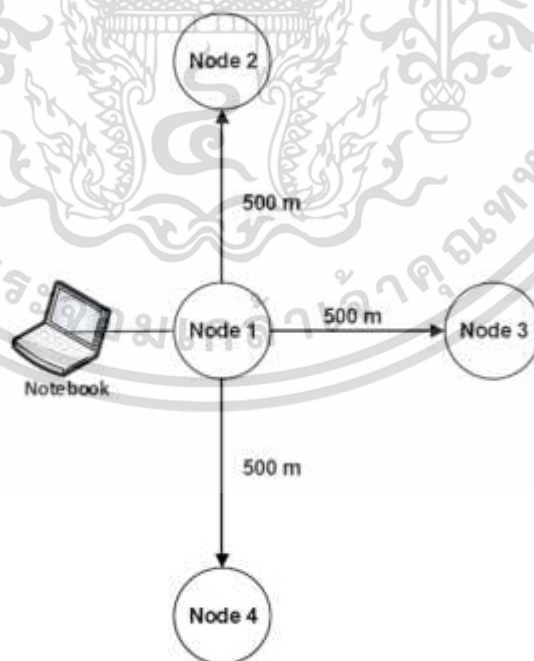
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการสื่อสารแบบตามลำดับ

Node	Packet Size (Bytes)	Distance (meters)	Time (millisecond)
1 to 2	65500	500	222
2 to 3	65500	500	246
3 to 4	65500	500	215

ในการสื่อสารตามโครงสร้างตามลำดับนั้นเมื่อส่งข้อมูลที่มีขนาด 65500 ไบต์จาก โหนดหนึ่งไปยังอีกโหนดหนึ่งภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ระยะทางในการส่งเท่ากัน สรุปการส่งไฟล์นั้นใช้เวลาในการส่งเฉลี่ยอยู่ที่ 225 มิลลิวินาที

4.5.1 โครงสร้างแบบดาว (star pattern)

การสื่อสารของแขนกลโดยใช้โครงข่ายการสื่อสารแบบดาวนั้น เป็นไปตามโครงสร้างในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 โครงข่ายการสื่อสารของแขนกลแบบดาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองโดยการส่งไฟล์ โดยใช้คำสั่ง ping (ping command) จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 2 โหนดที่ 3 และโหนดที่ 4 โดยกำหนดขนาดของข้อมูลที่ส่งคงที่ ขนาด 65,500 ไบต์ ผลของการทดลองแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการสื่อสารแบบดาว

Node	Packet Size (Bytes)	Distance (meters)	Time (millisecond)
1 to 2	65500	500	234
1 to 3	65500	500	219
1 to 4	65500	500	222

ในการสื่อสารตามโครงสร้างแบบดาวนั้นเมื่อส่งข้อมูลที่มีขนาด 65500 ไบต์จาก โหนดหนึ่งไปยังอีกโหนดหนึ่งภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ระยะทางในการส่งเท่ากัน สรุปการส่งไฟล์นั้นใช้เวลาในการส่งเฉลี่ยอยู่ที่ 225 มิลลิวินาที

ดังจะเห็นได้ว่าการส่งข้อมูลระยะไกลผ่านเครือข่ายไร้สายในจำนวน 65500 ไบต์นั้นใช้เวลาประมาณ 0.2-0.3 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่เพียงพอที่เกือบจะถือว่าเป็นเวลาจริง (real time) จะเห็นได้ว่าแม้เปลี่ยนวัสดุเป็นโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบา ไม่มีผลต่อความล่าช้าในการส่งสัญญาณต่อการสื่อสารของในเครือข่ายหุ่นยนต์และแขนกลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งการศึกษานี้เป็นเพียงเริ่มต้นทดลองเพื่อประเมินการตอบสนองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเชิงกายภาพต่อการรับส่งข้อมูลเทียบกับเวลา สำหรับการศึกษาในแนวคิดต่อไปจะแสดงในส่วนข้อเสนอแนะในหัวข้อสุดท้ายในบทถัดไปอันเป็นการกล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทนี้เป็นการสรุปเนื้อหาที่ได้นำเสนอทั้งหมดจากบทที่ผ่านมา โดยเฉพาะผลการออกแบบและสร้างจริงของแขนกลอ่อนตัว การวิเคราะห์เปรียบเทียบคุณสมบัติในเชิงเทคนิคและเชิงเศรษฐศาสตร์ของแขนกลที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้เทียบกับระบบแขนกลแบบดั้งเดิม รวมไปถึงข้อเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาต่อ อีกทั้งระบุปัญหาที่เกิดขึ้นจากประสบการณ์วิจัยเพื่อเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ต้องการทำวิจัยสร้างแขนกลอ่อนตัวเช่นนี้ต่อไป

5.1 บทสรุป

ปัญหาของแขนกลแบบดั้งเดิมที่ทำมาจากโลหะหนัก เช่น เหล็กหรือเหล็กกล้าไร้สนิม ทำให้มีขีดจำกัดในการปฏิบัติงานเคลื่อนย้ายภาระหรือสิ่งของเมื่อเทียบกับน้ำหนักตัวของแขนกลหรือหุ่นยนต์ การแก้ปัญหาทางหนึ่งคือการเลือกใช้วัสดุน้ำหนักเบาเช่นอลูมิเนียมมาแทนโลหะหนักในการสร้างแขนกล ทว่า แขนกลรุ่นใหม่แม้จะช่วยขจัดปัญหาเรื่องน้ำหนักตัวต่อภาระการทำงาน แต่ธรรมชาติแขนกลมีความอ่อนตัวโดยวัสดุทำให้เกิดการสั่นขณะปฏิบัติงานส่งผลให้การควบคุมที่ปลายจับซึ่งงานคาดเคลื่อนได้หลายปีที่ผ่านมา นักวิจัยทั่วโลกต่างมุ่งเน้นการแก้ปัญหานี้ด้วยการใช้วิธีป้อนสัญญาณควบคุมให้แขนกลเพื่อแก้การสั่นดังกล่าว แต่การแก้ปัญหานี้ทำให้ยุ่งยากในการออกแบบและสิ้นเปลืองพลังงาน เพราะพลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปในการป้อนหรือขับเคลื่อนแขนกลในทิศทางตรงข้ามกับการสั่น งานวิจัยนี้จึงแก้ปัญหาดังกล่าวโดยตรงเชิงโครงสร้างด้วยวิธีโครงสร้างขนานและให้แนวทางการเขียนซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการออกแบบ รวมทั้งการทดลองเพื่อทดสอบระบบสื่อสารเบื้องต้นของแขนกลอ่อนตัวผ่านระบบเครือข่ายสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์

ในหัวข้อนี้จึงเป็นบทสรุปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยโดยแยกออกเป็นบทสรุปของการสร้างแขนกลอ่อนตัว และบทสรุปของการทดลองการสื่อสารระหว่างแขนกลผ่านเครือข่ายหุ่นยนต์ ดังนี้

5.1.1 บทสรุปของการสร้างแขนกล

จากแนวคิดแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการขยายปลายแขนกลแบบห้าอันตะเข้มโยงเป็นกลไกแบบขนานงานวิจัยนี้ได้แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับโครงสร้างดังกล่าวโดยอาศัยวิธีลากรางจ์ นำไปสู่สมการปริภูมิสถานะที่พร้อมใช้งานในการออกแบบระบบควบคุมต่อไป โดยวิศวกรระบบควบคุมสามารถนำแนวทางที่

ได้จากงานวิจัยนี้ไปเขียนตัวควบคุม ออกแบบอัลกอริธึมควบคุม จากสมการนี้ ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงเทียบกับวัสดุแบบดั้งเดิมพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการสร้างแกนกลอ่อนตัวสามารถตรวจสอบได้จากซอฟต์แวร์ระเบียบวิธีตัวเลขเชิงอันดับที่นำเสนอในงานวิจัยนี้

จากการวิเคราะห์ต้นทุนเชิงเศรษฐศาสตร์เปรียบเทียบระหว่างระบบที่นำเสนอและระบบแบบดั้งเดิม พบว่า การใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาคือ ไม่เพียงแค่อลูมิเนียมยังสามารถช่วยลดน้ำหนักโดยรวมของแกนกล แต่ยังคงรวมไปถึงขนาดของมอเตอร์ได้ ซึ่งถ้าขนาดของมอเตอร์ที่ใช้มีขนาดเล็กลง ทำให้ช่วยลดต้นทุนคงที่ของการสร้างหุ่นยนต์ได้ การใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา ย่อมทำให้ลดต้นทุนในการใช้พลังงานลงทำให้ทุนในการดำเนินการลดลงไปอีกด้วย หากเปรียบเทียบแกนกลแบบดั้งเดิม ที่มีเป็นแกนกลแบบบอนุกรม และใช้วัสดุที่มีน้ำหนักมากเช่น เหล็ก สเตนเลส เป็นต้น กับแกนกลอ่อนตัวที่ใช้วัสดุอลูมิเนียมแล้วนั้น สามารถสรุปได้ว่าแกนกลอ่อนตัวนั้นใช้ต้นทุนที่ต่ำกว่าในการสร้างและการดำเนินงานอย่างมีนัยสำคัญ

5.1.2 บทสรุปของการสื่อสารระหว่างแกนกล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสื่อสารระหว่างแกนกลเบื้องต้น ด้วยรูปแบบต่างๆ โดยมุ่งเน้นไปที่การตรวจสอบสัญญาณการรับส่งระยะไกลเพื่อใช้กับหุ่นยนต์ที่มีแกนกลอ่อนตัวในโครงสร้างน้ำหนักเบา เป็นการศึกษาเชิงการรับส่งสัญญาณเท่านั้น ไม่ครอบคลุมถึงการเข้ารหัส (coding) และโปรโตคอลสื่อสาร (communication protocol) สาเหตุที่ศึกษาร่องระบบสื่อสารการสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากต้องการครอบคลุมประโยชน์ในการรับส่งข้อมูลการทำงานของแกนกลที่ขยายขีดความสามารถในการควบคุมหุ่นยนต์จากระยะไกล จากการทดลองพบว่า ทุกโครงข่ายสื่อสารของหุ่นยนต์และแกนกลที่ได้ทดลองตามโครงสร้างของการสื่อสารแบบอนุกรมและแบบดาว สามารถขยายขอบเขตของระยะการสื่อสารให้เพิ่มมากขึ้นและให้ผลเป็นที่น่าพอใจในระดับที่สามารถนำไปใช้ต่อยอดขยายผลใช้ปฏิบัติงานได้จริงต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการสร้างแกนกลด้วยวัสดุจริงในงานวิจัยนี้เป็นการสร้างด้วยการประกอบด้วยมือคน (Handmade) ไม่ได้สร้างด้วยเครื่องจักรเฉพาะสำหรับการสร้างแกนกล จึงส่งผลให้เกิดความผิดพลาดต่างๆ ขึ้นในการสร้างจริง เช่นขนาดความยาวต่างมีการคลาดเคลื่อน การประกอบชิ้นส่วนที่มีความคลาดเคลื่อน แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ ดังนั้นหากสร้างแกนกลด้วยเครื่องจักรเฉพาะ จะยิ่งส่งผลให้แกนกล

มีความแม่นยำมากขึ้น ตรงตามที่ได้ออกแบบมากขึ้น และสำหรับแขนกลอ่อนตัวนั้นนอกจากจะใช้วัสดุที่เป็นอลูมิเนียมตามที่งานวิจัยนี้ใช้แล้ว ยังสามารถใช้วัสดุอื่นที่มีน้ำหนักเบาได้เช่นกัน เพียงแต่ต้องมีข้อมูลที่จำเป็นเช่น ความหนาแน่น โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น ความทนต่อแรงดึง ความแข็งแรงที่จุดคราก ของวัสดุเป็นต้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบตามระเบียบวิธี และโครงสร้างตามงานวิจัยนี้ ในด้านการสื่อสารสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารให้เพิ่มมากขึ้นได้เช่นกัน ทั้งเพิ่มคุณภาพสัญญาณ การพัฒนาโปรโตคอลในการสื่อสาร การเข้ารหัสของข้อมูลในการสื่อสารเพื่อความปลอดภัยและถูกต้องของข้อมูล

อนึ่ง ส่วนที่ยังไม่ได้ครอบคลุมในงานวิจัยนี้คือ การออกแบบและสร้างระบบควบคุมแบบชาญฉลาดเช่น ระบบจัดการข้อมูลใหญ่อัจฉริยะ (intelligent system for big data management) การควบคุมหุ่นยนต์ด้วยระบบคำนวณในเมฆ (cloud computing) ระบบควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม (neural network control system) การควบคุมแขนกลผ่านอินเทอร์เน็ตของทุกสิ่ง (Internet of things) และการผสมการใช้เทคโนโลยีล่าสุด (cutting edge technology) ล้วนแต่เป็นหัวข้อที่น่าสนใจในการทำวิจัยต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] Asada H., Youcef-Toumi K., "Design Application - M.I.T. Direct-Drive Manipulators", *Direct-Drive Robots: Theory and Practice*, MIT Press, pages 123, 1987.
- [2] Lin S.H., Tosunoglu S., Tesar D., "Control of a six-degree-of-freedom flexible industrial manipulator", *IEEE Control Systems Magazine*, volume 11, number 3, pages 24-30, April 1991.
- [3] Shoureshi R., Evans R.D., Stevenson W., "Optically driven learning control for industrial manipulators", *IEEE Control Systems Magazine*, volume 9, number 6, pages 21-26, October 1989.
- [4] Judd R.P., Falkenburg R., "Dynamics of nonrigid articulated robot linkages", *IEEE Transactions on Automatic Control*, volume 30, number 5, pages 499-502, May 1985.
- [5] Yoneyama T., Watanabe T., Kagawa H., Hamada J., Hayashi Y., Nakada M., "Force detecting gripper and flexible micro manipulator for neurosurgery", *Annual International Conference of the IEEE on Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC 2011*, pages 6695-6699, August 2011 - September 2011.
- [6] Sever M.D.M., D'Eleuterio G.M.T., "A servocompensator approach to the control of flexible space robotic manipulators with application to teleoperation", *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 1993*, volume 3, pages 2140-2147, July 1993.
- [7] Murrugarra C., Grieco J., Fernandez G., De Castro O., "Design of a PD Position Control based on the Lyapunov Theory for a Robot Manipulator Flexible-Link", *IEEE*

- International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2006*, pages 890-895, December 2006.
- [8] Zhao Z., Tian H., "Active disturbance rejection control for trajectory tracking of space manipulator flexible joint", *Chinese Control Conference 30th, CCC 2011*, pages 727-732, July 2011.
- [9] Zhao Y., Zhao Z., Zhao B., Li W., "Active Disturbance Rejection Control for Manipulator Flexible Joint with Dynamic Friction and Uncertainties Compensation", *International Symposium on Computational Intelligence and Design 4th, ISCID 2011*, volume 2, pages 248-251, October 2011.
- [10] Zhang X., Qingxuan J., Hanxu S., Ming C., "Adaptive control of manipulator flexible-joint with friction compensation using LuGre model", *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications 3rd, ICIEA 2008*, pages 1234-1239, June 2008.
- [11] Yang T.W., Sun Z.Q., Tso S.K., Xu W.L., "Trajectory control a flexible space manipulator utilizing a macro-micro architecture", *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2003*, volume 2, pages 2522-2528, September 2003.
- [12] Luh J.Y.S., Zheng Y.F., "Computation of input generalized forces for robots with closed kinematic chain mechanisms", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, volume 1, number 2, pages 95-103, June 1985.
- [13] Monsarrat B., Gosselin C.M., "Workspace analysis and optimal design of a 3-leg 6-DOF parallel platform mechanism", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, volume 19, number 6, pages 954-966, December 2003.
- [14] Gosselin C.M., Vollmer F., Cote G., Yangnian W., "Synthesis and design of reactionless three-degree-of-freedom parallel mechanisms", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, volume 20, number 2, pages 191-199, April 2004.

- [15] Ishii C., Kobayashi K., Kamei Y., Nishitani Y., "Robotic Forceps Manipulator With a Novel Bending Mechanism", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, volume 15, number 5, pages 671-684, October 2010.
- [16] Judd R.P., Falkenburg R., "Dynamics of nonrigid articulated robot linkages", *IEEE Transactions on Automatic Control*, volume 30, number 5, pages 499-502, May 1985.
- [17] Takaki T., Omata T., "High-Performance Anthropomorphic Robot Hand With Grasping-Force-Magnification Mechanism", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, volume 16, number 3, pages 583-591, June 2011.
- [18] Takayama T., Yamana T., Omata T., "Three-Fingered Eight-DOF Hand That Exerts 100-N Grasping Force With Force-Magnification Drive", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, volume 17, number 2, pages 218-227, April 2012.
- [19] Lee H., Choi Y., Yi B.J., "Stackable 4-BAR Manipulators for Single Port Access Surgery", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, volume 17, number 1, pages 157-166, February 2012.
- [20] Chen Q., Chen W., Yang G., Liu R., "An Integrated Two-Level Self-Calibration Method for a Cable-Driven Humanoid Arm", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, volume 10, number 2, pages 380-391, April 2013.
- [21] Yu H., "Modeling and Control of Hybrid Machine Systems: a Five-bar Mechanism Case", *Journal of Automation and International Computing*, volume 3, number 3, pages 235-243, April 2006.
- [22] Liao H., Yoshimura K., Utsugida T., Matsumiya K., Masamune K., Dohi T., "Surgical manipulator with linkage mechanism for anterior cruciate ligament reconstruction", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2007*, pages 1266-1271, October 2007 – November 2007.

- [23] Wu F.X., Zhang W.J., Li Q., Ouyang P.R., Zhou Z.X., "Control of hybrid Machines with 2-DOF for trajectory tracking problems", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, volume 13, number 2, pages 338-342, March 2005.
- [24] Merlet J.P., *Parallel Robots 2nd edition*, Springer, 2006.
- [25] Gwinnett J.E., "Amusement device", *US Patent No. 1,789,680*, January 20, 1931.
- [26] Pollard W.L.V., "Position controlling apparatus", *US Patent No. 2,286,571*, June 16, 1942.
- [27] Pollard W.L.G., "Spray painting machine", *US Patent No. 2,213,108*, August 26, 1940.
- [28] Roselund H.A., "Means for moving spray guns or other devices through predetermined paths", *US Patent No. 2,344,108*, March 14, 1944.
- [29] Sun J., Zhu X., Zhang C., Fang Y., "Rescue Me: Location-Based Secure and Dependable VANETs for Disaster Rescue", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, volume 29, number 3, pages 659-669, March 2011.
- [30] Das S.R., Perkins C.E., Royer E.M., "Performance Comparison of Two On-demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks", *Proceedings of the IEEE INFOCOM Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies 19th*, volume 1, pages 3-12. March 2000.
- [31] Larsson T., Hedman N., *Routing Protocols in Wireless Ad-hoc Networks, A Simulation Study, Master's thesis in Computer Science and Engineering*, Lulea University of Technology, Stockholm, 1998.
- [32] Lundgren H., Nordstrom E., Tschudin C., "Coping with Communication Gray Zones in IEEE 802.11b based Ad hoc Networks", *Proceedings of the ACM International Workshop on Wireless Mobile Multimedia 5th, WoWMoM 2002*, pages 49-55, September 2002.

- [33] Lundgren H., Lundberg D., Nielsen J., Nordstrom E. Tschudin C., "A Large-scale Testbed for Reproducible Ad hoc Protocol Evaluations", *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2002*, volume 1, pages 412-418, March 2002.
- [34] Lundberg D., *Ad hoc Protocol Evaluation and Experience of Real World Ad Hoc Networking, Thesis in Department of Information Technology*, Uppsala University, 2002.
- [35] NTT Docomo, "The Inspection of the Damage of the NTT Docomo System and the Recovery Plan of the Total System and its Real Record of the Recovery Process in East Japan Great Disaster", July 2011.
- [36] Noguchi S., "The Design Principle of the Robust Communication System under the Great Disaster Environment", *IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, AINA 2012*, March 2012.
- [37] Ceccarelli M., Glazunov V.A., "Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators", *Proceedings of Romansy 2014 XX CISMIFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators (Mechanisms and Machine Science)*, June 2014.
- [38] Murphy R.R., *Disaster Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents series)*, MIT Press, March 2014.
- [39] Aghajarian M., Kiani K., "Inverse Kinematics solution of PUMA 560 robot arm using ANFIS", *International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence 8th, URAI 2011*, pages 574-578, November 2011.

ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่อโยง

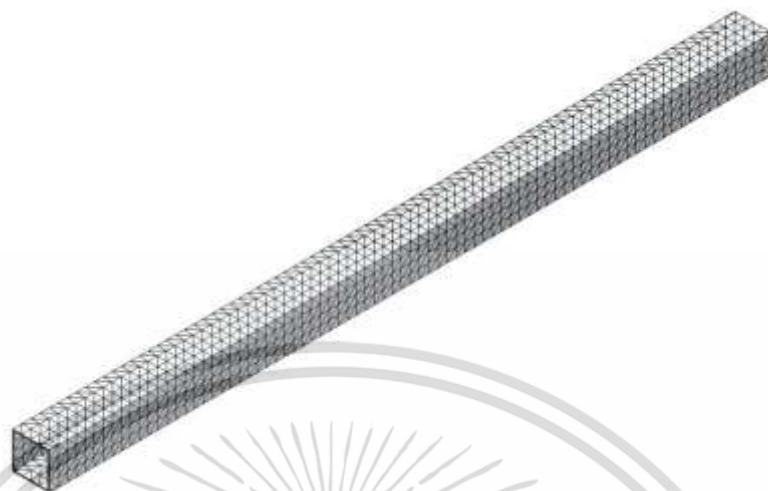
ในภาคผนวกนี้เป็นกรกล่าวถึงการศึกษาความแข็งแรงของ ชิ้นส่วนต่อโยงที่ได้ออกแบบไว้แล้วใน บทที่ 4 เมื่อส่วนต่อโยงได้รับแรงในทิศทางและขนาดต่าง โดยใช้ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ที่ได้รับการพัฒนาและเป็น ที่นิยมใช้ เพราะสามารถประยุกต์เพื่อแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนได้ เนื่องจากระเบียบวิธีดังกล่าว ใช้วิธีพื้นฐานของคณิตศาสตร์และระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยวิธีทางไฟไนต์ เอลิเมนต์ ที่เกิดขึ้นในวัสดุ

โดยการวิเคราะห์ความแข็งแรงของวัสดุในภาคผนวกนี้ ใช้ชิ้นส่วนต่อโยงขนาดยาว 500 มิลลิเมตร มาทำการวิเคราะห์ เพราะว่าเป็นส่วนที่ติดอยู่กับส่วนปลายของแขนกล และเป็นส่วนที่รับภาระ โดยรูปของ ชิ้นส่วนต่อโยงดังกล่าวแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 ชิ้นส่วนต่อโยงที่นำมาวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ต้องมีการแบ่งวัตถุที่ต้องการ วิเคราะห์ออกเป็นส่วนๆ เพื่อให้โปรแกรมสำหรับจำลองความแข็งแรงได้คำนวณความแข็งแรงเมื่อมีแรง ขนาดและทิศทางต่างๆมากระทำกับวัตถุนั้น รูปของการแบ่งวัตถุออกเป็น ส่วน ๆ แสดงในรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 การแบ่งวัตถุที่จะวิเคราะห์เป็นส่วนๆ

ขั้นตอนต่อมาของการวิเคราะห์หลังจากแบ่งวัตถุที่ต้องการวิเคราะห์ออกเป็นส่วน ๆ แล้วก็คือการจำลองแรงที่มากระทำกับวัตถุโดยในการวิเคราะห์นี้แยกประเภทและขนาดของแรงตามตารางที่ ก.1

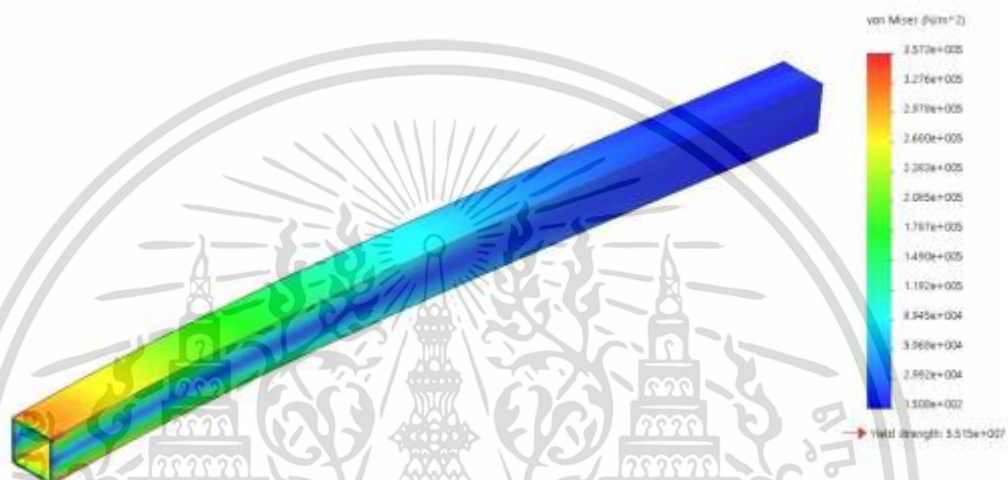
ตารางที่ ก.1 ประเภทและขนาดของแรงที่จะทำการวิเคราะห์

ประเภทของแรง	ขนาดของแรง	ตำแหน่งที่แรงกระทำ	จุดตรึง
แรงกด	1 N	ผิวด้านบนของส่วนต่อโยง	หน้าตัดของส่วนต่อโยง
	10 N		
	100 N		
แรงดึง	1 N	หน้าตัดของส่วนต่อโยง	หน้าตัดของส่วนต่อโยง
	10 N		
	100 N		

โดยผลของการจำลองความแข็งแรงเป็นไปตามหัวข้อต่อไปนี้

ก.1 การจำลองความแข็งแรงเมื่อมีแรงกดขนาด 1 นิวตัน

เมื่อชิ้นส่วนต่อโยงมีแรงกดขนาด 1 นิวตันมากระทำ โดยกำหนดจุดตรึงอยู่ที่ผิวหน้าตัดของส่วนต่อโยง ผลการจำลองแยกออกเป็นสองส่วนคือ ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงแสดงในรูป ก.3 และระยะขจัดที่ส่วนต่อโยงเปลี่ยนแปลงไปแสดงในรูป ก.4



รูปที่ ก.3 ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงกดขนาด 1 นิวตัน

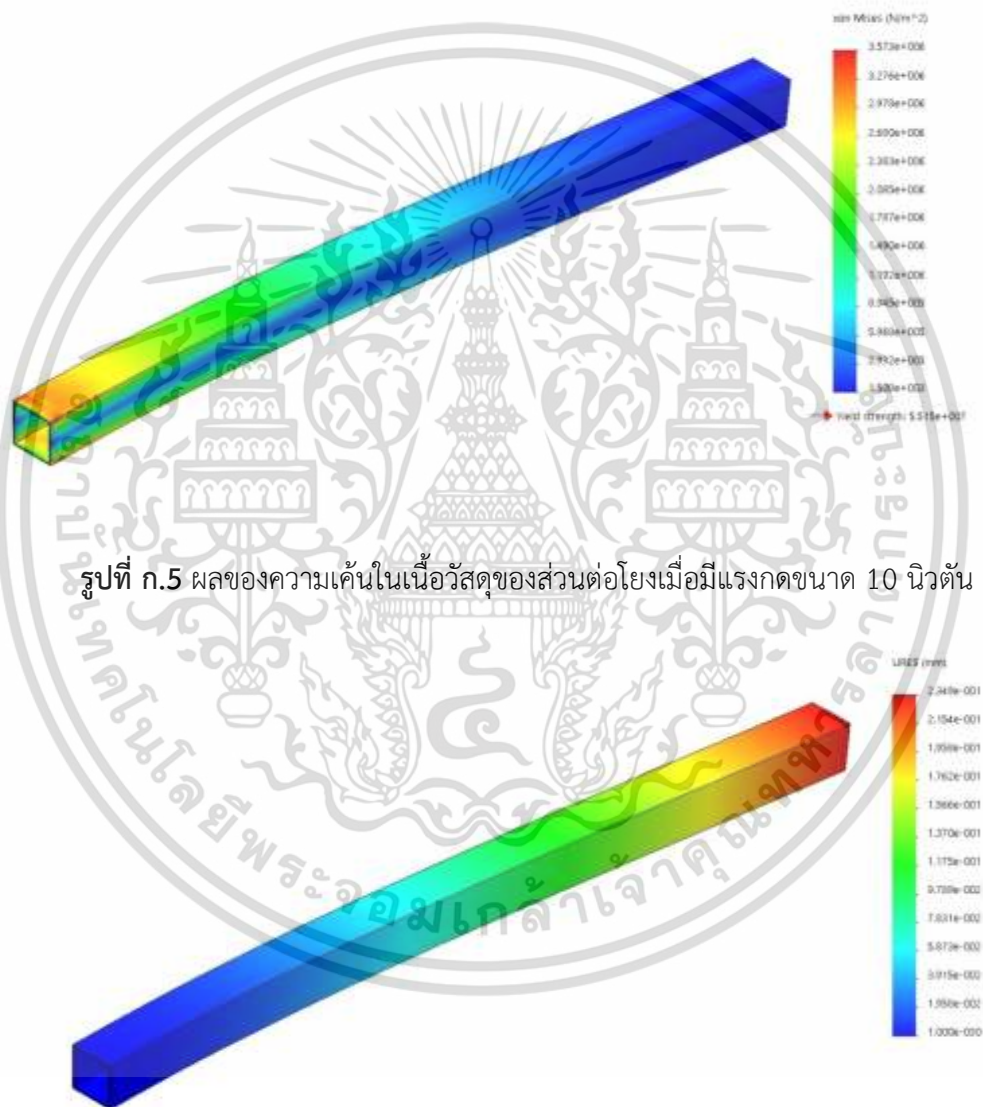


รูปที่ ก.4 ผลของระยะขจัดของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงกดขนาด 1 นิวตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 การจำลองความแข็งแรงเมื่อมีแรงกดขนาด 10 นิวตัน

เมื่อชิ้นส่วนต่อโยงมีแรงกดขนาด 10 นิวตันมากระทำ โดยกำหนดจุดตรึงอยู่ที่ผิวหน้าตัดของส่วนต่อโยง ผลการจำลองแยกออกเป็นสองส่วนคือ ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงแสดงในรูป ก.5 และระยะขจัดที่ส่วนต่อโยงเปลี่ยนแปลงไปแสดงในรูป ก.6



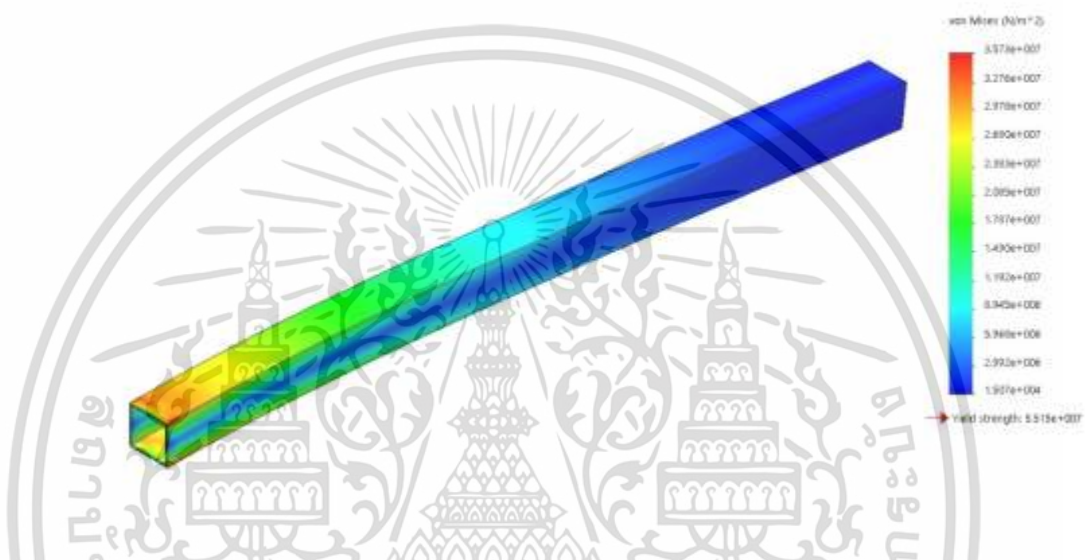
รูปที่ ก.5 ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงกดขนาด 10 นิวตัน

รูปที่ ก.6 ผลของระยะขจัดของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงกดขนาด 10 นิวตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 การจำลองความแข็งแรงเมื่อมีแรงกดขนาด 100 นิวตัน

เมื่อขึ้นส่วนต่อโยงมีแรงกดขนาด 100 นิวตันมากระทำ โดยกำหนดจุดตั้งอยู่ที่ผิวหน้าตัดของส่วนต่อโยง ผลการจำลองแยกออกเป็นสองส่วนคือ ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงแสดงในรูป ก.7 และระยะขจัดที่ส่วนต่อโยงเปลี่ยนแปลงไปแสดงในรูป ก.8



รูปที่ ก.7 ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงกดขนาด 100 นิวตัน



รูปที่ ก.8 ผลของระยะขจัดของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงกดขนาด 100 นิวตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.4 การจำลองความแข็งแรงเมื่อมีแรงดึงขนาด 1 นิวตัน

เมื่อขึ้นส่วนต่อโยงมีแรงดึงขนาด 1 นิวตันมากระทำ โดยกำหนดจุดตรึงอยู่ที่ผิวหน้าตัดของส่วนต่อโยง ผลการจำลองแยกออกเป็นสองส่วนคือ ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงแสดงในรูป ก.9 และระยะขจัดที่ส่วนต่อโยงเปลี่ยนแปลงไปแสดงในรูป ก.10



รูปที่ ก.9 ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงดึงขนาด 1 นิวตัน

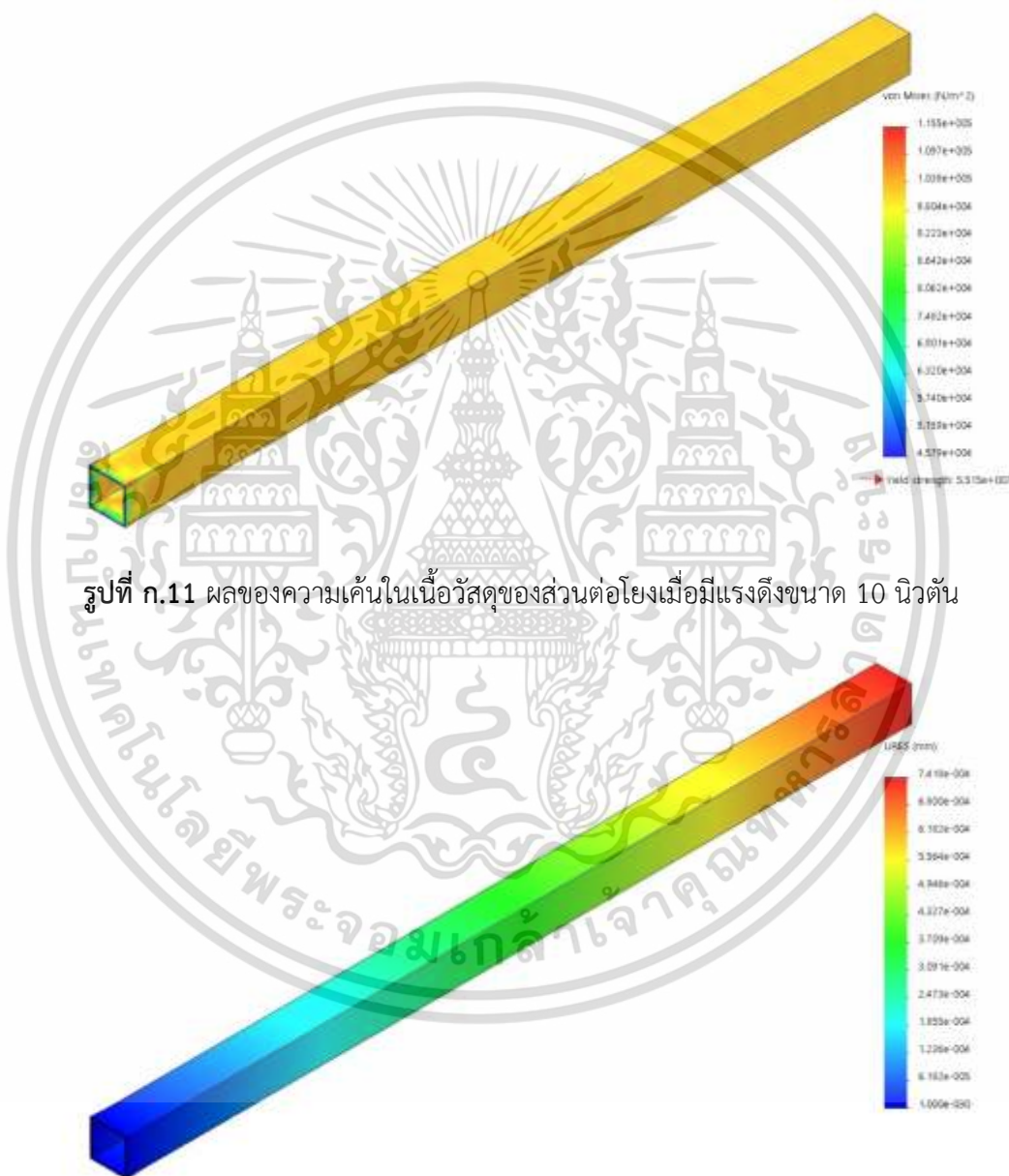


รูปที่ ก.10 ผลของระยะขจัดของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงดึงขนาด 1 นิวตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.5 การจำลองความแข็งแรงเมื่อมีแรงดึงขนาด 10 นิวตัน

เมื่อขึ้นส่วนต่อโยงมีแรงดึงขนาด 10 นิวตันมากระทำ โดยกำหนดจุดตรึงอยู่ที่ผิวหน้าตัดของส่วนต่อโยง ผลการจำลองแยกออกเป็นสองส่วนคือ ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงแสดงในรูป ก. 11 และระยะขจัดที่ส่วนต่อโยงเปลี่ยนแปลงไปแสดงในรูป ก.12



รูปที่ ก.11 ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงดึงขนาด 10 นิวตัน

รูปที่ ก.12 ผลของระยะขจัดของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงดึงขนาด 10 นิวตัน

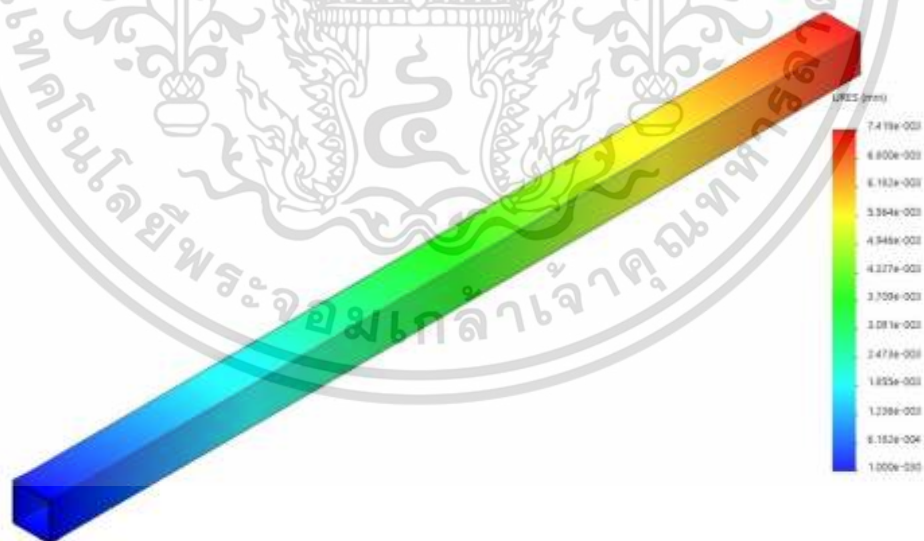
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.6 การจำลองความแข็งแรงเมื่อมีแรงดึงขนาด 100 นิวตัน

เมื่อชิ้นส่วนต่อโยงมีแรงดึงขนาด 100 นิวตันมากระทำ โดยกำหนดจุดตรึงอยู่ที่ผิวหน้าตัดของ ส่วนต่อโยง ผลการจำลองแยกออกเป็นสองส่วนคือ ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงแสดงในรูป ก.13 และระยะขจัดที่ส่วนต่อโยงเปลี่ยนแปลงไปแสดงในรูป ก.14



รูปที่ ก.13 ผลของความเค้นในเนื้อวัสดุของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงดึงขนาด 100 นิวตัน



รูปที่ ก.14 ผลของระยะขจัดของส่วนต่อโยงเมื่อมีแรงดึงขนาด 100 นิวตัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากหัวข้อ ก.1 จนถึงหัวข้อ ก.6 เป็นการแสดงผลการจำลองความแข็งแรงของวัสดุอลูมิเนียม 6061 เมื่อมีแรงต่างๆมากระทำ โดยแบ่งแรงออกเป็นแรงกด ที่กระทำ ณ ตำแหน่งด้านบนของชิ้นส่วนต่อโยง และ แรงดึงที่กระทำ ณ ผิวหน้าตัดของชิ้นส่วนต่อโยง ทั้งนี้การจำลองความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ และการจำลองการเคลื่อนตัวของวัสดุ มีความจำเป็นต่อการออกแบบโครงสร้างของแขนกลอัตโนมัติ ในด้านการพิจารณา ความแข็งแรง และภาระสูงสุดที่แขนกลรับได้ โดยไม่เกิดความเสียหายขึ้นกับแขนกล หัวข้อต่อไปเป็นการสรุปผลของการจำลองความแข็งแรง

ก.7 ผลการจำลองความแข็งแรง

ผลของการจำลองความแข็งแรงของส่วนต่อโยงแสดงในตารางที่ ก.2 โดยแยกประเภทและขนาดของแรงที่มากระทำกับส่วนต่อโยง

ตารางที่ ก.2 ผลของการจำลองความแข็งแรงของวัสดุ

ประเภทของแรง	ขนาดของแรง	ความเค้นที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ		หน่วย	ระยะเคลื่อนตัวของวัสดุ		หน่วย
		ความเค้นต่ำสุด	ความเค้นสูงสุด		ระยะเคลื่อนตัวต่ำสุด	ระยะเคลื่อนตัวสูงสุด	
แรงกด	1 N	0	3.573×10^5	N/m ²	0	2.349×10^{-2}	mm.
	10 N	0	3.573×10^6	N/m ²	0	2.349×10^{-1}	mm.
	100 N	0	3.573×10^7	N/m ²	0	2.349	mm.
แรงดึง	1 N	0	1.038×10^4	N/m ²	0	7.418×10^{-5}	mm.
	10 N	0	1.038×10^5	N/m ²	0	7.418×10^{-4}	mm.
	100 N	0	1.038×10^6	N/m ²	0	7.418×10^{-3}	mm.

จากตารางที่ ก.2 เมื่อออกแรงกด 100 นิวตัน ที่ส่วนปลายของส่วนต่อโยงจะทำให้เกิดความเค้นขึ้น กระจายสู่เนื้อวัสดุที่เป็นอลูมิเนียม 6061 โดยความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 3.573×10^7 นิวตันต่อตารางเมตร ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้สำหรับวัสดุอลูมิเนียม 6061 เพราะยังไม่เกินค่าความแข็งแรงที่จุดครากซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.51×10^7 นิวตันต่อตารางเมตร (ตารางที่ 4.1) ที่จะทำให้อลูมิเนียมเกิดความเสียหายขึ้นในเนื้อวัสดุ และด้วยแรงกดขนาด 100 นิวตัน ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของวัสดุสูงสุดอยู่ที่ 2.349 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า โครงสร้างของส่วนต่อโยงที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมมีความ

หนา 1 มิลลิเมตรนั้น สามารถนำมาสร้างเป็นส่วนต่อโยงของแกนกล่อ่นตัวได้ และสามารถรับแรงได้ถึง 100 นิวตันก่อนจะถึงจุดครากของวัสดุ

ในภาคผนวกบทต่อไปจะเป็นการกล่าวถึงการคำนวณต้นทุนจากค่าใช้จ่ายในการสร้างหรือจัดหาแกนกล (initial fixed-cost) และค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน (operation cost) ซึ่งพบว่าลดลงจากการเปลี่ยนรูปแบบวัสดุและโครงสร้างแกนกลแบบดั้งเดิมมาเป็นแกนกล่อ่นตัวแบบขนาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การคำนวณต้นทุนรวมจากการใช้แขนกลอัตโนมัติ

ในบทนี้เป็นการแสดงการคำนวณหาต้นทุนที่ลดลงของการเปลี่ยนมาใช้แขนกลอัตโนมัติแทนแขนกลแบบเชิงเกียร์ จากที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 เรื่องข้อดีของการใช้แขนกลอัตโนมัติที่ได้ออกแบบมาในงานวิจัยฉบับนี้ การคำนวณต้นทุนแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อย ดังนี้

ข.1 ต้นทุนจากการสร้างหรือจัดหา (Initial fixed-cost)

จากการเปรียบเทียบขนาดและกำลังของมอเตอร์ไฟฟ้าระหว่างแขนกล PUMA 560 ซึ่งเป็นแขนกลแบบอนุกรมที่ใช้วัสดุเชิงเกียร์เป็นโครงสร้างหลัก กับ แขนกลอัตโนมัติแบบขนานที่ผ่านการออกแบบในงานวิจัยฉบับนี้ สร้างจากวัสดุที่เป็นอลูมิเนียม ผลการเปรียบเทียบเป็นดังนี้

ขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ในแขนกล PUMA 560 คือมอเตอร์ขนาด 100 W 48 VDC ซึ่งมีราคาเฉลี่ยที่ 9,000 บาทต่อมอเตอร์ 1 ตัว (อ้างอิงราคาจาก Maxon motor เดือนกรกฎาคม 2558) และราคาของเกียร์ 10 ต่อ 1 ที่จำเป็นในการทดรอบเพื่อเพิ่มแรงบิดให้เพียงพอต่อการใช้งาน ราคา 2,000 บาท

สรุปต้นทุนมอเตอร์ของแขนกลแบบดั้งเดิมมีค่าเท่ากับ

$$9,000 + 2,000 = 11,000 \text{ บาท}$$

เปรียบเทียบแขนกลด้วยองศาอิสระเท่ากับ 3 หมายถึงใช้มอเตอร์ไปกับแขนกล 3 ตัว

$$11,000 \times 3 = 33,000 \text{ บาท}$$

ทั้งนี้ยังไม่รวมค่าขนส่งที่เกิดขึ้นจากการขนส่งมอเตอร์ ซึ่งแปรผันตรงกับขนาดของมอเตอร์เช่นกัน

ขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ในแขนกลอัตโนมัติ คือมอเตอร์ขนาด 15 W 24 VDC ซึ่งมีราคาเฉลี่ยอยู่ที่ 4,500 บาทต่อมอเตอร์ 1 ตัว (อ้างอิงราคาจาก Maxon motor เดือนกรกฎาคม 2558) และราคาของเกียร์ 10 ต่อ 1 ที่จำเป็นในการทดรอบเพื่อเพิ่มแรงบิดให้เพียงพอต่อการใช้งาน ราคา 2,000 บาท

สรุปต้นทุนมอเตอร์ของแขนกลแบบดั้งเดิมมีค่าเท่ากับ

$$4,500 + 2,000 = 6,500 \text{ บาท}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบแกนกลด้วยองศาอิสระเท่ากับ 3 หมายถึงใช้มอเตอร์ไปกับแกนกล 3 ตัว

$$6,500 \times 3 = 19,500 \text{ บาท}$$

ทั้งนี้ยังไม่รวมค่าขนส่งที่เกิดขึ้นจากการขนส่งมอเตอร์ ซึ่งแปรผันตรงกับขนาดของมอเตอร์เช่นกัน

ดังนั้นต้นทุนในการสร้าง (เฉพาะมอเตอร์) ลดลงไปเท่ากับ

$$33,000 - 19,500 = 13,500 \text{ บาท}$$

คิดเป็น 40.90% ของต้นทุนแกนกลแบบดั้งเดิม

สรุปการลดขนาดกำลังของมอเตอร์ลงเนื่องจากความต้องการใช้กำลังของแกนกลลดลง เนื่องจากใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา สามารถช่วยลดต้นทุนในการสร้างแกนกล หรือจัดหาแกนกลได้ อย่างมีนัยสำคัญ

ข.2 การลดค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงาน (operation cost)

ในทุกขณะที่มอเตอร์ของแกนกลทำงาน กำลังไฟฟ้าจะถูกใช้ไปเพื่อทำให้มอเตอร์ขับเคลื่อนส่วนต่อโยงให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการ แน่นอนว่ามอเตอร์ที่ใช้กำลังไฟฟ้ามักยอมมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่มากกว่ามอเตอร์ที่ใช้กำลังไฟฟ้าน้อยกว่า และจากข้อมูลเรื่องกำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ในแกนกล PUMA 560 จากบทที่ 4 สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในการใช้งานหุ่นยนต์ต่อเนื่อง 1 ปีได้ดังนี้ กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ในแกนกลแบบดั้งเดิมมีค่าเท่ากับ 100 W ดังนั้นในแกนกลที่มีองศาอิสระเท่ากับ 3 ใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ

$$100 \text{ W} \times 3 = 300 \text{ W}$$

ในแต่ละวันแกนกล 1 แกนทำงาน 24 ชั่วโมง คิดเป็น

$$0.3 \text{ kW} \times 24 \text{ Hr} = 7.2 \text{ kW-hr}$$

แกนกลทำงานต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1 ปี

$$7.2 \text{ kW-hr} \times 365 = 2,628 \text{ kW-hr}$$

กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ในแกนกลอ่อนตัวมีค่าเท่ากับ 15 W ดังนั้นในแกนกลที่มีองศาอิสระเท่ากับ 3 ใช้กำลังไฟฟ้าเท่ากับ

$$15 \text{ W} \times 3 = 45 \text{ W}$$

ในแต่ละวันแขนกล 1 แขนทำงาน 24 ชั่วโมง คิดเป็น

$$0.045 \text{ kW} \times 24 \text{ Hr} = 1.08 \text{ kW-hr}$$

แขนกลทำงานต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 1 ปี

$$1.08 \text{ kW-hr} \times 365 = 394.2 \text{ kW-hr}$$

สรุปการลดขนาดกำลังของมอเตอร์ลงเนื่องจากความต้องการใช้กำลังของแขนกลลดลง เนื่องจากใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา สามารถช่วยลดต้นทุนในการดำเนินงานได้อย่างมีนัยสำคัญ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายณัฐพล ผลเจริญพงศ์
วัน เดือน ปีเกิด 13 กุมภาพันธ์ 2529
ที่อยู่ 121/54 ถนนติวานนท์ ตำบลปากเกร็ด อำเภอปากเกร็ด
จังหวัดนนทบุรี 11120 โทรศัพท์ 02-584-0865
ประวัติการศึกษา 2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) ระบบแมคคาทรอนิกส์
2.) การออกหุ่นยนต์และกลไก
3.) ไมโครคอนโทรลเลอร์ และระบบฝังตัว (embedded system)



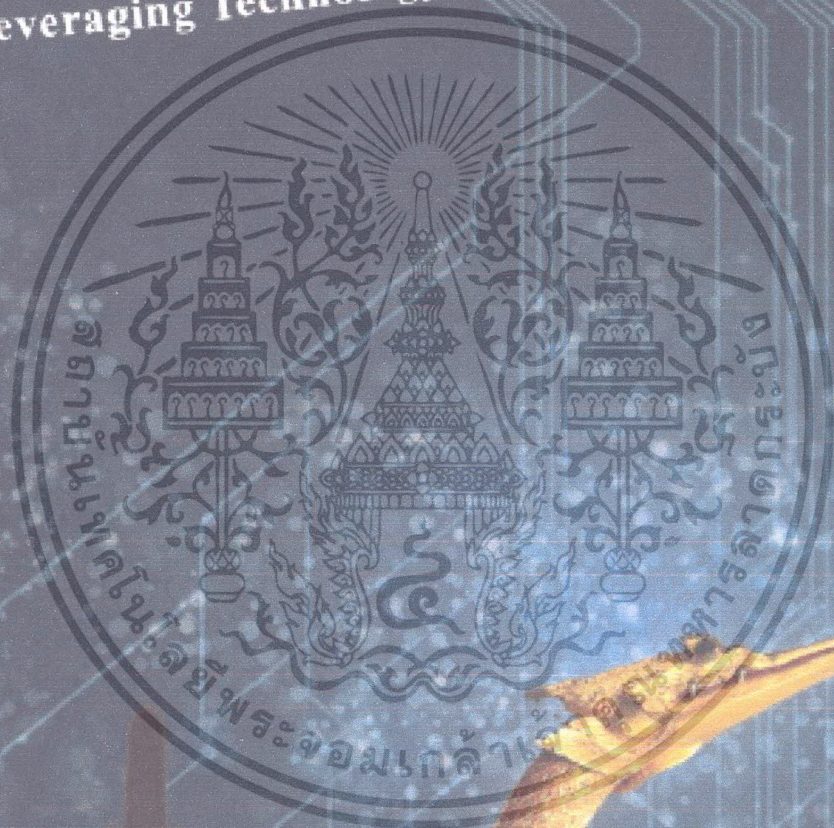
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



IEEE TENCON-2014 Bangkok, Thailand

22 - 25 October 2014

Leveraging Technology for a Better Tomorrow



IEEE TENCON-2014, Bangkok, Thailand, 22 - 25 October 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Communication Network Structure for Robotic Manipulators

Uttapon Poncharernpong, Sunchanan Charanyananda, Youtthana Silakam, Kitdakorn Klomkarn, Pitikhate Sooraksa
Faculty of Engineering, King Mongkut Institute of Technology Lardkrabang (KMITL)
Bangkok, Thailand 10520

Abstract— This article presents the design and implementation of communication networks for robotic manipulator. The aim of this work is to investigate a suitable pattern for communication network structure. The designed network can be used under disaster environment through a group of information-communication robots.

Keywords— *Wireless Network, Robot Network Topologies, Disaster*

I. INTRODUCTION

Our civilization has been moved to the world of digital and information technology. World-Wide-Web has changed the way we work, which is currently World-Wide-Work. Robotics and other multi-disciplinary technologies also change academia and industry, which makes possible by combining the internet, WIFI, ad-hoc networks, and any communication physical and protocol with the electro-mechatronic bases [1-10]. Today work is not the same as twenty years ago in lieu of advanced in communication. Engineers can work in New York and control a robot in Bangkok. Although today technologies may provide solution to easier work in various aspects, but there are still a gap of technology between the developed countries and the developing ones. To bridge the gap of the development, it is better for Thailand to initialize research of merging robotic engineering, information and communication technology, which is a part of motivation in this work.

This paper describes a brief investigation on selection of various pattern of network architecture under the field tests. In-house robots built by the authors are used in the experiment. Four types of robots are assigned for each communication node providing a real physical environment. The robot manipulators are used for installation of communication system, which imbedded in the manipulator or the robot arm inside the robot in the lotus shape. Four types of robots in used are as follows:

- Chongko Alpha (CK- α) is a robot assigned as Node 1 shown in Figure 1. An arm of this robot is employed to hold an antenna under test. The robot height is 3 m and the arm length can be extended to 2 m. With plenty of working space around the CK-Alpha, we have free choices to locate communication circuits, which may be equipped at the end-effector of the manipulator during performing tests.
- Chongko Beta (CK- β) is a robot used for Node 2 shown in Figure 2. This robot has a lotus shape installed on the roof of Dean Building at KMITL. The shape of the robot is a sky-lotus.

- Chongko Gamma (CK- γ) is a robot used for Node 3 as shown in Figure 3. The robot has a lotus shape equipped with two solar cell panels floating in the pool at KMITL.
- Chongko Delta (CK- δ) is a mobile robot assigned as Node 3 operating on the floor.



Fig. 1 Chongko Alpha used for Node 1.



Fig. 2 Chongko Beta used for Node 2.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

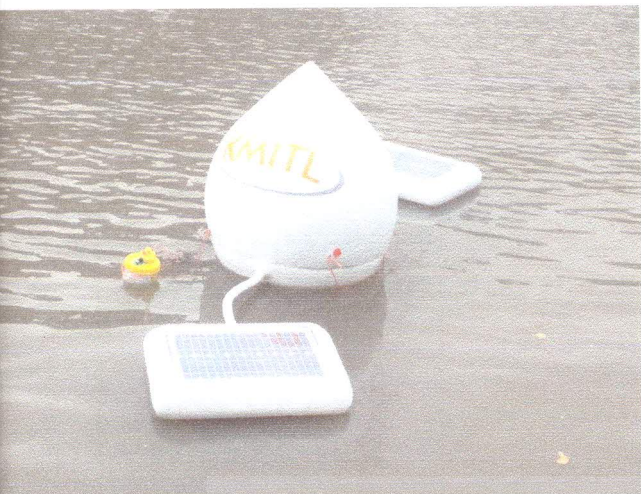


Fig. 3 Chongko Gamma used for Node 3.



Fig. 4 Chongko Delta used for Node 4.

Test 3 involves a file transmission using the *ping* command from Node 1 to Node 4 using a sequential pattern. The intermodal distance is variable and the packet size is fixed at 65,500 bytes. The results are in milliseconds. The communication pattern is shown in Fig. 5.

Test 4 involves a file transmission using the *ping* command from Node 1 to Node 4 using a star pattern. The intermodal distance is variable and the packet size is fixed at 65,500 bytes. The results are in milliseconds. The communication pattern is shown in Fig. 6.

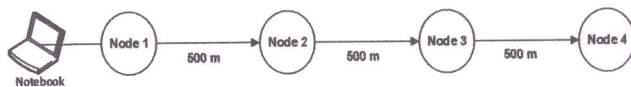


Fig. 5. Robotic communication network pattern for multi-hop ping from Node 1 to Node 4.

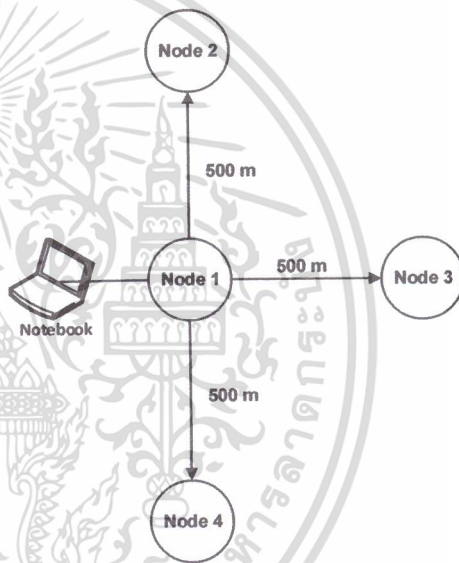


Fig. 6. Single-hop ping from Node 1 to Node 4 with a star topology.

II. TESTING PATTERN AND EXPERIMENTAL DESIGN

To initialize the working platform, four basic tests are conducted. The tests are designed as follows:

Test 1 involves a file transmission using the *ping* command from Node 1 to Node 2. The intermodal distance is variable and the packet size is fixed at 32,750 bytes. The results are in milliseconds.

Test 2 involves a file transmission using the *ping* command from Node 1 to Node 2. The intermodal distance is variable and the packet size is fixed at 500 bytes. The results are in milliseconds.

III. EXPERIMENTAL RESULTS

Tables 1-4 show experimental results of the field tests using tests designed in Section II. The *ping* command is represent a package of control instruction to the robot destination. For the field test of the transmitter performance, the *ping* command was used to test the network connectivity (units in milliseconds). The single-hop signal range was measured to have a radius of 1 km. The 65,500-byte ping packet was received without any packet loss at a range of 500 meters.

Tables 3-4 illustrate the presence of other external factors out of our experimental control such as terrain obstacles such

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cars, trees and other radio-frequency interference (RFI) nearby that could have affected the ping delay.

10	500	65500	240
----	-----	-------	-----

TABLE 1 TEST RESULTS FOR EXPERIMENT 1.

Trial	Packet Size (bytes)	Distance (meters)	Time (ms)
1	32750	100	27
2	32750	200	33
3	32750	300	61
4	32750	400	81
5	32750	500	105
6	32750	600	133
7	32750	700	260
8	32750	800	413
9	32750	900	702
10	32750	1000	998

TABLE 2 TEST RESULTS FOR EXPERIMENT 2.

Trial	Packet Size (bytes)	Distance (meters)	Time (ms)
1	500	6550	112
2	500	13100	129
3	500	19650	135
4	500	26200	124
5	500	32750	140
6	500	39300	155
7	500	45850	170
8	500	52400	190
9	500	58950	210

TABLE 3 TEST RESULTS FOR EXPERIMENT 3.

Node	Packet Size (bytes)	Distance (meters)	Time (ms)
1 to 2	65500	500	233
1 to 3	65500	1000	336
1 to 4	65500	1500	552

TABLE 4 TEST RESULTS FOR EXPERIMENT 4.

Node	Packet Size (bytes)	Distance (meters)	Time (ms)
1 to 2	65500	500	222
2 to 3	65500	500	246
3 to 4	65500	500	215

IV. CONCLUSION

Patterns of communication networks for robotic system are designed, assigned, and tested using an in-house robotic group of four. As physics implied the star topology provides better results than the sequential one due to its minimum package delay. The inverse square law for strength of the signals is also governed by reducing power of the control packet from node to node. It is recommended to conduct further investigation on this similar type robotic communication network for a complex system.

Acknowledgment

This work is fully supported by National Research Council of Thailand (NRCT) and Innovation Fund of Faculty of Engineering, KMITL, for the year 2012-2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

References

- [1] J. Sun, X. Zhu, C. Zhang and Y. Fang, "RescueMe: Location-Based Secure and Dependable VANETs for Disaster Rescue," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, March 2011.
- [2] C.E. Perkins, E.M. Royer, and S.R. Das, "Performance Comparison of Two On-demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks", In Proceedings of the IEEE Infocom, pp.3-12. Israel : Tel Aviv, March 2000.
- [3] T. Larsson and N. Hedman, "Routing Protocols in Wireless Ad-hoc Networks, A Simulation Study," Master's thesis in Computer Science and Engineering, Lulea University of Technology, Stockholm, 1998.
- [4] H. Lundgren, E. Nordstrom, and C. Tschudin, "Coping with Communication Gray Zones in IEEE 802.11b based Ad hoc Networks," Department of Information Technology, Uppsala University, September 2002.
- [5] H. Lundgren, D. Lundberg, J. Nielsen, E. Nordstrom and C. Tschudin, "A Large-scale Testbed for Reproducible Ad hoc Protocol Evaluations," In Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC02), March 2002.
- [6] D. Lundberg, "Ad hoc Protocol Evaluation and Experience of Real World Ad Hoc Networking," Department of Information Technology, Uppsala University, 2002.
- [7] NTT Docomo, "The Inspection of the Damage of the NTT Docomo System and the Recovery Plan of the Total System and its Real Record of the Recovery Process in East Japan Great Disaster," July 19, 2011.
- [8] Shoichi Noguchi, "The Design Principle of the Robust Communication System under the Great Disaster Environment," IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2012), March 26, 2012.
- [9] M. Ceccarelli and V.A. Glazunov, "Advances on Theory and Practice of Robots and Manipulators" In Proceedings of Romansy 2014 XX CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators (Mechanisms and Machine Science), June, 2014
- [10] R.R. Murphy, Disaster Robotics (Intelligent Robotics and Autonomous Agents series), The MIT Press, March, 2014



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้