สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

นารายณ์: แขนกลอวตารสำหรับใช้งานส่วนบุคคล

NARAI: Novel Artful Robotic Arms for Individuals

นายปิติเขต สู้รักษา

นายกฤดากร กล่อมการ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

RdH
ป 6/5 ม
2556

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 137800
วัน เดือน ปี 6 ส.ค. 2558

.b. 12699676
.i.....

เอกสารนี้ถือเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ชงโคโกอินเตอร์:นวัตกรรมหุ่นยนต์กระเป๋าลากเลื่อน
แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน
ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 1,388,000.00 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ต .ค. 2555 ถึง 30 ก.ย. 2556
ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด
นายปีติเขต สู้รักษา ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
นายกฤดากร กล่อมการ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเป้าในการพัฒนาต้นแบบแขนกลส่วนบุคคลเพื่อสวมใส่ใช้งานขยายความสามารถของมนุษย์ในการทำงานยามที่ต้องปฏิบัติหน้าที่เพียงลำพัง งานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีการออกแบบเพื่อเสริมความแข็งแรงของแขนด้วยโครงสร้างชิ้นส่วนโยงใยอันตะแบบขนาน โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ทั้งจลนศาสตร์และพลศาสตร์ด้วยสมการลากรานจ์ รวมทั้งวิเคราะห์วัสดุและการซับแรงด้วยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์อันนำไปสู่การสร้างจริง ผลการทดลองสวมใส่แขนกลอวตารที่สร้างขึ้นพบว่าได้ตามจุดประสงค์เชิงวิศวกรรมแต่ยังมีส่วนที่ต้องปรับปรุงในเรื่องรูปแบบความงามอันเป็นงานสถาปัตยกรรมการออกแบบเพื่อให้เกิดความสวยงามต่อผู้ใช้อันเป็นหัวข้องานในอนาคต

คำสำคัญ : แขนกล หุ่นยนต์ นวัตกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: NARAI: Novel Artful Robotic Arms for Individuals

Researcher: Pitikhate Sooraksa and Kitdakorn Klomkarn

Faculty: Engineering **Department:** Computer Engineering

ABSTRACT

This research aims to develop a prototype of personal robot arms put on a human body. In working alone, human capability can be extended by the arms. This research methodology first focus on designing to assembly strong element structure in parallel platform. Beginning with kinematics and dynamic model using Lagrange's equation, following by analysis and computer simulation of material and force arrangement, the experiment on the prototype reveals satisfactory results in engineering sense. Yet, in sense of aesthetics, the robot arms needs to redesign, which is a good topic in the future.

Keywords : robot arm , robot, innovation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เกิดขึ้นได้เพราะความร่วมมือระหว่างนักวิจัย ผู้ช่วยนักวิจัยและนักศึกษาปริญญาเอกดังนี้คือ นายสุวิไล อารีจิตต์และนายภูมิยศ พยัคฆวรรณ ในงานสร้างแขนกล การปรับแต่ง การทดสอบและช่วยจัดการงานทั่วไป นายอนุรักษ์ จันทร์ศรี ในด้านช่วยเขียนโปรแกรมการควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ นายพิเชษฐ์ คุณากรวงศ์ ช่วยงานการสร้างและติดตั้งระบบเชิงกล นายอรรถพล กัณหาเวก ช่วยงานด้านอัลกอริธึมการเคลื่อนไหว ร่วมกับนักศึกษาปริญญาโทนายยุทธนา ศิลาคำ ช่วยงานด้านโปรโตคอลหุ่นยนต์ นายณัฐพล ผลเจริญพงศ์ ช่วยงานในการออกแบบโครงสร้างแขนกลและดูแลการเชื่อมต่อซอฟท์แวร์คอมพิวเตอร์กับฮาร์ดแวร์ รวมทั้งช่วยเหลืองานทั่วไป

"การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน โดยสภาวิจัยแห่งชาติ (วช.)ที่จัดสรรให้กับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556"

นายปิติเขต สู้รักษา
นายกฤดากร กล่อมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VI

สารบัญภาพ VII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ภูมิหลัง 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 5

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 5

1.4 กรอบแนวคิดของโครงการวิธีวิจัย 5

1.5 แผนการดำเนินงานโครงการวิจัย 6

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์ 5

2.1 บทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 7

2.2 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 11

บทที่ 3 หลักการออกแบบ 14

3.1 แบบจำลองจลนศาสตร์ (Kinematic Model) ของแขนกล 15

3.2 แบบจำลองจลนศาสตร์ (Dynamic Model) ของแขนกล 20

บทที่ 4 ผลการวิจัยและผลกระทบ 24

4.1 การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ 24

4.2 ผลการทดสอบ 40

4.3 การประดิษฐ์ 49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 50

5.1 บทสรุป 50

5.2 ข้อเสนอแนะ 52

เอกสารอ้างอิง 55

ภาคผนวก 59

ประวัตินักวิจัย 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 แผนงานและกิจกรรมที่ปฏิบัติได้จริง 6

4.1 คุณสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมหมายเลข 6061 25

4.2 คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนต่อโยงเมื่อมีความยาวต่างๆ 26

4.3 ค่าตัวแปรสำคัญที่ได้จากการออกแบบและวิเคราะห์ 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แนวคิดการขยายสมรรถนะในการปฏิบัติงานเพิ่มพลังและขยายขีดจำกัดมนุษย์	2
1.2 แนวคิดศักยภาพการประยุกต์แขนกลอวตารทางด้านการทหาร	2
1.3 แนวคิดการประยุกต์แขนกลอวตารสำหรับทางด้านการแพทย์และเวชศาสตร์ฟื้นฟู	3
1.4 การประยุกต์แขนกลอวตารสำหรับผู้พิการไร้ขา สามารถใช้แขนช่วยเดินแทนขาได้	3
1.5 ตัวอย่างการประยุกต์แขนกลอวตารกับ "ชีวิตประจำวัน"	4
1.6 กรอบแนวคิดทฤษฎีอันเป็นแนวทางสู่กิจกรรมการออกแบบและสร้าง	5
2.1 แขนกล KMOS 24 แขน	5
2.2 เอกสารอ้างสิทธิในคำร้องขอ US Patent เกี่ยวกับแขนกลของบริษัท Apple	11
2.3 แนวคิดหีบห่อแปลงร่างของบริษัท Apple	12
2.4 หน้าแรกของสิทธิบัตรแขนกล US2013/0174683	13
3.1 แขนกลแบบผสมที่ใช้กลไกต่อโยงเชื่อมแบบขนาน	14
4.1 อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน หมายเลข 6061	24
4.2 ลักษณะและขนาดของส่วนต่อโยงที่ออกแบบ	25
4.3 รูปร่างเอลิเมนต์สามมิติ แบบสามเหลี่ยมสี่หน้า สิบจุดต่อ	26
4.4 จำนวนจุดตัดและเอลิเมนต์ทั้งหมดในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่อโยง	27
4.5 จุดตรึงอ้างอิงที่ใช้ในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนต่อโยง	27
4.6 จุดรับภาระในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนต่อโยง	28
4.7 ค่าความเค้นที่จุดต่างๆเมื่อชิ้นส่วนต่อโยงได้รับแรงแนวตั้ง	28
4.8 ค่าความเคลื่อนตัวที่จุดต่างๆเมื่อชิ้นส่วนต่อโยงได้รับแรงแนวตั้ง	29
4.9 จุดรับแรงดึงในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนต่อโยง	30
4.10 ค่าความเค้นที่จุดต่างๆเมื่อชิ้นส่วนต่อโยงได้รับแรงดึง	31
4.11 ค่าความเคลื่อนตัวที่จุดต่างๆเมื่อชิ้นส่วนต่อโยงได้รับแรงดึง	32
4.12 ตลับลูกปืนที่ใช้ในการประกอบ	33
4.13 การประกอบตลับลูกปืนเข้ากับชิ้นส่วนต่อโยง	33
4.14 แกนเพลาที่ใช้ในการประกอบ	34
4.15 แหวนล็อคชนิดอี	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.16 การประกอบชิ้นส่วนต่อโยงเข้าด้วยกัน 35

4.17 จำนวนจุดตัดและเอลิเมนต์ทั้งหมดในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแกนเพลา 35

4.18 จุดตรึงอ้างอิงที่ใช้ในการวิเคราะห์แกนเพลา 36

4.19 จุดรับเฉือนในการวิเคราะห์แกนเพลา 36

4.20 ค่าความเค้นที่จุดต่างๆเมื่อแกนเพลาได้รับแรงเฉือน 37

4.21 ค่าความเคลื่อนตัวที่จุดต่างๆเมื่อแกนเพลาได้รับแรงเฉือน 38

4.22 ภาพรวมของแขนกลแบบผสมจากการออกแบบ 39

4.23 ความสัมพันธ์ของมุม q_3 เทียบกับมุม q_1 และ q_2 40

4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของมุม q_4 เทียบกับมุม q1 และ q2 41

4.25 ความสัมพันธ์ของมุม q_3 เทียบกับมุม q_1 โดยตรึงมุมq_2 ที่ 90 องศา 42

4.26 ความสัมพันธ์ของมุม q_3 เทียบกับมุม q_2 โดยตรึงมุมq_1 ที่ 90 องศา 42

4.27 ความสัมพันธ์ของมุม q_4 เทียบกับมุม q_1 โดยตรึงมุมq_2 ที่ 90 องศา 43

4.28 ความสัมพันธ์ของมุม q_4 เทียบกับมุม q_2 โดยตรึงมุมq_1 ที่ 90 องศา 43

4.29 ความสัมพันธ์ของแรงบิด (T1) ในภาวะสมดุล 44

4.30 ความสัมพันธ์ของแรงบิด (T2) ในภาวะสมดุล 45

4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด T_1 และมุมต่างๆ เมื่อชิ้นส่วนมีความเร็ว 10 องศาต่อวินาที 46

4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด T_2 และมุมต่างๆ เมื่อชิ้นส่วนมีความเร็ว 10 องศาต่อวินาที 47

4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด T_1 และมุมต่างๆ เมื่อชิ้นส่วนมีความเร็ว 50 องศาต่อวินาที 48

4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด T_2 และมุมต่างๆ เมื่อชิ้นส่วนมีความเร็ว 50 องศาต่อวินาที 48

4.35 การประยุกต์ช่วยเพิ่มแรงในการยกของ 49

4.36 ทดสอบการใช้งานตามแนวคิดภาพที่ 1.5 49

5.1 โปสเตอร์จัดแสดงในงานวัน INNOVATION DAY 51

5.2 แขนกลอวตารสอดใส้ไปในกระเป๋าเดินทางที่นำเสนอในงาน INNOVATION DAY 52

5.3 แนวคิดต่อยอดแขนกลอวตารในรูปหุ่นยนต์แปลงเคลื่อนที่ 53

5.4 แนวคิดต่อยอดแขนกลอวตารในรูปแบบมนุษย์แปลงคล้ายไอรอนแมน 54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ในบทนำนี้กล่าวถึงภาพรวมของโครงการโดยเริ่มจากภูมิหลัง วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตการวิจัยและวิธีดำเนินการวิจัย สำหรับโครงร่างในการนำเสนอในรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์นี้โปรดดูจากสารบัญ เพื่อที่จะได้ไม่ซ้ำซ้อนในเนื้อหาและเพื่อความกระชับของการนำเสนอซึ่งมีทั้งหมด 6 หมดด้วยกัน

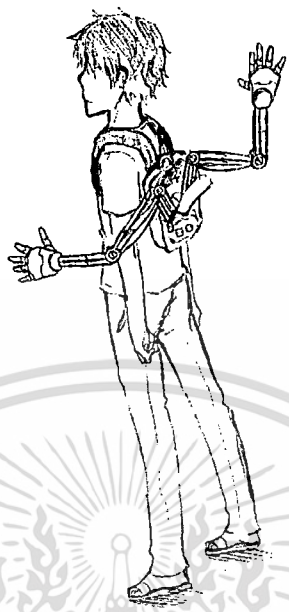
เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่มุ่งเน้นวิชาการควบคู่ไปกับงานประดิษฐ์ การออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างแขนจะอยู่ในช่วงบทที่ 3-4 ในขณะที่บทที่ 5 เป็นการนำเสนอผลการทดลองความแม่นตรงของระบบเซอร์โวที่ใช้โดยเสนอผลการประดิษฐ์ในตอนท้ายของบท สำหรับในบทนำมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ภูมิหลัง

"แขนกลอวตาร" เป็นแขนกลอเนกประสงค์ที่สามารถพกพาได้สะดวกไปได้ทุกที่และเป็นของใช้ส่วนตัวที่ช่วยอำนวยความสะดวกและเพิ่มสมรรถนะส่วนบุคคล ด้วยการขยายข้อจำกัดของการเข้าถึงปริภูมิ (Space) รอบตัว ดังแสดงในภาพที่ 1.1 แขนกลดังกล่าวซึ่งสามารถบูรณาการเข้ากับกระเป๋าสะพายหลัง ทำให้ "มนุษย์" ขยายขีดจำกัดทางชีวภาพโดยเลียนลักษณ์องค์มหาเทพ "นารายณ์" ซึ่งมีสี่กรอันซึ่งสามารถถือของได้สี่สิ่งคือ สังข์ จักร ตี และคทา ซึ่งเมื่อบุคคลใดได้สวมใส่กระเป๋าสะพายหลังที่บูรณาการกับแขนกลอเนกประสงค์ บุคคลผู้นั้น ย่อมสามารถถือของหรือเครื่องมือได้สี่สิ่งพร้อม ๆ กันดุจดังเป็นแขนทีประทานมาจากองค์นารายณ์ จึงขนานนามดังข้างต้นว่า "แขนกลอวตาร" ซึ่งพ้องกับชื่อย่อของโครงการในภาษาอังกฤษ คือ "**N**ovel **A**rtful **R**obotic **A**rms for **I**ndividuals" หรือย่ออักษรคำหน้าได้เป็น "NARAI"

ด้วยความสามารถดังกล่าวนี้ นวัตกรรมแขนกลชนิดใหม่นี้ จึงมีคุณเอนกประสงค์นานาประการซึ่งอาจสามารถประยุกต์ใช้ได้ในสาขาต่าง ๆ อาทิ ทางด้านการทหารดังภาพที่ 1.2 โดยทหารสามารถเชื่อมยุทโธปกรณ์เสริมสมรรถนะการยิงป้องกันตัวและขีดความสามารถของต่อสู้ ส่วนศักยภาพการประยุกต์แขนกลดังกล่าวสำหรับทางด้านการแพทย์ อันรวมถึงแนวความคิดการประยุกต์ด้านการสังคมสงเคราะห์และการบำบัดฟื้นฟูผู้ป่วยและช่วยผู้พิการทางแขนดังภาพที่ 1.3 เพื่อให้ผู้พิการไร้แขนสามารถช่วยตัวเองได้ เช่นช่วยป้อนอาหาร หรือในภาพที่ 1.4 เป็นแนวคิดความเป็นไปได้ในการประยุกต์โดยใช้แขนกลอวตารแทนขาในการเดิน เป็นต้น

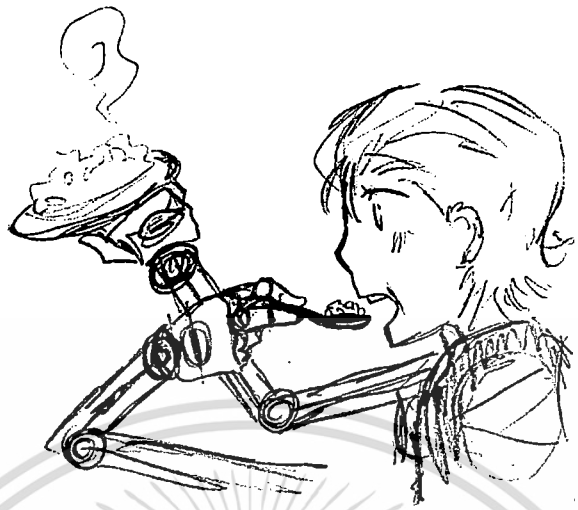
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 1.1 แนวคิดการขยายสมรรถนะในการปฏิบัติงานเพิ่มพลังและขยายขีดจำกัดมนุษย์

ภาพที่ 1.2 แนวคิดศักยภาพการประยุกต์แขนกลอวตารทางด้านการทหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

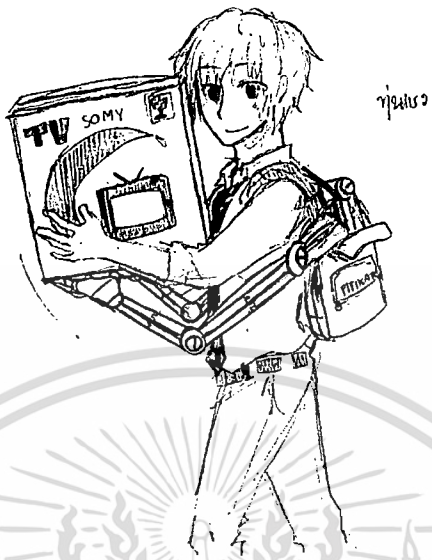


ภาพที่ 1.3 แนวคิดการประยุกต์แขนกลอวตารสำหรับทางด้านการแพทย์และเวชศาสตร์ฟื้นฟู

ภาพที่ 1.4 การประยุกต์แขนกลอวตารสำหรับผู้พิการไร้ขา สามารถใช้แขนช่วยเดินแทนขาได้

นอกจากนี้ แขนกลอวตาร อาจได้รับความนิยม เป็นส่วนหนึ่งในอุปกรณ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวันโดยสามารถช่วยเสริมพลังกล้ามเนื้อให้สามารถก้าวข้ามขีดจำกัดการใช้แรงยกสิ่งของได้ซึ่งจะมีคุณูปการต่อการดำเนินชีวิตประจำวันของชนทุกอาชีพในการใช้งานที่ต้องใช้แรงกล้ามเนื้อแขนเป็นองค์ประกอบ ดังแสดงในภาพที่ 1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 1.5 ตัวอย่างการประยุกต์แขนกลอวตารกับ “ชีวิตประจำวัน”

อนึ่ง อาจกล่าวได้ว่าแขนกลอวตาร คือมิติ ใหม่ของปรากฏการณ์ทางสังคม ที่อาจเป็นการถือกำเนิดแนวคิด “หุ่นยนต์ส่วนบุคคล” (Personal Robot) หรือ PR เช่นเดียวกับปรากฏการณ์การเกิด “คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล” (Personal Computer) หรือ PC และด้วยแนวคิดนี้ จึงเป็นเหตุจำเป็นเร่งด่วนที่ประเทศไทยเราต้องมี “ความกล้าเชิงนวัตกรรม” เพื่อเข้าไป “ดักหน้า” และปรับตัวล่วงหน้าประเทศอาเซียน ที่ประเทศสมาชิกกำลังสั่งสมศักยภาพเชิงเทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์นวัตกรรม เพื่อครอบครองตลาดอันมีอำนาจต่อรองขนาดใหญ่และกำลังเปิดพรมแดนการค้าเสรีอย่างเต็มรูปแบบในปี พ.ศ.2558 ที่กำลังจะถึงนี้

อนึ่ง องค์ “พระบิดาแห่งการประดิษฐ์ไทย” หรือองค์พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวอันเป็นที่รักยิ่งของเรานั้น ดังเป็นที่ทราบกันดีในพระอิสริยสอันขจรขจายว่าพระองค์ทรงเป็นพระมหากษัตริย์องค์ที่ ๙ แห่ง “ราชวงศ์จักรี” ซึ่งคำว่า “จักรี” มาจาก “จักรและตรี” อันเป็นเทพอาวุธแห่งองค์พระนารายณ์ นอกจากนี้พระราชลัญจกรประจำพระองค์มีส่วนที่เป็นรอบวงจักรมีรัศมีเปล่งออกโดยรอบ ด้วยสัญลักษณ์อันเป็นมงคลและด้วยพระบรมเดชานุภาพ ของบุคลาธิษฐานอันเกี่ยวเนื่องด้วยพระบารมีและพระอัจฉริยภาพทางด้านการประดิษฐ์ จึงเป็นมงคลยิ่งที่จะฉวายแขนกลอวตารภายใต้โครงการนี้เป็นสัญลักษณ์เทอดพระเกียรติแด่องค์พระบิดาแห่งการประดิษฐ์ไทยและการประดิษฐ์โลก โดยจะจัดแสดงเผยแพร่องค์ความรู้ที่ได้ในวันนักประดิษฐ์โลก เพื่อกระตุ้นให้เยาวชนไทยเกิดแรงบันดาลใจแห่งการประดิษฐ์คิดค้นตามรอยเบื้องพระยุคลบาท โดยถือเป็นวัตถุประสงค์หนึ่งของโครงการวิจัยนี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1). ออกแบบและสร้างแขนกลเอนกประสงค์ส่วนบุคคลที่สามารถพกพาใช้งานได้ทุกที่

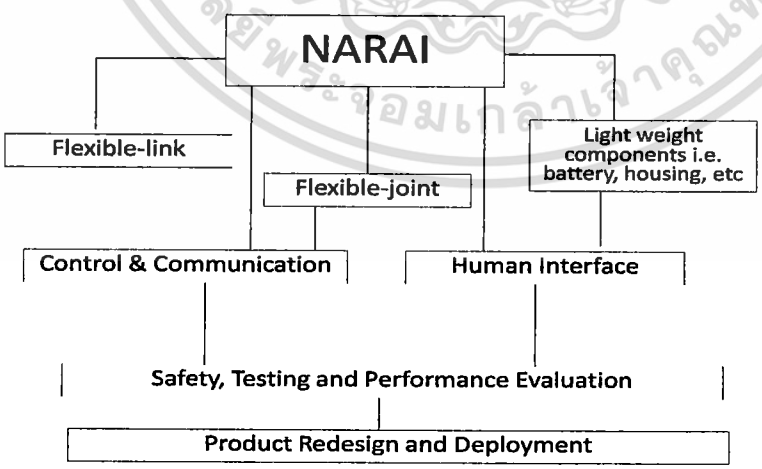
2). จัดแสดงแขนกลเอนกประสงค์ส่วนบุคคลที่ได้ในข้อ 1). ภายใต้แนวคิด "แขนกลนารายณ์อวตารเฉลิมพระเกียรติ" ในวันนักประดิษฐ์โลก เพื่อเป็นการเทอดพระเกียรติองค์พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวแก่ประชาชนทั่วไปและสื่อมวลชน ในฐานะที่พระองค์เป็น "พระบิดาแห่งการประดิษฐ์ไทย" อีกทั้งเพื่อเผยแพร่องค์ความรู้และกระตุ้นเยาวชนให้เกิดแรงบันดาลใจสู่จิตวิญญาณแห่งการประดิษฐ์คิดค้นตามรอยยุคลบาท

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ สร้าง แขนกลเอนกประสงค์พกพาเคลื่อนที่ส่วนบุคคล ทั้งนี้ไม่รวมความเป็นหุ่นยนต์ทั้งตัวและมิใช่หุ่นยนต์เลียนแบบมนุษย์ (Humanoid robot) โดยการทำงานของแขนกลเอนกประสงค์เป็นแบบกึ่งอัตโนมัติเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน เพราะเนื่องจากบริเวณปฏิบัติการ (workspace) นั้น อยู่ในบริเวณสัมผัสใกล้ในเขตรัศมีลำตัวมนุษย์ (Radius of operation)

1.4 กรอบแนวความคิดของโครงการวิจัย

เนื่องจาก แขนกลเอนกประสงค์ชนิดพกพาดังกล่าวอยู่ติดกับลำตัวมนุษย์ดังนั้นวัสดุที่ใช้ประกอบส่วนทั้งระบบองค์รวมจะต้องมีน้ำหนักเบา จึงมีสมมติฐานว่าวัสดุและอุปกรณ์องค์ประกอบแขนกลดังกล่าวที่มีน้ำหนักเบานั้นจะต้องมีความเหนียว เบา และยืดหยุ่น เพราะต้องทั้งรับน้ำหนักและต้องแข็งแรง ซึ่งตรงกับชนิดการศึกษาทฤษฎีและการประยุกต์ของแขนกลอ่อนตัว (Flexible-link robot arm) และข้อต่อต่าง ๆจะต้องมีการอ่อนตัว (Flexible joint) กรอบแนวคิดอันเป็นแนวทางศึกษาจะดำเนินการโดยอาศัยภาพที่ 1.6 เป็นแนวทาง



ภาพที่ 1.6 กรอบแนวคิดทฤษฎีอันเป็นแนวทางสู่กิจกรรมการออกแบบและสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 แผนการดำเนินงานโครงการวิจัย

แผนการดำเนินงานโครงการวิจัยนี้แสดงในตาราง 1.1 โดยเปรียบเทียบแผนงานที่วางไว้ซึ่งแสดงโดยสัญลักษณ์ ⟷ โดยกิจกรรมที่ปฏิบัติได้จริงใช้สัญลักษณ์ *

ตาราง 1.1 แผนงานและกิจกรรมที่ปฏิบัติได้จริง

กิจกรรม	เดือนที่											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ขั้นการสืบค้นเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Review Literatures)	* ⟷	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
2. สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ควบคู่ไปกับการสร้างฮาร์ดแวร์	* ⟷	*	*	*	*	*	*					
3. ออกแบบ เขียนซอฟท์แวร์และจำลองผลในข้อที่ 2 ด้วยคอมพิวเตอร์ และทดลองสร้างวงจรอิเลคทรอนิคส์สื่อสารควบคุม รวมทั้งทดสอบวัสดุประกอบต้นแบบ		* ⟷	*	*	*	*	*	*				
4. จัดทำรายงานความก้าวหน้ากลางปี						* ⟷						
5. วิเคราะห์ระบบการทำงาน						* ⟷	*	*				
6. ทดลองใช้งานและปรับแต่ง					* ⟷	*	*	*	*	*	* ⟷	*
7. สร้างต้นแบบสุดท้าย										* ⟷	*	*
8. เขียนรายงานประจำปีและจัดอบรมเผยแพร่ความรู้											* ⟷	*

ในบทที่ 1 หรือบทนำนี้กล่าวถึงภาพรวมของงานวิจัย ซึ่งยังไม่ได้ครอบคลุมการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทที่ 2 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
วรรณกรรมปริทัศน์

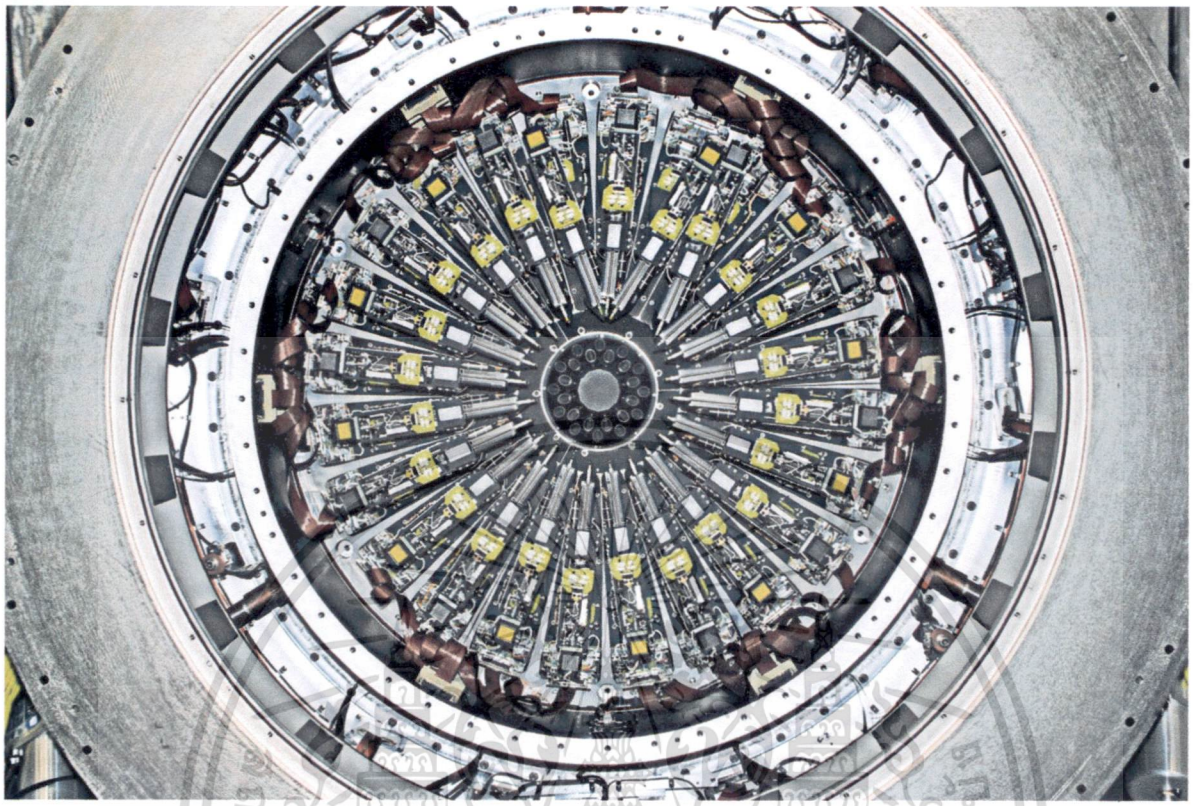
จากกรอบแนวความคิดของโครงการในหัวข้อ 1.4 ในบทที่แล้ว จะเห็นได้ว่าปัจจัยสำคัญอันเป็นแนวทางในการศึกษาสร้างแขนกลพกพาเอนกประสงค์ซึ่งสามารถสะพายหลังหรือเป็นแขนกลส่วนบุคคล โดยแนวทางดังกล่าวจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบามาสร้างเป็นองค์ประกอบของแขนกล ดังนั้นในบทนี้จะแสดงวรรณกรรมปริทัศน์สองส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้าง โดยหาช่องว่างที่ไม่ซ้ำรูปแบบกับงานวิจัยหรือสิทธิบัตรเดิมที่มีอยู่ ดังนั้น ในหัวข้อ 2.1 จะแสดงวรรณกรรมส่วนที่เป็นบทความ และหัวข้อ 2.2 จะเป็นส่วนของสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ดังจะเห็นได้จากบทที่ 1 ว่าแขนกลพกพาอเนกประสงค์ตามแบบแนวคิดที่กล่าวไว้ในบทที่ผ่านมาแล้วนั้นเป็นแขนกลประเภทสองแขนสวมใส่ต่ออวัยวะเป็นสี่แขน เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการสร้างก่อนที่จะเข้าสู่เนื้อหาของแขนกลพกพาอเนกประสงค์ ลองพิจารณานวัตกรรมแขนกลล่าสุด 24 แขนในภาพที่ 2.1 อันเป็นแขนกลที่สร้างขึ้นโดย Oxford และภาคีร่วมเพื่อได้นำไปติดตั้ง ณ หอดูดาว ประเทศ Chile ซึ่งแขนกลทั้ง 24 นี้ปลายแขนติดแผ่นทองคำทำหน้าที่รวบรวมสัญญาณย่านใกล้รังสีความร้อน (NIR) เพื่อรวบรวมมาประมวลผลสัญญาณแสงจากกาแลกซีที่อยู่ห่างไกลพร้อมกันถึง 24 กาแลกซี โดยลำแขนกลเหล่านี้แช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำกว่า -200 องศาเซลเซียส [1-2] จัดเป็นแขนกล นี่คือแขนกลที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีล่าสุดจากความร่วมมือหลายสถาบันการศึกษาชั้นนำของยุโรป อย่างไรก็ตาม รูปแบบ 24 แขนนั้นไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในแขนกลอวตารในงานนี้เนื่องจากมีแขนมากเกินความจำเป็นในการประยุกต์กับชีวิตประจำกันเพราะเพียงแขนแค่ 10 แขนเท่าทศกัณฐ์ก็มาเกินพอแล้ว

อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าหนึ่งในการใช้แขนกลในงานสำรวจดวงดาวและอวกาศนั้นเป็นหนึ่งในหัวข้อวิจัยที่มีการค้นคว้ากันอย่างต่อเนื่อง[3] ด้วยเทคโนโลยีที่ประเทศโลกที่หนึ่งได้ลงทุนค้นคว้ามาระดับหนึ่งจึงเป็นปัจจัยเอื้อต่อการต่อยอดองค์ความรู้ งานวิจัยนี้จึงใช้ผลของการค้นคว้าแขนกลที่ใช้ในงานอวกาศที่มีลักษณะเบาซึ่งเหมาะกับงานที่ต้องการเนื่องจากต้องพกพา ดังนั้นวัสดุที่ใช้ประกอบส่วนทั้งระบบองค์รวมจะต้องมีน้ำหนักเบา จึงมีสมมติฐานว่าวัสดุและอุปกรณ์องค์ประกอบโครงสร้างดังกล่าวที่มีน้ำหนักเบานั้นจะต้องมีความเหนียว เบา และยืดหยุ่น เพราะต้องทั้งรับน้ำหนักและต้องแข็งแรง ซึ่งตรงกับชนิดการศึกษาทฤษฎีและการประยุกต์ของแขนกลอ่อนตัว (Flexible-link robot arm) และข้อต่อต่าง ๆ จะต้องมีการอ่อนตัว (Flexible joint)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 แขนกล KMOS 24 แขน

แขนกลอวตารในงานนี้จึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบามาสร้างเป็นองค์ประกอบของโครงสร้าง ซึ่งจัดเป็นประเภทแขนหุ่นยนต์อ่อนตัว (flexible robot am) ซึ่งเป็นแขนที่ทำจากวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง เช่น อลูมิเนียม (Al) พลาสติก หรือ ไฟเบอร์ (fiber) เป็นต้น แขนหุ่นยนต์ชนิดนี้ ได้รับความสนใจจากบรรดานักวิทยาศาสตร์ วิศวกร และ นักวิจัยทั่วโลก มาเป็นเวลากว่าศตวรรษ [3-12] ทั้งนี้เพราะ แขนชนิดนี้มีข้อดีกว่าแขนแบบดั้งเดิมที่ทำด้วยเหล็ก เช่น มีน้ำหนักเบากว่า ต้องการมอเตอร์ขับเคลื่อนขนาดเล็กกว่า ใช้พลังงานน้อยกว่า ราคาประหยัดกว่า อย่างไรก็ตามข้อด้อยของแขนกลอ่อนตัวก็คือขณะปฏิบัติงานจะเกิดการสั่น ซึ่งอาจมีผลต่อการใช้บางประเภทที่ต้องการความแม่นยำและความละเอียดสูง เช่น งานประกอบชิ้นส่วนอิเลคทรอนิกส์ระดับมินิ หรือ ไมโครสเกล ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่ท้าทายและมีประโยชน์ที่จะแก้ปัญหาเรื่องลดการสั่นของแขนกลแบบอ่อนตัวขณะปฏิบัติงาน ซึ่งผู้วิจัยได้เคยแก้ไขปัญหานี้สำเร็จมาแล้วในกรณีของแขนกลอ่อนตัวข้อต่อเดียวโดยใช้กระบวนการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบฟัซซี (Fuzzy Control) [9] แต่แขนกลอ่อนตัวข้อต่อเดียวไม่เหมาะสมกับการใช้งานบางประเภทที่ต้องใช้การเคลื่อนที่คล้ายกับการยืดหรือหดของแขนมนุษย์ ซึ่งมีสองข้อต่อใหญ่ คือจากไหล่ถึงข้อศอก และจากข้อศอกถึงข้อมือ นอกจากนี้ ประเด็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการควบคุมแขนกลข้อต่อเดียวในปัจจุบันได้มีการศึกษาครอบคลุมไปเกือบทุกประเด็นปัญหาและมีชุดการทดลองมาจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ [13] ดังนั้นแขนหุ่นยนต์อ่อนตัวสองข้อต่อจึงมีคุณลักษณะที่น่าสนใจอย่างมากในเชิงปฏิบัติการ

แต่ปัญหาประการสำคัญก็คือ การเกิดอันตรกริยาจากเคลื่อนที่ระหว่างแขนอ่อนตัวสองข้อต่อใด ๆ ที่เชื่อมชิ้นอันตะของกระเป๋าแปลงร่างในแต่ละช่วงซึ่งมีผลกระทบต่อกันและกัน การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในช่วงข้อต่อหนึ่งขณะปฏิบัติงานอาจทำให้เกิดการกระตุ้นแบบแผนของการสั่น (vibration mode) ของแขนอีกช่วงข้อต่อหนึ่ง แขนหุ่นยนต์อ่อนตัวสองข้อนี้จึงมีความซับซ้อน มีความไม่เป็นเชิงเส้น (non-linearity) และยากต่อการควบคุมมากกว่าแขนกลอ่อนตัวแบบข้อต่อเดียวมาก ในการศึกษาส่วนที่เป็นการเชื่อมต่อชิ้นอันตะของส่วนประกอบหุ่นยนต์กระเป๋าลากเลื่อนอันมีแขนหุ่นยนต์อ่อนตัวสองข้อต่อใด ๆ เป็นรูปแบบพื้นฐานนั้น จะเกี่ยวข้องกับทำงานของการสั่นและผลกระทบในแขนกลอ่อนตัวระหว่างข้อต่อสองข้อต่อใดๆ สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับแขนกลชนิดนี้ ออกแบบระบบควบคุมอัจฉริยะ (Intelligent Control System) วิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ สร้างแขนกลชนิดนี้และตัวควบคุมอัจฉริยะ (Intelligent Controller)

เมื่อเทียบงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ไปแล้วระหว่างแขนหุ่นยนต์อ่อนตัวแบบข้อต่อเดียวกับแขนหุ่นยนต์อ่อนตัวแบบสองข้อต่อหรือหลายข้อต่อ พบว่า แขนหุ่นยนต์อ่อนตัวตั้งแต่สองข้อต่อขึ้นไปยังมีผู้ทำวิจัยในสัดส่วนน้อยเมื่อเทียบกับแขนหุ่นยนต์อ่อนตัวแบบข้อต่อเดียว งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแขนหุ่นยนต์อ่อนตัวสองข้อต่อที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ในกรณีกระเป๋าแปลงร่าง ได้แก่ งานวิจัยสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อโดย Nicosia และคณะ [14] ซึ่งใช้วิธีแบบการกระจายแบบ Ritz (Ritz expansion) คล้ายกับงานวิจัยของ Park and Park [15] และการประมาณค่าแบบมิติจำกัด สำหรับการทดลองที่ยืนยันความเที่ยงตรง (validity) ของแบบจำลองนั้นเป็นการสร้างแขนกลในลักษณะเดียวกันกับงานของ Cannon and Schmitz [5] แต่เป็นการขยายการพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากแขนหุ่นยนต์จากข้อต่อเดียวเป็นสองข้อต่อ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังต้องการการวิเคราะห์รูปแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้งานวิจัยได้ครอบคลุมถึงกรณีที่ลำแขนกลมีสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นอีกด้วย

งานวิจัยของ Yang และคณะ [16] ได้กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองกระสวนการสั่นของแขนหุ่นยนต์อ่อนตัวหลายข้อ (multi-link flexible robot arms) และแต่ละข้อต่อใช้วิธีควบคุมแบบ Proportional-Derivative (PD) โดยมีการควบคุมแต่ละข้อต่อแบบเป็นอิสระต่อกัน แม้ว่าจำมีการสร้างแบบจำลองตามกระสวนการสั่นในรูปเมตริกซ์ที่ลดรูปเหลือเพียง 2x2 เมตริกซ์ แต่การบรรยายเพียงสองหน้าไม่อาจครอบคลุมถึงรายละเอียดทั้งหมดที่มี โดยอาศัยความในวรรณกรรมปริทัศน์นี้จึงเป็นเพียงแค่แนวทางในการดำเนินการแบบย่อเท่านั้น

Luca และ Siciliano [17] ใช้วิธีแบบ Lagrangian สร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแขนกลอ่อนตัวหลายข้อต่อแบบแขนบางตามโดยอาศัยทฤษฎีคานของ Euler-Bernoulli โดยตั้งสมมติฐานการสั่นเพียงสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบแผน (two vibration modes) ในแต่ละข้อต่อ งานวิจัยนี้ให้ตัวอย่างของแบบจำลองของแขนกลอ่อนตัวสองข้อต่อโดยสมมติเงื่อนไขขอบเขตแบบมวลคานกระนาบ (clamped-mass boundary conditions) โดยอาศัยแนวทางจากงานวิจัย [5,18,19,20] อย่างไรก็ตามแบบจำลองยังไม่ครอบคลุมในกรณีที่มีการหน่วง (damping effects)

ในงานวิจัยของ Yazdizadeh และคณะ [21] ได้ใช้วิธีการระบุแบบจำลองระบบ (system identification) โดยวิธีการ Adaptive Time Delay Neural Network [22] ซึ่งเป็นระบบ MIMO (Muliti-Input Multi-Output) ของระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น กับแขนหุ่นยนต์อ่อนตัวสองข้อต่อ วิธีการนี้ให้ผลดีโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยการสอนแบบ Off-line training อย่างไรก็ตาม ในวิธีการตามบทความดังกล่าวข้างต้นยังไม่ได้มีการสร้างจริง เป็นเพียงการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์เท่านั้น

ในส่วนการควบคุมแขนกลอ่อนตัวได้มีผู้ออกแบบและทำวิจัยแขนกลอ่อนตัวไว้หลายประเภทด้วยกัน อาจมีถึงร้อยกว่ารูปแบบที่ใช้ได้ ตัวอย่างเช่น การควบคุมแบบฟัซซี [9] แบบ Input/command shaping [23] การควบคุมแบบ H_2 optimal control [24] การควบคุมแบบปรับตัวได้ (adaptive control) [25] การควบคุมแบบ singular perturbation [26] แบบ Quaddratic d-Stability [27] และแบบ input preshaping เป็นต้น อย่างไรก็ตาม เมื่อคำนึงถึงการสร้างเทคโนโลยีของประเทศแบบที่สามารพึ่งพาตนเองได้ งานวิจัย ดังกล่าวข้างต้นและที่มีอีกมากที่ยังไม่ได้กล่าวถึง จึงเป็นเพียงแหล่งความรู้ที่ดี (knowledge resources) แต่ยังไม่ใช่การรู้วิธีการ (know-how) งานวิจัยนี้ จึงมุ่งสร้างทั้งองค์ความรู้และวิธีการทำตามแบบที่ผู้วิจัยและคณะมีความถนัด โดยอาศัยแนวทางตามระเบียบวิธีวิจัยดังแผนผังในหัวข้อต่อไป

อนึ่ง จะเห็นได้ว่าแขนกลทำนองดังกล่าวมีการศึกษามานานแล้ว ซึ่งส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในอวกาศ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาเหมาะแก่การขนส่ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จะนำแขนกลอ่อนตัวมาทำเป็นแขนกลพับได้ในกระเป๋าสะพายหลังเพื่อนำไปใช้ในทุกแห่ง จึงเป็นอุปกรณ์ส่วนบุคคลการเข้าถึงความเป็นเจ้าของหรือการแสดงตนในสิทธิการครอบครองและควบคุมมีความสำคัญยิ่ง ดังนั้นผู้วิจัยจะนำรหัสลับอลวน (chaotic signal) สำหรับการพิสูจน์ตนซึ่งเป็นสิทธิบัตรของคณะวิจัย [28] และเป็นเทคโนโลยีที่ได้จากการวิจัยโดยอาศัยทุนอุดหนุนวิจัยจาก วช. อันเป็นงบประมาณแผ่นดิน ปี 2553-2554 ในการเข้ารหัสลับพหุสื่อมาใช้ควบคุมหุ่นยนต์ชงโค ซึ่งจะทำให้ระบบมีการแสดงตนหรือแสดงบุคคลที่เป็นเจ้าของกล่าวคือ ผู้มิใช่เจ้าของมิอาจใช้สิทธิควบคุมหุ่นยนต์นี้ได้ ซึ่งจะปลอดภัยในกรณีประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการรักษาความปลอดภัยต่างๆ นอกจากนี้ ในการทดสอบความคงทนจะใช้การยิงสัญญาณอลวนไปรบกวนบริเวณทำงานของหุ่นยนต์โดยอาศัยสมการอลวนแบบ Chua ดังแสดงใน [29] อนึ่ง "แขนกลนารายณ์อวตาร" ยังสามารถรวมเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาพลศาสตร์แบบไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์เชิงกล โดยใช้ร่วมกับบล๊อกสร้าง

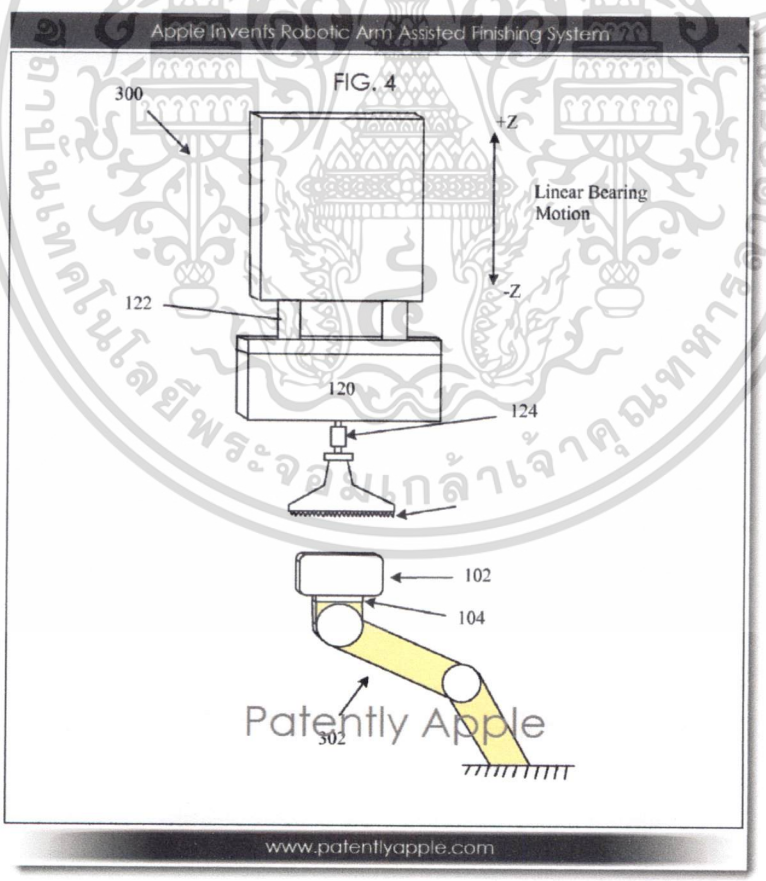
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณอลวนเอนกประสงค์ที่ผู้วิจัยเป็นผู้นำเสนอใน [30] ได้อีกด้วย ดังจะได้กล่าวถึงการออกแบบและสร้างซึ่งนำเสนอการสร้างในบทต่อไป

2.2 สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

ในหัวข้อ 2.1 เป็นการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาเชิงพลศาสตร์และโครงสร้างทางด้านระบบควบคุมของหุ่นยนต์ ทว่า ไม่ได้ครอบคลุมถึงสิทธิบัตรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องหรือเป็นแนวทางในการค้นคว้าเพื่อต่อยอดต่อไป ซึ่งจะกล่าวถึงสิทธิบัตรที่น่าสนใจพอเป็นสังเขปในหัวข้อนี้ ส่วนทฤษฎีและคู่มือการออกแบบและสร้างรวมทั้งการเลือกวัสดุที่เป็นพื้นฐานนั้นสามารถอ้างอิงได้จาก [31-34]

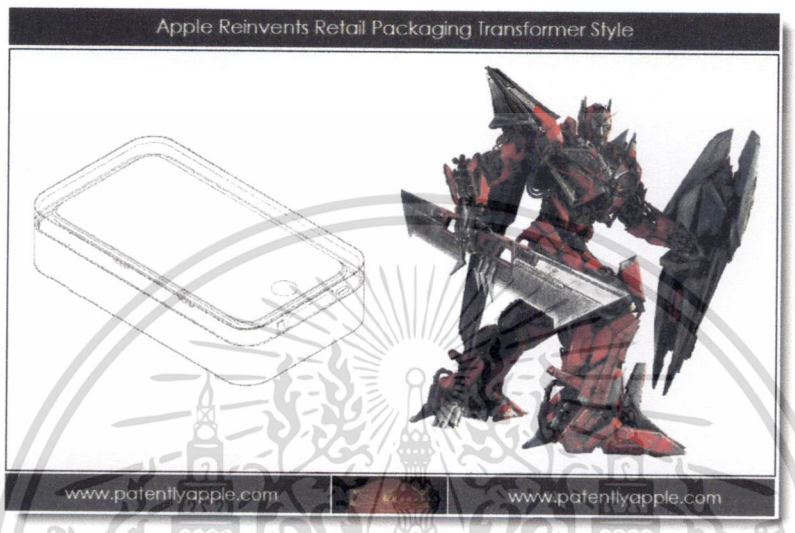
เอกสารยื่นไฟล์สิทธิบัตรในภาพที่ 2.2 เป็นเอกสารคำร้องของสิทธิบัตรแขนกลที่เชื่อมต่อหรือถือ iPhone ยื่นโดยบริษัท Apple ในเดือนมกราคม 2556 ครอบคลุมถึงการประยุกต์ไอโฟนเป็นส่วนหนึ่งของปลายแขนหุ่นยนต์ (end effector) ซึ่งในงานวิจัยนี้สามารถนำมาดัดแปลงโดยเชื่อมปลายแขนกลกับอุปกรณ์อื่นๆ ที่คล้ายสมาร์ทโฟน เช่นติดกล้องร่วมกับเครื่องมือชิ้นอื่น



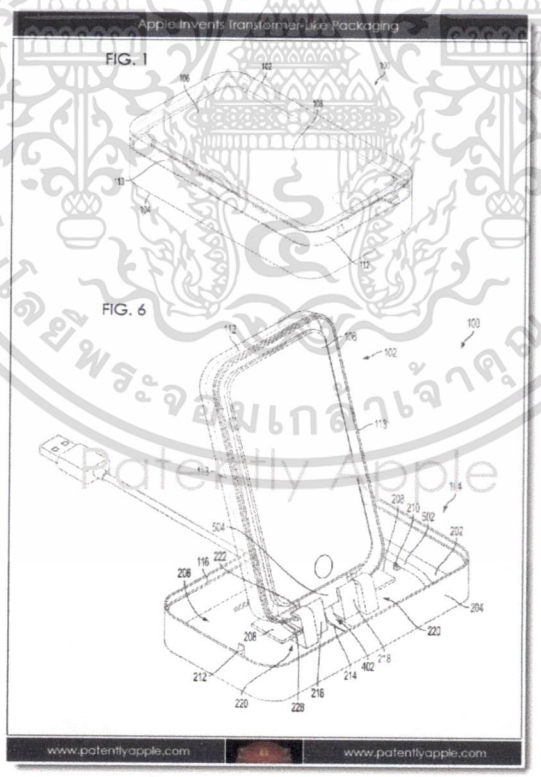
ภาพที่ 2.2 เอกสารอ้างสิทธิในคำร้องขอ US Patent เกี่ยวกับแขนกลของบริษัท Apple

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารยื่นขอรับสิทธิคุ้มครองสิทธิบัตร USPTO อีกชิ้นที่น่าสนใจของบริษัท Apple ที่ยื่นไปเมื่อเดือนพฤษภาคม 2555 ก็คือ แนวคิดของการแปลงรูปหีบห่อในภาพที่ 2.3 โดยหีบห่อสามารถแปลงร่างเสมือนกับหุ่นยนต์แปลงรูป [36] ซึ่งสามารถนำมาดัดแปลงแนวคิดกระเป๋าสะพายหลังของแขนกลนารายณ์อวตารได้



(ก) สังกัป

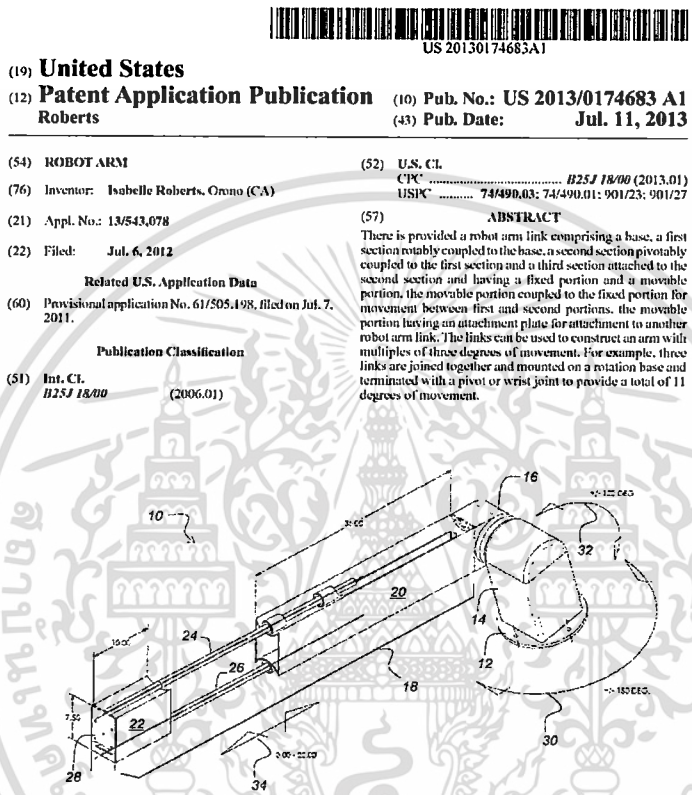


(ข) ส่วนหนึ่งของเอกสารยื่นขอจดสิทธิบัตร

ภาพที่ 2.3 แนวคิดหีบห่อแปลงร่างของบริษัท Apple

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวคิดล่าสุดของแขนกลที่เพิ่งได้สิทธิบัตร USPatent ซึ่งเพิ่งออกสิทธิบัตรฉบับที่ US2013/0174683 ในภาพที่ 2.4 ผู้ประดิษฐ์คือ Roberts ชาวอเมริกัน สิทธิบัตรนี้อ้างถึงความใหม่ของแขนกลโดยอ้างสิทธิการเคลื่อนที่ของแขนกลลักษณะข้อต่อที่เชื่อมกันสามส่วนว่าสามารถเคลื่อนได้ถึง 11 องศาเสรี (degree of freedom) จากภาพจะเห็นได้ว่ามีลักษณะรูปลักษณ์คล้ายกับภาพที่ 2.1 ของแขนกล 24 แขน



US 20130174683A1

(19) **United States**

(12) **Patent Application Publication**
Roberts

(10) **Pub. No.: US 2013/0174683 A1**
(43) **Pub. Date: Jul. 11, 2013**

(54) **ROBOT ARM**

(76) Inventor: **Isabelle Roberts**, Orono (CA)

(21) Appl. No.: **13/543,078**

(22) Filed: **Jul. 6, 2012**

Related U.S. Application Data

(60) Provisional application No. 61/505,498, filed on Jul. 7, 2011.

Publication Classification

(51) **Int. Cl.**
B25J 18/00 (2006.01)

(52) **U.S. Cl.**
CPC *B25J 18/00* (2013.01)
USPC **74/490.03**; 74/490.01; 901/23; 901/27

(57) **ABSTRACT**

There is provided a robot arm link comprising a base, a first section rotably coupled to the base, a second section pivotably coupled to the first section and a third section attached to the second section and having a fixed portion and a movable portion, the movable portion coupled to the fixed portion for movement between first and second portions, the movable portion having an attachment plate for attachment to another robot arm link. The links can be used to construct an arm with multiples of three degrees of movement. For example, three links are joined together and mounted on a rotation base and terminated with a pivot or wrist joint to provide a total of 11 degrees of movement.

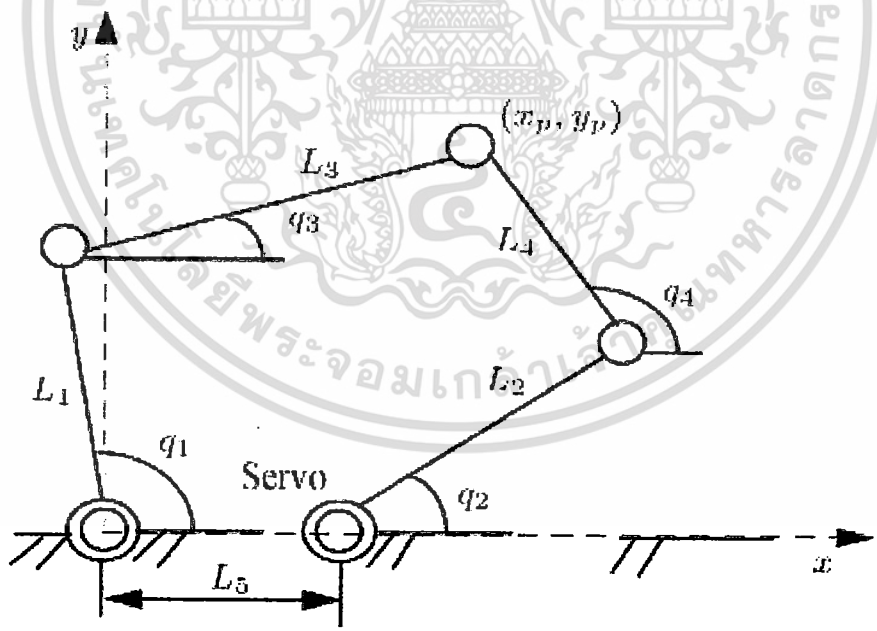
ภาพที่ 2.4 หน้าแรกของสิทธิบัตรแขนกล US2013/0174683 [37]

แม้ว่าจะมีสิทธิบัตรที่น่าสนใจอีกเป็นจำนวนมาก ทว่า ร่างสิทธิบัตรและสิทธิบัตรในภาพที่ 2.2-2.4 เป็นสิทธิบัตรที่น่าสนใจที่จะสามารถนำมาประยุกต์ได้ โดยในงานวิจัยนี้จะเปลี่ยนโครงสร้างรูปลักษณ์ให้เหมาะแก่การใช้งานไม่ซ้ำกับข้อถือสิทธิในเอกสารสิทธิดังกล่าวข้างต้น โดยจะกล่าวต่อไปในบทที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

บทนี้กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแขนกลซึ่งในที่นี้ แบ่งเป็นสองส่วนคือ หัวข้อ 3.1 กล่าวถึงแบบจำลองจลนศาสตร์ ส่วนหัวข้อ 3.2 กล่าวถึงแบบจำลองพลศาสตร์ โดยในที่นี้เนื่องจากแขนกลในโครงการนี้ออกแบบหุ้มฉนวนลดการสั่น (vibration suppression) ทำให้ขนาดแขนในแต่ละชิ้นเป็นข้อสั้นเพื่อลดความอ่อนตัวในขณะที่วัสดุที่ใช้เลือกเป็นวัสดุเบา อีกทั้งโครงสร้างออกแบบเพื่อให้เกิดความแข็งแรงโดยใช้กลไกโยงเชื่อมถึงกันของชิ้นอันตะในสถาปัตยกรรมแบบขนานในการเชื่อมจุดปลายเพื่อนำไปต่อมือจับใช้งาน ตามภาพที่ 3.1 โดยรูปแบบของกลไกนี้ มีตัวขับเร้าที่เป็นมอเตอร์กระแสตรงซึ่งอยู่ที่ฐานของระบบกลไกส่งแรงไปยังลิงค์ต่างๆเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ สำหรับการคำนวณหาแบบจำลองแบบพลศาสตร์จะใช้วิธีของลากรานจ์ซึ่งแสดงในภาคผนวก เพื่อหาสมการของการเคลื่อนที่ของกลไก ดังนั้นการคำนวณในที่นี้จะยอมให้เกิดความผิดพลาดในส่วนของการอ่อนตัวของวัสดุที่ไม่คำนึงถึงเพราะถือว่าได้ชดเชยเชิงกลโดยขนาดและโครงสร้างแล้ว อีกทั้งยังมีการชดเชยในส่วนการควบคุมซึ่งสามารถจัดการกับข้อที่ไม่คำนึงถึงในประเด็นนี้ได้



ภาพที่ 3.1 แขนกลแบบผสมที่ใช้กลไกต่อโยงเชื่อมแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ (Kinematic Model) ของแขนกล

ในการหาสมการทางจลน์ศาสตร์ สามารถเริ่มต้นพิจารณาชิ้นส่วนกลไกต่อโยงหรือวงปิดของ L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 จากภาพที่ 3.1 สมการที่เกิดจากวงปิดนี้คือ

$$L_1C_1 + L_3C_3 - L_2C_2 - L_4C_4 - L_5 = 0 \tag{3.1}$$

$$L_1S_1 + L_3S_3 - L_2S_2 - L_4S_4 = 0 \tag{3.2}$$

โดยที่ $C_i = cos(q_i)$ และ $S_i = sin(q_i)$ ซึ่งสมการ (3.1) และสมการ (3.2) จำเป็นสำหรับการคำนวณหาสมการจลนศาสตร์ของระบบ

3.1.1 การคำนวณหาความสัมพันธ์ของ q_3 และ q_4

กลไกต่อโยงตามภาพที่ 3.1 มีจำนวนองศาอิสระ (degree of freedom) เท่ากับ 2 และมีจุดร่วม (joint) 4 จุด จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า q_1 และ q_2 นั้นเป็นอิสระต่อกัน และไม่ขึ้นกับจุดร่วมอื่นเพราะเป็นมุมที่เกิดจากการขับเคลื่อนของมอเตอร์โดยตรง ส่วนอีกสองจุดร่วมที่เหลือจะขึ้นอยู่กับ q_1 และ q_2 สำหรับวัตถุประสงค์ในหัวข้อนี้คือ การหาความสัมพันธ์ของ q_3 และ q_4 ในเทอมของ q_1 และ q_2 โดยใช้สมการ (3.1) สมการ (3.2) และการคำนวณทางพีชคณิตจะได้ว่า

$$q_3 = \sin^{-1}\left(\frac{L_4^2-((L_1C_1-L_5-L_2C_2)^2+(L_1S_1-L_2S_2)^2+L_3^2)}{2L_3\sqrt{(L_1C_1-L_5-L_2C_2)^2+(L_1S_1-L_2S_2)^2}}\right) - \sin^{-1}\left(\frac{L_1S_1-L_2S_2}{\sqrt{(L_1C_1-L_5-L_2C_2)^2+(L_1S_1-L_2S_2)^2}}\right) \tag{3.3}$$

และจากการแทนค่าสมการ (3.3) ลงในสมการ (3.2) ได้

$$q_4 = \cos^{-1}\left(\frac{L_1C_1-L_5-L_2C_2+L_3C_3}{L_4}\right) \tag{3.4}$$

เขียนสมการที่ (3.3) และ (3.4) ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายตามสมการที่ (3.5) และ (3.6) ตามลำดับ

$$q_3 = \sin^{-1}\left(\frac{A}{C}\right) - \beta_1 \tag{3.5}$$

$$q_4 = \cos^{-1}\left(\frac{a+L_3C_3}{L_4}\right) \tag{3.6}$$

โดยกำหนดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a = L_1C_1 - L_5 - L_2C_2$$
$$b = L_1S_1 - L_2S_2$$
$$A = L_4^2 - (a^2 + b^2 + L_3^2)$$
$$C = 2L_3\sqrt{a^2 + b^2}$$
$$\beta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right)$$

3.1.2 การคำนวณหาความสัมพันธ์ของ $\frac{\partial q_i}{\partial q_1}$ และ $\frac{\partial q_i}{\partial q_2}$ ในกรณีที่ $i = 3, 4$

หาอนุพันธ์ย่อยของสมการที่ (3.1) และ (3.2) โดยเทียบกับ q_1 โดยพิจารณาว่า $\frac{\partial q_2}{\partial q_1} = 0$ เนื่องจาก q_1 และ q_2 เป็นอิสระต่อกัน จะได้ว่า

$$L_1S_1 + L_3S_3\frac{\partial q_3}{\partial q_1} - L_4S_4\frac{\partial q_4}{\partial q_1} = 0$$
$$L_1C_1 + L_3C_3\frac{\partial q_3}{\partial q_1} - L_4C_4\frac{\partial q_4}{\partial q_1} = 0$$

สามารถเขียนสมการทั้ง 2 สมการด้านบนให้อยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} L_1S_1 \\ L_1C_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_3S_3 & -L_4S_4 \\ L_3C_3 & -L_4C_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial q_3}{\partial q_1} \\ \frac{\partial q_4}{\partial q_1} \end{bmatrix} = 0$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial q_3}{\partial q_1} \\ \frac{\partial q_4}{\partial q_1} \end{bmatrix} = L_1 \begin{bmatrix} -L_3S_3 & L_4S_4 \\ -L_3C_3 & L_4C_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_1 \\ C_1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

หาอนุพันธ์บางส่วนของสมการที่ (3.1) และ (3.2) โดยเทียบกับ q_2 โดยพิจารณาว่า $\frac{\partial q_1}{\partial q_2} = 0$ เนื่องจาก q_1 และ q_2 เป็นอิสระต่อกัน จะได้ว่า

$$L_1S_1 - L_3S_3\frac{\partial q_3}{\partial q_2} + L_4S_4\frac{\partial q_4}{\partial q_2} = 0$$
$$L_1C_1 - L_3C_3\frac{\partial q_3}{\partial q_2} + L_4C_4\frac{\partial q_4}{\partial q_2} = 0$$

สามารถเขียนสมการทั้ง 2 สมการด้านบนให้อยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} L_1S_1 \\ L_1C_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -L_3S_3 & L_4S_4 \\ -L_3C_3 & L_4C_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial q_3}{\partial q_2} \\ \frac{\partial q_4}{\partial q_2} \end{bmatrix} = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial q_3}{\partial q_2} \\ \frac{\partial q_4}{\partial q_2} \end{bmatrix} = -L_2 \begin{bmatrix} -L_3S_3 & L_4S_4 \\ -L_3C_3 & L_4C_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_2 \\ C_2 \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

3.1.3 การคำนวณหาความสัมพันธ์ของ $\dot{q}_3$ และ $\dot{q}_4$

จากสมการ (3.1) และ สมการ (3.2) นำมาหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาตามลำดับได้ว่า

$$L_1S_1\dot{q}_1 - L_2S_2\dot{q}_2 + L_3S_3\dot{q}_3 - L_4S_4\dot{q}_4 = 0$$
$$L_1C_1\dot{q}_1 - L_2C_2\dot{q}_2 + L_3C_3\dot{q}_3 - L_4C_4\dot{q}_4 = 0$$

เขียนสมการทั้งสองด้านบนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ คือ

$$\begin{bmatrix} L_1S_1 & -L_2S_2 \\ L_1C_1 & -L_2C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_3S_3 & -L_4S_4 \\ L_3C_3 & -L_4C_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} = 0$$
$$\begin{bmatrix} \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_3S_3 & L_4S_4 \\ -L_3C_3 & L_4C_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} L_1S_1 & -L_2S_2 \\ L_1C_1 & -L_2C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

ในการออกแบบระบบกลไกต่างๆ สิ่งจำเป็นที่ควรคำนึงถึงคือ การหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดค่าเอกภาวะ (Singularity value) ขึ้นที่ เมทริกซ์ $\begin{bmatrix} -L_3S_3 & L_4S_4 \\ -L_3C_3 & L_4C_4 \end{bmatrix}$ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือป้องกันไม่ให้เกิดสถานะที่ $q_3 = q_4$ เพื่อหลีกเลี่ยงค่าเอกภาวะ

3.1.4 การคำนวณหาความสัมพันธ์ของ $\dot{x}_i$ และ $\dot{y}_i$ ในกรณีที่ $i = 1, 2, 3, 4$

กำหนดให้ L_{ci} $(i = 1,2,3,4)$ คือระยะจากข้อต่อไปยังจุดศูนย์กลางมวลของแต่ละส่วนต่อโยงอ้างอิงจากภาพที่ 3.1 สามารถหาความสัมพันธ์ของตำแหน่งต่างๆได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} x_1 &= L_{c1}C_1 & y_1 &= L_{c1}S_1 \\ x_2 &= L_{c2}C_2 & y_2 &= L_{c2}S_2 \\ x_3 &= L_{c3}C_3 + L_1C_1 & y_3 &= L_{c3}S_3 + L_1S_1 \\ x_4 &= L_{c4}C_4 + L_2C_2 & y_4 &= L_{c4}S_4 + L_2S_2 \end{aligned} \tag{3.10}$$

จากสมการของตำแหน่งต่างๆข้างต้น นำมาหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาได้ว่า

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -L_{c1}S_1\dot{q}_1 & \dot{y}_1 &= L_{c1}C_1\dot{q}_1 \\ \dot{x}_2 &= -L_{c2}S_2\dot{q}_2 & \dot{y}_2 &= L_{c2}C_2\dot{q}_2 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

137800

$$\dot{x}_3 = -L_{c3}S_3\dot{q}_3 - L_1S_1\dot{q}_1 \quad \dot{y}_3 = L_{c3}C_3\dot{q}_3 + L_1C_1\dot{q}_1$$
$$\dot{x}_4 = -L_{c4}S_4\dot{q}_4 - L_2S_2\dot{q}_2 \quad \dot{y}_4 = L_{c4}C_4\dot{q}_4 + L_2C_2\dot{q}_2$$

กลุ่มสมการที่เกิดจากการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาเหล่านี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเวดเตอร์ดังนี้

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\end{bmatrix} = -\begin{bmatrix}L_{c1}S_1 & 0\\ 0 & L_{c2}S_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix} \tag{3.11}$$

$$\begin{bmatrix}\dot{y}_1\\ \dot{y}_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}L_{c1}C_1 & 0\\ 0 & L_{c2}C_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix} \tag{3.12}$$

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_3\\ \dot{x}_4\end{bmatrix} = -\begin{bmatrix}L_{c3}S_3 & 0\\ 0 & L_{c4}S_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_3\\ \dot{q}_4\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}L_1S_1 & 0\\ 0 & L_2S_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix} \tag{3.13}$$

$$\begin{bmatrix}\dot{y}_3\\ \dot{y}_4\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}L_{c3}C_3 & 0\\ 0 & L_{c4}C_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_3\\ \dot{q}_4\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}L_1C_1 & 0\\ 0 & L_2C_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix} \tag{3.14}$$

แทนค่าสมการ (3.9) ลงในสมการ (3.13) และ สมการ (3.14)

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_3\\ \dot{x}_4\end{bmatrix} = -\left\{\begin{bmatrix}L_{c3}S_3 & 0\\ 0 & L_{c4}S_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-L_3S_3 & L_4S_4\\ -L_3C_3 & L_4C_4\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}L_1S_1 & -L_2S_2\\ L_1C_1 & -L_2C_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}L_1S_1 & 0\\ 0 & L_2S_2\end{bmatrix}\right\}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix} \tag{3.15}$$

$$\begin{bmatrix}\dot{y}_3\\ \dot{y}_4\end{bmatrix} = \left\{\begin{bmatrix}L_{c3}C_3 & 0\\ 0 & L_{c4}C_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-L_3S_3 & L_4S_4\\ -L_3C_3 & L_4C_4\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}L_1S_1 & -L_2S_2\\ L_1C_1 & -L_2C_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}L_1C_1 & 0\\ 0 & L_2C_2\end{bmatrix}\right\}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix} \tag{3.16}$$

3.1.5 การคำนวณหาความสัมพันธ์ของ $\frac{\partial y_i}{\partial q_1}$ และ $\frac{\partial y_i}{\partial q_2}$ ในกรณีที่ $i = 1,2,3,4$

จากสมการที่ (3.10) หากพิจารณาว่า q_1 และ q_2 เป็นอิสระต่อกันและกันทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ต่างๆดังต่อไปนี้

1) กลุ่มความสัมพันธ์ของ $\frac{\partial y_i}{\partial q_1}(i = 1,2,3,4)$

$$\frac{\partial y_1}{\partial q_1} = L_{c1}C_1$$
$$\frac{\partial y_2}{\partial q_1} = 0$$
$$\frac{\partial y_3}{\partial q_1} = L_{c3}C_3\frac{\partial q_3}{\partial q_1} + L_1C_1$$
$$\frac{\partial y_4}{\partial q_1} = L_{c4}C_4\frac{\partial q_4}{\partial q_1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) กลุ่มความสัมพันธ์ของ $\frac{\partial y_i}{\partial q_2}(i = 1,2,3,4)$

$$\frac{\partial y_1}{\partial q_2} = 0$$

$$\frac{\partial y_2}{\partial q_2} = L_{c2}C_2$$

$$\frac{\partial y_3}{\partial q_2} = L_{c3}C_3\frac{\partial q_3}{\partial q_2}$$

$$\frac{\partial y_4}{\partial q_2} = L_{c4}C_4\frac{\partial q_4}{\partial q_2} + L_2C_2$$

กลุ่มสมการทั้ง 2 กลุ่มข้างต้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเวคเตอร์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix}\frac{\partial y_1}{\partial q_1}\\ \frac{\partial y_2}{\partial q_1}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}L_{c1}C_1\\ 0\end{bmatrix} \tag{3.17}$$

$$\begin{bmatrix}\frac{\partial y_1}{\partial q_2}\\ \frac{\partial y_2}{\partial q_2}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0\\ L_{c2}C_2\end{bmatrix} \tag{3.18}$$

$$\begin{bmatrix}\frac{\partial y_3}{\partial q_1}\\ \frac{\partial y_4}{\partial q_1}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}L_{c3}C_3 & 0\\ 0 & L_{c4}C_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{\partial q_3}{\partial q_1}\\ \frac{\partial q_4}{\partial q_1}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}L_1C_1\\ 0\end{bmatrix} \tag{3.19}$$

$$\begin{bmatrix}\frac{\partial y_3}{\partial q_2}\\ \frac{\partial y_4}{\partial q_2}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}L_{c3}C_3 & 0\\ 0 & L_{c4}C_4\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{\partial q_3}{\partial q_2}\\ \frac{\partial q_4}{\partial q_2}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\ L_2C_2\end{bmatrix} \tag{3.20}$$

สมการความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด ตั้งแต่สมการที่ (3.1) ไปจนถึงสมการที่ (3.20) เป็นสมการจลนศาสตร์ที่สามารถใช้คำนวณในหัวข้อต่อไปได้ ซึ่งคือ การคำนวณหาแบบจำลองทางพลศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 แบบจำลองทางพลศาสตร์ (Dynamics Model) ของแขนกล

พลังงานจลน์รวมของระบบสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$T = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{4}[I_i\,\dot{q}_i + m_i(\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2)] = T_1 + T_2$$

โดยที่

$$T_1 = \tfrac{1}{2}I_1\dot{q}_1^2 + \tfrac{1}{2}I_2\dot{q}_2^2 + \tfrac{1}{2}I_3\dot{q}_3^2 + \tfrac{1}{2}I_4\dot{q}_4^2 \qquad (3.21)$$

$$T_2 = \tfrac{1}{2}m_1(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + \tfrac{1}{2}m_2(\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) + \tfrac{1}{2}m_3(\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) + \tfrac{1}{2}m_4(\dot{x}_4^2 + \dot{y}_4^2) \qquad (3.22)$$

จากกลุ่มสมการ (3.10) ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งต่างๆเทียบกับแกน x และ y สามารถหาค่า $(\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2)$ โดยที่ $i = 1,2,3,4$ ดังนี้

$$\begin{aligned}
(\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) &= L_{c1}^2\dot{q}_1^2 \\
(\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) &= L_{c2}^2\dot{q}_2^2 \\
(\dot{x}_3^2 + \dot{y}_3^2) &= L_{c3}^2\dot{q}_3^2 + L_1^2\dot{q}_1^2 + 2L_1L_{c3}C_{1-3}\dot{q}_1\dot{q}_3 \\
(\dot{x}_4^2 + \dot{y}_4^2) &= L_{c4}^2\dot{q}_4^2 + L_2^2\dot{q}_2^2 + 2L_2L_{c4}C_{2-4}\dot{q}_2\dot{q}_4
\end{aligned}$$

นำกลุ่มสมการด้านบนแทนค่ากลับไปที่สมการ (3.22)

$$T_2 = \tfrac{1}{2}m_1L_{c1}^2\dot{q}_1^2 + \tfrac{1}{2}m_2L_{c2}^2\dot{q}_2^2 + \tfrac{1}{2}m_3L_{c3}^2\dot{q}_3^2 + \tfrac{1}{2}m_3L_1^2\dot{q}_1^2 + m_3L_1L_{c3}C_{1-3}\dot{q}_1\dot{q}_3 + \tfrac{1}{2}m_4L_{c4}^2\dot{q}_4^2 + \tfrac{1}{2}m_4L_2^2\dot{q}_2^2 + m_4L_2L_{c4}C_{2-4}\dot{q}_2\dot{q}_4 \qquad (3.23)$$

สมการของพลังงานจลน์รวมของระบบกลไก เกิดจากสมการที่ (3.21) รวมกับสมการที่ (3.23) แสดงได้ดังนี้

$$T = \tfrac{1}{2}[(I_1 + m_1L_{c1}^2 + m_3L_1^2)\dot{q}_1^2 + (I_2 + m_3L_{c2}^2 + m_4L_2^2)\dot{q}_2^2 + 2m_3L_1L_{c3}C_{1-3}\dot{q}_1\dot{q}_3 + (I_3 + m_3L_{c3}^2)\dot{q}_3^2 + 2m_4L_2L_{c4}C_{2-4}\dot{q}_2\dot{q}_4 + (I_4 + m_4L_{c4}^2)\dot{q}_4^2] \qquad (3.24)$$

พลังงานศักย์รวมของระบบสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของ

$$V = \sum_{i=1}^{4} m_i g y_i$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = m_1 g y_1 + m_2 g y_2 + m_3 g y_3 + m_4 g y_4 \tag{3.25}$$

จากกลุ่มสมการ(3.10) ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งต่างๆเทียบกับแกน x และ y สามารถหาค่า y_i โดยที่ $i = 1,2,3,4$ ลงในสมการ (3.25)

$$V = m_1 g L_{c1} S_1 + m_2 g L_{c2} S_2 + m_3 g L_{c3} S_3 + m_3 g L_1 S_1 + m_4 g L_{c4} S_4 + m_4 g L_2 S_2$$
$$V = (m_1 g L_{c1} + m_3 g L_1) S_1 + (m_2 g L_{c2} + m_4 g L_2) S_2 + m_3 g L_{c3} S_3 + m_4 g L_{c4} S_4 \tag{3.26}$$

พลังงานจลน์และพลังงานศักย์ที่คำนวณได้ถือเป็นสมการหลักที่ใช้หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกลไกนี้

แทนค่า $L = T - V$ ลงในสมการของลากรานจ์ในภาคผนวก

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

แต่ในสมการที่ (3.24) ไม่มีองค์ประกอบของ $\dot{q}_i$อยู่ดังนั้น $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial V}{\partial \dot{q}_i}\right)$ จึงมีค่าเป็นศูนย์

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = \tau_i \tag{3.27}$$

คำนวณหาค่า $\frac{\partial T}{\partial q_1}$ และ $\frac{\partial T}{\partial q_2}$ โดยการหาอนุพันธ์ย่อยของสมการที่ (3.24) เทียบกับ q_1 และ q_2 ตามลำดับ

$$\frac{\partial T}{\partial q_1} = -m_3 L_1 L_{c3} S_{1-3} \dot{q}_1 \dot{q}_3 + m_3 L_1 L_{c3} S_{1-3} \dot{q}_1 \dot{q}_3 \frac{\partial q_3}{\partial q_1} + m_4 L_2 L_{c4} S_{2-4} \dot{q}_2 \dot{q}_4 \frac{\partial q_4}{\partial q_1} \tag{3.28}$$

$$\frac{\partial T}{\partial q_2} = -m_4 L_2 L_{c4} S_{2-4} \dot{q}_2 \dot{q}_4 + m_3 L_1 L_{c3} S_{1-3} \dot{q}_1 \dot{q}_3 \frac{\partial q_3}{\partial q_2} + m_4 L_2 L_{c4} S_{2-4} \dot{q}_2 \dot{q}_4 \frac{\partial q_4}{\partial q_2} \tag{3.29}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (3.28) และสมการที่ (3.29) สามารถเขียนรวมกันให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix}\frac{\partial T}{\partial q_1}\\ \frac{\partial T}{\partial q_2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-m_3L_1L_{c3}S_{1-3}\dot{q}_1 & 0\\ 0 & -m_4L_2L_{c4}S_{2-4}\dot{q}_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_3\\ \dot{q}_4\end{bmatrix}$$
$$+\begin{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{\partial q_3}{\partial q_1} & \frac{\partial q_4}{\partial q_1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}m_3L_1L_{c3}S_{1-3}\dot{q}_1 & 0\\ 0 & m_4L_2L_{c4}S_{2-4}\dot{q}_2\end{bmatrix}\\ \begin{bmatrix}\frac{\partial q_3}{\partial q_2} & \frac{\partial q_4}{\partial q_2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}m_3L_1L_{c3}S_{1-3}\dot{q}_1 & 0\\ 0 & m_4L_2L_{c4}S_{2-4}\dot{q}_2\end{bmatrix}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_3\\ \dot{q}_4\end{bmatrix} \quad (3.30)$$

ความสัมพันธ์ของเมทริกซ์ $\begin{bmatrix}\dot{q}_3\\ \dot{q}_4\end{bmatrix}$ ในรูปของเมทริกซ์ $\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix}$ ได้คำนวณไว้แล้วจากสมการที่ (3.9) ดังนั้นจึงแทนค่าสมการ (3.9) ลงในสมการที่ (3.30)

$$\begin{bmatrix}\frac{\partial T}{\partial q_1}\\ \frac{\partial T}{\partial q_2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-m_3L_1L_{c3}S_{1-3}\dot{q}_1 & 0\\ 0 & -m_4L_2L_{c4}S_{2-4}\dot{q}_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-L_3S_3 & L_4S_4\\ -L_3C_3 & L_4C_4\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}L_1S_1 & -L_2S_2\\ L_1C_1 & -L_2C_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix}$$
$$+\begin{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{\partial q_3}{\partial q_1} & \frac{\partial q_4}{\partial q_1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}m_3L_1L_{c3}S_{1-3}\dot{q}_1 & 0\\ 0 & m_4L_2L_{c4}S_{2-4}\dot{q}_2\end{bmatrix}\\ \begin{bmatrix}\frac{\partial q_3}{\partial q_2} & \frac{\partial q_4}{\partial q_2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}m_3L_1L_{c3}S_{1-3}\dot{q}_1 & 0\\ 0 & m_4L_2L_{c4}S_{2-4}\dot{q}_2\end{bmatrix}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-L_3S_3 & L_4S_4\\ -L_3C_3 & L_4C_4\end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix}L_1S_1 & -L_2S_2\\ L_1C_1 & -L_2C_2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix} \quad (3.31)$$

คำนวณหาค่า $\frac{\partial V}{\partial q_1}$ และ $\frac{\partial V}{\partial q_2}$ โดยการหาอนุพันธ์ย่อยของสมการที่ (3.26) เทียบกับ q_1 และ q_2 ตามลำดับ

$$\frac{\partial V}{\partial q_1}=(m_1gL_{c1}+m_3gL_1)C_1+m_3gL_{c3}C_3\frac{\partial q_3}{\partial q_1}+m_4gL_{c4}C_4\frac{\partial q_4}{\partial q_1} \quad (3.32)$$
$$\frac{\partial V}{\partial q_2}=(m_2gL_{c2}+m_4gL_2)C_2+m_3gL_{c3}C_3\frac{\partial q_3}{\partial q_2}+m_4gL_{c4}C_4\frac{\partial q_4}{\partial q_2} \quad (3.33)$$

สมการที่ (3.33) และสมการที่ (3.34) สามารถเขียนรวมกันให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix}\frac{\partial V}{\partial q_1}\\ \frac{\partial V}{\partial q_2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}(m_1gL_{c1}+m_3gL_1)C_1\\ (m_2gL_{c2}+m_4gL_2)C_2\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{\partial q_3}{\partial q_1} & \frac{\partial q_4}{\partial q_1}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}m_3gL_{c3} & 0\\ 0 & m_4gL_{c4}\end{bmatrix}\\ \begin{bmatrix}\frac{\partial q_3}{\partial q_2} & \frac{\partial q_4}{\partial q_2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}m_3gL_{c3} & 0\\ 0 & m_4gL_{c4}\end{bmatrix}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}C_3\\ C_4\end{bmatrix} \quad (3.34)$$

คำนวณหาค่า $\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1}$ และ $\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2}$ โดยการหาอนุพันธ์ย่อยของสมการที่ (3.24) เทียบกับ $\dot{q}_1$ และ $\dot{q}_2$ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1} = (I_1 + m_1 L_{c1}^2 + m_3 L_1^2)\dot{q}_1 + m_3 L_1 L_{c3} C_{1-3}\dot{q}_1 \frac{\partial \dot{q}_3}{\partial \dot{q}_1} + m_3 L_1 L_{c3} C_{1-3}\dot{q}_3 + \left[(I_3 + m_3 L_{c3}^2)\dot{q}_3 \frac{\partial \dot{q}_3}{\partial \dot{q}_1}\right] + m_4 L_2 L_{c4} C_{2-4}\dot{q}_2 \frac{\partial \dot{q}_4}{\partial \dot{q}_1} + \left[(I_4 + m_4 L_{c4}^2)\dot{q}_4 \frac{\partial \dot{q}_4}{\partial \dot{q}_1}\right] \tag{3.35}$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2} = (I_2 + m_3 L_{c2}^2 + m_4 L_2^2)\dot{q}_2 + m_4 L_2 L_{c4} C_{2-4}\dot{q}_2 \frac{\partial \dot{q}_4}{\partial \dot{q}_2} + m_4 L_2 L_{c4} C_{2-4}\dot{q}_4 + \left[(I_3 + m_3 L_{c3}^2)\dot{q}_3 \frac{\partial \dot{q}_3}{\partial \dot{q}_2}\right] + m_3 L_1 L_{c3} C_{1-3}\dot{q}_1 \frac{\partial \dot{q}_3}{\partial \dot{q}_2} + \left[(I_4 + m_4 L_{c4}^2)\dot{q}_4 \frac{\partial \dot{q}_4}{\partial \dot{q}_2}\right] \tag{3.36}$$

คำนวณหาค่า $\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1}$ และ $\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2}$ โดยการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาของสมการที่ (3.35) และ (3.36) ตามลำดับ

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_1}\right) = {} & (I_1 + m_1 L_{c1}^2 + m_3 L_1^2)\ddot{q}_1 + m_3 L_1 L_{c3}\left[(\dot{q}_3 - \dot{q}_1)S_{1-3}\dot{q}_1 \frac{\partial \dot{q}_3}{\partial \dot{q}_1} + C_{1-3}\ddot{q}_1 \frac{\partial \dot{q}_3}{\partial \dot{q}_1} + C_{1-3}\dot{q}_1 \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \dot{q}_3}{\partial \dot{q}_1}\right)\right] \\ & + m_3 L_1 L_{c3}[(\dot{q}_3 - \dot{q}_1)S_{1-3}\dot{q}_3 + C_{1-3}\ddot{q}_3] + \left[(I_3 + m_3 L_{c3}^2)\left[\ddot{q}_3 \frac{\partial \dot{q}_3}{\partial \dot{q}_1} + \dot{q}_3 \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \dot{q}_3}{\partial \dot{q}_1}\right)\right]\right] \\ & + m_4 L_2 L_{c4}\left[(\dot{q}_4 - \dot{q}_2)S_{2-4}\dot{q}_2 \frac{\partial \dot{q}_4}{\partial \dot{q}_1} + C_{2-4}\ddot{q}_2 \frac{\partial \dot{q}_4}{\partial \dot{q}_1} + C_{2-4}\dot{q}_2 \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \dot{q}_4}{\partial \dot{q}_1}\right)\right] \\ & + \left[(I_4 + m_4 L_{c4}^2)\left[\ddot{q}_4 \frac{\partial \dot{q}_4}{\partial \dot{q}_1} + \dot{q}_4 \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \dot{q}_4}{\partial \dot{q}_1}\right)\right]\right]\end{aligned} \tag{3.37}$$

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_2}\right) = {} & (I_2 + m_3 L_{c2}^2 + m_4 L_2^2)\ddot{q}_2 + m_4 L_2 L_{c4}\left[(\dot{q}_4 - \dot{q}_2)S_{2-4}\dot{q}_2 \frac{\partial \dot{q}_4}{\partial \dot{q}_2} + C_{2-4}\ddot{q}_2 \frac{\partial \dot{q}_4}{\partial \dot{q}_2} + C_{2-4}\dot{q}_2 \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \dot{q}_4}{\partial \dot{q}_2}\right)\right] \\ & + m_4 L_2 L_{c4}[(\dot{q}_4 - \dot{q}_2)S_{2-4}\dot{q}_4 + C_{2-4}\ddot{q}_4] + \left[(I_3 + m_3 L_{c3}^2)\left[\ddot{q}_3 \frac{\partial \dot{q}_3}{\partial \dot{q}_2} + \dot{q}_3 \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \dot{q}_3}{\partial \dot{q}_2}\right)\right]\right] \\ & + m_3 L_1 L_{c3}\left[(\dot{q}_3 - \dot{q}_1)S_{1-3}\dot{q}_1 \frac{\partial \dot{q}_3}{\partial \dot{q}_2} + C_{1-3}\ddot{q}_1 \frac{\partial \dot{q}_3}{\partial \dot{q}_2} + C_{1-3}\dot{q}_1 \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \dot{q}_3}{\partial \dot{q}_2}\right)\right] \\ & + \left[(I_4 + m_4 L_{c4}^2)\left[\ddot{q}_4 \frac{\partial \dot{q}_4}{\partial \dot{q}_2} + \dot{q}_4 \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \dot{q}_4}{\partial \dot{q}_2}\right)\right]\right]\end{aligned} \tag{3.38}$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (3.30), (3.34), (3.37) และ สมการที่ (3.38) ลงในสมการที่ (3.27) สมการที่ได้ออกมาคือสมการพื้นฐานที่เป็นแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของแขนกลที่จะใช้เป็นกลไกในงานวิจัยนี้ ดังจะได้แสดงในบทถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดสอบและผลการประดิษฐ์

บทนี้กล่าวถึงหัวข้อ 4.1 การจำลองผลการเลือกวัสดุโดยอาศัยแบบจำลองในบทที่ 3 ด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์และปรับปรุงแบบ ส่วนการทดสอบแสดงในหัวข้อ 4.2 อันเป็นการทดสอบด้านเทคนิคและนำไปสู่การประยุกต์แขนกลอวตารตามแนวคิดในบทที่ 1 ซึ่งแสดงผลการประดิษฐ์ในหัวข้อ 4.3

4.1 การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์

4.1.1 วัสดุอ้างอิงที่ใช้ในการออกแบบ

ในการออกแบบกลไกหรือโครงสร้างต่างๆ หัวข้อที่มีความสำคัญเป็นอันดับต้นๆคือ วัสดุและคุณสมบัติของวัสดุเพราะเป็นตัวแปรสำคัญในการออกแบบในเรื่องของน้ำหนักและโครงสร้างของกลไกที่ต้องการออกแบบ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวัสดุอ้างอิงที่ใช้ในการออกแบบ

สำหรับแขนกลแบบผสม ที่ต้องการความแข็งแรงในการใช้งาน ในทางตรงกันข้ามก็ต้องการน้ำหนักที่น้อยเพื่อไม่ให้สิ้นเปลืองพลังงานที่จ่ายให้กับต้นกำลัง จึงเลือกใช้วัสดุที่เป็นอลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน หมายเลข 6061 อ้างอิงตาม Aluminum Standards and Data 2006 Metric SI มาเป็นวัสดุอ้างอิง รูปของอลูมิเนียมชนิดนี้แสดงในภาพที่ 4.1 ซึ่งเป็นวัสดุที่นำมาบ่มแข็งได้ ทำให้มีความแข็งสูง ทนต่อการกัดกร่อน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมหมายเลข 6061 ที่จำเป็นในการออกแบบแสดงในตารางที่ 4.1

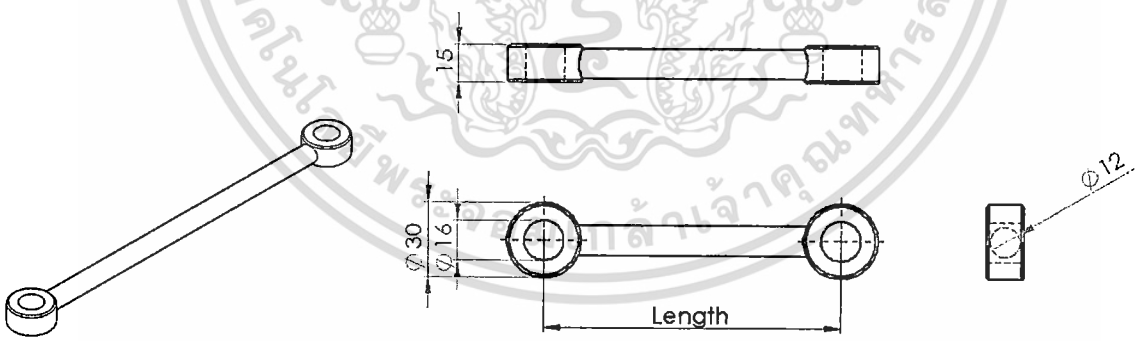
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมหมายเลข 6061

คุณสมบัติ (Property)	**ค่า (Value)**	**หน่วย (Unit)**
โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Elastic Modulus)	$6.9x10^{10}$	นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2)
โมดูลัสของแรงเฉือน (Shear Modulus)	$2.6x10^{10}$	นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2)
ความหนาแน่น (Density)	2,700	กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร(Kg/m^3)
ความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength)	$1.24x10^8$	นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2)
ความแข็งแรงที่จุดคราก (Yield Strength)	$5.51x10^7$	นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2)

4.1.2 ออกแบบชิ้นส่วนต่อโยง

แขนกลแบบผสมในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วยชิ้นส่วนหลักๆที่เป็น ชิ้นส่วนต่อโยงทั้งหมด 4 ชิ้น รวมกับระยะห่างของส่วนต่อโยงที่ฐานของกลไกรวมเป็น 5 ชิ้น ด้วยเห็นนี้กลไกประเภทนี้จึงจึงถูกเรียกว่ากลไกลต่อโยงต่อกัน ดังนั้นในหัวข้อนี้เป็นการออกแบบรูปร่างลักษณะพื้นฐานของส่วนต่อโยงแต่ละชิ้น

จากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบสร้างแบบจำลองของส่วนต่อโยง ผลที่ได้จากการออกแบบแสดงในภาพที่ 4.2 โดยชิ้นส่วนต่อโยงมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ที่ปลายสุดทั้ง 2 ด้าน มีช่องสำหรับ ใส่ตลับลูกปืนลงไปเพื่อให้การเคลื่อนไหวของระบบกลไก ลื่นไหล ไม่ติดขัด



ภาพที่ 4.2 ลักษณะและขนาดของส่วนต่อโยงที่ออกแบบ

จากลักษณะและขนาดของชิ้นส่วนต่อโยงในภาพที่ 4.2 หากมีการสร้างด้วยวัสดุที่เป็น อลูมิเนียมผสมแมกนีเซียมและซิลิกอน หมายเลข 6061 ที่มีคุณสมบัติเชิงกลตามตารางที่ 4.1 แล้ว ชิ้นส่วนต่อโยงที่ออกแบบจะมีคุณสมบัติตามตารางที่ 4.2

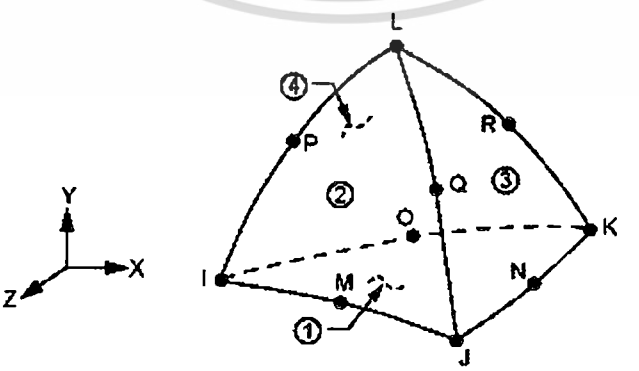
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นส่วนต่อโยงเมื่อมีความยาวต่างๆ

ความยาว(Length)	คุณสมบัติ (Property)	ค่า (Value)	หน่วย (Unit)
80 มิลลิเมตร	มวล (Mass)	55.93	กรัม (g)
	ปริมาตร (Volume)	20,713.62	ลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm^3)
	พื้นที่ผิว (Surface Area)	7,833.15	ตารางมิลลิเมตร (mm^2)
100 มิลลิเมตร	มวล (Mass)	62.03	กรัม (g)
	ปริมาตร (Volume)	22,974.91	ลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm^3)
	พื้นที่ผิว (Surface Area)	8,587.17	ตารางมิลลิเมตร (mm^2)
250 มิลลิเมตร	มวล (Mass)	107.83	กรัม (g)
	ปริมาตร (Volume)	39,935.98	ลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm^3)
	พื้นที่ผิว (Surface Area)	14,241.98	ตารางมิลลิเมตร (mm^2)

4.1.3 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่อโยง

ในหัวข้อนี้เป็นการกล่าวถึงการศึกษาความแข็งแรงของ ชิ้นส่วนต่อโยงที่ได้ออกแบบไว้แล้วในหัวข้อ 4.1.2 เมื่อได้รับแรงกระทำต่างๆ โดยใช้ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ที่ได้รับการพัฒนาและเป็นที่นิยมใช้ เพราะสามารถประยุกต์เพื่อแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนได้ เนื่องจากระเบียบวิธีดังกล่าว ใช้วิธีพื้นฐานของคณิตศาสตร์และระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยวิธีทางไฟไนเอลิเมนต์ ที่เกิดขึ้นในวัสดุ โดยกำหนดชนิดของเอลิเมนต์เป็นแบบสามมิติแบบสามเหลี่ยมสี่หน้าสิบจุดต่อ (10-node tetrahedral) ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่เหมาะกับ โครงสร้างที่มีความซับซ้อน ในหนึ่งเอลิเมนต์ประกอบด้วยจุดต่อ (node) ทั้งสิ้น 10 จุด คือ I, J, K, L, M, N, O, P, Q และ R มีระดับขั้นความเสรี(degree of freedom) ของแต่ละจุดเอลิเมนต์เท่ากับ 3 คือ ในแนวแกน x , y และ z ดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 รูปร่างเอลิเมนต์สามมิติ แบบสามเหลี่ยมสี่หน้า สิบจุดต่อ

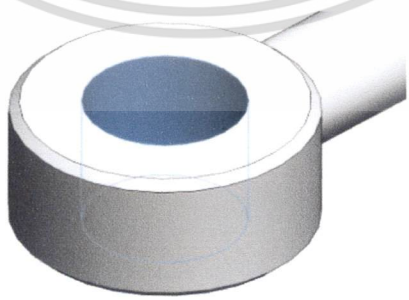
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ความแข็งแรงแสดงออกมาเป็นค่าความเค้นและค่าความเคลื่อนตัวที่บริเวณต่างๆของชิ้นส่วนต่อโยง โดยชิ้นส่วนต่อโยงที่นำมาศึกษาเป็นชิ้นส่วนต่อโยงที่มีความยาว 250 มิลลิเมตร วิเคราะห์จากจำนวนจุดตัดทั้งหมด 13,663 จุด จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 8022 เอลิเมนต์ ดังภาพที่ 4.4

ภาพที่ 4.4 จำนวนจุดตัดและเอลิเมนต์ทั้งหมดในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่อโยง

4.1.4 การวิเคราะห์ความแข็งแรงเมื่อมีแรงกระทำในแนวตั้ง

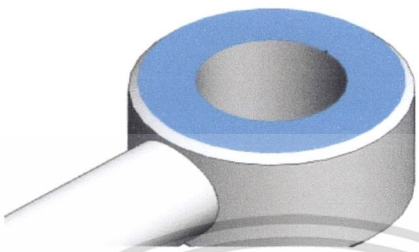
จากจำนวนจุดตัดและเอลิเมนต์ทั้งหมดในการวิเคราะห์ของชิ้นส่วนต่อโยงที่ได้ออกแบบมาแล้ว ได้มีการกำหนดจุดตรึงและภาระตามภาพที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงเมื่อมีแรงกระทำด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบ



ภาพที่ 4.5 จุดตรึงอ้างอิงที่ใช้ในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนต่อโยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดจุดตรึงที่ปลายข้างหนึ่งของชิ้นส่วนต่อโยง โดยตรึงที่ผิวด้านในของรูสำหรับใส่ตลับลูกปืน ในส่วนของจุดภาระอยู่ที่ปลายอีกข้างของชิ้นส่วนต่อโยง ตรงบริเวณหน้าสัมผัสด้านบน ตามรูปที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 จุดรับภาระในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนต่อโยง

แรงที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแรงสม่ำเสมอขนาด 10 นิวตัน กดลงที่จุดรับภาระตามภาพที่ 4.6 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบ ผลที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดังกล่าวมากระทำเป็นดังนี้

1) ค่าความปลอดภัย (Factor of Safety)

ภายใต้แรงกระทำขนาด 10 นิวตันที่ปลายด้านหนึ่ง ค่าความปลอดภัยน้อยที่สุดที่เกิดขึ้นคือ 3.76927

2) ค่าความเค้นวอนมิสเซส (Von Mises Stress)

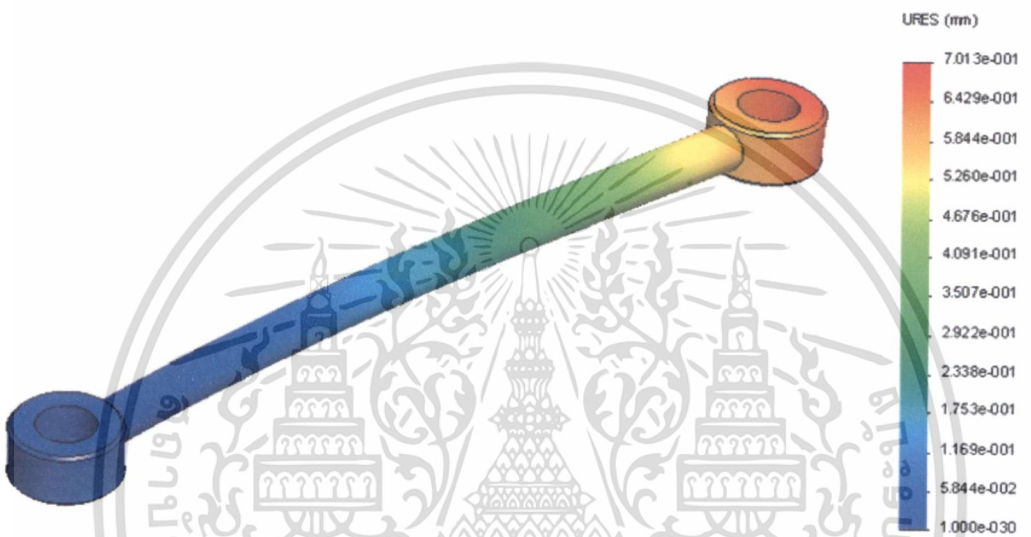
เมื่อรับแรงขนาด 10 นิวตันในแนวตั้งค่าความเค้นต่ำสุดที่เกิดขึ้นคือ 261.351 นิวตันต่อตารางเมตร เกิดขึ้นตรงบริเวณที่เป็นสีน้ำเงิน และมีค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นคือ 1.463×10^7 นิวตันต่อตารางเมตร เกิดขึ้นตรงบริเวณที่เป็นสีแดง ส่วนค่าความเค้นอื่นที่อยู่ระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุด แสดงเป็นสีต่างๆตามภาพที่ 4.7

ภาพที่ 4.7 ค่าความเค้นที่จุดต่างๆเมื่อชิ้นส่วนต่อโยงได้รับแรงแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ค่าความเคลื่อนตัว (Displacement)

เมื่อรับแรงขนาด 10 นิวตันในแนวตั้งค่าความเคลื่อนตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นคือ 0.701 มิลลิเมตร เกิดขึ้นตรงบริเวณส่วนปลายสุดของชิ้นส่วนต่อโยงที่เป็นสีแดง ส่วนค่าความเคลื่อนตัวต่ำสุดคือ 0 มิลลิเมตร หรือไม่มีความเคลื่อนตัวเลยซึ่งเกิดขึ้น ณ จุดตรึง ส่วนค่าความเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆของชิ้นส่วนต่อโยงแสดงในภาพที่ 4.8

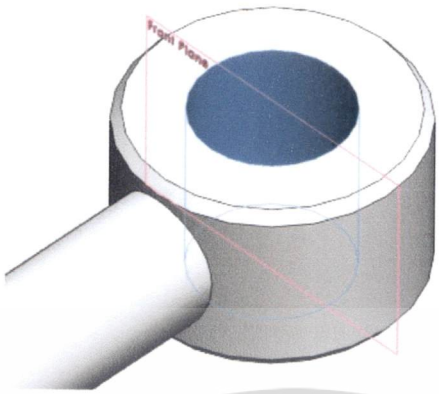


ภาพที่ 4.8 ค่าความเคลื่อนตัวที่จุดต่างๆเมื่อชิ้นส่วนต่อโยงได้รับแรงแนวตั้ง

4.1.5 การวิเคราะห์ความแข็งแรงเมื่อมีแรงดึงมากระทำ

สำหรับการจำลองความแข็งแรงในวัสดุ เมื่อมีแรงดึงมากระทำกับชิ้นงาน จากชิ้นส่วนต่อโยงที่ได้ออกแบบมาแล้ว ได้มีการกำหนดจุดตรึงเช่นเดียวกับที่ผ่านมา แต่จุดที่ออกแรงดึงเป็นบริเวณภายภายในรูสำหรับใส่ตลับลูกปืน โดยออกแรงขนาด 1000 นิวตัน ในแนวตามยาวของชิ้นส่วนต่อโยงตามภาพที่ 4.9 เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงเมื่อมีแรงดึงกระทำ ด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 จุดรับแรงดึงในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนต่อโยง

ผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมช่วยออกแบบ วิเคราะห์ความแข็งแรงที่เกิดขึ้นที่ส่วนต่างๆของชิ้นส่วนต่อโยง แยกออกเป็น 3 รูปแบบคือ การวิเคราะห์ค่าความปลอดภัย การวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในบริเวณต่างๆเมื่อมีแรงกระทำ 1000 นิวตัน และการวิเคราะห์ค่าความเคลื่อนตัวในบริเวณต่างๆเมื่อมีแรงกระทำ 1000 นิวตัน

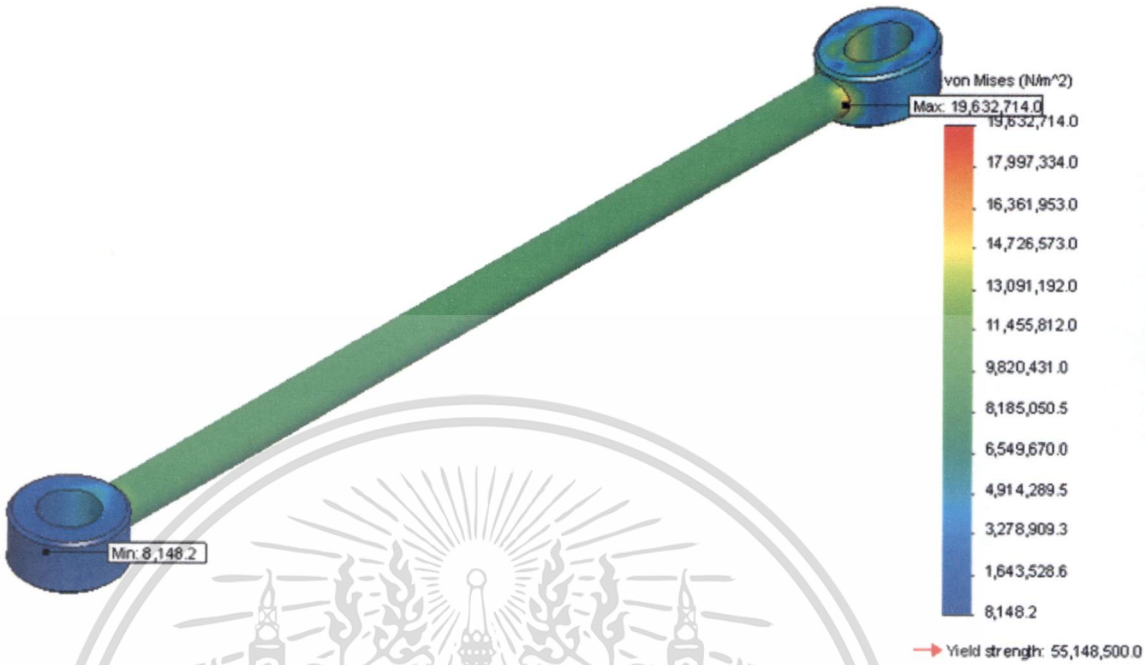
1) ค่าความปลอดภัย

ภายใต้แรงกระทำขนาด 10 นิวตันที่ปลายด้านหนึ่ง ค่าความปลอดภัยน้อยที่สุดที่เกิดขึ้นคือ 2.80901

2) ค่าความเค้นวอนมิสเซส

เมื่อมีแรงดึงขนาด 1000 นิวตัน ดึงชิ้นส่วนต่อโยงตามแนวยาวโดยอ้างอิงจุดตรึง ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นที่บริเวณต่างๆของชิ้นส่วนต่อโยง แสดงในภาพที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



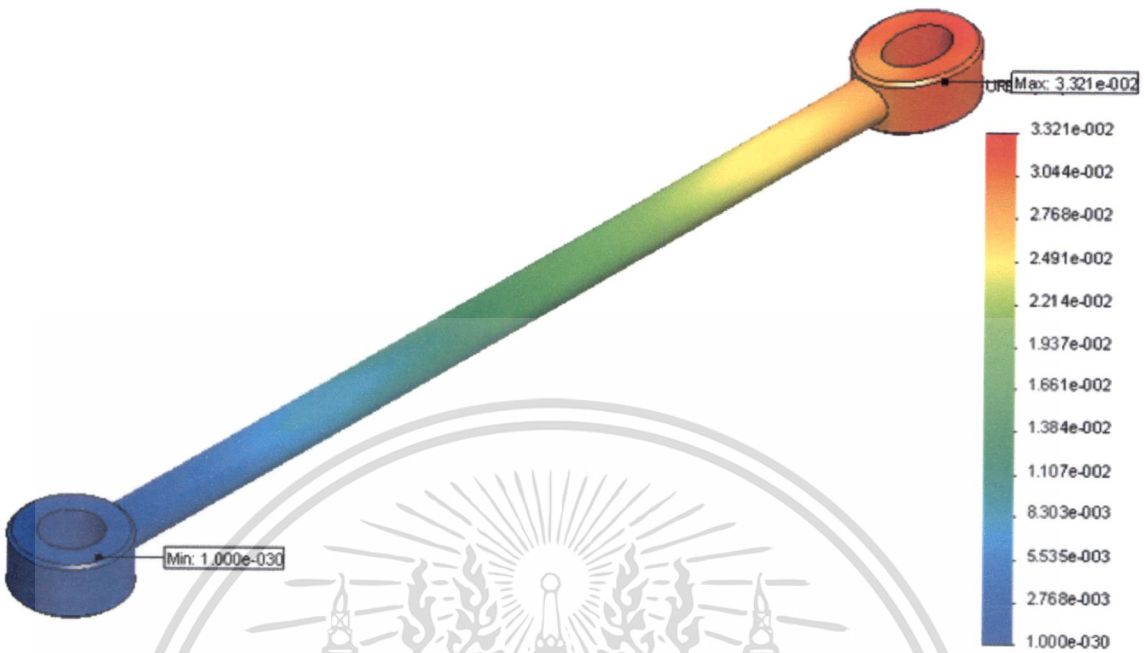
ภาพที่ 4.10 ค่าความเค้นที่จุดต่างๆเมื่อชิ้นส่วนต่อโยงได้รับแรงดึง

เมื่อรับแรงดึงขนาด 1000 นิวตันในแนวยาวค่าความเค้นต่ำสุดที่เกิดขึ้นคือ 8148.18 นิวตันต่อตารางเมตรเกิดขึ้นตรงบริเวณที่เป็นสีน้ำเงิน และมีค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นคือ 1.963×10^7 นิวตันต่อตารางเมตรเกิดขึ้นตรงบริเวณที่เป็นสีแดง ส่วนค่าความเค้นอื่นที่อยู่ระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุด แสดงเป็นสีต่างๆตามรูป

3) ค่าความเคลื่อนตัว (Displacement)

เมื่อรับแรงดึงขนาด 1,000 นิวตันในแนวยาว ค่าความเคลื่อนตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นคือ 0.03321มิลลิเมตรเกิดขึ้นตรงบริเวณส่วนปลายสุดของชิ้นส่วนต่อโยงที่เป็นสีแดง ส่วนค่าความเคลื่อนตัวต่ำสุดคือ 0 มิลลิเมตรหรือไม่มีความเคลื่อนตัวเลยซึ่งเกิดขึ้น ณ จุดตรึง ส่วนค่าความเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆของชิ้นส่วนต่อโยงแสดงในภาพที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 ค่าความเคลื่อนตัวที่จุดต่างๆเมื่อชิ้นส่วนต่อโยงได้รับแรงดึง

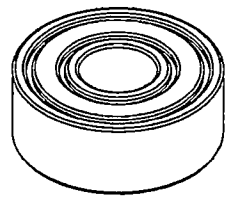
หัวข้อนี้เป็นกล่าวถึงการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่อโยง ในรูปแบบของการรับแรงต่างๆ เช่นแรงกดในแนวตั้งฉาก และแรงดึงตามแนวยาว สรุปได้ว่าในการสร้างชิ้นงานจริงตามที่ได้ออกแบบมานั้น ชิ้นส่วนที่สร้างจาก อลูมิเนียมหมายเลย 6061 สามารถรับแรงกดในแนวตั้งได้ 10 นิวตันที่ชิ้นส่วนความยาว 250 มิลลิเมตร และยังคงมีค่าความปลอดภัย 3.76927 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ในส่วนของการรับแรงดึงตามแนวยาว แรงที่ใช้ทดสอบคือ 1,000 นิวตัน และมีค่าความปลอดภัยขณะรับแรงดึงนั้นอยู่ที่ 2.80901 ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้เช่นกัน

4.1.6 การจำลองผลการออกแบบแกนเพลา

จากหัวข้อย่อยที่ผ่านมาเป็นกล่าวถึงการวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่อโยง ในรูปแบบของการรับแรงต่างๆ ในหัวข้อนี้เป็นการออกแบบแกนเพลาเพื่อเชื่อมต่อ ชิ้นส่วนต่อโยงที่ได้ออกแบบในหัวข้อย่อยที่ผ่านมาเข้าด้วยกันให้เป็นกลไกส่วนต่อโยง

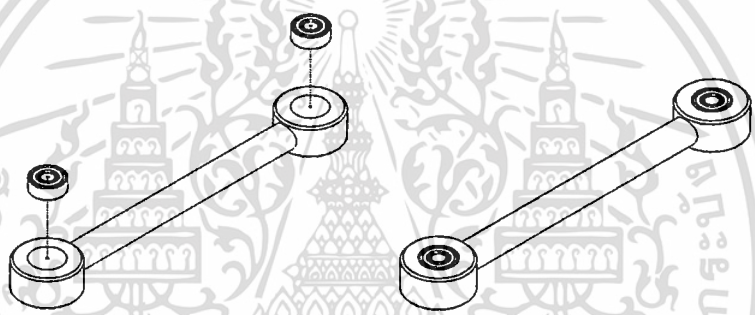
การประกอบชิ้นส่วนต่อโยงเข้าหากันเพื่อสร้างให้เป็นจุดหมุนนั้น ใช้ตลับลูกปืนในการประกอบเพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในข้อต่อ โดยตลับลูกปืนที่ใช้เป็นชนิดที่มีผนึกกันฝุ่นทั้ง 2 ด้านซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 16 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6 มิลลิเมตร และตลับลูกปืนมีความหนา 6 มิลลิเมตร รูปของตลับลูกปืนแสดงในภาพที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.12 ตลับลูกปืนที่ใช้ในการประกอบ

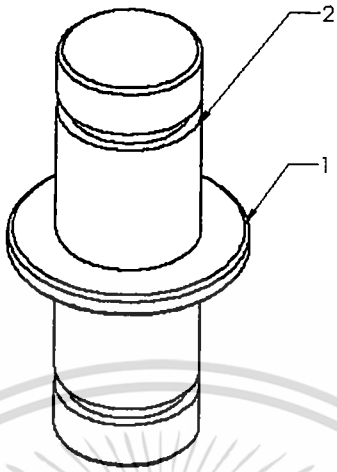
ที่ส่วนปลายทั้งสองด้านของชิ้นส่วนต่อโยงที่ได้ออกแบบมาแล้ว มีรูสำหรับใส่ตลับลูกปืนนี้อยู่ ในการใช้งานจริงกำหนดให้ใช้วิธีอัดตลับลูกปืนด้วย เครื่องอัดไฮโดรลิก เพื่อประกอบตลับลูกปืนเข้ากับชิ้นส่วนต่อโยง ในภาพที่ 4.13 อธิบายการประกอบตลับลูกปืนเข้ากับชิ้นส่วนต่อโยง



ภาพที่ 4.13 การประกอบตลับลูกปืนเข้ากับชิ้นส่วนต่อโยง

การสร้างจุดหมุนที่ข้อต่อ ของชิ้นส่วนต่อโยงแต่ละชิ้น ซึ่งผ่านการประกอบตลับลูกปืน ใช้แกนเพลาโลหะที่สร้างจาก วัสดุที่เป็นอลูมิเนียมหมายเลข 6061 โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เป็นตัวเชื่อมต่อชิ้นส่วนทั้ง 2 ชิ้นเข้าด้วยกัน แกนเพลาที่ได้ออกแบบนั้นมีส่วนที่เป็นแผ่นกั้น (Spacing) เพื่อสร้างช่องว่างระหว่างชิ้นส่วนต่อโยง ในเวลาที่ถูกประกอบเข้าหากัน ภาพที่ 4.14 เป็นรูปของแกนเพลาที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



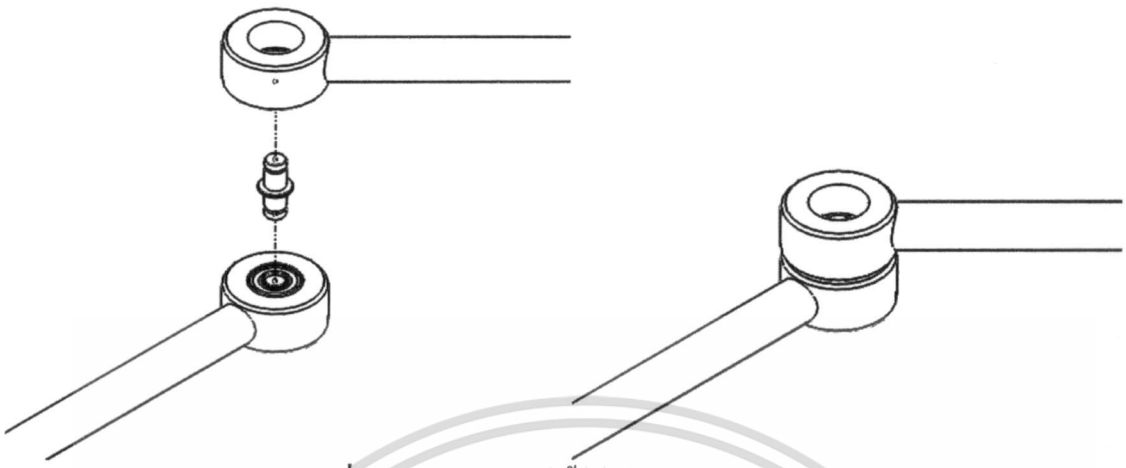
ภาพที่ 4.14 แกนเพลาที่ใช้ในการประกอบ

หมายเลข 1 ที่แสดงในรูปคือส่วนที่เป็นแผ่นกั้น ขนาดกว้าง 2 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร ส่วนหมายเลข 2 คือร่องสำหรับใส่แหวนล็อคชนิดอี (E-type Retainer Ring) ตามภาพที่ 4.15 สำหรับกั้นไม่ให้ตลับลูกปืนหลุดออกจากกัน

ภาพที่ 4.15 แหวนล็อคชนิดอี

การประกอบชิ้นส่วนต่อโยง 2 ชิ้นเข้าด้วยกันโดยใช้แกนเพลาที่ออกแบบเป็นตัวเชื่อม อธิบายในภาพที่ 4.16 หลังจากการประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน ชิ้นส่วนทั้งสองจะกลายเป็นข้อต่อที่สามารถหมุนได้รอบ มีแรงเสียดทานในการหมุนน้อย ในการสร้างระบบกลไกจะใช้การประกอบเช่นนี้อ้างอิงต่อไป โดยในส่วนของการวิเคราะห์ ความแข็งแรงของแกนเพลาหลังจากประกอบแล้ว อธิบายในหัวข้อต่อไป

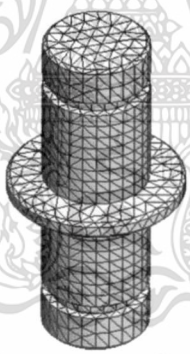
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.16 การประกอบชิ้นส่วนต่อโยงเข้าด้วยกัน

4.1.7 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่อโยง

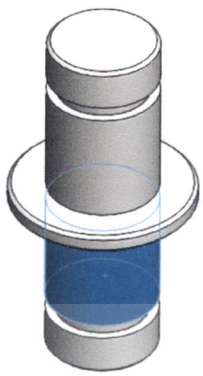
ในหัวข้อนี้มุ่งพิจารณาไปที่การวิเคราะห์ ค่าความปลอดภัย ความเค้น และความเคลื่อนตัว ของแกนเพลาในสภาวะที่ถูกประกอบรวมกันเป็นระบบกลไก ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแกนเพลา ใช้จำนวนจุดตัดทั้งหมด 13,663 จุด จำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด 8022 เอลิเมนต์ ดังภาพที่ 3.17



ภาพที่ 4.17 จำนวนจุดตัดและเอลิเมนต์ทั้งหมดในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแกนเพลา

จากจำนวนจุดตัดและเอลิเมนต์ทั้งหมดในการวิเคราะห์ของแกนเพลาที่ได้ออกแบบมาแล้ว มีการกำหนดจุดตรึงและภาระตามภาพที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงเมื่อมีแรงกระทำด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.18 จุดตรึงอ้างอิงที่ใช้ในการวิเคราะห์แกนเพลา

กำหนดจุดตรึงที่ผิวรอบแกนเพลาในส่วนที่สัมผัสกับรูด้านในของตลับลูกปืนเมื่อถูกประกอบเข้าด้วยกัน และส่วนของจุดรับภาระอยู่ที่ผิวรอบแกนเพลาอีกส่วนหนึ่งที่อยู่ด้านบน ตามภาพที่ 4.19

ภาพที่ 4.19 จุดรับเฉือนในการวิเคราะห์แกนเพลา

แรงที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแรงเฉือนขนาด 100 นิวตัน กระทำที่จุดรับภาระตามภาพที่ 4.19 จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบ ผลที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดังกล่าวมากระทำเป็นดังนี้

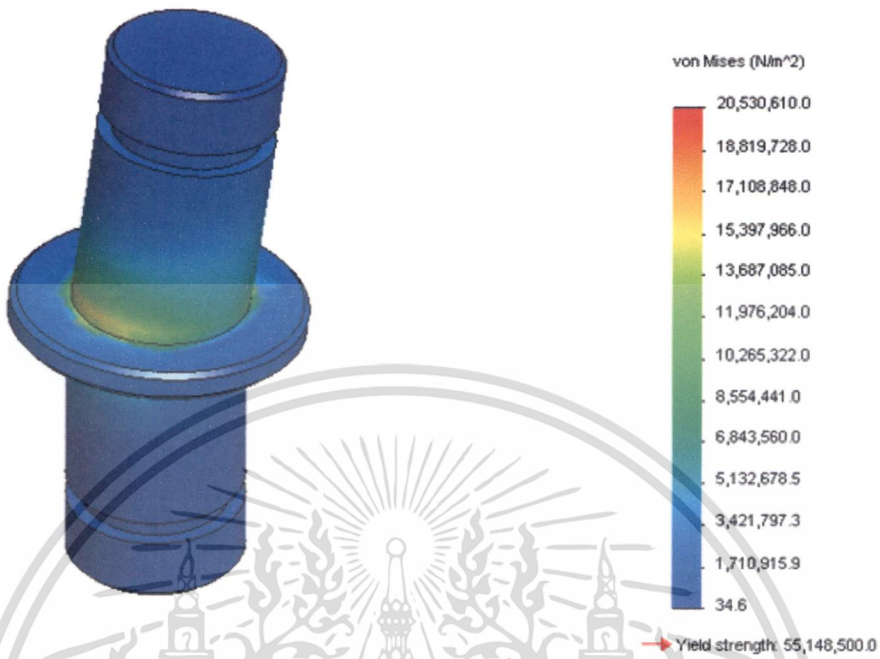
1) ค่าความปลอดภัย

ภายใต้แรงเฉือนขนาด 100 นิวตันที่ผิวของแกนเพลาส่วนที่สัมผัสกับรูด้านในของตลับลูกปืน จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบ ค่าความปลอดภัยน้อยที่สุดที่เกิดจากแรงเฉือนนี้คือ 2.68616

2) ค่าความเค้นวอนมิสเซส (Von Mises Stress)

ภายใต้แรงเฉือนขนาด 100 นิวตันที่ผิวของแกนเพลาส่วนที่สัมผัสกับรูด้านในของตลับลูกปืน ค่าความเค้นต่ำสุดที่เกิดขึ้นคือ 34.6267 นิวตันต่อตารางเมตร เกิดขึ้นตรงบริเวณที่เป็นสีน้ำเงิน และมีค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นคือ 2.05306×10^{7} นิวตันต่อตารางเมตร เกิดขึ้นตรงบริเวณที่เป็นสีแดง ส่วนค่าความเค้นอื่นที่อยู่ระหว่างค่าสูงสุดและต่ำสุด แสดงเป็นสีต่างๆตามภาพที่ 4.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

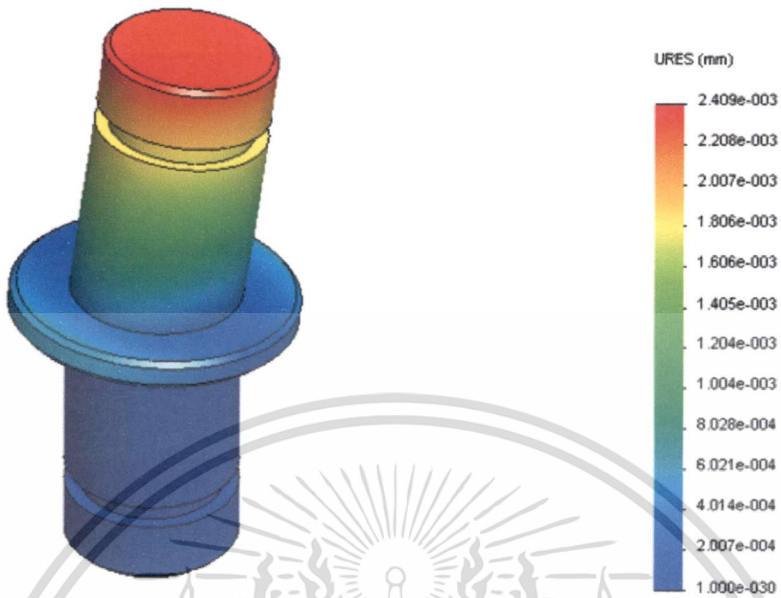


ภาพที่ 4.20 ค่าความเค้นที่จุดต่างๆเมื่อแกนเพลาได้รับแรงเฉือน

3) ค่าความเคลื่อนตัว (Displacement)

ภายใต้แรงเฉือนขนาด 100 นิวตันที่ผิวของแกนเพลาส่วนที่สัมผัสกับรูด้านในของตลับลูกปืน ค่าความเคลื่อนตัวสูงสุดที่เกิดขึ้นคือ 0.00240852 มิลลิเมตร เกิดขึ้นตรงบริเวณส่วนปลายด้านบนของแกนเพลาที่เป็นสีแดง ส่วนค่าความเคลื่อนตัวต่ำสุดคือ 0 มิลลิเมตร หรือไม่มีความเคลื่อนตัวเลยซึ่งเกิดขึ้น ณ จุดตรึง ส่วนค่าความเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆของแกนเพลาแสดงในภาพที่ 4.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



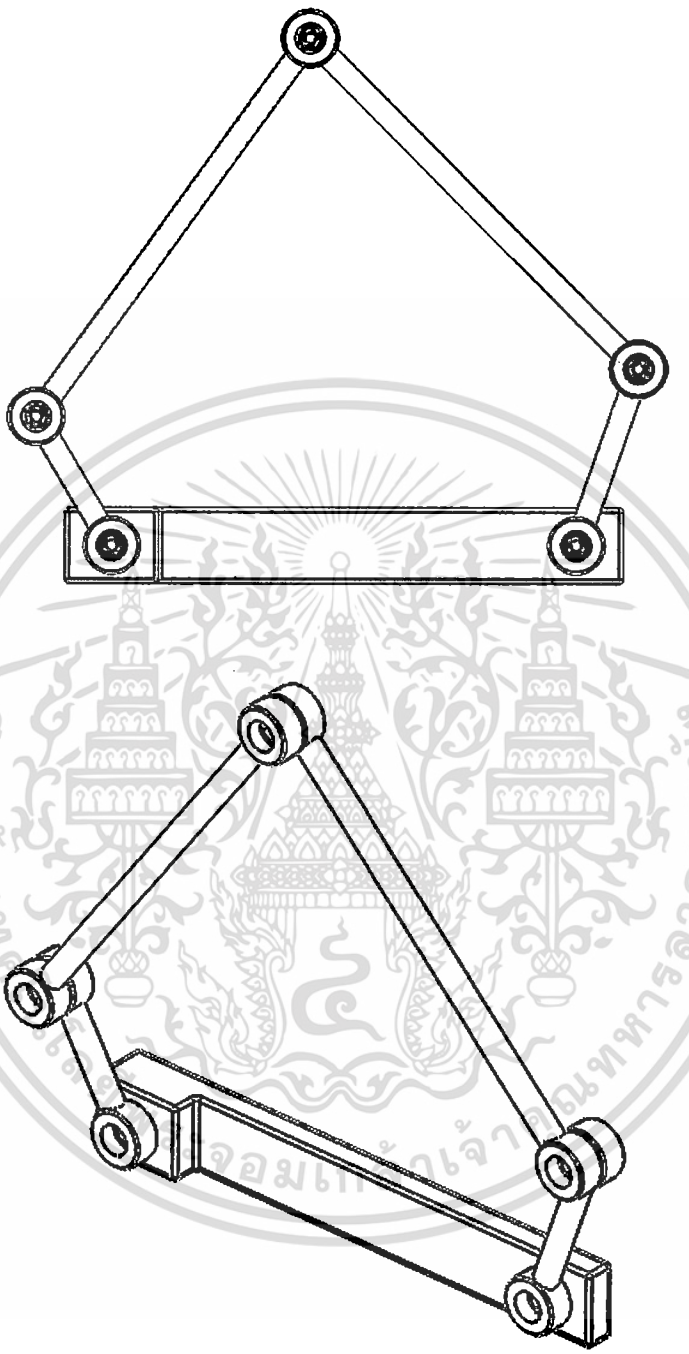
ภาพที่ 4.21 ค่าความเคลื่อนตัวที่จุดต่างๆเมื่อแกนเพลาได้รับแรงเฉือน

จากการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุ และการวิเคราะห์ค่าความเคลื่อนตัว เมื่อมีแรงมากระทำกับชิ้นงานโดยกำหนดจุดตรึงตามหัวข้อที่ผ่านมา ทำให้สามารถออกแบบชิ้นส่วนต่างๆของแขนกลแบบผสมได้อย่างถูกต้อง ไม่มีความเสียหายเกิดขึ้นเมื่อต้องถูกสร้างขึ้นจริง มีความแข็งแรงและคงทน ผลสรุปของการออกแบบชิ้นส่วนต่างๆที่ผ่านการวิเคราะห์เป็นดังหัวข้อย่อยถัดไป

4.1.8 ค่าตัวแปรที่ได้จากการออกแบบและวิเคราะห์

อ้างอิงจากภาพที่ 3.1 ในบทที่ 3 ซึ่งเป็นรูปแขนกลที่ใช้กลไกต่อโยง 4 ชิ้น โดยมีชิ้นส่วนต่อโยงทั้งหมด 4 ชิ้นคือ L_1, L_2, L_3, L_4 ภาพที่ 4.22 แสดงภาพรวมของแขนกลแบบผสมที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบ และ ระยะความยาว ระยะจากจุดปลายจนถึงจุดศูนย์กลางมวล น้ำหนัก และค่าโมเมนต์ความเฉื่อย ของแต่ละชิ้นส่วน แสดงในตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.22 ภาพรวมของแขนกลแบบผสมจากการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าตัวแปรสำคัญที่ได้จากการออกแบบและวิเคราะห์

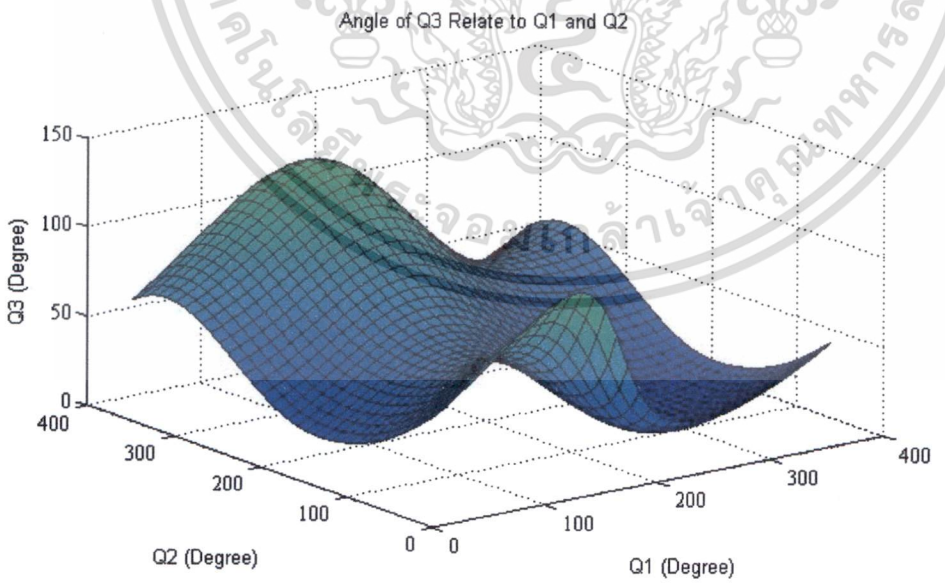
ชื่อ	ความยาว (L_i)	ระยะจุดศูนย์กลางมวล (L_{ci})	มวล (m_i)	โมเมนต์ความเฉื่อย (I_i)
L_1	0.080 m	0.040 m	0.056 kg	0.0000740 kg·m^2
L_2	0.100 m	0.050 m	0.062 kg	0.0001161 kg·m^2
L_3	0.250 m	0.125 m	0.108 kg	0.0009119 kg·m^2
L_4	0.250 m	0.125 m	0.108 kg	0.0009119 kg·m^2
L_5	0.250 m	-	-	-

ผลที่ได้จากการออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของวัสดุดังตารางที่ 4.3 สามารถใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลอวตารที่ใช้กลไกต่อโยง 4 ชิ้นที่ได้ออกแบบมาเป็นกลไกเชื่อมโยงขับเคลื่อนแขน

4.2 ผลการทดสอบ

4.2.1 ความสัมพันธ์ของมุม

แขนกลที่ออกแบบแสดงมุมอ้างอิงอยู่ทั้งหมด 4 มุมนั่นคือ q_1, q_2, q_3 และ q_4 จากการคำนวณในบทที่ 3 เกี่ยวกับความสัมพันธ์ของมุม q_3 และ q_4 เทียบกับมุม q_1 และ q_2 ซึ่งเป็นมุมที่เกิดจากต้นกำลังที่เป็นมอเตอร์ซึ่งเปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของกลไกขึ้น ความสัมพันธ์ของ q_3 แสดงในภาพที่ 4.23

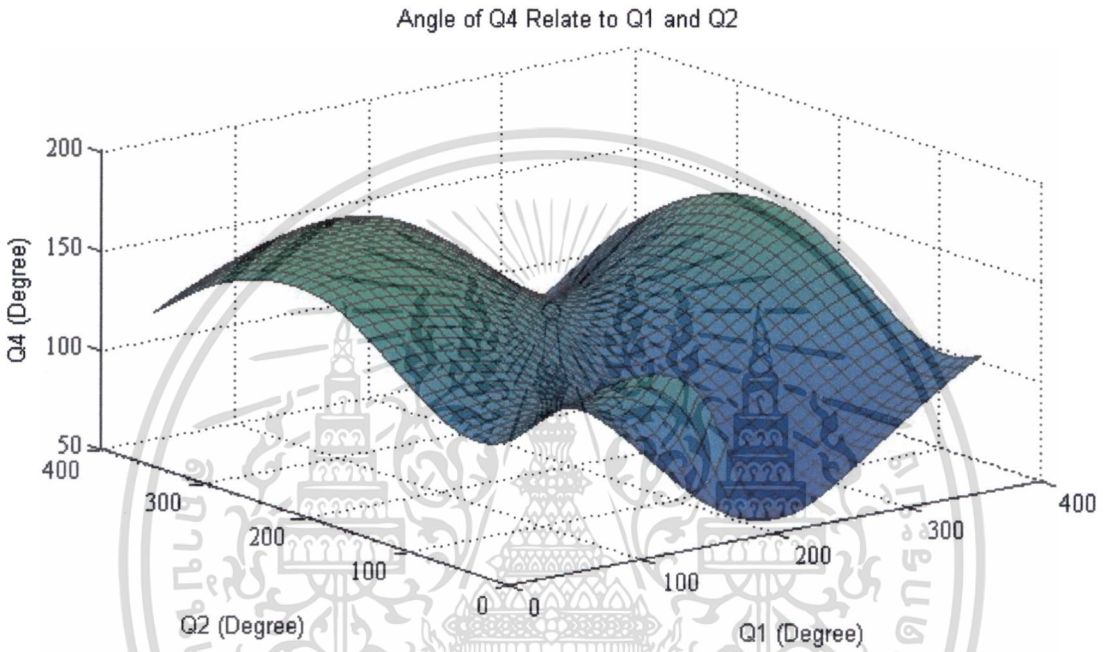


ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของมุม q_3 เทียบกับมุม q_1 และ q_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 4.23 ในแกนนอนแสดงค่าของมุม q_1 และ q_2 หน่วยองศา ตั้งแต่ 0 จนถึง 360 องศา ในแกนตั้งแสดงมุม q_3 ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม q_1 และ q_2 โดยค่าต่ำสุดอยู่ที่ 11.50 องศา และค่าสูงสุดอยู่ที่ 127.88 องศา

ความสัมพันธ์ของ q_4 แสดงในรูปที่ 4.24

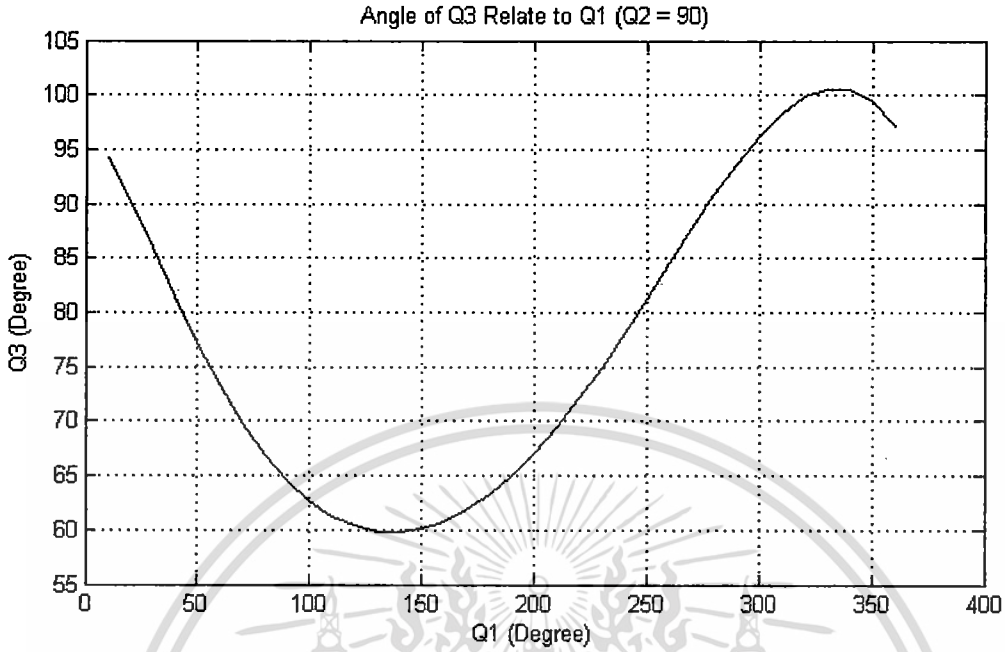


ภาพที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของมุม q_4 เทียบกับมุม q1 และ q2

จากกราฟในรูปที่ 4.24 ในแกนนอนแสดงค่าของมุม q_1 และ q_2 หน่วยองศา ตั้งแต่ 0 จนถึง 360 องศา ในแกนตั้งแสดงมุม q_4 ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม q_1 และ q_2 โดยค่าต่ำสุดอยู่ที่ 52.11 องศา และค่าสูงสุดอยู่ที่ 168.49 องศา

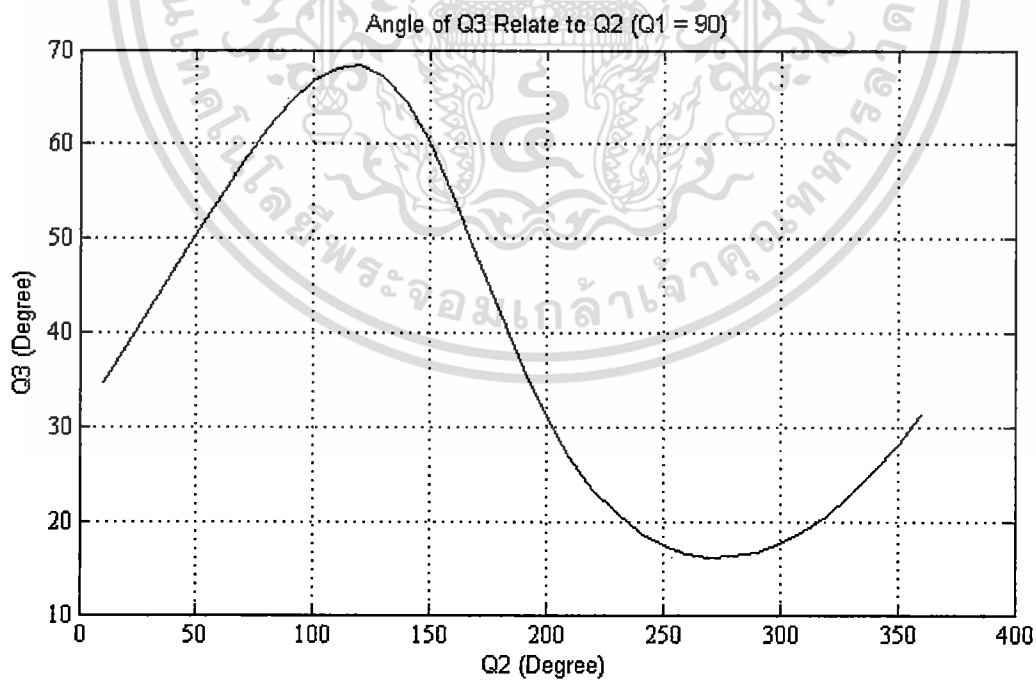
โดยเมื่อแยกพิจารณาเฉพาะมุม q_3 และ q_1 โดยตรึงมุม q_2 ไว้อยู่ที่ 90 องศา ทำให้ได้ความสัมพันธ์ตามรูปที่ 4.25 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์แบบสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของมุม q_3 เทียบกับมุม q_1 โดยตรึงมุมq_2 ที่ 90 องศา

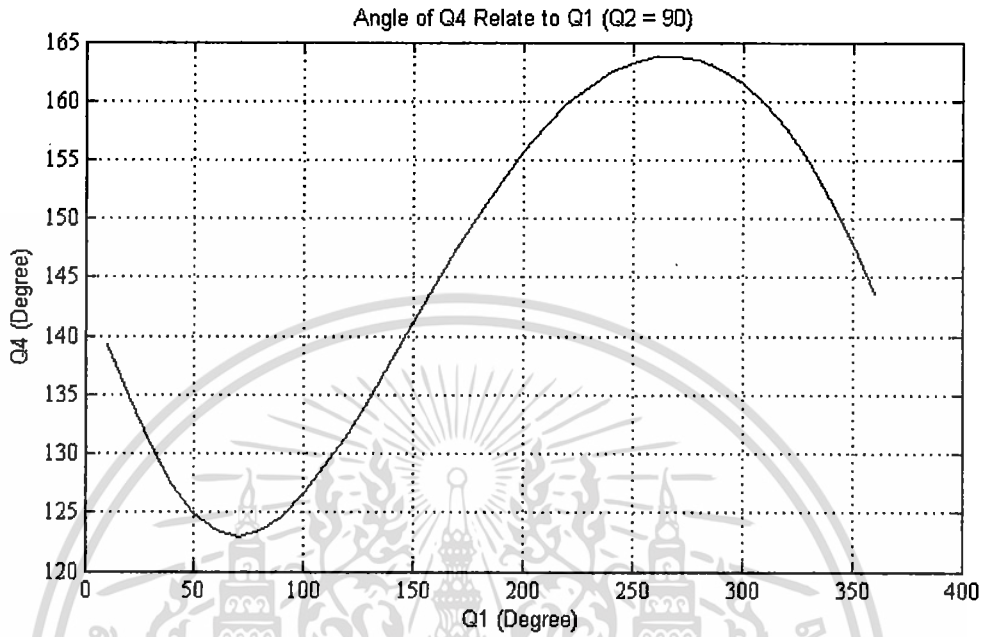
พิจารณาเฉพาะมุม q_3 และ q_2 โดยตรึงมุม q_1 ไว้อยู่ที่ 90 องศา ทำให้ได้ความสัมพันธ์ตามภาพที่ 4.26



ภาพที่ 4.26 ความสัมพันธ์ของมุม q_3 เทียบกับมุม q_2 โดยตรึงมุมq_1 ที่ 90 องศา

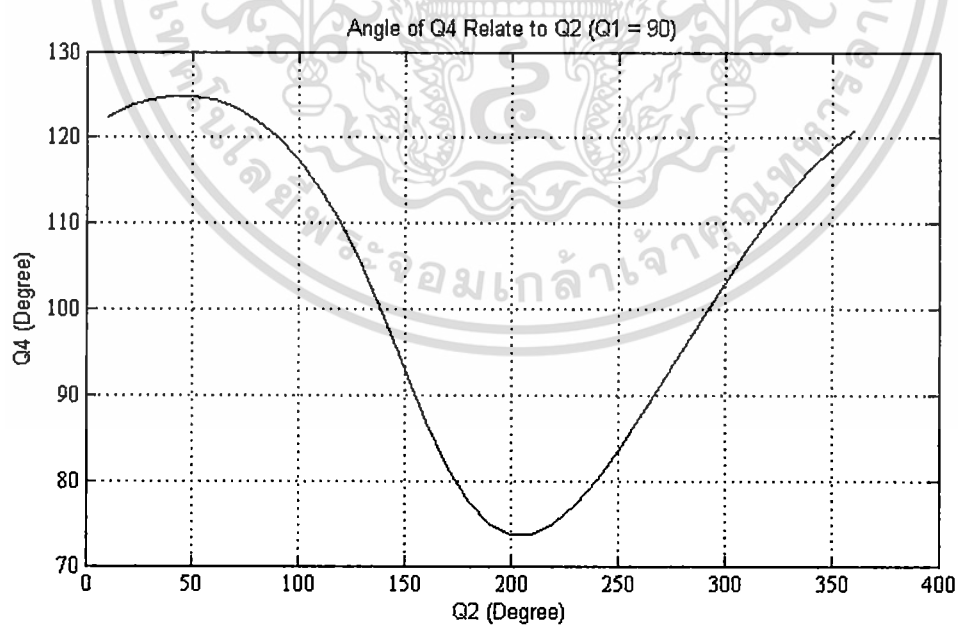
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาเฉพาะมุม q_4 และ q_1 โดยตรึงมุม q_2 ไว้อยู่ที่ 90 องศา ทำให้ได้ความสัมพันธ์ตามภาพที่ 4.27



ภาพที่ 4.27 ความสัมพันธ์ของมุม q_4 เทียบกับมุม q_1 โดยตรึงมุมq_2 ที่ 90 องศา

พิจารณาเฉพาะมุม q_4 และ q_2 โดยตรึงมุม q_1 ไว้อยู่ที่ 90 องศา ทำให้ได้ความสัมพันธ์ตามภาพที่ 4.28



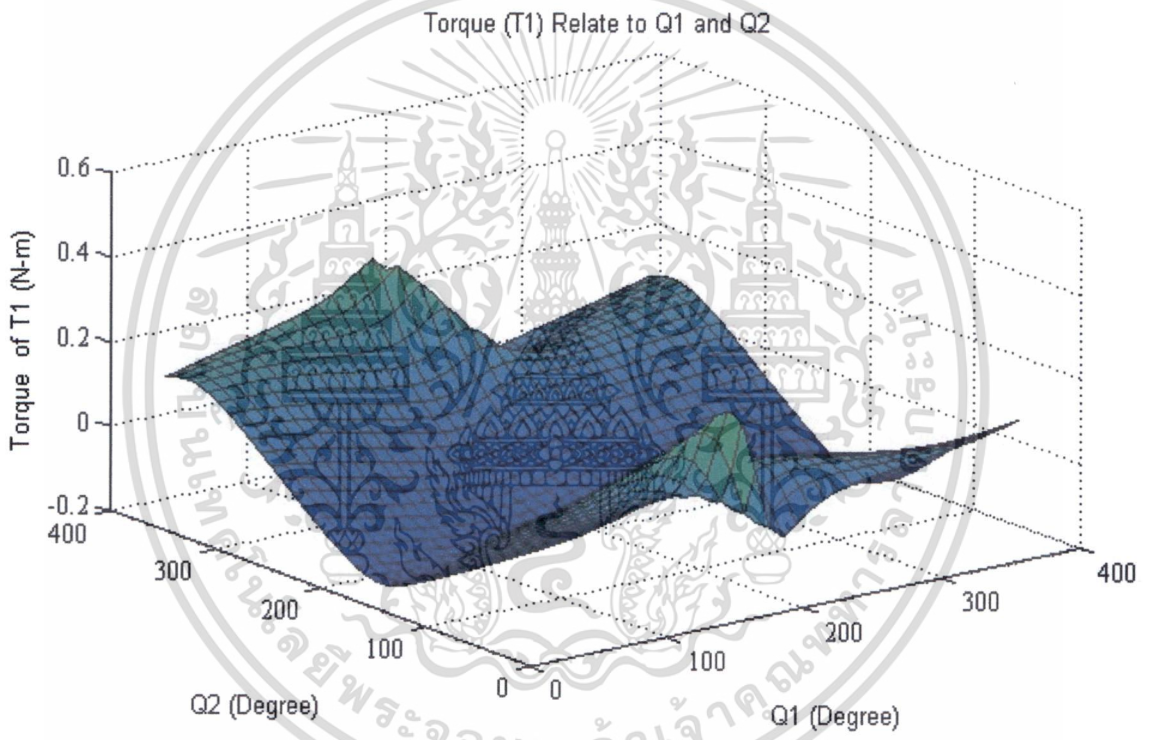
ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ของมุม q_4 เทียบกับมุม q_2 โดยตรึงมุมq_1 ที่ 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ความสัมพันธ์ของแรงบิด

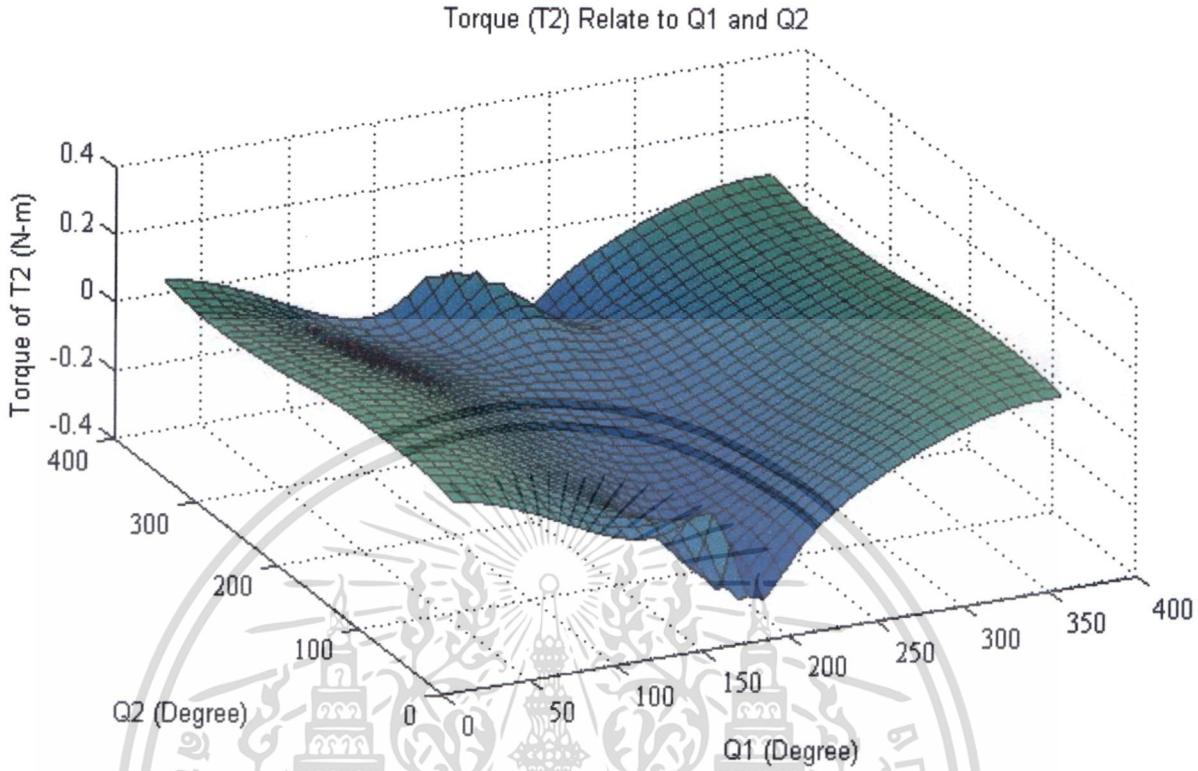
4.2.2.1 การจำลองแรงบิดเมื่อกลไกอยู่ในภาวะสมดุล

แรงบิดที่ได้เป็นแรงบิดที่ทำให้กลไก คงภาวะนั้นอยู่ได้อย่างสมดุล โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนต่อโยงเมื่อระบบกลไกอยู่ในภาวะสมดุลแสดงได้ในภาพที่ 4.29 และ 4.30 โดยในแกนนอนแสดงมุมที่เกิดขึ้นและในแกนที่ตั้งฉากกับระนาบแสดงแรงบิดที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร โดยแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.3141 นิวตัน-เมตร แรงบิดน้อยสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.1631 นิวตัน-เมตร



ภาพที่ 4.29 ความสัมพันธ์ของแรงบิด (T1) ในภาวะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.30 ความสัมพันธ์ของแรงบิด (T2) ในภาวะสมดุล

แรงบิดที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนต่อโยงเมื่อระบบกลไกอยู่ในภาวะสมดุลแสดงได้ในภาพที่ 4.30 โดยในแกนนอนแสดงมุมที่เกิดขึ้นและในแกนที่ตั้งฉากกับระนาบแสดงแรงบิดที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร โดยแรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.3170 นิวตัน-เมตร แรงบิดน้อยสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.1660 นิวตัน-เมตร

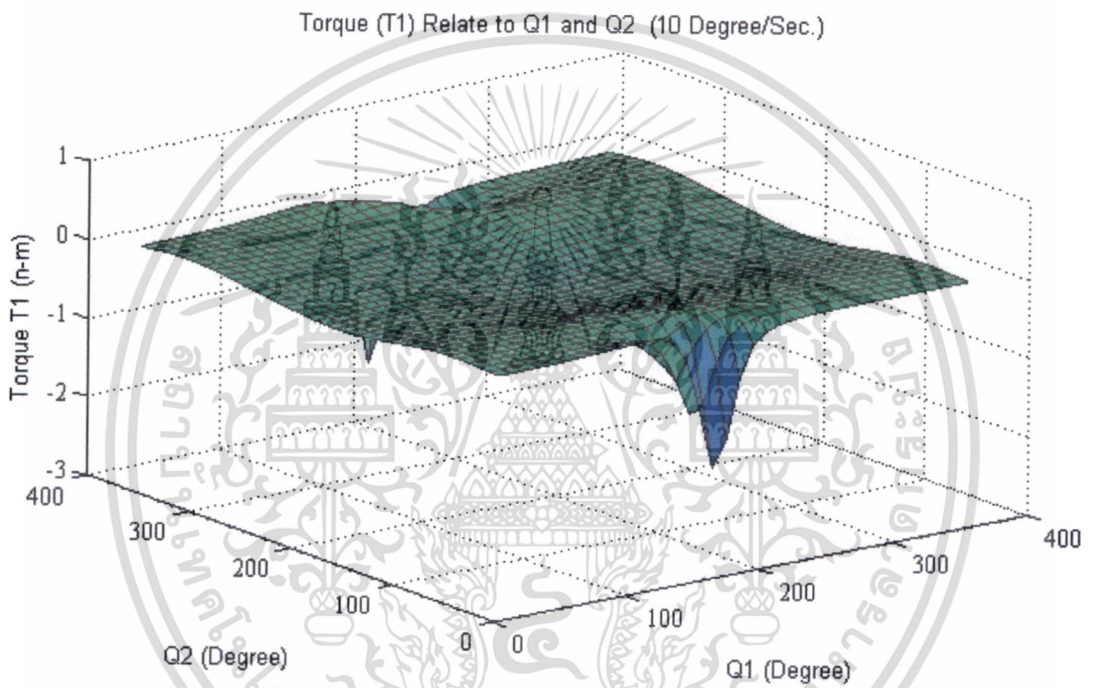
ในการออกแบบกลไกนั้น แรงบิดถือว่าเป็นตัวแปรสำคัญอย่างหนึ่งในการออกแบบ เพราะสามารถบอกได้ว่าในการสร้างแขนกลจริงควรเลือกใช้ต้นกำลัง ที่มีพิกัดกำลังเท่าใด จึงจะเหาะสมกับกลไกนั้นๆ และนอกจากจะพิจารณาแรงบิดที่ภาวะสมดุลแล้ว การพิจารณาแรงบิดในขณะที่กลไกเคลื่อนที่ก็มีความสำคัญเช่นกัน ในหัวข้อถัดไปเป็นการพิจารณาแรงบิดที่เกิดขึ้นเมื่อกลไกเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างๆ

4.2.2.2 การจำลองแรงบิดเมื่อกลไกเคลื่อนที่

ในการพิจารณาแรงบิดเมื่อกลไกมีการเคลื่อนทีทำได้โดย กำหนดชิ้นส่วนต่อโยงมีความเร็วคงที่ค่าหนึ่ง แล้วหาความสัมพันธ์ของแรงบิดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการหมุนไปยังตำแหน่งต่างๆ โดยการพิจารณาจะแยกเป็นสองความสัมพันธ์คือความสัมพันธ์ของแรงบิดจากชิ้นส่วนต่อโยงที่ 1 ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.31 และ

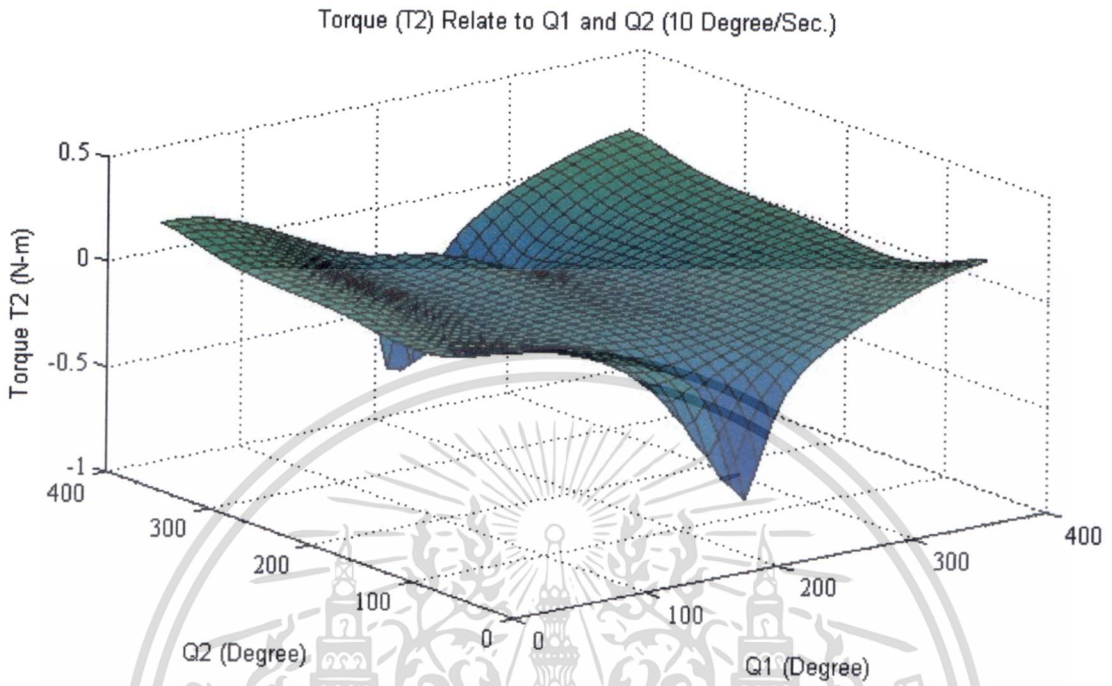
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงบิดที่เกิดขึ้นจากชิ้นส่วนต่อโยงชิ้นที่ 2 ซึ่งแสดงในภาพที่ 4.32 ความเร็วเชิงมุมที่ชิ้นส่วนเคลื่อนที่มีค่าเท่ากับ 10 องศาต่อวินาที แรงบิดที่เกิดขึ้นหากต้นกำลังมีความเร็วเชิงมุม 10 องศาต่อวินาทีแสดงในภาพที่ 4.31 จากกราฟ แรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 2.0159 นิวตัน-เมตร และแรงบิดต่ำสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.1960 นิวตัน-เมตร แรงบิดที่เกิดขึ้นหากต้นกำลังมีความเร็วเชิงมุม 10 องศาต่อวินาทีแสดงในภาพที่ 4.32 จากกราฟ แรงบิดสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.6915 นิวตัน-เมตร และแรงบิดต่ำสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 0.2338 นิวตัน-เมตร



ภาพที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด T_1 และมุมต่างๆ เมื่อชิ้นส่วนมีความเร็ว 10 องศาต่อวินาที

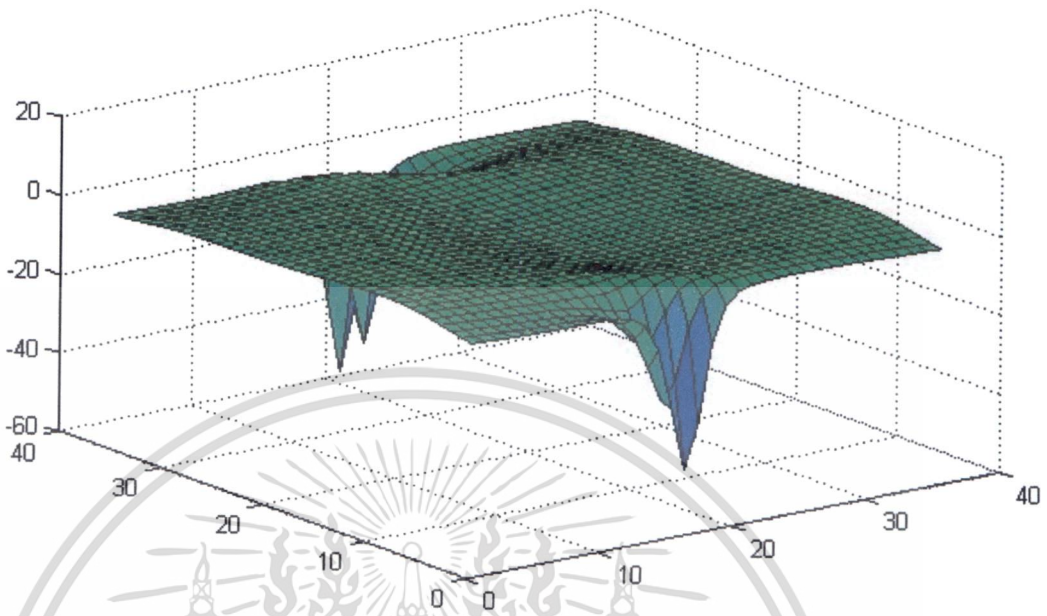
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



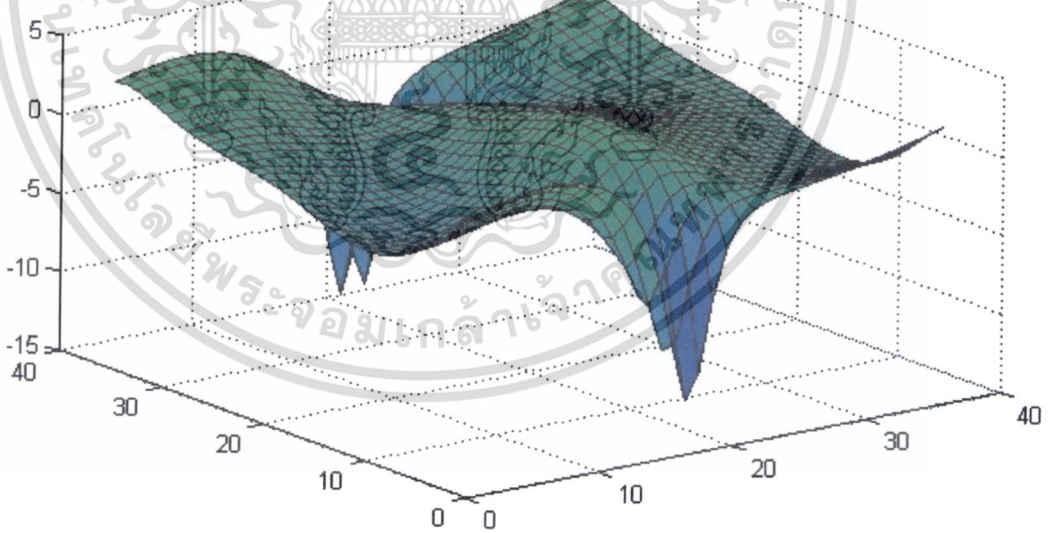
ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด T_2 และมุมต่างๆ เมื่อชิ้นส่วนมีความเร็ว 10 องศาต่อวินาที

ที่ความเร็วเชิงมุม 50 องศาต่อวินาที แรงบิดที่เกิดขึ้นกับชิ้นส่วนต่อโยงแสดงในภาพที่ 4.33 และภาพที่ 4.34 โดยแรงบิดที่เกิดขึ้นหากต้นกำลังมีความเร็วเชิงมุม 50 องศาต่อวินาทีแสดงในภาพที่ 4.34 จากกราฟแรงบิดสูงสุดที่เกิดกับชิ้นส่วนต่อโยงที่ 1 (T1) มีค่าเท่ากับ 53.5960 นิวตัน-เมตร และแรงบิดต่ำสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.8800 นิวตัน-เมตร แรงบิดสูงสุดที่เกิดกับชิ้นส่วนต่อโยงที่ 2 (T2) มีค่าเท่ากับ 13.5686 นิวตัน-เมตร และแรงบิดต่ำสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 3.4251 นิวตัน-เมต แรงบิดสูงสุดและต่ำสุดที่เกิดขึ้นในภาวะต่างๆ ของกลไก สามารถใช้พิจารณาในการเลือกใช้พิกัดของต้นกำลังที่เป็นมอเตอร์ได้อย่างเหมาะสมซึ่งใช้ในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด T_1 และมุมต่างๆ เมื่อชิ้นส่วนมีความเร็ว 50 องศาต่อวินาที



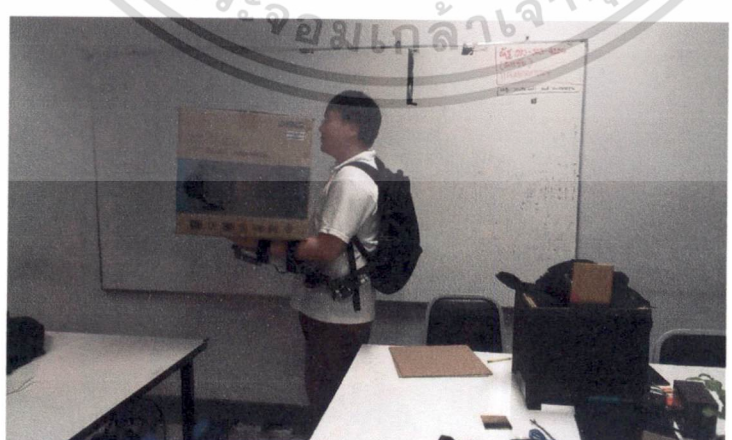
ภาพที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด T_2 และมุมต่างๆ เมื่อชิ้นส่วนมีความเร็ว 50 องศาต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การประดิษฐ์

เนื่องจากการเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์อยู่ในช่วงร่างการจดการคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญา (สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร) ผู้วิจัยจึงขอสงวนสิทธิเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์ไว้ ณ ที่นี้ และจะส่งเอกสารยื่นจดคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญาเพิ่มเติมในรายงานพิเศษให้กับ วช. ภายหลังจากได้ทำการยื่นจดทะเบียนแล้ว ดังนั้นในที่นี้จะเพียงแสดงภาพการประดิษฐ์และการประยุกต์ในภาพที่ 4.35 และ 4.36 พอเป็นสังเขป

ภาพที่ 4.35 การประยุกต์ช่วยเพิ่มแรงในการยกของ



ภาพที่ 4.36 ทดสอบการใช้งานตามแนวคิดภาพที่ 1.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาแขนกลอวตารเพื่อใช้งานส่วนบุคคลและเพื่อจัดแสดงในงานวันนักประดิษฐ์เป็นการถวายพระเกียรติแสดงความกตัญญูแด่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวในฐานะที่พระองค์ทรงเป็นพระบิดาแห่งการประดิษฐ์ของไทย งานวิจัยจึงมุ่งตอบโจทย์วิจัยดังกล่าว และได้ผลลัพธ์ตลอดจนผลกระทบสำเร็จสนองจุดประสงค์ในงานวิจัยที่กำหนดไว้ ดังมีข้อสรุปและข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 บทสรุป

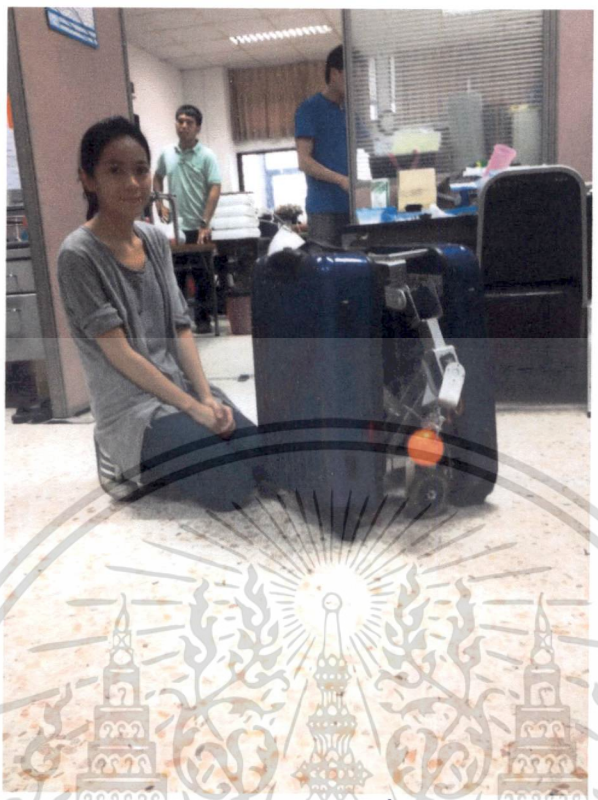
1) *การประดิษฐ์* งานวิจัยนี้ออกแบบและสร้างแขนกลอวตารได้สัมฤทธิ์ผลในเชิงวิศวกรรม โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ทั้งรูปจลนศาสตร์และพลศาสตร์ การเลือกวัสดุ การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์และการสร้างจริง แม้ว่าภายในโครงสร้างที่ต่อกับแขนภายนอกจะซึ่งเป็นส่วนสะบักที่อยู่ในกระเป๋าจะเป็นกลไกเชื่อมต่อแบบชิ้นส่วนที่ต่อกับแขนนอกแบบ 4 ชิ้นอันตะ แต่ส่วนที่เป็นวัสดุครอบเพื่อเพิ่มการซับแรงและลดการสั่นยังมีส่วนที่ต้องปรับปรุงให้ดีขึ้น ดังจะกล่าวต่อไปในข้อเสนอแนะ

2) *การจัดแสดง* แม้ว่างานทางวิศวกรรมจะได้ผลในระดับที่สามารถทำเป็นฟังก์ชันการทำงานได้ แต่ว่างานทางสถาปัตยกรรมการออกแบบรูปลักษณ์ภายนอกยังขาดความสวยงาม จึงได้จัดแสดงขึ้นเป็นการภายในสถาบันฯ ณ หอประชุมคณะวิศวกรรมศาสตร์ ในวัน INNOVATION DAY วันที่ 25 มิถุนายน 2556 ดังภาพที่ 5.1 และ 5.2 เท่านั้น ซึ่งได้จัดแสดงโดยการนำแขนกลอวตารเข้าเป็นส่วนหนึ่งของกระเป๋าเดินทางที่สามารถแปลงรูปร่างได้ และได้รับความสนใจจากสื่อมวลชนที่มาร่วมชมในงานจัดแสดง ขณะนี้ผู้วิจัยได้กำลังปรับแบบภายนอกให้เกิดความสวยงามน่าใช้งานเพื่อที่จะได้จัดแสดงในวันนักประดิษฐ์ในปีถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 5.1 โปสเตอร์จัดแสดงในงานวัน INNOVATION DAY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 5.2 แขนกลอวตารสอดใส้ไปในกระเป๋าเดินทางที่นำเสนอในงาน INNOVATION DAY

5.2 ข้อเสนอแนะ

มีผู้กล่าวว่า "การประดิษฐ์ที่ดีที่สุดมีอยู่ในวันพรุ่งนี้เสมอ" ซึ่งย่อมไม่เกินความจริงเพราะงานที่สมบูรณ์ที่สุดในโลกนั้น "ไม่มี" ด้วยเวลาเพียงหนึ่งปีของ "แขนกลอวตาร" ก็เช่นกันไม่อาจที่จะทำให้สมบูรณ์แบบพระกรขององค์มหาเทพ "นารายณ์" ได้ ซึ่งควรได้รับการสนับสนุนในเฟสถัดไปให้ต่อยอดจนถึงขั้นสุดของการประดิษฐ์คือสามารถผลิตใช้และจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ทั้งนี้ก้าวต่อไปในการปรับปรุงให้ดีขึ้นควรกระทำในประเด็นต่อไปนี้

1) *การประดิษฐ์*

1.1) *ระบบสื่อสาร* แขนกลส่วนบุคคลที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นส่วนที่ทำงานในโหมดอิเลคทรอนิคส์เชิงกลยังไม่มีการสื่อสารกับแขนกลหรือหุ่นยนต์อื่นที่อยู่ข้างเคียง ควรบูรณาการแนวคิดนี้โดยอาศัยแนวทางใน [38-44] ในการเพิ่มฟังก์ชันการสื่อสาร

1.2) *ระบบจำกัดระยะปลอดภัย* ในงานวิจัยนี้ยังไม่มีการรักษาระยะปลอดภัยในการปฏิสังสรรค์ของแขนกลอวตารกับทั้งที่เป็นเจ้าของและมนุษย์อื่นที่ไม่ใช่เจ้าของ ในงานวิจัยครั้งต่อไปจึงควรพิจารณาสภาวะแขนกลอวตารกับมนุษย์และกับสิ่งแวดล้อม โดยอาจใช้เทคนิคแผนภาพนำร่องอิงศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

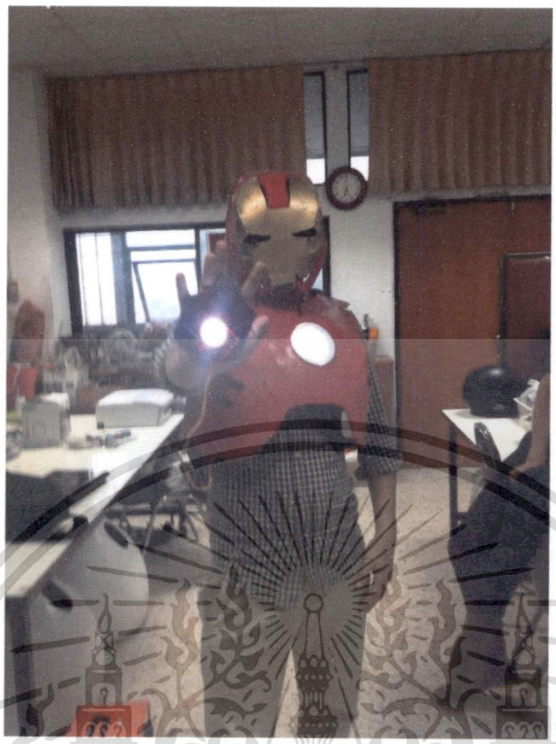
กลางคนใกล้สุด ซึ่งสามารถต่อยอดจากงานวิจัยในอดีตของนักวิจัยต่างประเทศโดยนำเทคนิควิธีการต่างๆ มาผสมผสานให้เหมาะกการนำไปใช้ในพื้นที่งานดังแสดงรายละเอียดใน [45-52] โดยการพิจารณาระยะห่างระหว่างการปฏิสังสรรค์ของหุ่นยนต์กับคนและหุ่นยนต์กับสิ่งกีดขวางใช้หลักการหาค่าน้อยสุดของระยะทางที่จะทำให้เกิดความปลอดภัยไม่มีพื้นที่ทับซ้อนของวงกลมหรือวงรีแสดงอาณาเขตของพื้นที่อ่อนไหวของหุ่นยนต์และของมนุษย์ ซึ่งเทคนิคนี้ได้นำมาใช้ในโหมดของการเคลื่อนที่ในพื้นที่ทำงานของแขนกลอวตารได้อันเป็นการต่อยอดจากงานวิจัยนี้

1.3) *การติดตั้งใช้งาน* สามารถขยายผลให้แขนกลสามารถเป็นส่วนหนึ่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (mobile robot) และสามารถแปลงรูปให้เป็นกระเป๋าเป้สะพายหลังใช้งานดังแสดงในภาพที่ 5.3

ภาพที่ 5.3 แนวคิดต่อยอดแขนกลอวตารในรูปหุ่นยนต์แปลงเคลื่อนที่

2) *การจัดแสดง* ในการจัดแสดงเพื่อให้เกิดการประชาสัมพันธ์ที่ได้ผลนั้น สิ่งที่มาจัดแสดงต้องมีรูปร่างดึงดูดสายตา และสะดุดใจต่อผู้พบเห็น แขนกลอวตารที่ได้ในเฟสนี้จึงขาดความสวยงามทางโครงสร้างและต้องปรับปรุงเพิ่มเติม ผู้วิจัยและคณะรวมทั้งนักศึกษาในห้องปฏิบัติการมีความพยายามที่จะรวมผลที่ได้จากงานวิจัยนี้เข้ากับชุดสวมใส่ในรูปคล้ายไอรอนแมน (Iron Man) เพื่อจุดประสงค์ด้านความงามและการขยายขีดจำกัดของมนุษย์ออกไปจากที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน จึงสมควรปรับปรุงประเด็นนี้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) สวมหน้ากากครอบ

(ข) ถอดหน้ากากครอบ

ภาพที่ 5.4 แนวคิดต่อยอดแขนกลอวตารในรูปแบบมนุษย์แปลงคล้ายไอรอนแมน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Turk, V., "The 24 robot arms of the K-Band Multi-Object Spectrograph," Wired Magazine, May 29, 2013.

[2] KMOS, Department of Physics, Oxford University, 2012, Retrieved from htttps://www2.physics.ox.ac.uk/research/optical-infrared-instrumentation/kmos

[3] Jackwan, L., James, D. H., and Wayne, J. B., "Experimental verification of large scale flexible manupulator," NASA Technical Reports, ID#19880067307, 1988.

[4] de Luca, A., and Siciliano, B., "Regulation of flexible arms under gravity," IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9 Issue. 4, pp. 463-467, 1993.

[5] Canon, R. H. Jr., and Schmitz, E., "Initial Experiment on the End-Point Control of flexible one-Link Robot," The international Journal of Robotic Research, Vol. 3, No. 3, pp. 666-672, 1984

[6] Nemir, D.C., Koivo, A. J., and Kashyap, R. L., "Pseudolinks and the self-tuning control of a nonrigid link mechanism," IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, Vol. 18, pp. 40-48, 1988.

[7] Yang, T. C., Yang, Y. C. S., and Kudva, P., "Load-adaptive control of a single-link flexible manipulator," IEEE Trans. Systems Man and Cybernetics, Vol. 22, No. 1, pp. 85-91, 1992.

[8] Thomas, S., and Bandyopadhay, B., "Comment on "A new controller design for a flexible one link manipulator"," IEEE Trans. Automatic Control, Vol. 42, pp. 425-428, 1997.

[9] Sooraksa, P., and Chen, G., "Mathematical Modeling and Fuzzy Control of a Flexible-Link Robot Arm," J. of Mathematical Computing and Modeling, Vol. 27, pp. 73-93, 1998.

[10] Ibrahimbegovic, A., and Mamouri, S., "Nonlinear dynamics of flexible beams in planar motion formulation and time-stepping scheme for stiff problems," Computers and Structures, pp. 1-22, 1999.

[11] Rhim, S., and Book, W.J., "Noise effect on adaptive command shaping methods for flexible manipulator control," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 9, Issue 1, pp. 84-92, 2001.

[12] Karkoub, M., and Tamma, K., "Modelling and μ-synthesis control of flexible manipulators," Computers and Structures, Vol. 79, pp. 543-551, 2001.

[13] www.quanser.com use keyword (search) "rotary flexible link"

[14] Nicosia, S., Valigi, P., and Zaccarian, L., "Dynamic modeling of a two-link flexible robot and experimental validation, IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, Vol. 3, p. 1953-1958, 1996.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[15] Park, K., and Park, Y., "Fourier-based optimal design of a flexible manipulator path to reduce residual vibration of the end-point," Robotica, Vol. 11, pp. 263-272, 1993.

[16]. Yang, H., Krisnan, H., and Ang., M. H. Jr., "A modal feedback control law for vibration control of multi-link flexible robots," Proc. of the American Control Conf., pp. 1821-1822, 1998.

[17] Luca, A. D., and Sicilliano, B., "Closed-form dynamic model of planar multilink lightweight robots," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernatics, Vol. 21, No. 4, pp. 826-839, 1991.

[18] Bellezza, F., Lanari, L., and Ulivi, G., "Exact modeling of the slewing flexible link," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 734-739, 1990.

[19]. Nicosia, S., Tomei, P., and Tornambe, A., "Dynamic modeling of flexible robot manipulator," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 365-372, 1986.

[20] Tomei, P., and Tornambe, A., "Approximate modeling of robots having elastic links," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernatics, Vol. SMC-18,pp. 831-840, 1988.

[21] Yazdizadeh, A., Khorasani, K., and Patel, R. V., "Identification of a two-link flexible manipulator using adaptive time delay neural networks," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernatics, Part B., pp. 165-172, 2000.

[22] Yazdizadeh, A., and Khorasani, K, "Nonlinear system identification using adaptive time delay neural networks," Proc. World Congress Neural Networks, pp. 482-485, 1997.

[23] M. H., Jr., "A simple rest-to-rest control command for a flexible link robot," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 3312-3316, 1997.

[24] Krisnan, H., and Vidyasagar, M., "Bounded input discrete-time control of a flexible beam:theory, simulation, and experimental results," Proc. ASME meeting, pp. 1-16, 1988.

[25] Lucibello, P., and Bellezza, F., "Nonlinear adaptive control of a two-link flexible robot arm," IEEE Int. Conf. Decision and Control, pp. 2545-2550, 1990.

[26] Khorrami, F., and Ozguner, U., "Perturbation methods in control of flexible link manipulators, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 310-315, 1998.

[27] Daafouz, J., Garcia, G., and Bernussou, J., "Robust control of a flexible robot arm using the Quadratic d-Stability Approach," IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 6, No. 4, 1998.

[28] Sooraksa, P. and Klomkarn, K., An Authentication Device, World Intellectual Property Organization, WO 2008/044998 A1.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[29] Sooraksa, P. and Klomkarn, K., "No-CPU" chaotic robots: From classroom to commerce," IEEE Magazine, Vol 10, Issue 1, pp. 46-53, 2010.

[30] K. Klomkarn, and **P. Sooraksa,** "Simple self instructional module based on chaotic oscillator: Few blocks generating many patterns," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol.21, Issue 5, pp. 1469-1491, 2011.

[31] Westphal, L., *Handbook of Control System Engineering*, 2nd Ed., Kluwer Academic Publishers: Massachusetts, 2001.

[32]Webster, J. G., *The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*: IEEE Press, 1999.

[33] Gibson, J. D., *The Communication Handbook*, Second Ed., CRC Press: Florida, 2002.

[34] Ashby, M. F., *Material Selection in Mechanical Design*, Third Ed., Pergamon Press: Massachusetts, 2005.

[35] Patently Apple,"New robotic arm finishing system for iPhone," http://www.patentlyapple.com.

[36] Patently Apple, "Reinvent detail packaging transformer style," http://www.patentlyapple.com.

[37] Roberts, I., US 2013/0174683, *US Patent Application*, July 11, 2013.

[38] Sun, J., Zhu, X., Zhang C., and Fang, Y., "RescueMe: Location-Based Secure and Dependable VANETs for Disaster Rescue," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, March, 2011.

[39] K Kanchanasut, "Building A Long-distance Multimedia Wireless Mesh Network for Collaborative Disaster Emergency Responses", Publisher: Internet Education and Research Laboratory, Asian Institute of Technology (AIT), pp. 1-19 , " April, 2007.

[40] Tony L. "Routing Protocols in Wireless Ad-hoc Networks, A Simulation Study," Master's thesis in Computer Science and Engineering, Lulea University of Technology, Stockholm, 1998.

[41] Lundgren, H., Nordstrom, E., and Tschudin, C., "Coping with Communication Gray Zones in IEEE 802.11b based Ad hoc Networks," Department of Information Technology, Uppsala University, September 2002.

[42] Lundgren, H. et.al, "A Large-scale Testbed for Reproducible Ad hoc Protocol Evaluations," In Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC02), March 2002.

[43] Lundberg, D., "Ad hoc Protocol Evaluation and Experience of Real World Ad Hoc Networking," Department of Information Technology, Uppsala University, 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[44] Corson, S. and Macker, J., "Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations," *RFC 2501*, January 1999.

[45] Sisbot, E. A., Marin-Urias, L. F., Alami, R. and Simeon, T., "A human aware mobile robot motion planner," *IEEE Trans. Robot.*, Vol. 23, No. 5, pp. 874–883, Oct. 2007.

[46] Takeshi, S. and Hideki, H., "Human observation based mobile robot navigation in intelligent space," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst.*, 2006, pp. 1044–1049.

[47] Minguez, J., and Montano., L., "Nearness Diagram (ND) Navigation: Collision Avoidance in Troublesome Scenarios," *IEEE Trans. Robot.*, Vol.20, No.1, pp. 45-59, Feb. 2004.

[48] Fox, D., Burgard, W., and S. Thrun, "The dynamic window approach to collision avoidance," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, Vol. 4, No.1, pp. 23-33, Mar. 1997.

[49] Alami, R., Belousov, I., Fleury, S., Herrb, M., Ingrand, F., Minguez,J. and Morisset,B., "Diligent: towards a human-friendly navigation system," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, 2000, pp. 21–26.

[50] Lam, C. P., Chou, C.T., Chiang, K.H., and Fu, L.C., "Human-Centered Robot Navigation-Towards a Harmoniously Human–Robot Coexisting Environment," IEEE TRANS. ROBOT., Vol. 27, No. 1, pp. 99-112, FEB. 2011

[51] Khatib, O., "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 5,pp. 90-98, 1986.

[52] LaValle, S.M., and Kuffner, Jr., J.J., "Randomized kinodynamic planning," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 20, pp. 378–400, 2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

สมการของลากรานจ์

ในการคำนวณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกลไก ใช้วิธีการของลากรานจ์ในการหาสมการสำคัญต่างๆในระบบ

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \qquad \text{(ก.1)}$$

โดยที่ $L = T - V$ สมการนี้รู้จักกันในชื่อของสมการของลากรานจ์ ซึ่ง T หมายถึงพลังงานจลน์ของแต่ละชิ้นส่วนต่อโยงในระบบ V หมายถึงพลังงานศักย์ของแต่ละชิ้นส่วนต่อโยงในระบบ แขนกลจะมีส่วนต่อโยงทั้งหมด 5 ชิ้น คือ L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 โดยส่วนต่อโยง L_5 ถูกตรึงอยู่กับที่ตามภาพที่ 3.1 ส่วนต่อโยงทั้งห้าชิ้นนี้รวมเรียกว่า กลไกต่อโยง 5 ชิ้น (five-bar linkage) และ q_i เป็นมุมระหว่างส่วนต่อโยงแต่ละชิ้นเทียบกับแกน x แต่ในที่นี้จะทำการตรึง L_5 เหลือเพียง 4 ชิ้น จะได้พลังงานจลน์รวมของระบบคือ

$$T = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{4}[I_i \dot{q}_i + m_i(\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2)] \qquad \text{(ก.2)}$$

เมื่อ I_i คือความเฉื่อยที่เกิดขึ้นทั้งหมดเช่น ความเฉื่อยที่มาจากภายในมอเตอร์ ความเฉื่อยที่เกิดขึ้นจากภาระงาน หรือความเฉื่อยของแต่ละส่วนต่อโยง, τ_i คือแรงบิดของตัวขับเร้าที่เป็นมอเตอร์, m_i คือมวลของส่วนต่อโยงแต่ละชิ้น, x_iและ y_i คือพิกัดจุดศูนย์กลางมวล ของส่วนต่อโยงแต่ละชิ้นตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ พลังงานศักย์รวมของระบบคือ

$$V = \sum_{i=1}^{4} m_i g y_i \qquad \text{(ก.3)}$$

เมื่อ g คือความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก, จากสมการของพลังงานศักย์ และพลังงานจลน์รวมของระบบ เมื่อแทนค่าสมการทั้งสองไปยังสมการของลากรานจ์ ทำให้สามารถหาสมการหลักในการคำนวณหาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล ปิติเขต สู้รักษา

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

การศึกษาสูงสุด Ph.D. (Electrical Engineering) University of Houston, USA

ได้รับรางวัลงานวิจัยดีเด่นปี 2542 และ 2551 มอบโดย สกว. รางวัลต้นแบบโทรคมนาคมยอดเยี่ยม ปี 2553 และสิทธิบัตร World Patent PCT 2008: An Authentication Device ร่วมกับ กฤดากร กล่อมการ

ชื่อ-สกุล กฤดากร กล่อมการ

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

การศึกษาสูงสุด D. Eng. KMITL

ได้รับรางวัลงานวิจัยดีเด่นปี 2551 มอบโดย สกว. และรางวัลต้นแบบโทรคมนาคมยอดเยี่ยม ปี 2553 และสิทธิบัตร World Patent PCT 2008: An Authentication Device ร่วมกับ ปิติเขต สู้รักษา และครุฑทองคำรางวัลข้าราชการดีเด่น ปี 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้