

การออกแบบและสร้างมือกลที่เหมาะสมที่สุดในการจับยกชิ้นงานโดยใช้เมาส์แสง

ปริญญานิพนธ์
ของ
อาทิตย์ คำต่าย

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มีนาคม 2553

การออกแบบและสร้างมือกลที่เหมาะสมที่สุดในการจับยกชิ้นงานโดยใช้เมาส์แสง

ปริญญาโท

ของ

อาทิตย์ คำต่าย

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มีนาคม 2553

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การออกแบบและสร้างมือกลที่เหมาะสมที่สุดในการจับยกชิ้นงานโดยใช้เมาส์แสง

บทคัดย่อ

ของ

อาทิตย์ คำต่าย

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มีนาคม 2553

อาทิตย์ คำต่าย. (2553). การออกแบบและสร้างมือกลที่เหมาะสมที่สุดในการจับยกชิ้นงานโดยใช้เมาส์แสง. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: อาจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล, พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวิวัชร วีระแก้ว.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ และสร้างมือกลสำหรับจับยกชิ้นงาน ด้วยการใช้เมาส์แสงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ในการตรวจจับการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน และประยุกต์ใช้หลักความโน้มถ่วงสูงสุด เพื่อควบคุมการทำงานของมือกล ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ประมวลผลหาค่าความเหมาะสมสูงสุดของระบบพลศาสตร์ แล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และแรงในการจับยกกับมือกลประเภทใช้เมาส์ลูกกลิ้งตรวจจับการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน โดยในการทดสอบหาประสิทธิภาพ และแรงในการจับยกมีการทดสอบโดยใช้น้ำหนักมาตรฐาน 1 N, 2 N, 3 N และ 4 N มีวัสดุรองรับเป็นฟองน้ำ และยาง

ผลการทดสอบพบว่ามือกลติดตั้งเมาส์แสงใช้แรงในการจับยกชิ้นงานน้อยกว่ามือกลที่ติดตั้งเมาส์ลูกกลิ้ง 15.5% คิดเป็นประสิทธิภาพ 75.5% และสำหรับวัสดุรองรับที่เป็นยางจะใช้แรงจับยกน้อยกว่าวัสดุรองรับที่เป็นฟองน้ำ 3.3% คิดเป็นประสิทธิภาพ 70.5%

คำสำคัญ : มือกล / เมาส์แสง / ความโน้มถ่วงสูงสุด

THE OPTIMAL DESIGN AND FABRICATION FOR GRIP BY USING
OPTICAL MOUSE

AN ABSTRACT
BY
ARTIT KAMTAI

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering Degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

March 2010

Artit Kamtai. (2010). *The Optimal Design and Fabrication for Grip by Using Optical Mouse*.

Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School,
Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Dr. Pracha Bunyawanichakul:
Col. Asst. Prof. Dr. Tawiwat Veeraklaew

This thesis aim to design and fabrication grip using optical mouse to detect the displacement of work piece during the operation computer program is used to control the operation of system by develop means software package using minimum jerk principle. Performance and gripping force of optical mouse grip are compared to the ordinary roller mouse grip. Standard test weight of 1 N, 2 N, 3 N and 4 N is used during the performance and gripping force testing of different materials sponges and rubber

The results of the research indicate that the installation of the optical mouse would use less force than the ordinary roller mouse in lifting the objects and has 15.5% at efficiency 75.5%. At for the material used for supporting the grip, the hand with rubber tips would use less force than the one with sponges and is 3.3% at efficient 70.5%

Keywords: Grip / Optical mouse / Minimum jerk

ประกาศคุณูปการ

ปริญญาโทฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของ อาจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล ประธานกรรมการควบคุมปริญญาโท และ พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวิวัชร วีระแก้ว กรรมการควบคุมการทำปริญญาโท ให้ความช่วยเหลือ และแก้ไขความบกพร่อง อีกทั้งให้กำลังใจขณะดำเนินการทำปริญญาโท ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงตลอดไป

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ ชุติมา ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบปริญญาโท ตลอดจน อาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ตลอดระยะเวลาที่ได้ทำการศึกษาตามหลักสูตร ความรู้ที่ได้ศึกษาทุกวิชา เป็นประโยชน์กับการทำปริญญาโทอย่างมาก

ขอขอบคุณเงินทุนสนับสนุนการทำปริญญาโท จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ท้ายสุดขอขอบคุณ บิดา มารดา ตลอดจนเพื่อนร่วมรุ่น และเพื่อนร่วมงานทุกท่านที่ให้ความสนับสนุนช่วยเหลือให้กำลังใจเป็นอย่างดีตลอดมา

อาทิตย์ คำต่าย

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย
จาก
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
3 วิธีการดำเนินการวิจัย	32
การออกแบบสร้างมือกล.....	32
การออกแบบสร้างแขนกล.....	34
การหาสมการการเคลื่อนที่.....	35
การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	37
การออกแบบระบบควบคุมมือกล.....	37
การเขียนโปรแกรม Propeller.....	39
วิธีจับยกชิ้นงาน.....	43
4 ผลการวิจัย	45
ผลการแก้ปัญหาของความนิ่งมวลที่สูงสุดโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	45
ผลการเคลื่อนที่ของแขนกล และมือกล.....	49
ผลการจับยกชิ้นงานด้วยมือกลที่ติดตั้งเมาส์แสง และเมาส์ลูกกลิ้ง.....	51
เปรียบเทียบผลการจับยกชิ้นงาน.....	54
5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	55
สรุปผล.....	55
ข้อเสนอแนะทั่วไป.....	55
ข้อเสนอแนะงานวิจัยครั้งต่อไป.....	56

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บรรณานุกรม.....	57
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก.....	61
ภาคผนวก ข.....	67
ภาคผนวก ค.....	75
ภาคผนวก ง.....	79
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	85

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงการแบ่งชนิดของหุ่นยนต์ตามแกนต่างๆ.....	5
2 แสดงตาราง DH-Parameter.....	35
3 ตรวจสอบสภาพโดยทั่วไปของแขนกล และมือกล.....	49
4 แสดงผลการแก้ปัญหาคำนวณน้ำหนักสูงสุดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	62
5 แสดงผลการจับยกชิ้นงานที่น้ำหนัก 1 N.....	63
6 แสดงผลการจับยกชิ้นงานที่น้ำหนัก 2 N.....	64
7 แสดงผลการจับยกชิ้นงานที่น้ำหนัก 3 N.....	65
8 แสดงผลการจับยกชิ้นงานที่น้ำหนัก 4 N.....	66

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แสดงชนิดข้อต่อของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่หมุนและเคลื่อนที่เชิงเส้น.....	4
2 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดคาร์ทีเซียนหรือหุ่นยนต์เกรทรี.....	5
3 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดทรงกระบอกล.....	6
4 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดเฟียร์คอลล.....	7
5 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดสกร่า.....	7
6 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดอาทิกูล่า.....	8
7 แสดงตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล (CM).....	9
8 แสดงแท่งกลมขนาดเล็ก ส่วนที่แรงงาคือมวล dm เล็กๆ ที่แบ่งในช่วง dx	11
9 แสดงภาพประกอบทฤษฎีแก๊นขนาน.....	13
10 แสดงแกนที่ติดกับเฟรมของแขนกลรูปทรงคล้ายข้อศอก.....	15
11 แสดงการตั้งเฟรมตามวิธีเดนาวิต-ฮาร์เทินเบอร์ก (DENA-VIT-HARTENBERG).....	16
12 แสดงลักษณะมือกล 2 นิ้ว.....	32
13 แสดงมือกลติดตั้งเมาส์แสง.....	33
14 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของแขนกล.....	34
15 แสดงแบบจำลองการเคลื่อนที่แขนกล.....	35
16 แสดงบอร์ด ET-BASE PX32 Chip P8X32.....	37
17 แสดงการทำงานของมือกล.....	38
18 แสดงโปรแกรม Propeller.....	39
19 แสดงหน้าจอโปรแกรม Propeller.....	39
20 แสดง File Name โปรแกรม Propeller.....	40
21 แสดงการกำหนดค่าคงที่ให้กับตัวแปรใน CON-Block.....	40
22 แสดงการประกาศตัวแปรใน VAR – Block.....	40
23 แสดงการกำหนดชื่อไฟล์จากภายนอกใน OBJ – Block.....	41
24 แสดงการเขียนเงื่อนไขใน Block PUB.....	41
25 แสดงการ Save File เป็นนามสกุลจุด spin.....	42
26 แสดงการ RUN โปรแกรม Propeller.....	42
27 แสดงการเข้าสาย Download เข้ากับ Com-Port ของ PC.....	43
28 แสดงมือกลที่ติดตั้งเมาส์แสงจับยกชิ้นงาน.....	44
29 แสดงมือกลที่ติดตั้งเมาส์ลูกกิ่งจับยกชิ้นงาน.....	44
30 แสดงการเคลื่อนที่ของ $x_1(t)$ เทียบกับเวลา.....	45

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
31 แสดงการเคลื่อนที่ของ $\dot{x}_1(t)$ เทียบกับเวลา.....	46
32 แสดงแรงบิดของเฟรมที่ 1 เทียบกับเวลา จากการแก้ปัญหาของความโน้มถ่วง สูงสุด.....	46
33 แสดงการเคลื่อนที่ของ $x_2(t)$ เทียบกับเวลา.....	47
34 แสดงการเคลื่อนที่ของ $\dot{x}_2(t)$ เทียบกับเวลา.....	47
35 แสดงแรงบิดของเฟรมที่ 2 เทียบกับเวลา จากการแก้ปัญหาของความโน้มถ่วง สูงสุด.....	48
36 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนกล และมือกล.....	50
37 แสดงการจับยกชิ้นงานของมือกลติดตั้งเมาส์แสง.....	51
38 แสดงการจับยกชิ้นงานของมือกลติดตั้งเมาส์ลูกกิ่ง.....	51
39 แสดงผลการจับยกชิ้นงานของมือกลติดตั้งเมาส์แสง และเมาส์ลูกกิ่งมี วัสดุรองรับเป็นยาง.....	52
40 แสดงผลการจับยกชิ้นงานของมือกลติดตั้งเมาส์แสง และเมาส์ลูกกิ่งมี วัสดุรองรับเป็นฟองน้ำ.....	53
41 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างมือกลติดตั้งเมาส์แสงกับมือกลติดตั้ง เมาส์ลูกกิ่ง.....	54

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมบางแห่งที่มีการจับภาชนะที่บรรจุสารเคมี หรือวัตถุที่เป็นอันตรายต้องใช้มือมนุษย์ในการจับหรือเคลื่อนย้าย และงานทางด้านเกษตร ที่มีการจับหรือเคลื่อนย้ายวัตถุที่บอบบางมากต้องการระมัดระวังในการเคลื่อนย้าย งานเหล่านี้ต้องใช้มือมนุษย์เข้าไปจับเคลื่อนย้าย หากเกิดความผิดพลาดอาจทำให้วัตถุเสียหายหรือเป็นอันตรายต่อมนุษย์ การสร้างมือกลจับชิ้นงานขึ้นมาใช้งานแทนมือมนุษย์จะเป็นประโยชน์อย่างมากในการช่วยลด ความเสียหายของวัตถุและไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ต่อมาได้มีการออกแบบและสร้างมือกล สำหรับจับยกชิ้นงานโดยใช้หลักการของแรงเสียดทานระหว่างผิวของวัตถุ กับการทำงานของเมาส์ลูกกลิ้ง ซึ่งหากเกิดการเคลื่อนที่หรือสั่นไถลของชิ้นงานในขณะที่จับยก มือกลก็จะเลื่อนนิ้วเพื่อเพิ่มแรงในการจับยกชิ้นงานขึ้นเรื่อยๆ จนสามารถจับยกชิ้นงานด้วยแรงที่เหมาะสม เหมือนกับการหยิบสิ่งของด้วยมือของมนุษย์ โดยไม่มีการสั่นหลุดออกจากมือ แต่เนื่องจากจุดด้อยของเมาส์ลูกกลิ้งก็คือมีขีดจำกัดในการทำงานที่ต้องใช้งานบนพื้นผิวที่เรียบ อีกทั้งยังมีความละเอียดความแม่นยำในการประมวลผลต่ำ จึงทำให้อาจเกิดการผิดพลาดในการตรวจจับการเคลื่อนที่หรือสั่นไถลของชิ้นงานเวลามือกลจับยกทำให้ไม่สามารถควบคุมแรงที่ใช้จับยกชิ้นงานอย่างเหมาะสม

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเมาส์แสงขึ้นเพื่อใช้แทนเมาส์ลูกกลิ้งที่ยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน เมาส์แสงไม่มีกลไก หรือลูกกลิ้งที่ใช้เคลื่อนไหวแต่อย่างใด เนื่องจากใช้วิธียิงลำแสงลงไปพื้นและมีเซ็นเซอร์คอยรับลำแสงที่จะสะท้อนกลับมา เพื่อเปลี่ยนเป็นทิศทางการเคลื่อนที่ เมาส์แบบนี้ใช้งานสะดวก เนื่องจากไม่ต้องคอยดูแลความสะอาด และมีความรวดเร็วความแม่นยำในการทำงานสูงกว่าเมาส์ลูกกลิ้ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการออกแบบและสร้างมือกลที่มีความสามารถในการรับรู้ถึงการจับยกชิ้นงานด้วยแรงที่เหมาะสม โดยการนำเอาเมาส์แสงมาติดตั้งกับมือกลเพื่อใช้ในการตรวจจับการเคลื่อนที่หรือสั่นไถลของชิ้นงานแทนเมาส์ลูกกลิ้งและนำหลักการความโน้มถ่วงสูงสุดมาใช้ในการออกแบบสร้างมือกลซึ่งคาดว่า การออกแบบและสร้างมือกลโดยการนำเอาเมาส์แสงมาใช้สำหรับตรวจจับการเคลื่อนที่หรือสั่นไถลของชิ้นงานร่วมกับหลักการความโน้มถ่วงสูงสุดในการเคลื่อนที่ขณะมือกลเข้าจับยกชิ้นงานแรงที่ใช้ในการจับยกชิ้นงานจะเป็นแรงที่เหมาะสมสูงสุด และมีความละเอียดความแม่นยำในการตรวจจับการเคลื่อนที่หรือสั่นไถลของชิ้นงานมากกว่ามือกลติดตั้งเมาส์ลูกกลิ้ง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างมือกลที่ใช้หลักการความโน้มถ่วงสูงสุดในการเคลื่อนที่โดยมีเม้าส์แสงเป็นอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการจับยกชิ้นงานระหว่างมือกลติดตั้งเม้าส์แสงกับมือกลติดตั้งเม้าส์ลูกกิ่ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 แขนกลเป็นแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น 1 แกน และเคลื่อนที่เชิงมุม 1 แกน

1.3.2 เม้าส์ที่ใช้ติดตั้งกับมือกลเป็นแบบเม้าส์แสง และเม้าส์ลูกกิ่ง

1.3.3 ผิวของชิ้นงานต้องไม่เป็นแบบดุดกлинแสง

1.3.4 ตัวแปรที่ศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

1.3.4.1 ตัวแปรต้น ประกอบด้วย ชิ้นงานรูปทรงกระบอก มีน้ำหนักไม่เกิน 4 N และวัสดุที่ใช้รองจับมือกลคือ ฟองน้ำ และ ยาง

1.3.4.2 ตัวแปรตาม ประกอบด้วย แรงที่ใช้จับยกชิ้นงาน และประสิทธิภาพในการจับยกชิ้นงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมที่เป็นอันตรายแทนมือมนุษย์ได้

1.4.2 เป็นพื้นฐานในการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมมือกล

1.4.3 เป็นแนวทางในการค้นคว้าพัฒนามือกลให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และนำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 หุ่นยนต์ (Robot)

หุ่นยนต์เริ่มเข้ามามีบทบาทในชีวิตของมนุษย์มากขึ้น ในปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมหลายแห่งมีการนำแขนกลมาใช้ในงานประกอบชิ้นส่วนรถยนต์แทนแรงงานมนุษย์ ซึ่ง Karel Capek ได้ให้คำจำกัดความของ “หุ่นยนต์” ไว้เมื่อปี ค.ศ.1920 ว่าเป็นทาสผู้ถูกใช้แรงงาน (Forced labor) ในอดีตหุ่นยนต์ต่างๆ มีหลักการทำงานแบบเดียวกันคือ ทำงานตามโปรแกรมที่ถูกตั้งไว้ไม่มีสิทธิ์คิดเอง เมื่อพบปัญหาที่แปลกไปจากโปรแกรมที่ตั้งไว้ก็เป็นอันทำงานไม่ได้

ต่อมานักวิทยาศาสตร์จึงได้คิดประดิษฐ์ปัญญาเทียม (Artificial intelligence; AI) โดยใช้คอมพิวเตอร์ซึ่งมีโปรแกรมที่ซับซ้อน และเชื่อมโยงด้วยวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ขนาดจิ๋ว (Microchip) ที่เรียกว่าใยประสาทคอมพิวเตอร์ (Neuro computing) โดยมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับใยประสาทของมนุษย์ เมื่อหุ่นยนต์เจอปัญหาที่ซับซ้อนก็สามารถวิเคราะห์และหาคำตอบได้โดยทันที

นิยามของหุ่นยนต์ (Robotics definition) ตามมาตรฐาน ISO 8373 หุ่นยนต์ คือ “An automatic machine and semi automatic machine, Reprogrammable, Multipurpose, Manipulator programmable in three or more axes which may be either fixed in place or mobile for use in industrial automation application.” หรือแปลเป็นภาษาไทยได้ว่าหุ่นยนต์ คือ “เครื่องจักรกลชนิดหนึ่งที่มีลักษณะการทำงานแบบอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติ สามารถเขียนโปรแกรมใหม่ให้ทำงานได้อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างได้ หุ่นยนต์อาจจะยึดอยู่กับที่หรือย้ายตำแหน่งเพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม” จากเทคโนโลยีการสร้างหุ่นยนต์แต่ละชนิดบวกกับการประยุกต์ใช้หุ่นยนต์ ทำให้หุ่นยนต์ถูกเลือกนำมาใช้อย่างตามความเหมาะสมกับงาน

หุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Industrial robot) จาก RIA (The Robotics Industries Association) ได้ให้คำจำกัดความของหุ่นยนต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันในระดับนานาชาติของบริษัทอุตสาหกรรมที่ใช้หุ่นยนต์ 11 แห่ง เมื่อปี ค.ศ.1981 (พ.ศ.2524) ไว้ว่า “An industrial robot is a reprogrammable, multifunction manipulator designed to move materials, part, tools or special devices through variable programmed motion for the performance of a variety of tasks.” หรือแปลเป็นภาษาไทยว่า “หุ่นยนต์อุตสาหกรรม คือ เครื่องจักรกลที่สามารถทำการตั้งโปรแกรมเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ให้ทำงานได้ตามต้องการ ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถ

หยิบ จับ เคลื่อนย้ายวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ หรืออุปกรณ์พิเศษต่างๆ” โดยปกติการทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจะเลียนแบบร่างกายของมนุษย์เฉพาะส่วนของร่างกายที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเท่านั้นโดยส่วนใหญ่จะเป็นช่วงแขนของมนุษย์ ดังนั้นจึงเรียกได้ว่าแขนกล ซึ่งหมายถึงหุ่นยนต์อุตสาหกรรมนั่นเอง ปัจจุบันและในอนาคตอันใกล้นี้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมเข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมมากขึ้นจะทำงานแทนมนุษย์ในหลายๆ งาน

2.1.2 ประเภทของหุ่นยนต์

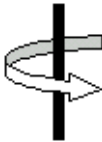

หุ่นยนต์จะถูกพัฒนาไปในหลายๆ รูปแบบ แต่ก็สามารถแบ่งประเภทหุ่นยนต์ ออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

ประเภทแรก คือหุ่นยนต์ชนิดที่ติดตั้งอยู่กับที่ (Fixed robot) ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปไหนได้ด้วยตัวเอง หุ่นยนต์ประเภทนี้จะมีลักษณะเป็นแขนกล สามารถเคลื่อนไหวได้เฉพาะแต่ละข้อต่อภายในตัวเองเท่านั้น ส่วนมากมักถูกนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานประกอบรถยนต์

ประเภทที่สอง คือหุ่นยนต์ชนิดที่เคลื่อนที่ได้ (Mobile robot) หุ่นยนต์ประเภทนี้จะสามารถเคลื่อนที่ไปไหนมาไหนได้ด้วยตัวเอง บ้างก็เคลื่อนที่โดยการไถล้อ หรือบางแบบก็เคลื่อนที่โดยการไต่ขา ซึ่งหุ่นยนต์ประเภทนี้ ส่วนใหญ่ยังเป็นงานวิจัยที่อยู่ในห้องทดลอง เพื่อพัฒนาออกมาใช้งานในรูปแบบต่างๆ เช่น หุ่นยนต์สำรวจดาวอังคารขององค์การนาซ่า แต่ปัจจุบันก็ได้มีการพัฒนาให้มีลักษณะเป็นสัตว์เลี้ยงอย่างเช่น สุนัข เพื่อเป็นเพื่อนเล่นกับคน หรือพัฒนาให้สามารถเคลื่อนที่แบบสองขาได้อย่างมนุษย์ เพื่ออนาคตจะสามารถนำไปใช้ในงานที่มีความเสี่ยงต่ออันตรายแทนมนุษย์ได้

2.1.3 การแบ่งชนิดของหุ่นยนต์

โดยทั่วไปจะแบ่งตามลักษณะรูปทรงของพื้นที่ทำงาน (Envelope geometric) ซึ่งพิจารณาได้จากการทำงานของข้อต่อของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ซึ่งในขั้นพื้นฐานมี 2 ชนิดด้วยกันดังภาพประกอบ 1 แสดงชนิดของข้อต่อของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่หมุน (Revolute) และเคลื่อนที่เชิงเส้น (Prismatic)

ชนิด	สัญลักษณ์	หมายเหตุ
Revolute (R)		เป็นการหมุนรอบแกน (Rotary)
Prismatic (P)		การเคลื่อนที่เชิงเส้น (Linear motion)

ภาพประกอบ 1 แสดงชนิดของข้อต่อของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่หมุน (Revolute) และเคลื่อนที่เชิงเส้น (Prismatic)

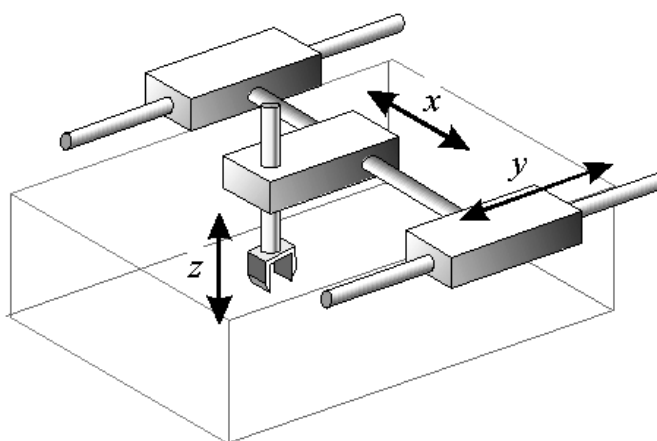
จุดต่อทั้งสองแบบเมื่อนำมาต่อเข้าด้วยกันอย่างน้อย 3 แกนหลัก จะได้พื้นที่ทำงานที่มีลักษณะแตกต่างกันไป ซึ่งสามารถนำมาแบ่งชนิดของหุ่นยนต์ได้ดังต่อไปนี้

ตาราง 1 แสดงการแบ่งชนิดของหุ่นยนต์ตามแกนต่างๆ

ชนิดของหุ่นยนต์	แกนที่ 1 (เอว)	แกนที่ 2 (ไหล่)	แกนที่ 3 (ข้อศอก)
Cartesian (gantry)	Prismatic	Prismatic	Prismatic
Cylindrical	Revolute	Prismatic	Prismatic
Spherical (Polar)	Revolute	Revolute	Prismatic
SCARA	Revolute	Prismatic	Revolute
Articulated	Revolute	Revolute	Revolute

โดยแต่ละชนิดมีคุณสมบัติดังนี้

2.1.3.1 หุ่นยนต์ชนิดคาร์ทีเซียน (Cartesian manipulator) หรือหุ่นยนต์ชนิดแกนทรี (Gantry manipulator) โดยถ้าโครงสร้างมีลักษณะคล้ายหุ่นยนต์ที่มีขาตั้ง (Overhead crane) จะเรียกว่าเป็นหุ่นยนต์ชนิดแกนทรีนอกนั้นจะเป็นแบบคาร์ทีเซียนทั้งหมด ซึ่งทั้งสองประเภทจะมีลักษณะการทำงานที่ทั้งสามแกนของหุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้นตามภาพประกอบ 2 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดคาร์ทีเซียนหรือหุ่นยนต์ชนิดแกนทรี



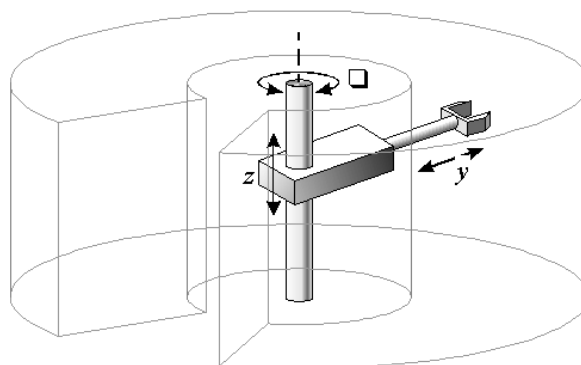
ภาพประกอบ 2 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดคาร์ทีเซียนหรือหุ่นยนต์ชนิดแกนทรี

โดยหุ่นยนต์ลักษณะนี้มีข้อดี คือ การเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงทั้ง 3 มิติ รูปแบบการทำงานสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย โครงสร้างแข็งแรงและมีส่วนประกอบง่าย ๆ แต่มีข้อเสีย คือ ต้องการพื้นที่ติดตั้งมาก บริเวณที่หุ่นยนต์เข้าไปทำงานได้ จะเล็กกว่าขนาดของตัวหุ่นยนต์ และไม่สามารถเข้าถึงวัตถุจากทิศทางข้างใต้ได้

ส่วนใหญ่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องหยิบยกชิ้นงาน (Pick-and-Place) หรือการเคลื่อนย้ายของหนัก ๆ เช่น ใช้โหลดชิ้นงานเข้าเครื่องจักร (Machine loading) ใช้จัดเก็บชิ้นงาน (Stacking) นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในงานประกอบ (Assembly) ที่ไม่ต้องการเข้าถึงในลักษณะที่มีมุมหมุน เช่น ประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และงานทดสอบต่างๆ

2.1.3.2 หุ่นยนต์ชนิดทรงกระบอก (Cylindrical manipulator)

โครงสร้างการทำงานของหุ่นยนต์ประเภทนี้จะได้พื้นที่การทำงานเป็นลักษณะรูปทรงกระบอก ตามภาพประกอบ 3 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดทรงกระบอก



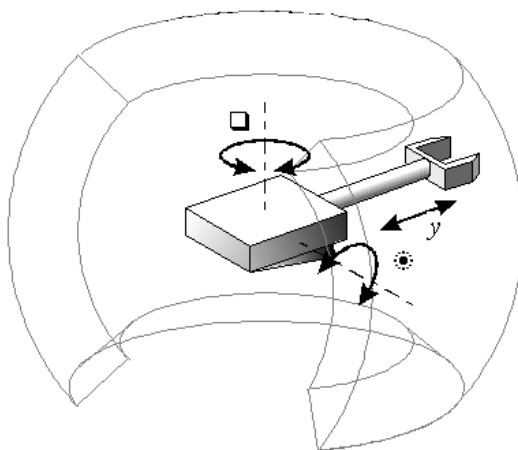
ภาพประกอบ 3 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดทรงกระบอก

โดยหุ่นยนต์ลักษณะนี้มีข้อดี คือ มีส่วนประกอบที่ไม่ซับซ้อน สามารถเข้าใจการทำงานของหุ่นยนต์ได้ง่าย และสามารถเคลื่อนที่เข้าออกบริเวณที่เป็นโพรงเล็กๆ ได้สะดวก เช่น การโหลด ชิ้นงานเข้าเครื่อง CNC แต่ก็มีข้อเสีย คือ มีพื้นที่การทำงานจำกัด

ส่วนใหญ่หุ่นยนต์ลักษณะนี้จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องหยิบยกชิ้นงาน หรือป้อนชิ้นงานเข้าเครื่องจักร เพราะสามารถเคลื่อนที่เข้าออกบริเวณที่เป็นช่องโพรงเล็กๆ ได้สะดวก

2.1.3.3 หุ่นยนต์ชนิดสเฟียริคัล (Spherical manipulator)

โดยสามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าหุ่นยนต์ชนิดโพล่า (Polar robot) ซึ่งมีโครงสร้างการทำงานของเป็นสองแกนที่เคลื่อนในลักษณะการหมุน ส่วนอีกแกนเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง ตามภาพประกอบ 4 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดสเฟียริคัล



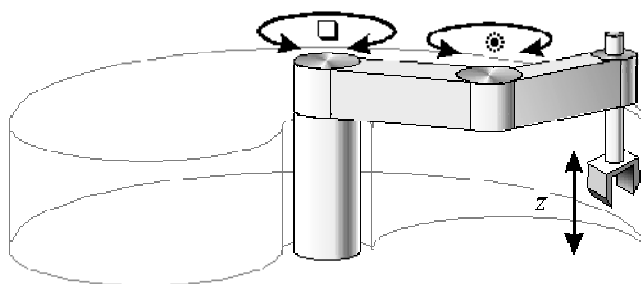
ภาพประกอบ 4 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดสเฟียริคอล

ซึ่งหุ่นยนต์ชนิดนี้มีข้อดี คือ สามารถทำงานได้มากขึ้น เนื่องจากการหมุนของแกนที่ทำหน้าที่เป็นเอวและไหล่สามารถก้มลงมาจับชิ้นงานบนพื้นได้สะดวก แต่ก็มีข้อเสีย คือมีระบบพิกัด (Coordinate) และส่วนประกอบที่ซับซ้อน ทำให้การเคลื่อนที่และระบบควบคุมมีความซับซ้อนมากขึ้น

โดยทั่วไปจะประยุกต์ใช้ในงานที่มีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Vertical) เพียงเล็กน้อย เช่น การโหลด ชิ้นงานเข้าออกจากเครื่องปั๊ม (Press) หรือในงานที่ต้องการเชื่อมจุดต่างๆ (Spot welding)

2.1.3.4 หุ่นยนต์ชนิดสการ์วา (SCARA manipulator)

โดยที่ SCARA ย่อมาจาก Selective compliance assembly robot arm ซึ่งลักษณะแกนที่ 1 (เอว) และแกนที่ 3 (ข้อศอก) จะทำงานหมุนรอบแกนในแนวตั้ง และแกนที่ 2 จะเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น ทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้รวดเร็วในแนวระนาบและมีความแม่นยำสูงตามภาพประกอบ 5 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดสการ์วา

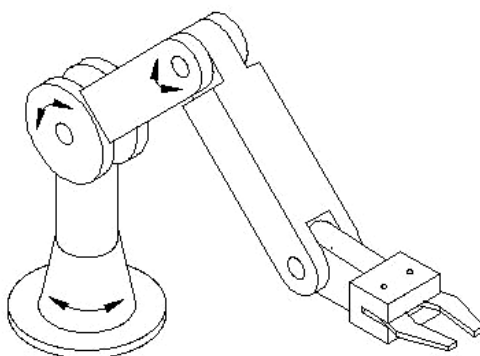


ภาพประกอบ 5 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดสการ์วา

เป็นหุ่นยนต์ที่มีข้อดี คือ สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวระนาบ และเคลื่อนที่ได้รวดเร็วในแนวขึ้นลง แต่มีข้อเสีย คือ มีพื้นที่ทำงานจำกัด ไม่สามารถหมุนในลักษณะมุมต่างๆ ได้ และไม่สามารถยกของที่มีน้ำหนักมากได้เนื่องจากการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ และเคลื่อนที่ขึ้นลงได้รวดเร็ว จึงมีความเหมาะสมมากที่จะใช้ในงานประกอบชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งยังเหมาะกับงานตรวจสอบ (Inspection) และงานบรรจุภัณฑ์ (Packaging) ซึ่งต้องการความเร็วในการทำงานแต่ไม่ต้องการการหมุนมากนัก ดังนั้นหุ่นยนต์ประเภทนี้จึงไม่เหมาะกับงานด้านการประกอบชิ้นส่วนทางกล (Mechanical part) ซึ่งส่วนใหญ่จะอาศัยการหมุนในลักษณะมุมต่างๆ

2.1.3.5 หุ่นยนต์ชนิดอาร์ทิกูเลท (Articulated manipulator)

หุ่นยนต์ชนิดนี้มีลักษณะที่ทุกแกนการเคลื่อนที่จะเป็นการทำงานแบบหมุน จนบางครั้งอาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าหุ่นยนต์ชนิดเรโวลูท (Revolute manipulator) โดยรูปแบบการเคลื่อนที่จะคล้ายกับแขนของคนมาก ซึ่งจะประกอบด้วยช่วงเอว ท่อนแขนบน ท่อนแขนล่าง และข้อมือ ตามภาพประกอบ 6 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดอาร์ทิกูเลท



ภาพประกอบ 6 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดอาร์ทิกูเลท

เนื่องจากทุกแกนจะเคลื่อนที่ในลักษณะของการหมุน ทำให้มีความยืดหยุ่นสูงในการเข้าไปยังจุดต่างๆ ที่ต้องการทำงานได้ สามารถเข้าถึงชิ้นงานทั้งจากด้านบน และด้านล่าง ซึ่งเหมาะกับการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นชุดขับเคลื่อน แต่มีข้อเสีย คือ มีระบบฟีดที่ซับซ้อน การเคลื่อนที่และระบบควบคุมทำความเข้าใจได้ยากขึ้น มีข้อจำกัดด้านการควบคุมให้เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง และโครงสร้างทางการเคลื่อนที่ไม่มั่นคงตลอดช่วงการทำงาน เพราะบริเวณขอบของพื้นที่ทำงานปลายแขนจะมีการสั่น ทำให้ความแม่นยำในการทำงานลดลง

โดยทั่วไปหุ่นยนต์ชนิดนี้สามารถใช้งานได้กว้างขวางมากเพราะสามารถเข้าถึงตำแหน่งต่างๆ ได้ดี เช่น งานเชื่อม (Spot welding) งานยกของ งานตัด งานทากาว และงานที่มีการเคลื่อนที่ยากๆ เช่น งานพ่นสี เป็นต้น

2.1.4 โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุ (Moment of Inertia of the Mass)

2.1.4.1 จุดศูนย์กลางมวล (Center of Mass; CM)

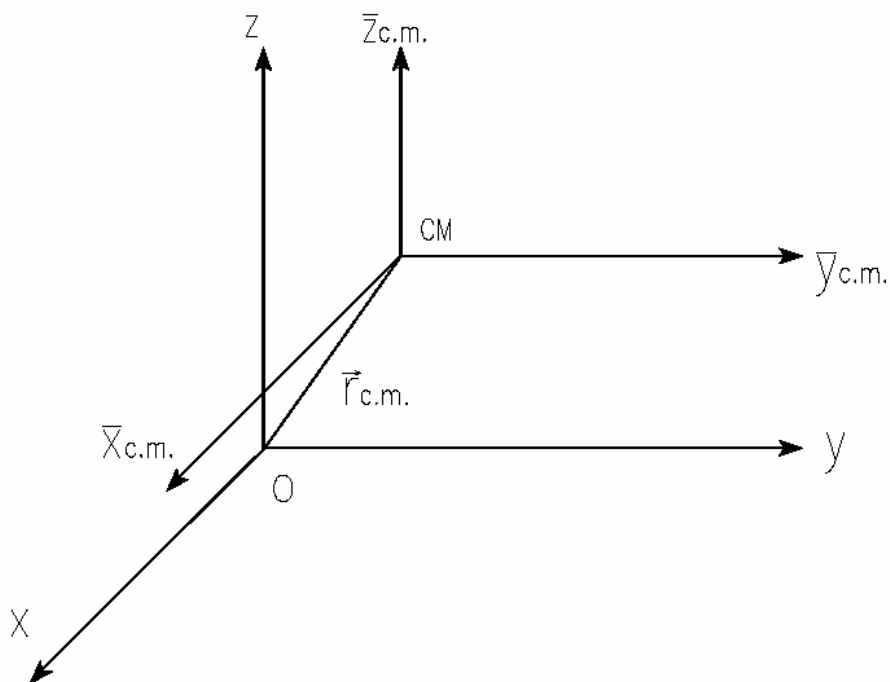
จุดศูนย์กลางมวลถือว่าเป็นจุดเสมือนมวลสำหรับวัตถุขนาดใหญ่ หรือระบบอนุภาครวมอยู่ที่จุดนั้น โดยปกติจุดศูนย์กลางมวลและจุดศูนย์กลางความถ่วง จะเป็นจุดเดียวกันและอาจอยู่ภายในหรือภายนอกวัตถุก็ได้ ถ้าวัตถุมีขนาดใหญ่มาก ในทำนองเดียวกันกับจุดศูนย์กลางความถ่วงก็จะหาจุดศูนย์กลางมวล

$$\bar{x}_{c.m.} = \frac{\sum x_i m_i}{\sum m} \quad (2.1)$$

$$\bar{y}_{c.m.} = \frac{\sum y_i m_i}{\sum m} \quad (2.2)$$

$$\bar{z}_{c.m.} = \frac{\sum z_i m_i}{\sum m} \quad (2.3)$$

ให้ $\bar{x}_{c.m.}$, $\bar{y}_{c.m.}$, $\bar{z}_{c.m.}$ คือ จุดพิกัดของจุดศูนย์กลางมวล ถ้าให้ \vec{r} เป็นเวกเตอร์ ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวล จะได้ $\vec{r}_{c.m.} = \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{m}$ เทียบกับแกนพิกัด xyz กับแกนพิกัด $\bar{x}_{c.m.}$, $\bar{y}_{c.m.}$, $\bar{z}_{c.m.}$ จะมีจุดกำเนิดที่จุดศูนย์กลางมวล



ภาพประกอบ 7 แสดงตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล (CM)

2.1.4.2 วิธีคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)

$I = \sum m_i r_i^2$ เป็นสมการที่หาโมเมนต์ความเฉื่อยในกรณีที่มวลเป็นจุด แต่ถ้ามวลมีรูปทรงขนาดใหญ่และเนื้อวัตถุกระจายอย่างสม่ำเสมอจะต้องใช้วิธีการอินทิกรัลแทนโดยแบ่งมวลของวัตถุออกเป็นชิ้นเล็กๆ มีค่า dm อยู่ห่างจากแกนหมุนเป็นระยะ r โมเมนต์ความเฉื่อยของอนุภาคเล็กๆ นี้จะเป็น

$$dI = r^2 dm \quad (2.4)$$

โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุทั้งก้อน

$$I = \int r^2 dm \quad (2.5)$$

ถ้า ρ เป็นความหนาแน่นของวัตถุ และ dV เป็นปริมาตรเล็ก

$$dm = \rho dV \quad (2.6)$$

แทนในสมการ(2.5) จะได้

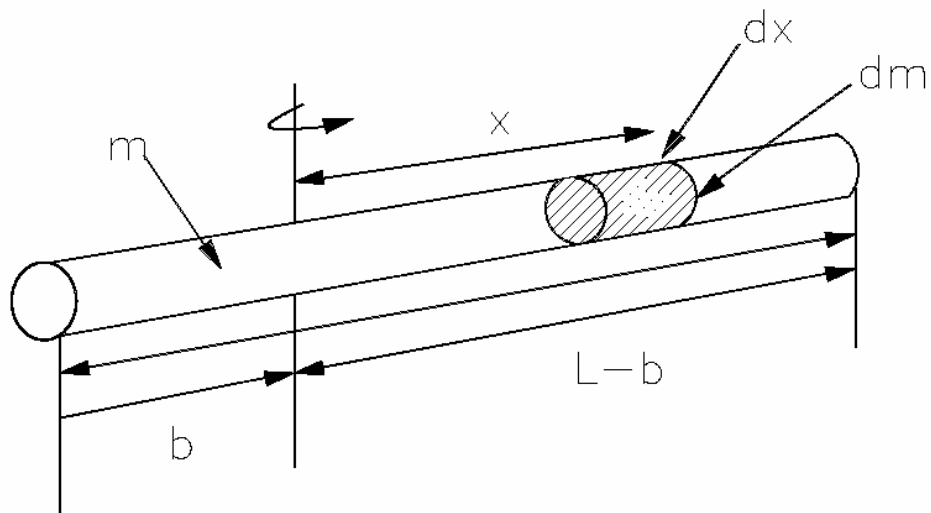
$$I = \int r^2 \rho dV \quad (2.7)$$

การกระจายของมวลเป็นเนื้อเดียวสม่ำเสมอ ความหนาแน่นจะคงที่ สามารถนำออกนอกเครื่องหมายอินทิกรัลได้

$$I = \rho \int r^2 dV \quad (2.8)$$

dV คือปริมาตรเล็กๆ ของมวล dm จึงมีลักษณะเหมือนจุด

ดังเช่น วิธีคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยของแท่งกลมขนาดเล็ก มวล m ยาว l เนื้อวัตถุกระจายสม่ำเสมอ แกนหมุนตั้งฉากกับจุด O ห่างจากปลายแท่งข้างหนึ่งเป็นระยะ h แบ่งแท่งกลมเป็นช่วงเล็กๆ dx ห่างจากจุด O เป็นระยะ x อัตราส่วนของมวลก้อนเล็กๆ dm ต่อมวลทั้งก้อน m จะเท่ากับ อัตราส่วนของ dx กับความยาวทั้งหมด l ดังนี้



ภาพประกอบ 8 แสดงแท่งกลมขนาดเล็ก ส่วนที่เรากำลังพิจารณาคือมวล dm เล็กๆ ที่แบ่งในช่วง dx

ดังนั้นจะได้

$$\frac{dm}{m} = \frac{dx}{l} \quad (2.9)$$

$$dm = \frac{m dx}{l} \quad (2.10)$$

แทนค่า dm ลงในสมการ (2.5) และอินทิเกรตบนแกน x จาก $-h$ ถึง $l-h$ ดังนี้

$$\begin{aligned} I_0 &= \int x^2 dm \\ &= \frac{m}{l} \int_{-h}^{l-h} x^2 dx \\ &= \frac{m}{l} \frac{x^3}{3} \Big|_{-h}^{l-h} \\ &= \frac{1}{3} m(l^2 - 3lh + 3h^2) \end{aligned} \quad (2.11)$$

สมการ (2.11) ที่ได้ สามารถหาโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหมุนได้ทุกๆ แกน ตัวอย่างเช่น ถ้าแกนหมุนอยู่ที่ปลายทางด้านซ้าย $h = 0$ จะได้

$$I = \frac{1}{3} ml^2 \quad (2.12)$$

แกนหมุนอยู่ที่ปลายแท่งด้านขวา $h = l$ จะได้

$$I = \frac{1}{3}ml^2$$

เท่ากันเพราะมวลมีลักษณะสมมาตร ทั้งซ้ายขวา

ถ้าแกนหมุนผ่านจุดศูนย์กลางมวล $h = \frac{l}{2}$

$$I = \frac{1}{12}ml^2 \quad (2.13)$$

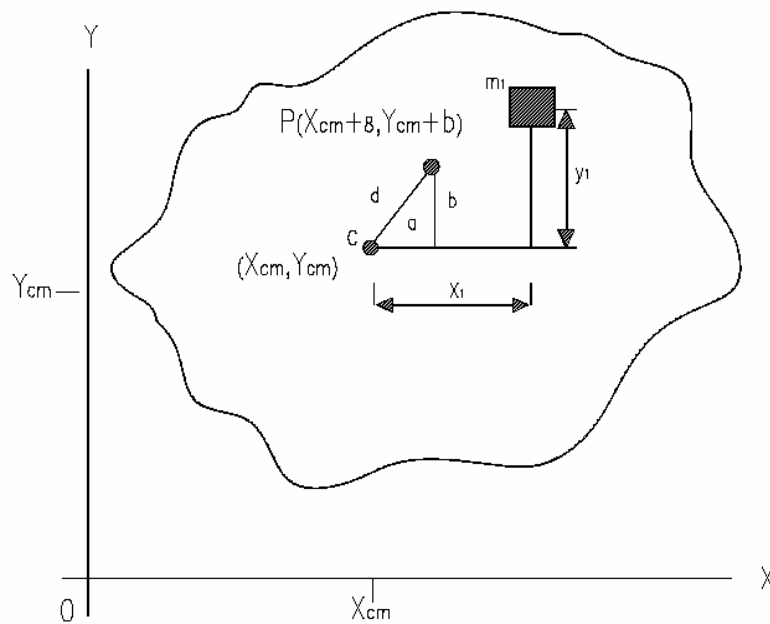
2.1.4.3 ทฤษฎีแกนขนาน (Parallel Axis Theorem)

รอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล แทนด้วย $I_{c.m.}$ แต่ถ้าเราต้องการหาโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหมุนใหม่ที่ขนานกับแกนหมุนเดิมเป็นระยะ d ก็สามารถคำนวณหาได้ โดยใช้ทฤษฎีของสไตเนอร์ (Steiner's Theorem) หรือทฤษฎีแกนขนาน (Parallel Axis Theorem) ซึ่งเขียนเป็นรูปของสมการได้ว่า

$$I = I_{c.m.} + md^2 \quad (2.14)$$

$I_{c.m.}$ คือโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุมวล m รอบแกนหมุนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล

I คือโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรอบแกนซึ่งขนานกับแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลและห่างเป็นระยะ d



ภาพประกอบ 9 แสดงภาพประกอบทฤษฎีแกนขนาน

การพิสูจน์หาความสัมพันธ์ของสมการ (2.14) เราจะกำหนดให้จุด C เป็นจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุรูปใดๆ มีพื้นที่ภาคตัดขวางดังภาพประกอบ 3 มีพิกัดที่ $(x_{c.m.}, y_{c.m.}, z_{c.m.} = 0)$ ให้แกนหมุนที่ผ่านจุด C มีทิศตั้งฉากกับระนาบของกระดาษและแกนหมุนที่จุด P ซึ่งมีแกนขนานกับแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล P จะมีจุดพิกัดอยู่ที่ $(x_{c.m.} + a, y_{c.m.} + b, z_{c.m.} = 0)$ และระยะระหว่างแกนทั้งสองมีค่า d ซึ่งเท่ากับ $\sqrt{a^2 + b^2}$ จะทำให้อนุภาคมวล m_i อยู่ห่างจากจุด $c = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$ และจุด $P = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2}$ ค่าโมเมนต์ของความเฉื่อยรอบแกนที่ผ่านจุด P มีค่าเท่ากัน

$$\begin{aligned} I &= \sum m_i \{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2\} \\ &= \sum m_i (x_i^2 + y_i^2) - 2a \sum m_i x_i - 2b \sum m_i y_i + (a^2 + b^2) \sum m_i \end{aligned}$$

เนื่องจากค่า $x_{c.m.}$ และ $y_{c.m.}$ เป็น 0 เพราะเป็นจุดศูนย์กลางมวล ดังนั้น

$$\begin{aligned} \sum m_i x_i &= x_{cm} \sum m_i = 0 \\ \sum m_i y_i &= y_{cm} \sum m_i = 0 \\ I &= \sum m_i (x_i^2 + y_i^2) + (a^2 + b^2) \sum m_i \\ I &= I_{cm} + Md^2 \end{aligned} \tag{2.15}$$

2.1.5 สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (Dynamic Equations for Robot)

2.1.5.1 ทฤษฎีจลนศาสตร์ (Kinematics Theory)

จุดมุ่งหมายของการวิเคราะห์จลนศาสตร์ เหมือนกับหุ่นยนต์สามารถคิดได้ ตามที่กำหนดข้อต่อเชื่อมต่อกันที่ข้อต่อต่างชนิดกัน ถ้าข้อต่อสามารถเหมือนกันได้ยิ่งทำให้ง่ายยิ่งขึ้น เช่น ข้อต่อหมุน (Revolute Joint) หรือ ข้อต่อเลื่อน (Prismatic Joint) หรือนอกจากนั้นเป็นรูปทรงซับซ้อนกว่าได้ เช่น ลูกบอลและข้อต่อที่เป็นเบ้า (จากที่กล่าวมา ข้อต่อหมุน เป็นเหมือนจุดแกว่งและหมุนรอบแกนเดียว ข้อต่อเลื่อน เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแกนๆ เดียว กล่าวคือ ยึดหรือหดเข้า) ความแตกต่างระหว่าง 2 อย่างนั้นคือ ประการแรก ข้อต่อมีเพียง หนึ่งระดับชั้นความเสรีของการเคลื่อนที่ มุมของการหมุนในกรณีของข้อต่อหมุนและถ้าเป็นการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงในกรณีของข้อต่อเลื่อน ในทางตรงกันข้าม ลูกบอลและข้อต่อแบบเบ้ามีสองระดับชั้นความเสรี

สมมติให้หุ่นยนต์ มีข้อต่อจำนวน $n+1$ ข้อต่อ จาก 0 ถึง n เริ่มต้นจากฐานของหุ่นยนต์ เป็นข้อต่อที่ 0 จำนวนข้อต่อเริ่มจาก 1 ถึง n และลำดับข้อต่อที่ i เป็นจุดในช่องว่างที่ข้อต่อ $i-1$ และ i ที่ต่อกัน ข้อต่อที่ i เปลี่ยนมาใช้แทนเป็น q_i ในกรณีของข้อต่อหมุน q_i เป็นมุมของการหมุนและในกรณีของข้อต่อเลื่อน q_i เป็นระยะข้อต่อเคลื่อนที่ สมมติให้ A_i เป็นโฮโมจีเนียเมตริกนั้น เปลี่ยนรูปตำแหน่งของจุดจากเฟรม i ถึงเฟรม $i-1$ เมตริก A_i ไม่คงที่แต่จะแตกต่างตามรูปร่างของหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนไป อย่างไรก็ตามสมมติให้ทุกข้อต่อทั้งที่หมุนหรือเลื่อนเป็น A_i คือที่มี q_i เป็นฟังก์ชันของข้อต่อเดียวที่เปลี่ยนแปลงเท่านั้น จะได้

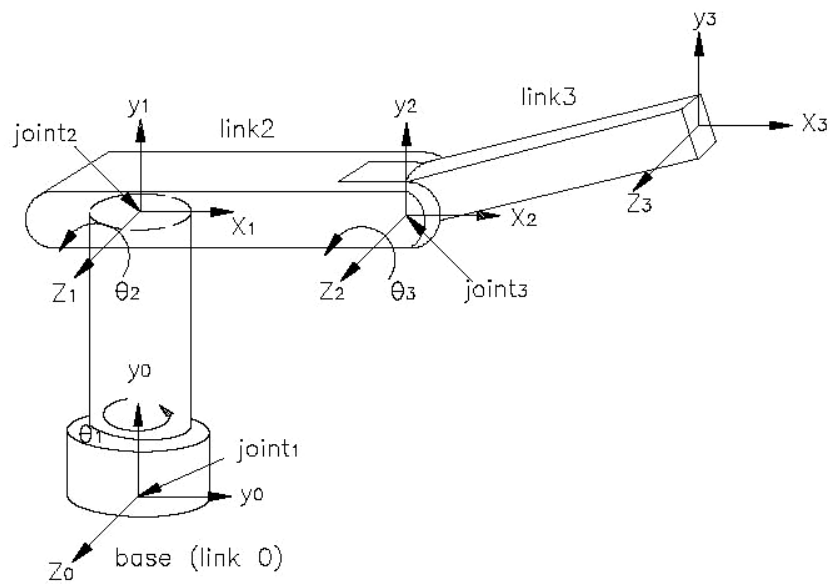
$$A_i = A_i(q_i) \quad (2.16)$$

ขณะที่โฮโมจีเนียเมตริกนั้นเปลี่ยนรูปตำแหน่งของจุดจากเฟรม j ถึงเฟรม i เรียกได้ว่าเป็น ทราจฟอรัมเมชันเมตริก และใช้แทนเป็น T_i^j จะได้ว่า

$$T_i^j = A_{i+1}A_{i+2}\dots A_{j-1}A_j \text{ if } i < j \quad (2.17)$$

$$T_i^j = I \text{ if } i = j \quad (2.18)$$

$$T_i^j = (T_j^i)^{-1} \text{ if } j > i \quad (2.19)$$



ภาพประกอบ 10 แสดงแกนที่ติดกับเฟรมของแขนกลรูปทรงคล้ายข้อศอก

ตำแหน่งและการหักเหของจุดรับแรงสุดท้ายด้วยส่วนของจุดตั้งต้นหรือฐานเฟรมที่สามเวกเตอร์ d_0^n และเป็น 3x3 โรเตชันเมตริก R_0^n โดยลำดับและกำหนดเป็นโฮโมจีเนียสเมตริก

$$H = \begin{bmatrix} R_0^n & d_0^n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

ดังนั้นตำแหน่งและการหักเหของจุดรับแรงสุดท้ายในส่วนของเฟรมตั้งต้นจะแสดงได้ว่า

$$H = T_0^n = A_1(q_1) \dots A_n(q_n) \quad (2.21)$$

แต่ละโฮโมจีเนียสทรานฟอร์มเมชัน A_i เป็นแบบนี้

$$A_i = \begin{bmatrix} R_{i-1}^i & d_{i-1}^i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$T_i^j = A_{i+1} \dots A_j = \begin{bmatrix} R_i^j & d_i^j \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

เมตริก R_i^j แสดงการหักเหของเฟรม j สัมพันธ์กับโครง i และให้ส่วนที่หมุนของเมตริก A ตามที่

$$R_i^j = R_i^{i+1} \dots R_{j-1}^j \quad (2.24)$$

เวกเตอร์ d_i^j จะยอมให้ติดกันไปตามหลัก ทั้งหมดนี้จะถูกใช้ในเรื่องของเมตริกจาโคเบียน

$$d_i^j = d_i^{j-1} + R_i^{j-1} d_{j-1}^j \quad (2.25)$$

2.1.5.2 เดนาวิต-ฮาร์เทนเบอร์ก (Denavit-Hartenberg)

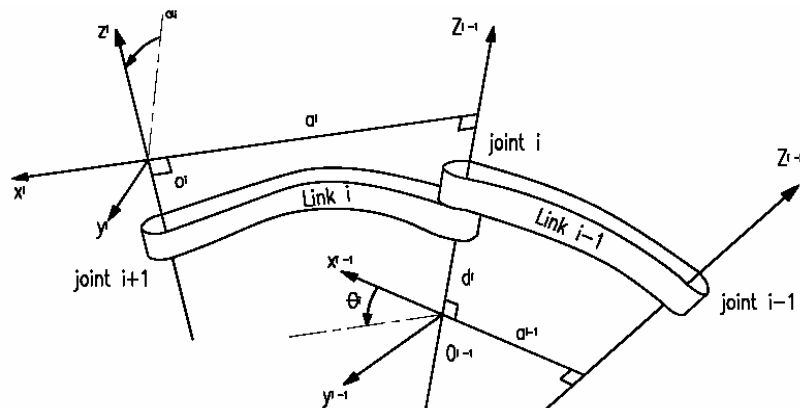
Denavit-Hartenberg หรือ แบบแผน D-H ในความเป็นแบบแผนแต่ละโฮโมจีเนียสทรานฟอร์มเมชัน A_i เป็นการนำเสนอตามที่ผลคูณของสี่ลักษณะพื้นฐานในการเปลี่ยนรูป

$$A_i = Rot_{z_i, \theta_i} Trans_{z_i, d_i} Trans_{x_i, a_i} Rot_{x_i, \alpha_i} \quad (2.26)$$

$$= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} c_{\alpha_i} & s_{\theta_i} s_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i} s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

ที่สี่ขนาด $\theta_i, a_i, d_i, \alpha_i$ เป็นตัวแปรของข้อต่อ i และจุดต่อ i เป็นตัวแปรต่างๆ ใน (2.26) โดยปกติจะแทนความหมายตามนี้ a_i ใช้เรียกแทนความยาว α_i ใช้เรียกแทนการบิด d_i ใช้เรียกแทนระยะที่เยื้องออกมาและ θ_i ใช้เรียกแทนมุม เมื่อเมตริก A_i เป็นฟังก์ชันของตัวแปรเดียวซึ่งเกิดขึ้นมาจากสามสิ่งทีนอกเหนือไปกว่าสี่ขนาดของค่าคงที่ที่ได้มาจากข้อต่อ ในขณะที่สี่ตัวแปรจะมี θ_i ของจุดต่อหมุนและ d_i ของจุดต่อเลื่อนเป็นค่าไม่คงที่ของจุดต่อนั้นๆ



ภาพประกอบ 11 แสดงการตั้งเฟรมตามวิธีเดนาวิต-ฮาร์เทนเบอร์ก (DENAVIT-HARTENBERG)

เป็นการตั้งเฟรมบนข้อต่อต่างๆ โดยใช้วิธีของเดนาวิต-ฮาร์เทนเบิร์ก (DENA-VIT-HARTENBERG) จุดกำเนิดของเฟรมที่ $i(0_i)$ จะอยู่บนจุดตัดระหว่างจุดต่อ $i+1$ กับเส้นตั้งฉากระหว่างจุดต่อ i กับ $i+1$

แกน x_i จะอยู่บนจุดต่อ $i+1$

แกน y_i จะอยู่บนเส้นตั้งฉากระหว่างจุดต่อ i กับ จุดต่อ $i+1$

แกน z_i จะเป็นไปตามกฎมือขวา

a_i คือ ความยาวของเส้นตั้งฉากระหว่าง z_{i-1} กับ z_i

d_i คือ ระยะระหว่าง x_{i-1} กับ x_i ตามแนวแกน z_{i-1}

α_i คือ มุมระหว่าง z_{i-1} กับ z_i วัดรอบแกน x_i ตามกฎมือขวา

θ_i คือ มุมระหว่าง z_{i-1} กับ z_i วัดรอบแกน z_{i-1} ตามกฎมือขวา

2.1.5.3 จาโคเบียน (Jacobian)

การพิจารณาหลักจลศาสตร์ของแขนกล จะนำไปสู่ความเร็วของหุ่นยนต์ซึ่งมีความสัมพันธ์ของความเร็วจะหาได้โดยการใช้จาโคเบียน ซึ่งจะแปลงค่าระหว่างอินพุตที่จุดเริ่มต้นกับเอาต์พุตที่ปลายแขนกล จาโคเบียน มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์และการควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์เพราะจะทำให้ได้มาซึ่งสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้ในที่สุด สำหรับหุ่นยนต์ที่มีข้อต่อจำนวน n ข้อต่อ จะสามารถหาจาโคเบียน ได้โดยการแปลงค่าระหว่างเวกเตอร์ความเร็วของจุดต่อจำนวน n เวกเตอร์ กับ 6 เวกเตอร์ความเร็วของจุดปลายแขนกล ซึ่งจะมีทั้งความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุม

เมื่อพิจารณาหุ่นยนต์ที่มีข้อต่อจำนวน n ข้อต่อ จะทำให้มีการเปลี่ยนของจุดต่อจำนวน q_1, \dots, q_n จะได้ว่า

$${}^0T(q) = \begin{bmatrix} {}^0R(q) & {}^0P(q) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

เมื่อ $q = (q_1, \dots, q_n)^T$ ซึ่งเป็นเวกเตอร์ของตัวแปรจุดต่อ เมื่อหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ $q_i(t)$ จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสองลักษณะคือ การเลื่อนตำแหน่งและการหมุน ดังนั้นจึงสามารถหาความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุมด้วยการคิดเทียบกับเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปคือ

$$\begin{bmatrix} V_i \\ \omega_i \end{bmatrix} = J_i \dot{q} \quad (2.29)$$

จะได้ว่า $J_i = \begin{bmatrix} J_{vi} \\ \dots \\ J_{\omega i} \end{bmatrix}$

โดยที่ เมตริก J_i ถูกเรียกว่าจาโคเบียนซึ่งจะมีขนาดเท่ากับ $6 \times n$ เมื่อ n คือจำนวนของข้อต่อ

2.1.5.4 สมการออยเลอร์-ลากรานจ์ (Euler-Lagrange Equations)

ในหัวข้อนี้ได้อธิบายการหาสมการในหัวข้อเรื่องโฮโลโนมิกคอนสเตรน (Holonomic Constraints) เมื่อแรงบังคับมีค่าสอดคล้องกับงานที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบออยเลอร์ – ลากรานจ์ (Euler-Lagrange Equations) มี 2 วิธีเป็นอย่างน้อยที่จะหาสมการนี้ วิธีที่นำเสนอ ณ ที่นี้ อาศัยการแทนที่ แต่อย่างไรก็ตามสามารถหาสมการนี้ได้ด้วยหลักการของฮามินตัน

เมื่อระบบประกอบด้วย k อนุภาค ซึ่งสัมพันธ์กับ r_1, \dots, r_k ถ้าอนุภาคเหล่านี้ เคลื่อนที่อิสระโดยไม่มีข้อจำกัดแล้ว ก็เป็นการง่ายที่จะอธิบายการเคลื่อนที่ของอนุภาคนั้นๆ โดยการ เปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของวัตถุมีค่าเท่ากับแรงภายนอกที่มีต่อสิ่งนั้น อย่างไรก็ตามถ้าการเคลื่อนที่ของ อนุภาคถูกบังคับ แรงที่นำมาคิดจะประกอบด้วยแรงภายนอกและแรงบีบบังคับ ซึ่งนั่นก็คือยัง ต้องการแรงบังคับเพิ่มอีกหนึ่งแรง อธิบายง่าย ๆ ก็คือ สมมุติว่าระบบประกอบด้วย 2 อนุภาค ซึ่งมา เชื่อมต่อกันด้วยเชือกที่ไร้น้ำหนัก ความยาวเท่ากับ l ดังนั้น r_1 และ r_2 เท่ากับ

$$\|r_1 - r_2\| = l \text{ or } (r_1 - r_2)^T (r_1 - r_2) = l^2 \quad (2.30)$$

ถ้ามีแรงจากภายนอกกระทำต่อแต่ละอนุภาคแล้ว อนุภาคเหล่านี้จะถูกกระทำไม่ แต่เฉพาะจากแรงภายนอกเท่านั้น ยังรวมไปถึงแรงที่มาจากเชือกด้วยทิศทาง $r_2 - r_1$ ประกอบกับ ขนาดที่เหมาะสม ดังนั้นเพื่อที่จะหาการเคลื่อนที่ของอนุภาคทั้งสองนี้ สามารถทำได้โดย วิธีแรก คำนวณจากแรงภายนอกแต่ละแรงที่กระทำโดยแรงบังคับที่เกิดขึ้นอยู่ในลำดับของสมการ วิธีที่ สองคำนวณจากวิธีวิเคราะห์ซึ่งไม่อาศัยแรงบังคับ (ซึ่งไม่จำเป็นต้องรู้แรงบังคับ) ซึ่งวิธีที่สองนี้เป็นที่ นิยมมากกว่าวิธีแรกเพราะว่าโดยทั่วไปแล้วต้องคำนวณหาแรงบังคับที่เกิดขึ้น จุดประสงค์ของหัวข้อนี้ คือศึกษาวิธีที่สอง

เริ่มต้นจากการอธิบายคำ “Holonomic” คือ แรงบังคับที่เกิดบนของค่าพิกัด k เป็น r_1, \dots, r_k เมื่อแรงนี้เท่ากันจะเกิดสมการ

$$g_i(r_1, \dots, r_k) = 0, i = 1, \dots, l \quad (2.31)$$

ถ้าสิ่งที่เกิดขึ้นมีลักษณะตรงกันข้ามกับสิ่งที่กล่าวมา จะเรียกว่า “Nonholonomic” แรงบังคับดังกล่าว (2.30) กำหนดโดยการเชื่อมต่อกันของ 2 อนุภาค ด้วยเชือกที่ไร้น้ำหนัก ซึ่งนั่นก็ คือโฮโลโนมิกคอนสเตรน ส่วนตัวอย่างของนอนโฮโลโนมิกคอนสเตรนพิจารณาจากการเคลื่อนที่ ของอนุภาคหนึ่งๆ ภายใน หนึ่งความยาวรัศมีของทรงกลม ρ ที่จุดศูนย์กลาง บริเวณจุดเริ่มต้นของ ระบบค่าพิกัดในกรณีนี้ค่าพิกัดเวกเตอร์ r ของอนุภาค สัมพันธ์กับแรงบังคับ

$$\|r\| \leq \rho \quad (2.32)$$

การเคลื่อนที่ของอนุภาค จะมีแรงบังคับ ดังนั้นอนุภาคยังคงรักษาระยะห่างจากพื้นผิววัตถุทรงกลม แต่เมื่อใดก็ตามที่อนุภาคเข้าใกล้จนสัมผัสกับพื้นผิววัตถุทรงกลม มันก็เท่ากับแรงบังคับนั่นเอง

ถ้าระบบขึ้นอยู่กับโฮโลโนมิกคอนสเตรน l เมื่อนั้นให้คำนึงถึงนิยามของระบบคอนสเตรนที่มี l ระดับชั้นความเสรีมากกว่าระบบอันคอนสเตรนเล็กน้อย ในกรณีนี้ ก็อาจเป็นไปได้ที่จะแสดงค่า ค่าพิกัดของ k อนุภาคในเทอม ของ n ค่าพิกัดทั่วไป q_1, \dots, q_n ส่วนในความหมายอื่น เราคาดว่าค่าพิกัดของอนุภาคที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชุดของแรงบังคับ ซึ่งสามารถแสดงดังลักษณะต่อไปนี้

$$r_i = r_i(q_1, \dots, q_n), i = 1, \dots, k \quad (2.33)$$

โดยที่ q_1, \dots, q_n เป็นอิสระจากกัน จริงๆ แล้วแนวคิดของค่าพิกัดทั่วไปถูกนำมาใช้เมื่ออนุภาคมีปริมาณมากมายไม่จำกัดจำนวน ตัวอย่างเช่น วัตถุคงตัวรูปแบบแท่งที่มีอนุภาคอยู่มากมาย แต่เนื่องจากระยะห่างระหว่าง 2 อนุภาคถูกจำกัดตลอดการเคลื่อนที่ของแท่งวัตถุดังกล่าว ดังนั้นเพียงแค่ค่าพิกัด 6 จุดก็เพียงพอที่เราจะระบุค่าพิกัดของอนุภาคใดๆ ในแท่งวัตถุข้างต้นได้อย่างสมบูรณ์แบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสามารถใช้ ค่าพิกัด 3 จุด เพื่อบ่งชี้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของแท่งวัตถุ และใช้มุมออยเลอร์ 3 มุมเพื่อกำหนดทิศทางของแท่งวัตถุ และเพื่อให้ง่ายต่อการอธิบายเราจะสมมุติให้จำนวนของอนุภาคถูกจำกัด โดยทั่วไปค่าพิกัดทั่วไป ก็คือตำแหน่งที่ตั้ง หรือมุม เป็นต้น เราสามารถกำหนดความหมายของตัวแปรของจุดต่อสัญลักษณ์ q_1, \dots, q_n ไว้อย่างชัดเจน เพราะตัวแปรของจุดต่อเหล่านี้จะแสดงสัญลักษณ์เป็นชุดของค่าพิกัดทั่วไป สำหรับหุ่นยนต์ที่มีข้อต่อจำนวน n ข้อ

เมื่อเรากล่าวถึงเวอชวลดิสเพลสเมนต์ (Virtual Displacements) (การแทนที่ที่เกิดขึ้นจริง) มันคือชุดของ $\delta r_1, \dots, \delta r_k$ ของการแทนที่ที่ไม่สามารถนับได้ โดยสอดคล้องกันกับแรงบังคับ ตัวอย่างเช่น เมื่อพิจารณาถึงแรงบังคับอย่างเช่นในสมการ (2.30) และสมมุติให้ r_1, r_2 ถูกกระจายเป็น $r_1 + \delta r_1, r_2 + \delta r_2$, ตามลำดับ ดังนั้นเพื่อที่จะให้สัมพันธ์กับแรงบังคับ เราต้องทำให้อยู่ในสมการดังนี้

$$(r_1 + \delta r_1 - r_2 - \delta r_2)^T (r_1 + \delta r_1 - r_2 - \delta r_2) = l^2 \quad (2.34)$$

จากนั้นเมื่อเรากระจายสมการดังกล่าวข้างต้น และถือเอาความจริงที่ว่าค่าพิกัดเดิม r_1, r_2 สัมพันธ์กับแรงบังคับ ทำให้เราตัดพจน์กำลังสองของ $\delta r_1, \delta r_2$ จะได้ว่า

$$(r_1 - r_2)^T (\delta r_1 - \delta r_2) = 0 \quad (2.35)$$

ดังนั้นตำแหน่งที่ยูกยากของสองอนุภาคต้องสอดคล้องกับสมการข้างต้น เพื่อว่าตำแหน่งที่ยูกยากจะได้สัมพันธ์กับแรงบังคับ (2.30) คู่ของเวกเตอร์ ที่ไม่สามารถวัดค่าได้ $\delta r_1, \delta r_2$ ซึ่งสัมพันธ์กับ (2.35) นั้นประกอบด้วย ชุดของเวกชวลดิสเพลสเมนต์

เหตุผลของการใช้ค่าพิกัดทั่วไปก็เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการจัดการความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนดังเช่นในสมการ (2.35) และถ้ายังมีสมการ (2.33) อยู่จะพบว่าชุดของเวกชวลดิสเพลสเมนต์ก่อนข้างกระชับดังเช่น

$$\delta r_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial r_i}{\partial q_j} \delta q_j, i = 1, \dots, k \quad (2.36)$$

โดยที่เวกชวลดิสเพลสเมนต์ $\delta q_1, \dots, \delta q_n$ ของค่าพิกัดทั่วไป คือการไม่มีแรงบังคับ (ซึ่งนั่นก็ทำให้กลายเป็น ค่าพิกัดทั่วไป)

ต่อไปจะอธิบายระบบแรงบังคับในสภาวะสมดุล โดยกำหนดให้แต่ละอนุภาคอยู่ในสภาวะสมดุล จากนั้นให้แรงสุทธิของแต่ละอนุภาค เป็นศูนย์ ซึ่งก็เท่ากับว่า งานที่ทำในแต่ละชุดของเวกชวลดิสเพลสเมนต์เป็นศูนย์ ด้วยดังนั้น

$$\sum_{i=1}^k F_i^T \delta r_i = 0 \quad (2.37)$$

โดยที่ F_i คือ แรงทั้งหมดต่ออนุภาค i ตามที่ได้อ้างไว้ข้างต้น แรง F_i จึงเป็นค่ารวมของสองแรงหนึ่งคือ แรงที่กระทำต่ออนุภาคจากภายนอก f_i และสองคือแรงบังคับ $f_i^{(a)}$ โดยสมมุติให้งานทั้งหมดกระทำด้วยแรงบังคับซึ่งสัมพันธ์หรือเกี่ยวข้องกับชุดของเวกชวลดิสเพลสเมนต์ใดๆ ที่เป็นศูนย์ ดังสมการ

$$\sum_{i=1}^k (f_i^{(a)})^T \delta r_i = 0 \quad (2.38)$$

สิ่งที่กล่าวมาข้างต้นจะถูกตอ้งก็ต่อเมื่อ แรงบังคับระหว่างคู่ของอนุภาค มุ่งตรงไปตามเส้นรัศมีซึ่งเชื่อมต่อกันระหว่างสองอนุภาคนั้นๆ โดยการแทนที่สมการ (2.38) เข้าไปใน (2.37) จะได้ผลลัพธ์ดังในสมการ

$$\sum_{i=1}^k f_i^T \delta r_i = 0 \quad (2.39)$$

ความสมบูรณ์แบบของสมการดังกล่าวคือ จะไม่มีแรงบังคับที่ไม่รู้ค่ามาเกี่ยวข้องกับในสมการนี้เลย แต่จะใช้เฉพาะแรงภายนอกที่รู้ค่า สมการนี้แสดงหลักการของงานที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งกล่าวไว้ว่า งานที่ทำโดยแรงภายนอกสัมพันธ์กับชุดของเวกซ์ลดิสพลเลขเมนต์ที่เป็นศูนย์ จำไว้ว่า หลักการนี้ใช้ได้กับทุกงาน แต่สมการ (2.38) ต้องยังคงอยู่ นั่นคือแรงบังคับที่ไม่ทำงาน ฉะนั้นถ้ากล่าวถึงหลักการของงานที่เกิดขึ้นจริงก็สามารถวิเคราะห์กลศาสตร์ของระบบโดยปราศจากการหาค่าแรงบังคับ

มันง่ายที่จะพิสูจน์หลักการของงานที่เกิดขึ้นจริง เมื่อไหร่ก็ตามแรงบังคับระหว่างคู่ของอนุภาค มุ่งตรงไปตามแรงที่เชื่อมกันระหว่างตำแหน่งที่ค่าพิกัดของอนุภาคทั้งสอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อถูกบังคับในรูปแบบสมการ (2.30) ซึ่งเป็นหลักการของการประยุกต์ใช้ เมื่อพิจารณาถึงแรงบังคับแรงเดียวจากสมการ (2.30) จะต้องออกแรงโดยเชือกที่ไร้น้ำหนัก ดังนั้นแรงต้องมุ่งตรงไปตามเส้นรัศมีระหว่างอนุภาคทั้งสอง หรืออาจกล่าวได้ว่า แรงที่กระทำต่ออนุภาคที่หนึ่งด้วยเชือกจะต้องอยู่ในฟอร์มของ

$$f_1^{(a)} = c(r_1 - r_2) \quad (2.40)$$

สำหรับค่าคงตัว c (ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงเมื่อ อนุภาคมีการเคลื่อนที่) ตามกฎของแรงกระทำและแรงปฏิกิริยา, แรงที่กระทำต่ออนุภาคที่สองด้วยเชือกต้องมีค่าเป็นลบ หรือตรงกันข้ามกับสมการข้างต้น นั่นคือ

$$f_2^{(a)} = -c(r_1 - r_2) \quad (2.41)$$

ตอนนี้ทราบแล้วว่า งานที่กระทำโดยแรงบังคับซึ่งสัมพันธ์กับชุดของเวกซ์ลดิสพลเลขเมนต์ คือ

$$(f_1^{(a)})^T \delta r_1 + (f_2^{(a)})^T \delta r_2 = c(r_1 - r_2)^T (\delta r_1 - \delta r_2) \quad (2.42)$$

แต่ในสมการ (2.35) แสดงให้เห็นชุดของเวกซ์ลดิสพลเลขเมนต์ ส่วนสมการข้างบนผลลัพธ์ต้องเป็นศูนย์ ดังนั้นหลักการของงานที่เกิดขึ้นจริงซึ่งนำไปใช้ในระบบใด ๆ จะถูกบังคับโดยสมการ (2.30) เหตุผลเดียวกันสามารถนำไปใช้กับระบบที่ประกอบด้วยหลายอนุภาค ซึ่งแต่ละคู่ของอนุภาคเชื่อมกันด้วยเชือกที่ไร้น้ำหนักซึ่งจำกัดความยาวเช่นในกรณีของระบบที่ถูกกำหนดไว้สำหรับหลายแรงบังคับเหมือนในสมการ (2.30)

ส่วนข้อกำหนดที่ว่า การเคลื่อนที่ของวัตถุที่มีความคงตัวสามารถแสดงได้เท่ากับข้อบังคับที่ว่าระยะทางระหว่างคู่ของจุดใด ๆ ต่อวัตถุยังมีค่าคงตัว แม้ว่าวัตถุจะมีการเคลื่อนที่เหมือนกับการบังคับที่ไม่จำกัดในแบบสมการ (2.30) ดังนั้นหลักการของงานที่เกิดขึ้นจริงถูกนำไปใช้เมื่อ ความแข็งคงตัวเป็นเพียงแรงบังคับต่อการเคลื่อนไหว มีบางสถานการณ์ที่หลักการนี้ไม่ได้ถูกนำไปใช้เช่น เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก อย่างไรก็ตาม ในทุกเหตุการณ์ที่กล่าวขึ้นนี้ เราสมมุติให้หลักการของงานที่เกิดขึ้นนั้นใช้ได้จริง

ในสมการที่ (2.39) เวกวลดิสเพลซเมนต์ δr_i ไม่เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้นเราไม่สามารถสรุปได้จากสมการนี้ ซึ่งแต่ละสัมประสิทธิ์ f_i เท่ากับศูนย์ โดยไม่ขึ้นตรงต่อกัน และเพื่อที่จะประยุกต์เหตุผลดังกล่าว ต้องเปลี่ยนรูปเป็นค่าพิกัดทั่วไป และก่อนที่จะเปลี่ยนรูป เราถือว่าระบบนั้นไม่จำเป็นต้องอยู่ในสมดุล ซึ่งเรียกระบบดังกล่าวว่า “หลักการของ D’Alembert” ได้กล่าวไว้ว่า เมื่อมีการให้แรงซึ่งสมมุติขึ้นเป็นค่า p_i กระทำต่ออนุภาค i โดยแต่ละ i ที่ p_i คือ แรงเคลื่อนที่ของอนุภาค i เมื่อแต่ละอนุภาคอยู่ในสมดุล ดังนั้นถ้ามีการดัดแปลงสมการ (2.37) ด้วยการแทนที่ F_i โดย $F_i - \dot{p}_i$ เมื่อนั้น ผลลัพธ์ของสมการจะใช้ได้จริงสำหรับระบบที่เราเลือก และทำให้สามารถตัดแรงบังคับก่อนที่จะใช้หลักการของงานที่เกิดขึ้นจริง ดังแสดงใน

$$\sum_{i=1}^k f_i^T \delta r_i - \sum_{i=1}^k \dot{p}_i^T \delta r_i = 0 \quad (2.43)$$

สมการข้างต้นไม่ได้หมายความว่า แต่ละสัมประสิทธิ์ของ δr_i เท่ากับศูนย์ แต่มีวัตถุประสงค์แสดงแต่ละ δr_i ในเทอมที่เกี่ยวข้องกับเวกวลดิสเพลซเมนต์ของค่าพิกัดทั่วไป อย่างเช่นที่ทำในสมการ (2.36) ดังนั้นงานที่เกิดขึ้นจริงกระทำโดยแรง f_i จะได้

$$\sum_{i=1}^k f_i^T \delta r_i = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n f_i^T \frac{\partial r_i}{\partial q_j} \delta q_j = \sum_{j=1}^n \psi_j \delta q_j \quad (2.44)$$

โดยที่

$$\psi_j = \sum_{i=1}^k f_i^T \frac{\partial r_i}{\partial q_j} \quad (2.45)$$

ซึ่งถูกเรียกว่า แรงทั่วไป ลำดับที่ j จำไว้ว่า ψ_j ไม่จำเป็นต้องมีมิติของแรง ขณะเดียวกับที่ q_j ก็ไม่ต้องมีมิติของความยาว อย่างไรก็ตาม $\psi_j \delta q_j$ ต้องมีมิติของงานเสมอ

จากนั้นทำให้เราศึกษาถึงผลรวมลำดับที่ 2 ของสมการ (2.43) เนื่องจาก $p_i = m_i \dot{r}_i$

$$\sum_{i=1}^k \dot{p}_i^T \delta r_i = \sum_{i=1}^k m_i \ddot{r}_i^T \delta r_i = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n m_i \ddot{r}_i^T \frac{\partial r_i}{\partial q_j} \delta q_j \quad (2.46)$$

จากนั้นเมื่อนำผลลัพธ์ของการดิฟเฟอเรนเชียล (Differentiate) มาใช้ จะเห็นได้ว่า

$$\sum_{i=1}^k m_i \ddot{r}_i^T \frac{\partial r_i}{\partial q_j} = \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{d}{dt} \left[m_i \dot{r}_i^T \frac{\partial r_i}{\partial q_j} \right] - m_i \dot{r}_i^T \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial r_i}{\partial q_j} \right] \right\} \quad (2.47)$$

เมื่อดิฟเฟอเรนเชียล สมการ (2.33) ด้วยการใช้กฎลูกโซ่ (Chain Rule) ทำให้ได้

$$v_j = \dot{r}_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial r_i}{\partial q_j} \dot{q}_j \quad (2.48)$$

สังเกตจากสมการข้างบนซึ่ง

$$\frac{\partial v_i}{\partial \dot{q}_j} = \frac{\partial r_i}{\partial q_j} \quad (2.49)$$

และ

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial r_i}{\partial q_j} \right] = \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 r_i}{\partial q_j \partial q_l} \dot{q}_l = \frac{\partial v_i}{\partial q_j} \quad (2.50)$$

โดย สมการ (2.39) เปลี่ยนแบบสมการ (2.48) การแทนที่ของสมการ (2.49) และ (2.50) เข้าไปในสมการ (2.47) และให้ $\dot{r}_i = v_i$ จะได้

$$\sum_{i=1}^k m_i \ddot{r}_i^T \frac{\partial r_i}{\partial q_j} = \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{d}{dt} \left[m_i v_j^T \frac{\partial v_i}{\partial \dot{q}_j} \right] - m_i v_i^T \frac{\partial v_i}{\partial q_j} \right\} \quad (2.51)$$

เมื่อเรากำหนดให้ พลังงานจลน์ (พลังงานของการเคลื่อนที่) เป็นปริมาณที่นับได้

$$K = \sum_{i=1}^k \frac{1}{2} m_i v_i^T v_i \quad (2.52)$$

ดังนั้นผลรวมข้างต้นสามารถแสดงให้กระชับขึ้นด้วย

$$\sum_{i=1}^k m_i \ddot{r}_i^T \frac{\partial r_i}{\partial q_j} = \frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial K}{\partial q_j} \quad (2.53)$$

การแทนที่ของ สมการ (2.53) เข้าไปในสมการ (2.47) พบว่า ผลรวมลำดับที่ 2 ใน สมการ (2.43) คือ

$$\sum_{i=1}^k \dot{p}_i^T \delta r_i = \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial K}{\partial q_j} \right\} \delta q_j \quad (2.54)$$

และสุดท้าย เมื่อรวมสมการ (2.54) และ สมการ (2.34) จะให้

$$\sum_{j=1}^n \left\{ \frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial K}{\partial q_j} - \psi_j \right\} \delta q_j = 0 \quad (2.55)$$

เนื่องจากเวกอร์ดิสเพลซเมนต์ δq_j เป็นค่าอิสระ ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่า แต่ละสัมประสิทธิ์ใน สมการ (2.44) เท่ากับศูนย์ นั่นก็คือ

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial K}{\partial q_j} = \psi_j, j = 1, \dots, n \quad (2.56)$$

ถ้าแรงทั่วไป ψ_j คือผลรวมของแรงทั่วไป ที่ถูกกระทำจากภายนอกและแฝงอยู่ ถ้าหากว่า มีฟังก์ชัน τ_j และ $V(q)$ ดังนั้น

$$\psi_j = -\frac{\partial V}{\partial q_j} + \tau_j \quad (2.57)$$

ทำให้สมการ (2.56) เขียนอยู่ในรูปของ

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial L}{\partial q_j} = \tau_j \quad (2.58)$$

โดยที่ $L = K - V$ คือ ลากรานจ์เจียน (Lagrangian) ของระบบฟังก์ชัน V คือ พลังงานศักย์ของระบบ และฟังก์ชัน K คือพลังงานจลน์ของระบบ จำไว้ว่า สมการ (2.56) และ (2.58) คือ สมการ ลากรานจ์เจียน หรือ สมการออยเลอร์-ลากรานจ์ของการเคลื่อนที่

2.1.5.5 สมการของการเคลื่อนที่ (Equation of Motion)

ในที่นี้เราใช้สมการออยเลอร์-ลากรางจ์ ที่หาได้ในหัวข้อผ่านมา เพื่อนำมาเป็นกรณีศึกษา เมื่อกำหนดให้มี 2 เองไขคือ อันดับแรกพลังงานจลน์คือฟังก์ชันยกกำลังสองของเวกเตอร์ \dot{q} ซึ่งอยู่ในรูปแบบของ

$$K = \frac{1}{2} \sum_{i,j}^n d_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j := \frac{1}{2} \dot{q}^T D(q) \dot{q} \quad (2.59)$$

โดยที่ $n \times n$ “เมตริกความเฉื่อย” $D(q)$ คือ ค่าสมมาตรและเป็นบวก สำหรับแต่ละ $q \in \mathbb{R}^n$ อันดับสองพลังงานศักย์ $V = V(q)$ ไม่ขึ้นอยู่กับค่า \dot{q} ได้กล่าวถึงการควบคุมหุ่นยนต์ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าวนี้ไปเรียบร้อยแล้ว

สมการออยเลอร์-ลากรางจ์ สำหรับระบบข้างต้นสามารถหาได้ดังนี้ เนื่องจาก

$$L = K - V = \frac{1}{2} \sum_{i,j} d_{ij}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j - V(q) \quad (2.60)$$

จึงได้

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} = \sum_i d_{kj}(q) \dot{q}_j \quad (2.61)$$

และ

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} = \sum_i d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j} \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} \dot{q}_i \dot{q}_j \quad (2.62)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_k} = \frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \dot{q}_i \dot{q}_j - \frac{\partial V}{\partial q_k} \quad (2.63)$$

ดังนั้นสมการออยเลอร์-ลากรางจ์ สามารถเขียนได้เป็น

$$\sum_j d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \dot{q}_i \dot{q}_j - \frac{\partial V}{\partial q_k} = \tau_k \quad (2.64)$$

$k = 1, \dots, n$

อาศัยการสลับ ลำดับของผลรวมและสมบัติการสมมาตรทำให้เราได้

$$\sum_{i,j} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} \right\} \dot{q}_i \dot{q}_j = \frac{1}{2} \sum_{i,j} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} \right\} \dot{q}_i \dot{q}_j \quad (2.65)$$

เนื่องจาก

$$\sum_{i,j} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \dot{q}_i \dot{q}_j = \sum_{i,j} \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \dot{q}_i \dot{q}_j \quad (2.66)$$

ดังนั้นจะได้

$$c_{ijk} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \quad (2.67)$$

หรือที่เรียกกันว่า “สัญลักษณ์คริสโทฟี” สำหรับค่าคงตัว k เราให้ $c_{ijk} = c_{jik}$ ซึ่งจะช่วยลดการคำนวณสัญลักษณ์เหล่านี้ สุดท้ายถ้าให้

$$\phi_k = \frac{\partial V}{\partial q_k} \quad (2.68)$$

ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการออยเลอร์-ลากรางจ์ ได้เป็น

$$\sum_j d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j} c_{ijk}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j + \phi_k(q) = \tau_k, \quad k = 1, \dots, n \quad (2.69)$$

จากสมการข้างต้น สามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 เทอม เทอมแรก เกี่ยวข้องกับ อนุพันธ์อันดับสองของค่าพิกัดทั่วไป เทอมที่สอง คือ สมการกำลังสองในเทอมของอนุพันธ์อันดับหนึ่งของ q โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ขึ้นอยู่กับ q จากนั้นทำให้สามารถจัดแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือเทอมที่เกี่ยวข้องกับผลคูณของ q_i^2 เรียกว่า “เหวี่ยงออกจากศูนย์กลาง” ในขณะที่อีกเทอมหนึ่งเกี่ยวข้องกับผลคูณของ $q_i q_j$ เมื่อ $i \neq j$ หรือเรียกว่า “Coriolis” ส่วนเทอมที่สามเกี่ยวข้องกับเฉพาะค่า q แต่ไม่รวมอนุพันธ์ของ q ซึ่งจะเข้าใจง่ายขึ้นเมื่อทำการดิฟเฟอเรนเชียลพลังงานจลน์ และทำให้สามารถเขียน (2.69) ให้อยู่ในเมตริกแบบดังนี้

$$D(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + g(q) = \tau \quad (2.70)$$

โดยที่ k, j^{th} เป็นส่วนของเมตริก $C(q, \dot{q})$ ถูกนิยามให้เป็น

$$\begin{aligned} c_{kj} &= \sum_{i=1}^n c_{ijk}(q) \dot{q}_i \\ &= \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \dot{q}_i \end{aligned} \quad (2.71)$$

จากนั้นเราหาความสัมพันธ์ระหว่าง เมตริกความเฉื่อย $D(q)$ และเมตริก $C(q, \dot{q})$ ที่ปรากฏอยู่ใน (2.70) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ขั้นพื้นฐานของปัญหาที่เกิดขึ้นกับการผสมการควบคุม

2.1.6 ทฤษฎีความหิมนวลสูงสุด (Minimum Jerk)

หลักการความหิมนวลสูงสุด (Minimum Jerk) นั้นมีหลักการเริ่มจากระบบชั้นความเสรีเดี่ยว (Single-Stage Systems) และระบบหลายระดับชั้นความเสรี (Multistage Systems) ตามลำดับ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนแคลคูลัสอพอริเอชันส์ (Calculus of Variation) ก็คือฟังก์ชันนอล (Functional) เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\dot{x}_i = f_i(x_i, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m, t); i = 1, \dots, n \quad (2.72)$$

เมื่อ x, u คือจำนวนจริงใดๆ และ t คือ เวลาในการเคลื่อนที่ โดยให้ $x(t)$ เป็นสถานะเริ่มต้นและ $U(t)$ เป็นฟังก์ชันที่ควบคุม ซึ่งในหลักการความหิมนวลสูงสุด (Minimum Jerk) นั้นจะกำหนดตำแหน่งและเวลาสุดท้ายของการเคลื่อนที่หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งก็คือ การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ซึ่งอยู่ในรูปของ $x(t_0), t_0$ เป็นตำแหน่งและเวลาเริ่มต้น $x(t_f), t_f$ เป็นตำแหน่งและเวลาสุดท้าย แต่หลักการความหิมนวลสูงสุดนั้นอยู่ในรูปของอนุพันธ์อันดับที่ 3 (Higher Order) ดังสมการที่ 2.73

$$\text{Minimum Jerk} = \ddot{x} = \dot{u} \quad (2.73)$$

หรือ

$$\dot{u} = \tilde{u} \quad (2.74)$$

จากสมการที่ 1 จะได้ว่า

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, \dots, x_{n+m}, \tilde{u}_1, \dots, \tilde{u}_m, t); i = 1, \dots, n+m \quad (2.75)$$

แต่หลักการความหิมนวลสูงสุดนี้แบ่งออกเป็นสองวิธีดังนี้

2.1.6.1 ปัญหาความโน้มถ่วงสูงสุดโดยวิธีทางตรง (Minimum Direct Jerk Problem) Cost Function ของการหาค่าความโน้มถ่วงสูงสุดโดยวิธีทางตรงกำหนดไว้ดังนี้

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{i=1}^m \ddot{x}_i^2 dt \quad (2.76)$$

2.1.6.2 ปัญหาความโน้มถ่วงสูงสุดโดยวิธีทางอ้อม (Minimum Indirect Jerk Problem) Cost Function ของการหาค่าความโน้มถ่วงสูงสุดโดยวิธีทางอ้อมกำหนดไว้ดังนี้

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{i=1}^m \tilde{u}_i^2 dt \quad (2.77)$$

โดยสมการที่ 2.72 และ 2.73 นั้นใช้การกำหนด Cost Function และได้ทำการมิไนไมซ์ (Minimized) โดยใช้ แคลคูลัสออฟวาเรียนชันส์ (Calculus of Variations) หาค่าตัวแปรเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมาเหมือนกัน

ซึ่งมีผู้ทำวิจัยเปรียบเทียบการหาค่าตอบด้วยวิธีทางตรงและทางอ้อมพบว่า การแก้ปัญหาทั้งสองวิธีนั้นให้คำตอบที่เหมือนกันเพียงแต่ว่าการแก้ปัญหาความโน้มถ่วงสูงสุดด้วยวิธีทางอ้อมนั้นง่ายกว่าในการแก้สมการ แต่อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีจำเป็นต้องทำการกำหนดฟังก์ชันที่จะใช้ในการหาค่าความโน้มถ่วง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสืบค้นข้อมูลและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการดำเนินการวิจัยครั้งนี้เป็นการทบทวนผลงานวิจัยของบุคคลต่าง ๆ ที่ผ่านมาและมีลักษณะคล้ายคลึงทั้งส่วนภายในประเทศและต่างประเทศมีบุคคลที่ได้ศึกษาทำวิจัยดังนี้

ในปี 1999 Nobuaki Nakazawa. และคณะ ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการควบคุมแรงจับชิ้นงานโดยออกแรงจับชิ้นงานน้อยที่สุดในการหยิบชิ้นงานขึ้นในแนวตั้ง ซึ่งแขนกลที่ใช้ในการทดสอบนั้นเป็นแขนกลที่ติดตั้ง Strain gage ที่มีอกลจับชิ้นงาน จากนั้นเมื่อแขนกลได้จับชิ้นงานและทำการยกในแนวตั้ง จะเกิดแรงเสียดทานขึ้นที่ผิวสัมผัสของมือกล ในการทดลองนั้นใช้กฎข้อ 2 ของนิวตัน กับระบบควบคุม PD Control ในการควบคุมมือจับชิ้นงานจากแรงที่เกิดขึ้นในการหยิบจับชิ้นงานขณะที่ยกขึ้น โดยในการทดลองได้ใช้เวลาสุ่มทั้งหมด 8 แบบ และได้ทำการทดลองกับผู้ร่วมการทดลองอายุระหว่าง 22 ถึง 27 ปี จำนวน 4 คน ซึ่งผลที่ได้คือมือจับชิ้นงานนั้นสามารถควบคุมแรงที่มากเกินไปได้ แต่ระบบยังไม่สามารถทำงานให้เกิดความราบเรียบได้อย่างสมบูรณ์

ในปี 2000 Takashi Maeno. และคณะ ได้ทำการทดลองการควบคุมมือกลจับชิ้นงาน โดยมือกลจับชิ้นงานนั้นสามารถยืดหยุ่นได้ หลักการมีอยู่ว่าที่มือกลนั้นได้ติดแผ่นทองแดงที่มี Strain gage ไว้ที่บนแผ่นทองแดงซึ่งจำนวนมาก และถ้าหากวัตถุตรวจวัดแรงมีขนาดเล็ก การกระจายแรงก็จะดีขึ้น และการค้นหาแรงที่เกิดจากการยกชิ้นงานก็จะดีขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งหากทำการยกวัตถุแล้ววัตถุเกิดการลื่นไถล แผ่นทองแดงนั้นก็เกิดการเปลี่ยนแปลง จากนั้นได้นำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาใช้ในการควบคุมแรงจับของมือกลจับชิ้นงาน ซึ่งงานวิจัยนี้ยังสามารถนำไปพัฒนาต่อได้อีกมาก

ในปี 2003 Dennis A. Nowak & Joachim Hermsdorfer. ได้ทำการทดลองควบคุมแรงที่ใช้จับวัตถุโดยใช้เซนเซอร์ Sensory เป็นตัวสัมผัสกับวัตถุเพื่อตรวจจับแรงที่เกิดมากที่สุดและน้อยสุดที่วัตถุไม่เกิดการลื่นไถลในขณะการจับยกวัตถุเพื่อเปรียบเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบและควบคุมแรงที่เกิดขึ้นให้เหมาะสมที่สุดสำหรับการจับยกวัตถุ

ในปี 2005 Tsukasa Ogasawara. และคณะ ได้ทำงานวิจัยการควบคุมแรงที่ใช้ในการหยิบจับชิ้นงาน โดยการใช้กล้องช่วย ซึ่งใช้หลักการของการจับภาพ (Vision) ผิดที่ใช้ในการสัมผัสวัตถุนั้นมีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลมที่มีความยืดหยุ่น ที่ยอดของครึ่งวงกลมนั้นจะมีจุดศูนย์กลางเป็นตำแหน่งที่ไว้ใช้กับกล้อง Vision เมื่อทำการยกชิ้นงานขึ้นแล้วเกิดการลื่นไถล จุดศูนย์กลางของกล้อง Vision ก็จะถูกเปลี่ยนตำแหน่งไปด้วย ซึ่งทางคณะผู้ทำการวิจัยได้นำหลักของภาพที่มีการเปลี่ยนแปลง รวมทั้งทฤษฎี Eccentricity มาใช้แก้ไขปัญหานี้จนชิ้นงานไม่เกิดการลื่นไถล

ในปี 1998 Sunil K. Agrawal, T. Veerakleaw and B.C. Fabien. ในการใช้ทฤษฎีของระบบวิเคราะห์ปัญหาของการหาค่าต่ำสุดและสูงสุดที่เป็นที่ยอมรับแล้วว่า ระบบการเคลื่อนที่ที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสูงมีข้อได้เปรียบเป็นอย่างมากในเรื่องของการคำนวณ เมื่อนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับกับระบบเคลื่อนที่ที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งโดยเฉพาะสมการการเคลื่อนที่ทางด้านวิศวกรรมเครื่องกล จะอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่สองเสมอ อันเนื่องมาจากการใช้กฎข้อที่สองของนิวตันในบทความฉบับนี้ได้นำเสนอข้อมูลเปรียบเทียบอย่างชัดเจนในการคำนวณระหว่างสมการการเคลื่อนที่ที่อยู่ในรูปสมการขั้นสูงและสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งการที่จะเปรียบเทียบได้นั้นผู้วิจัย ได้สร้างซอฟต์แวร์ขึ้นมาด้วยวิธีตรงและวิธีอ้อม เพื่อสามารถยืนยันได้ว่าไม่ว่าสมการการเคลื่อนที่ที่อยู่ในรูปแบบใดก็สามารถที่จะใช้โปรแกรมเดียวกันหาค่าตอบเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ

ในปี 2000 ทวีวัชร วีระแก้ว. ทำการศึกษาการพัฒนาทางด้านทฤษฎีของการหาค่าความเหมาะสมสูงสุดและวิธีการในการหาค่าตอบแบบใหม่ (Extensions of Optimization Theory and Computational Approaches for Higher-Order Dynamic Systems) เป็นการใช้ทฤษฎีระบบเชิงเส้น (Linear Systems) และไม่ใช่เชิงเส้น (Nonlinear Systems) เขียนให้อยู่ในรูปแบบแคโนนิคัล (Canonocal Forms) ซึ่งมีประโยชน์มากเมื่อเปรียบเทียบรูปแบบของลำดับที่หนึ่ง (First-Order Form) โดยสมการลำดับที่สูงกว่าเป็นเงื่อนไขบังคับของระบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น (General Nonlinear Constraints) นอกจากนี้การควบคุมแบบย้อนกลับที่ต่อเนื่องเป็นเส้นตรง (Linear Continuous Feedback Control) ใช้อธิบายระบบลำดับที่สูงกว่า (Higher Order Systems)

แนวความคิดที่ใกล้เคียงกับ Extremals และความแปรปรวนที่สอง (Second Variation) โดยสมภาวะที่เพียงพอ (Sufficient Condition) จะต้องสามารถแสดงเป็นคำตอบต่อเนื่องที่บอกค่าต่ำสุด (Minimum Trajectories) ได้โดยสมภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimality Conditions) สำหรับระบบลำดับที่สูงกว่า ถูกอธิบายได้สองแบบคือ แคลคูลัสความแปรปรวน (Variation Calculus) ของลำดับที่สูงกว่าถูกขยายในคอสมฟังก์ชันนอล (Cost Functional) และทฤษฎีของ Hamilton-Jacobi เป็นทฤษฎีที่ใช้หลักการของพรอนทริยาเกิน (Pontryagin's Principle) ต่อจากนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากสองวิธีนี้ถูกพิสูจน์โดยผ่านโปรแกรมการคำนวณของแคลคูลัสความแปรปรวน โดยทฤษฎีรูปแบบของลำดับที่หนึ่ง สภาวะเหล่านี้ถูกใช้เพื่อการแก้ปัญหากระบวนการคำนวณเพื่อให้เข้าใกล้ระบบลำดับที่สูงกว่า โปรแกรมถูกพัฒนาให้ใช้เป็นเครื่องมือตรวจสอบความถูกต้อง (Benchmark Computations) ระหว่างระบบลำดับที่สูงกว่า และทฤษฎีรูปแบบของลำดับที่หนึ่ง โปรแกรมใช้การวิเคราะห์ทั้งวิธีตรง วิธีอ้อม และใช้วิธีคอลโลเคชัน (Collocation Method) ร่วมกับการเขียนโปรแกรมไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Programming Solver)

ในปี 2008 จำนวน ผายสะพานน้อย. การศึกษาผลลัพธ์ที่ได้จากการรวมความนิ่มนวลที่สุด และพลังงานน้อยที่สุดของระบบพลศาสตร์เชิงเส้น ปริณูณานิพันธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการวิเคราะห์หาค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการรวมวิธีการ ความนิ่มนวลที่สุด (Minimum Jerk) และการใช้พลังงานน้อยที่สุด (Minimum Energy) ของระบบพลศาสตร์เชิงเส้น โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ ค่าความเหมาะสมที่สุดหาค่าตอบ คือได้ทั้งความนิ่มนวลสูงสุด และใช้พลังงานน้อยที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับกรณีการหาค่าความเหมาะสมสูงสุดด้วยวิธีความนิ่มนวลที่สุดและวิธีใช้พลังงานน้อยที่สุดเพียงอย่างเดียวศึกษาอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยกำหนดให้ระบบการเคลื่อนที่มี 2 องศาอิสระ (Two Degree of Freedom) เป็นระบบสปริง มวล และตัวหน่วง (Spring-Mass and Damper) ในรูปแบบของ Fully Actuator) ของระบบพลศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น (Linear of Dynamic Systems) ทำให้ได้สมการการเคลื่อนที่ ในรูปแบบการหาค่าความเหมาะสมสูงสุดด้วยวิธีการแก้ปัญหาจากการรวมวิธีการค่าความนิ่มนวลสูงสุดกับวิธีการพลังงานน้อยที่สุดเข้าด้วยกัน จากนั้นใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ Matlab มาเป็นเครื่องมือช่วยวิเคราะห์และแสดงผลในลักษณะรูปแบบของกราฟผลที่ได้จากการศึกษาและวิจัยตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ทำให้ได้ค่าความเหมาะสมสูงสุด คือได้ทั้งความนิ่มนวลที่สุดและใช้พลังงานน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับการหาค่าความเหมาะสมสูงสุดจากการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เดียว ซึ่งจะเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ใช้กับงานจริงต่อไป

ในปี 2008 สราวุฒิ สิริเกษมสุข. การประยุกต์ใช้เมาส์ลูกลิ้งกับมือกลจับชิ้นงานเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้มือกลจับชิ้นงานสามารถเรียนรู้การหยิบจับชิ้นงานได้โดยไม่เกิดการสั่นไหว โดยมือกลจับชิ้นงานที่ประยุกต์ขึ้นมานั้น ใช้หลักความเหมาะสมสูงสุดในการหยิบจับชิ้นงาน ซึ่งมีการตรวจจับสัญญาณจากเมาส์ลูกลิ้งว่ามีการหมุนของลูกลิ้งหรือไม่ กรณีลูกลิ้งหมุนแสดงว่าชิ้นงานเกิดการสั่นไหว ทำให้มือจับชิ้นงานเลื่อนเข้ามาจับชิ้นงานอีกจนกว่าลูกลิ้งของเมาส์จะไม่

หมุ่น ซึ่งในการทดลองนี้ ได้ทดลองการหยิบจับชิ้นงาน เพื่อเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการหยิบจับชิ้นงานของผู้ร่วมการทดลองทั้ง 10 คน กับมือกลที่ประยุกต์ขึ้นมา สรุปได้ว่าผู้ร่วมทำการทดลองออกแรงในการหยิบจับชิ้นงานมากกว่ามือจับชิ้นงานที่ประยุกต์ขึ้น ทั้งนี้เพราะการจับชิ้นงานนั้นสามารถออกแรงจับยกชิ้นงานได้เหมาะสมกว่ามนุษย์ และอาจเป็นแรงที่น้อยที่สุดที่จะยกชิ้นงานขึ้นได้โดยไม่เกิดการลื่นไถล

ในปี 2008 วิรัช สิริทรัพย์ไพบุลย์. ออกแบบและสร้างโปรแกรม Graphical User Interface สำหรับรับค่าอินพุตค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อหาสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ รวมถึงการแสดงผลเอาท์พุทหลังการคำนวณในรูปแบบที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม MATLAB และสามารถหาค่า Moment of Inertia ของแขนกลรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่ายเพื่อนำมาช่วยให้หาสมการการเคลื่อนที่ได้ถูกต้องยิ่งขึ้นการดำเนินการวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยทฤษฎีของออยเลอร์-ลากรานจ์ และวิเคราะห์ปัญหาของหุ่นยนต์แบบ Forward Kinematics ผู้ใช้ต้องมีข้อมูลที่เป็นตาราง D-H (Denavit-Hartenberg) อินพุตที่โปรแกรมโดยที่ผู้ใช้สามารถอินพุตค่าที่เป็นเชิงตัวเลขหรือค่าที่เป็นตัวแปรก็ได้ ซึ่งโปรแกรมจะนำค่าที่ได้ไปคำนวณต่อโดยใช้ฟังก์ชัน Symbolic ถ้าค่าที่อินพุตเป็นตัวแปรค่าผลลัพธ์คำตอบที่ได้จะติดเป็นตัวแปรเช่นกันในส่วนการอินพุตค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่าย ผู้ใช้สามารถเลือกได้ง่ายโดยมีรูปภาพมาประกอบให้เลือกและใส่ค่าตัวแปรต่างๆการแสดงผลของผลลัพธ์คำตอบสามารถแสดงออกมาได้หลายโปรแกรม แล้วแต่ผู้ใช้จะเป็นผู้เลือก เพื่อที่สามารถนำไปประยุกต์กับโปรแกรมอื่นเพื่อหาคำตอบที่เป็นเชิงตัวเลขได้อีกครั้ง

จากการทบทวนเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสรุปได้ว่า

งานวิจัยของ Nobuaki Nakazawa ที่ใช้ Strain gage เป็นเครื่องมือในการวัดแรงกดในขณะมือกลจับชิ้นงาน และ งานวิจัยของ สรวุฒิ สิริเกษมสุข ใช้เมาส์ลูกกลิ้งในการตรวจจับการเคลื่อนที่หรือลื่นไถลของชิ้นงาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำหลักการของ Nobuaki Nakazawa และ สรวุฒิ สิริเกษมสุข มาช่วยในการออกแบบสร้างมือกลโดยนำหลักความนิ่มนวลสูงสุดมาใช้ในการเคลื่อนที่เข้าจับยกชิ้นงานของมือกล และติดตั้งเมาส์แสงแทนเมาส์ลูกกลิ้งเพื่อตรวจจับการเคลื่อนที่ของชิ้นงานในขณะมือกลทำการจับยกมีการติดตั้ง Strain gage ไว้ที่นิ้วของมือกลเพื่อหาแรงจับยกชิ้นงาน

บทที่ 3

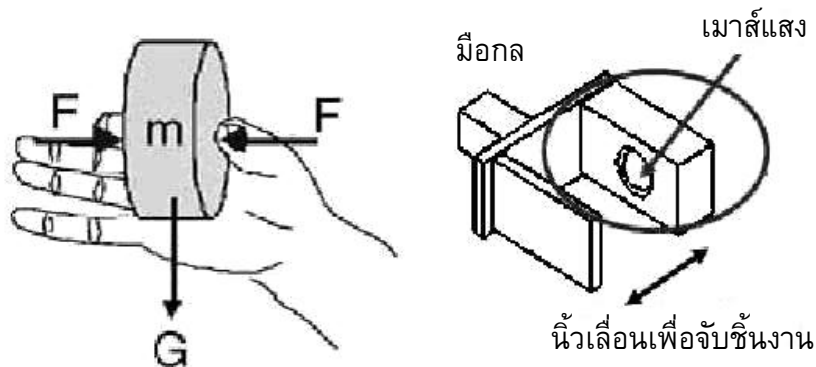
วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัย ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การออกแบบสร้างมือกล
2. การออกแบบสร้างแขนกล
3. การหาสมการการเคลื่อนที่
4. การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์
5. การออกแบบระบบควบคุมมือกล
6. การเขียนโปรแกรม Propeller
7. วิธีจับยกชิ้นงาน

3.1 การออกแบบสร้างมือกล

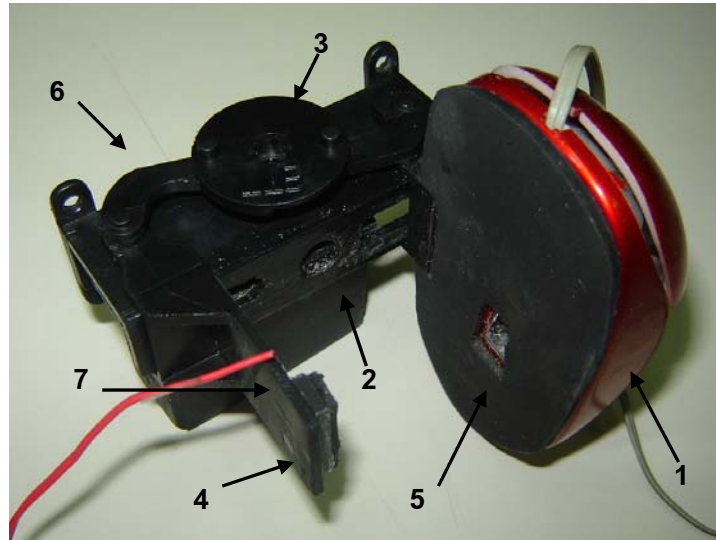
มือกลที่ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบมีลักษณะเป็นแบบ 2 นิ้ว โดยจะทำการติดตั้งเมาส์แสงไว้ที่นิ้ว 1 ข้างเพื่อใช้ในการตรวจจับการเคลื่อนที่หรือสิ้นไกลของชิ้นงาน ในขณะที่ทำการจับยกนิ้วทั้ง 2 ข้างสามารถเคลื่อนที่เข้าหากันเพื่อทำการบีบจับชิ้นงาน โดยมีน้ำหนักของชิ้นงานที่มีทิศทางตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ของนิ้วทั้ง 2 ถ้าหากเกิดการเคลื่อนที่หรือสิ้นไกลของชิ้นงาน เมาส์แสงจะทำการส่งสัญญาณไปยังชุดควบคุมบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อสั่งให้เซอร์โวมอเตอร์ทำการหมุนเลื่อนนิ้วทั้ง 2 ข้างของมือกลเข้ามาบีบชิ้นงานจนกว่าจะไม่มี การเคลื่อนที่หรือสิ้นไกลของชิ้นงาน



ภาพประกอบ 12 แสดงลักษณะมือกล 2 นิ้ว

มือกลที่ออกแบบนั้นจะใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา ในส่วนของเมาส์แสงที่ใช้ก็จะเลือกให้มีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบาเพื่อนำมาติดตั้งกับนิ้วของมือกล มอเตอร์ที่ติดตั้งกับมือกลใช้เลื่อนนิ้วทั้ง 2 ข้างเป็นแบบเซอร์โวมอเตอร์ รุ่น GWS S03T จะมีแรงบิดสูงสุดที่ 9 Kg-cm วัสดุรองรับมือกลเป็น

ฟองน้ำ และยางจะติดตั้งที่นิ้วทั้ง 2 ข้างของมือกล เพื่อเพิ่มแรงเสียดทาน และความยืดหยุ่นระหว่าง
 ชั๊นงานที่จับยกกับมือกล ดังภาพประกอบ 13 แสดงมือกลติดตั้งเม้าส์แสง



ภาพประกอบ 13 แสดงมือกลติดตั้งเม้าส์แสง

จากภาพประกอบ 13 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของมือกล จะมีชื่อ และหน้าที่การทำงาน
 ของส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

หมายเลข 1 เม้าส์แสง ทำหน้าที่ตรวจจับการเคลื่อนที่ของชั๊นงาน

หมายเลข 2 เซอร์โวมอเตอร์ ทำหน้าที่เลื่อนนิ้วทั้ง 2 ข้างเข้าจับชั๊นงาน

หมายเลข 3 จานหมุน ทำหน้าที่ส่งรับแรงบิดจากมอเตอร์เพื่อเลื่อนนิ้วทั้ง 2 ข้าง

หมายเลข 4 นิ้วมือกล ทำหน้าที่บีบจับชั๊นงาน

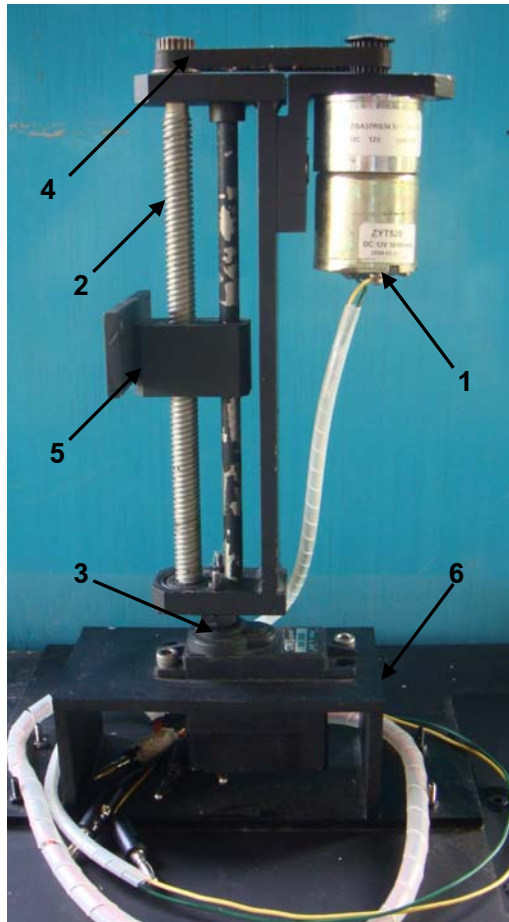
หมายเลข 5 วัสดุรองจับ ทำหน้าที่เพิ่มแรงเสียดทานขณะจับยกชั๊นงาน

หมายเลข 6 ก้ำมปู ทำหน้าที่เลื่อนนิ้วทั้ง 2 ข้างเข้าออกเพื่อบีบชั๊นงาน

หมายเลข 7 สเตรนเกจ ทำหน้าที่วัดความเครียดในขณะจับยกชั๊นงาน

3.2 การออกแบบสร้างแขนกล

การออกแบบสร้างมือกลสำหรับจับยกชิ้นงานต้องอาศัยแขนกลเป็นตัวช่วยในการยกชิ้นงานในการวิจัยได้มีการออกแบบในส่วนของแขนกลเป็นแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น 1 แกน และเคลื่อนที่เชิงมุม 1 แกน เพื่อให้ได้แรงเหมาะสมที่สุดในการจับยกชิ้นงาน



ภาพประกอบ 14 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของแขนกล

จากภาพประกอบ 14 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของแขนกล จะมีชื่อ และหน้าที่การทำงานของส่วนประกอบต่างๆ ดังต่อไปนี้

หมายเลข 1 มอเตอร์ขับเคลื่อนที่ 1 ทำหน้าที่ขับสายพานส่งกำลังเพื่อหมุนสลักเกลียว

หมายเลข 2 สลักเกลียวทำหน้าที่หมุนเพื่อเลื่อนมือกลขึ้นลงจับยกชิ้นงาน

หมายเลข 3 มอเตอร์ขับเคลื่อนที่ 2 ทำหน้าที่หมุนส่วนของแขนกลเพื่อจับยกชิ้นงาน

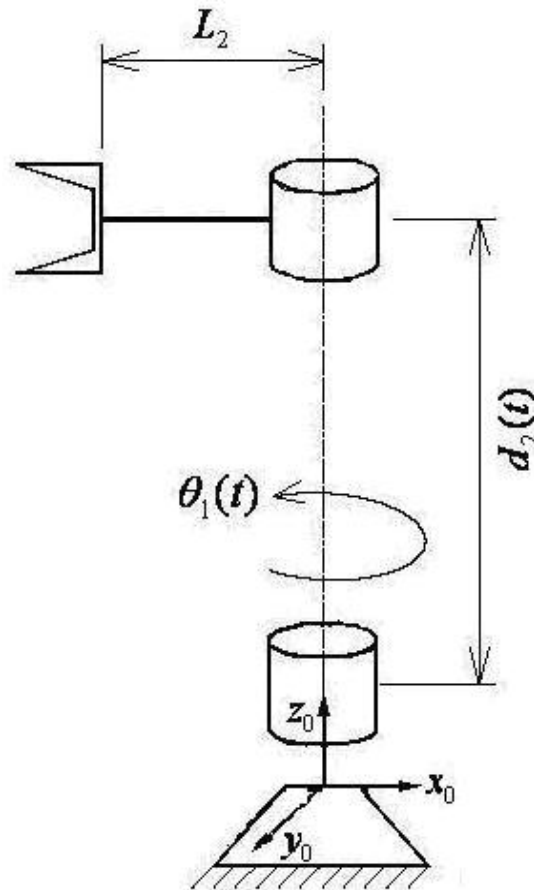
หมายเลข 4 สายพานส่งกำลังทำหน้าที่ส่งกำลังจากมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ 1 เพื่อหมุนสลักเกลียว

หมายเลข 5 สลักเลื่อนทำหน้าที่ต่อเข้ากับมือกลเพื่อจับยกชิ้นงาน

หมายเลข 6 ส่วนของฐานแขนกลเป็นส่วนยึดกับมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ 2 เพื่อหมุนแขนกล

3.3 การหาสมการ การเคลื่อนที่

การหาสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลนั้นสามารถพิจารณาจากแบบจำลองการเคลื่อนที่เพื่อกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ซึ่งสามารถพิจารณาการเคลื่อนที่ของแขนกลได้



ภาพประกอบ 15 แสดงแบบจำลองการเคลื่อนที่แขนกล

จากภาพประกอบ 15 แสดงแบบจำลองการเคลื่อนที่แขนกลสามารถนำมากำหนดตัวแปรต่างๆ ลงในตารางของ DH-Parameter เพื่อนำไปคำนวณหาสมการการเคลื่อนที่

ตาราง 2 แสดงตาราง DH-Parameter ของแขนกล

a_i	L_i (m)	d_i (m)	α_i	θ_i (rad)
1	0	0	0	$\theta_1(t)$
2	L_2	$d_2(t)$	0	0

สมการการเคลื่อนที่ตามกฎข้อที่สองของนิวตัน

$$\sum F = ma \quad (3.1)$$

$$\sum F = m\ddot{x} = m\ddot{\theta} \quad (3.2)$$

นำตัวแปรในตาราง 2 มาหาสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยการพัฒนาโปรแกรม MatLab (วิรัช สิริทรัพย์ไพบุลย์. 2008) เป็นตัวช่วยในการแก้ปัญหาจะได้สมการการเคลื่อนที่ออกเป็น 2 สมการคือ

$$u_1 = (2 + m_2 L_2^2) \ddot{\theta}_1 + \frac{981}{100} L_2 m_2 \sin(\theta_1) - \frac{981}{100} L_2 m_2 \cos(\theta_1) \quad (3.3)$$

และ

$$u_2 = m_2 \ddot{d}_2 + \frac{981}{100} m_2 \quad (3.4)$$

ปัญหาความน้มนวลสูงสุด (Minimum Jerk Problem) ต้องทำการ Differential Equation เพื่อให้สมการอยู่ในรูปของตัวแปร Jerk Variables ซึ่งทำให้ได้สมการใหม่คือ

$$\tilde{u}_1 = (2 + m_2 L_2^2) \ddot{\theta}_1 + \frac{981}{100} L_2 m_2 \dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) + \frac{981}{100} L_2 m_2 \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) \quad (3.5)$$

และ

$$\tilde{u}_2 = m_2 \ddot{d}_2 \quad (3.6)$$

กำหนดให้ตัวแปรที่ใช้ให้หน่วยของ MKS (เมตร กิโลกรัม วินาที) ดังนี้

$$m_1 = 1\text{kg}, m_2 = 0.5\text{kg}, l_1 = 0, l_2 = 0.03\text{m}, d_1 = 0, d_2 = x_2(t), \alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0, \theta_1 = x_1(t), \theta_2 = 0$$

โดยมีการกำหนดขอบเขตของปัญหา (The boundary conditions) กำหนดให้เวลาและตำแหน่งที่แน่นอน (Fixed End Time and Fixed End Points) $x(t_0) = (0,0)^T$ $x(t_f) = (1.570, 0.15)^T$ ที่เวลา $t_0 = 0$ และเวลาสุดท้าย $t_f = 1$ เงื่อนไขข้อบังคับ $-100 \leq u_i \leq 100$

จากการสืบค้นงานวิจัยพบว่าการแก้ปัญหาความน้มนวลสูงสุดโดยวิธีทางอ้อมนั้นง่ายกว่าในการแก้ปัญหาความน้มนวลสูงสุดสมการโดยวิธีทางตรง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกแก้ปัญหาความน้มนวลสูงสุดโดยวิธีทางอ้อม (Minimum Indirect Jerk Problem) Cost Function การหาค่าความน้มนวลสูงสุดโดยวิธีทางอ้อมกำหนดไว้ดังนี้

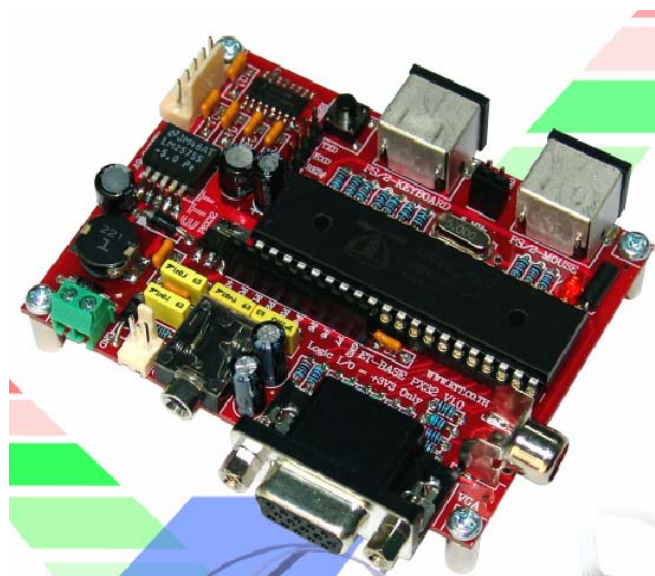
$$j = \int_0^1 \tilde{u}_1^2 + \tilde{u}_2^2 dt \quad (3.7)$$

3.4 การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer programming)

การออกแบบโปรแกรมนั้นต้องการใช้งานโดยเชื่อมโยงกับกล่องเครื่องมือ (Toolbox) ของโปรแกรมแมทแล็บ (Matlab) โดยพัฒนานาเอาสมการอนุพันธ์อันดับ $3 \frac{d^3 y}{dt^3} = \ddot{x}$ = ความถี่มุมสูงสุด (Minimum Jerk) มาใช้ร่วมกับฟังก์ชันของออปติไมต์เซชันโซลเวอร์ (Optimization solver) และฟังก์ชันเอพมินคอน (fmincon) ซึ่งเป็นกล่องเครื่องมือออปติไมต์เซชัน (Optimization toolbox) ที่มีอยู่แล้วในโปรแกรมแมทแล็บเป็นฟังก์ชันหลักในการแก้ปัญหา (T. Veeraklaew 2005) ซึ่งฟังก์ชันต่างๆ ภายในเอพมินคอน (fmincon) จะทำหน้าที่ตั้งนิพจน์แรกเมื่อรับอินพุต (Input) จาก user.m มาแล้วจะคืนค่าของเงื่อนไขบังคับที่เป็นอีควอลิตีคอนสเทรนต์ (Equality constraints) และอินอีควอลิตีคอนสเทรนต์ (Inequality constraints) ซึ่งแทนค่าออปติไมต์เซชันพารามิเตอร์ (Optimization parameter)

3.5 การออกแบบระบบควบคุมมือกล

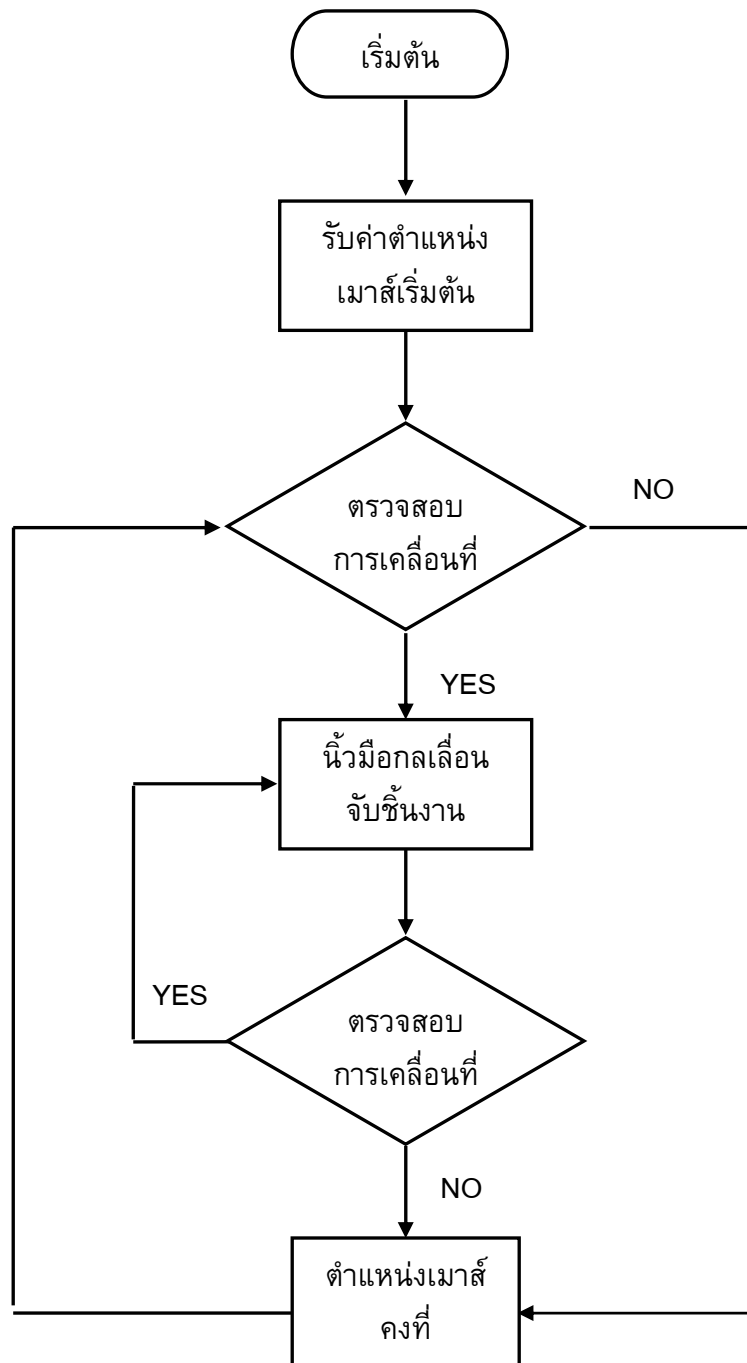
ระบบควบคุมมือกลจะใช้บอร์ด ET-BASE PX32 โดยใช้ MCU เบอร์ P8X32A –D40 ของ PARALLAX โดยจะเป็น MCU ที่มีความไวสูง ขนาด 32 บิต 8 Cog Multiprocessor โครงสร้างของ MCU จะเป็นตัวถังแบบ DIP 40 PIN สามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงสุด 80 MHz ทำงานที่แรงดัน 2.7-3.6 VDC การพัฒนาโปรแกรมจะใช้ Software tool “Propeller V1.06” ซึ่ง Software ตัวนี้สามารถใช้เขียนโปรแกรม Compile Code และ Download Code ผ่านทาง RS232 ได้เลยโดยภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมจะเป็นภาษา SPIN โปรแกรม Propeller นี้จะมี Library ต่างๆ สำหรับใช้ติดต่อระหว่างอุปกรณ์รอบข้างกับตัว MCU P8X32A ไว้ให้เรียบร้อยแล้วซึ่งก็สามารถเรียก Library มาใช้ได้



ภาพประกอบ 16 แสดงบอร์ด ET-BASE PX32 Chip P8X32

3.5.1 ขั้นตอนการทำงานของมือกล

การทำงานของมือกลมีความสำคัญมากแรงจับยกชิ้นงานน้อยหรือมาก และการตรวจจับการเคลื่อนที่หรือสั่นไหวของชิ้นงานขึ้นอยู่กับขั้นตอนการทำงานของมือกลด้วย เพราะจะนำขั้นตอนไปเขียนโปรแกรม และตั้งเงื่อนไขในการทำงานของมือกล

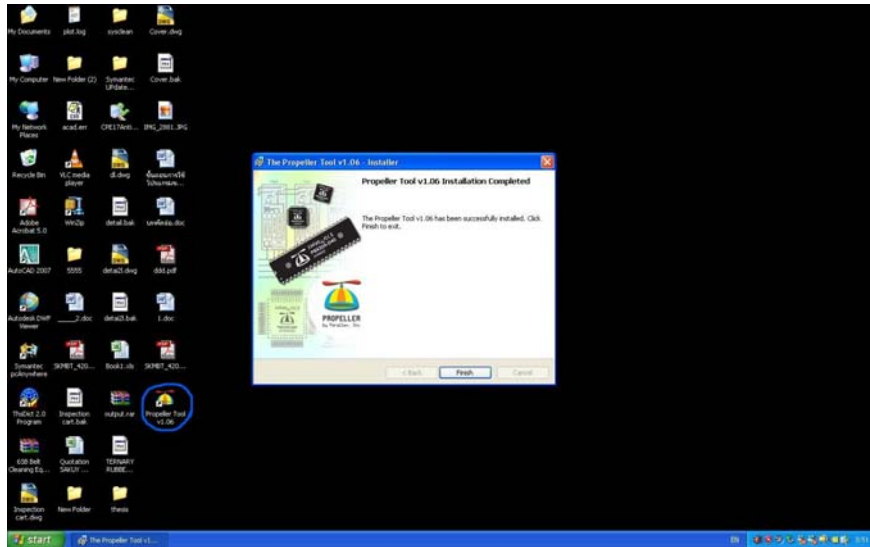


ภาพประกอบ 17 แสดงการทำงานของมือกล

3.6 การเขียนโปรแกรม Propeller

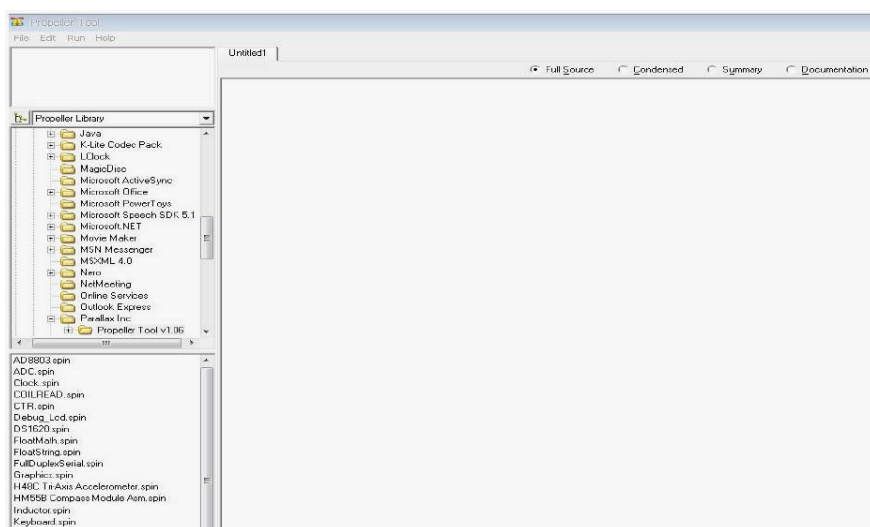
การเขียนโปรแกรม Propeller เพื่อควบคุมมือกลนั้นจะใช้เป็นภาษา SPIN ในการเขียนโดยแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

3.6.1 ทำการติดตั้งโปรแกรม Propeller V1.06 ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์



ภาพประกอบ 18 แสดงโปรแกรม Propeller

3.6.2 หลังจากติดตั้งแล้วให้เปิดโปรแกรม Propeller ขึ้นมาจะได้หน้าต่างจากรูปในหน้าต่างด้านขวามือ (แท็บ Untitled1) จะเป็นพื้นที่ว่างสำหรับเขียนโปรแกรม



ภาพประกอบ 19 แสดงหน้าจอโปรแกรม Propeller

3.6.3 ทำการกำหนดชื่อโปรแกรมชื่อของผู้เขียนโดยใส่ปีกกาขึ้นต้น และปิดท้าย

```

{{ *****
 * Example4.1   : For "ET-BASE PX32 V1.0           *
 *                                                     *
 * File Name    : Ex4.1_Mouse_On_TV.spin          *
 * Compiler     : Propeller V1.06                 *
 * Create By    : Artit Kamtay                     *
 * Last Update  : 28/January/2007                 *
 * Function     : Move Curser Mouse On TV         *
 *                                                     *
 *                                                     *
 ***** }}

```

ภาพประกอบ 20 แสดง File Name โปรแกรม Propeller

3.6.4 กำหนดค่าคงที่ให้กับตัวแปรที่จะใช้งานใน CON-Block

```

CON

_clknode = xtal1 + p1116x
_xinfreq = 5_000_000
_stack = ($3000 + $3000 + 100) >> 2 'accomodate display memory and stack

_1uS = 1_000_000 /      1

ZonePeriod = 5_000
NoGlitchWindow = 2_500

```

ภาพประกอบ 21 แสดงการกำหนดค่าคงที่ให้กับตัวแปรใน CON-Block

3.6.5 การประกาศตัวแปรใน VAR - Block เพื่อเรียกใช้งานใน Project File เดียวกัน

```

VAR

long mousex, mousey      |

long      ZoneClocks
long      NoGlitch
long      ServoPinDirection
long      ServoData[31]

```

ภาพประกอบ 22 แสดงการประกาศตัวแปรใน VAR - Block

3.6.6 กำหนดชื่อไฟล์ใน OBJ - Block เพื่อให้สามารถเรียกใช้ฟังก์ชันที่มีอยู่ในไฟล์จากภายนอกได้

```
OBJ
mouse : "mouse"
RS232 : "FullDuplexSerial"      ''Include Function in File FullDuplexSerial.spin
servo : "Servo32v3"
```

ภาพประกอบ 23 แสดงการกำหนดชื่อไฟล์จากภายนอกใน OBJ - Block

3.6.7 กำหนดเงื่อนไขต่างๆ ของโปรแกรมลงใน PUB - Block

```
PUB main | x, y, i, color1, color2, color3, click, receive

servo.start
servo.set(0, 1000)
mouse.start(24, 25)

'RS232.start(31, 30, 0, 9600)      ''Start RS232:Set P31= Rx,P30=Tx , Baud Rate=9600
ms_delay(1000)

'DirA[0] := 1                    '' Set P0 = Output

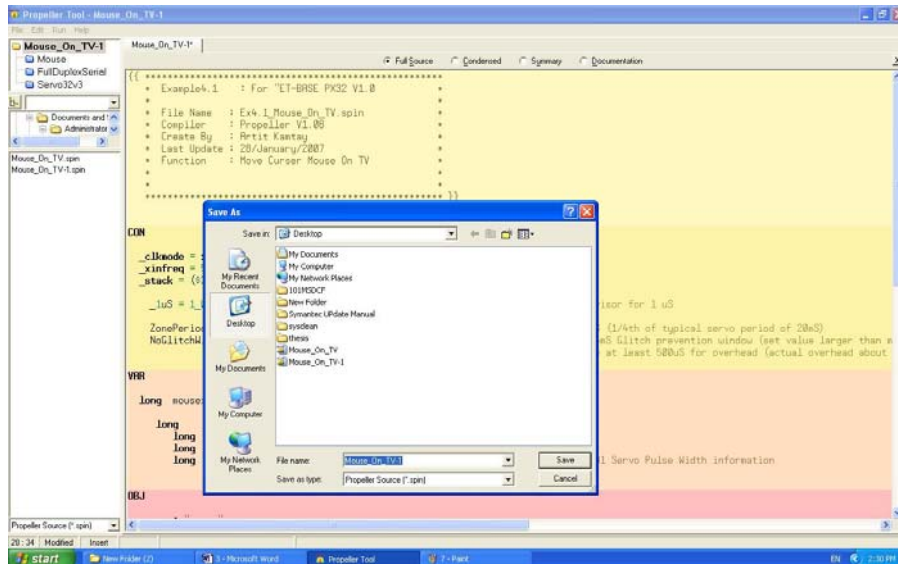
' RS232.str(String("Enter Key : ")) ''Sent Text to Hyperterminal
repeat
  'receive := RS232.rx           ''Receive Key From Hyperterminal
  y := mouse.abs_y
  'RS232.tx(mouse.y)            ''Sent ASCII Key return to Hyperterminal
  'OutA[0] ^= 1                  '' Toggle P0 (LED=ON/OFF)

  x := y
  if(x>i)
    i := y
    x := x+1000
  if(x<i)
    i := y
    x := 1000-x

servo.set(0, x)
ms_delay(300)
```

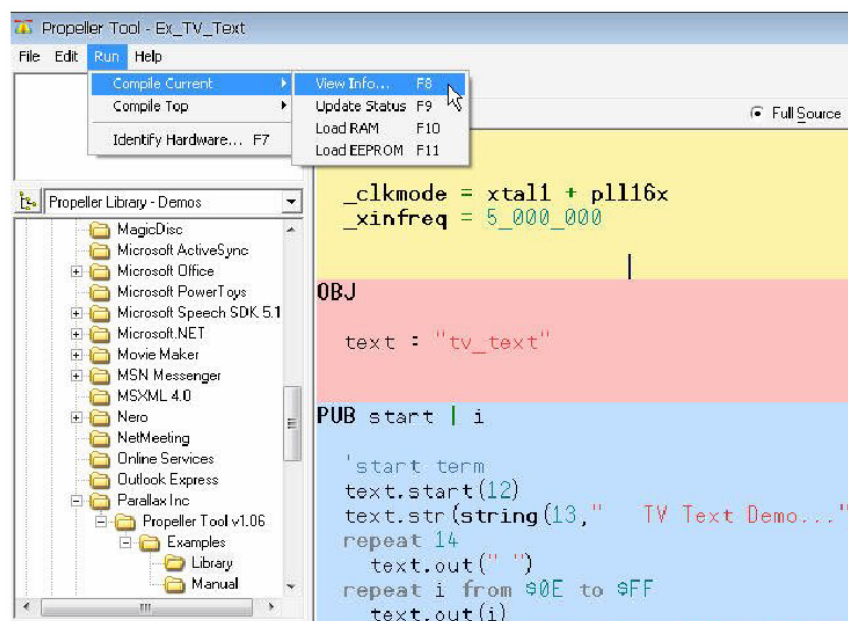
ภาพประกอบ 24 แสดงการเขียนเงื่อนไขใน Block PUB

3.6.8 เมื่อเสร็จขั้นตอนเขียนโปรแกรม เสร็จก็ให้ไปที่เมนู File เลือก Save As เพื่อทำการ Save File เป็นนามสกุล spin



ภาพประกอบ 25 แสดงการ Save File เป็นนามสกุลจุด spin

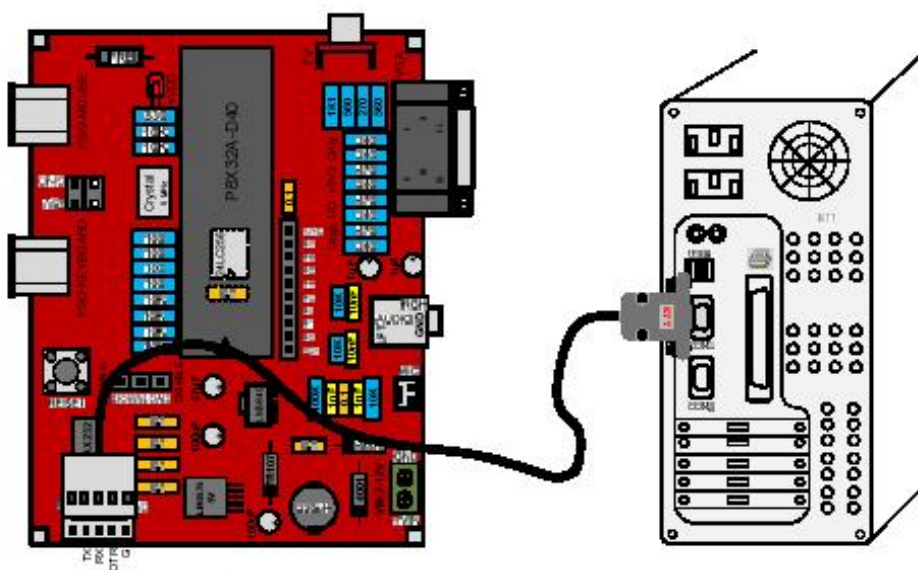
3.6.9 เมื่อ Save File เรียบร้อยแล้วก็ให้ไปที่เมนู RUN และเลือกที่ Compile Current เพื่อเป็นการตรวจสอบความพร้อมของโปรแกรม



ภาพประกอบ 26 แสดงการ RUN โปรแกรม Propeller

3.6.10 Download โดยการต่อสายสื่อสาร RS232

สำหรับสาย Download Program และสายสำหรับรับ-ส่งข้อมูลทาง RS232 ระหว่างบอร์ด PX32 กับ PC จะใช้สายเส้นเดียวกันโดยการเข้าสาย เมื่อจะทำการ Download Program ลงบนบอร์ด Px32 ก็ให้ทำการต่อสาย download ทางด้าน Connector 5 Pin เข้ากับขั้วต่อของบอร์ด PX32 ส่วนทางด้าน Connector DB9 ก็ให้ต่อเข้ากับ Com Port ของ PC ที่ใช้งาน ดังภาพประกอบ 27 และทำการ Set Jumper Download หมายเลข9 บนบอร์ด PX32 มาทางด้าน Enable, เมื่อจะทำการรับ-ส่ง ข้อมูลผ่านทาง RS232 ของบอร์ด PX32 กับ PC หลังจาก Download โปรแกรมเรียบร้อยแล้ว Set Jumper Download หมายเลข9 บนบอร์ด PX32 มาทางด้าน Disable

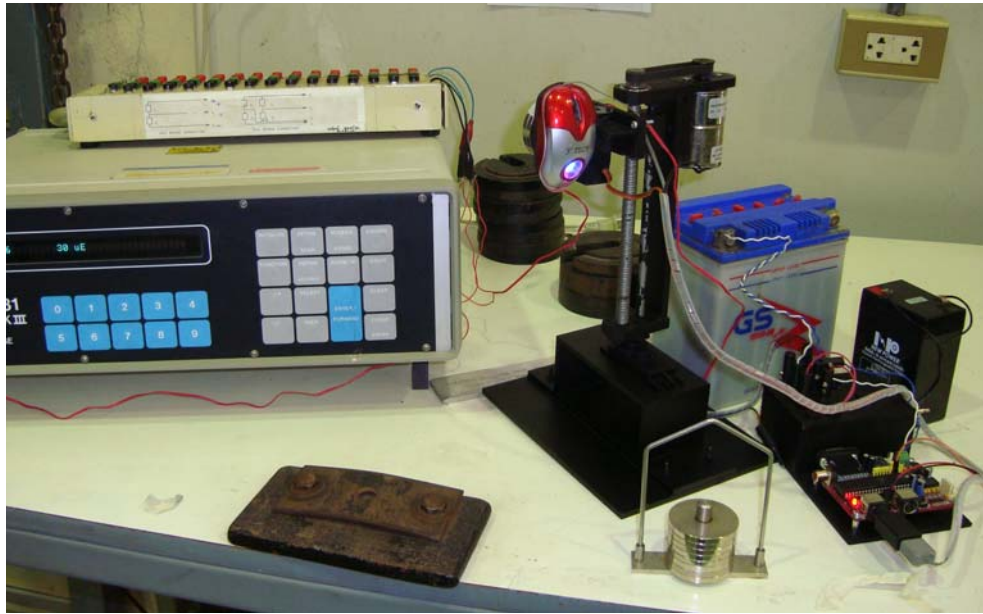


ภาพประกอบ 27 แสดงการเข้าสาย Download เข้ากับ Com-Port ของ PC

3.7 วิธีจับยกชิ้นงาน

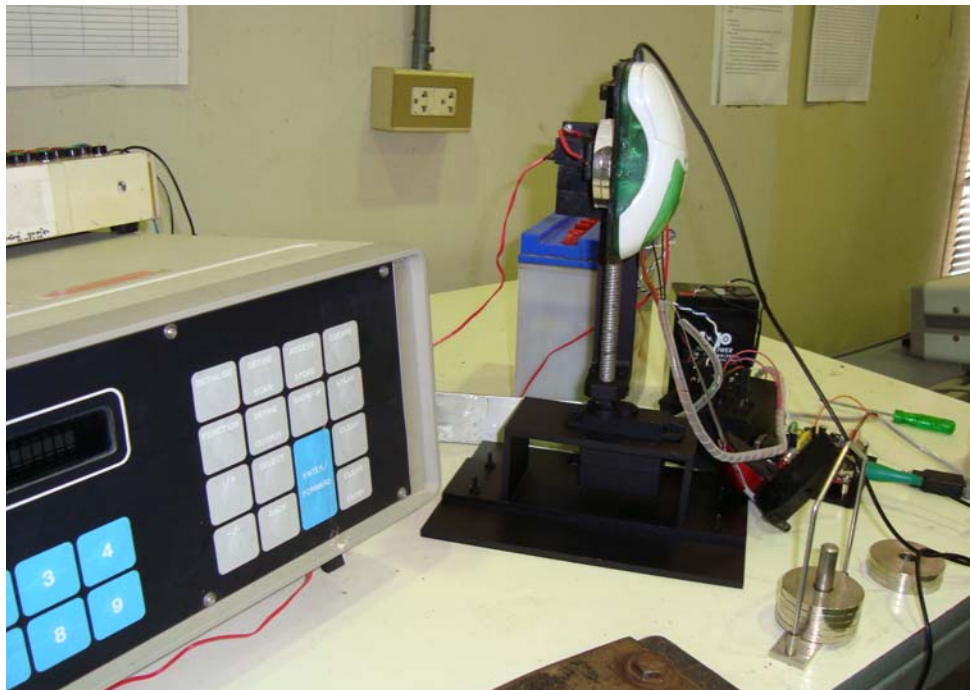
การจับยกชิ้นงานของมือกลโดยติดตั้งสเตรนเกจไว้ที่นิ้วของมือจับสำหรับวัดความเครียดที่เกิดขึ้นขณะจับยกชิ้นงาน และนำค่าความเครียดมาเปรียบเทียบเป็นแรงจับยกชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่จับยกมีน้ำหนักมาตรฐาน 1 N, 2 N, 3 N, และ 4 N ตามลำดับโดยแบ่งการจับยกชิ้นงานของมือกลออกเป็น 2 ส่วนคือ

3.7.1 การจับยกชิ้นงาน โดยมือกลที่ติดตั้งเมาส์แสง วัสดุรองจับเป็นฟองน้ำและเปลี่ยนเป็นยาง ตามลำดับให้จับยกชิ้นงาน แต่ละชุดน้ำหนักขึ้นที่ความสูง 150 mm ทั้งหมด 10 ครั้ง บันทึกผลและหาค่าเฉลี่ยของแรงที่ใช้ในการจับยกชิ้นงาน



ภาพประกอบ 28 แสดงมือกลที่ติดตั้งเมาส์แสงจับยกชิ้นงาน

3.7.2 การจับยกชิ้นงาน โดยมือกลที่ติดตั้งเมาส์ลูกกลิ้ง วัสดุรองจับเป็นฟองน้ำและเปลี่ยนเป็นยาง ตามลำดับ ให้จับยกชิ้นงาน แต่ละชุดน้ำหนักที่ความสูง 150 mm ทั้งหมด 10 ครั้ง บันทึกผลและหาค่าเฉลี่ยของแรงที่ใช้ในการจับยกชิ้นงาน



ภาพประกอบ 29 แสดงมือกลที่ติดตั้งเมาส์ลูกกลิ้งจับยกชิ้นงาน

บทที่ 4

ผลการวิจัย

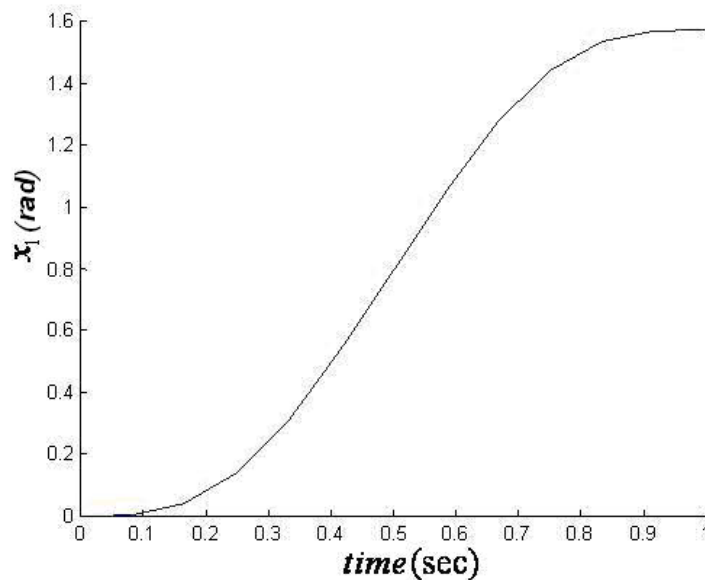
ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการวิจัยไว้เป็นหัวข้อต่อไปนี้

1. ผลการแก้ปัญหาของความโน้มถ่วงสูงสุดโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
2. ผลการเคลื่อนที่ของแขนกล และมือกล
3. ผลการจับยกชิ้นงานด้วยมือกลที่ติดตั้งเมาส์แสง และเมาส์ลูกกลิ้ง
4. เปรียบเทียบผลการจับยกชิ้นงาน

4.1 ผลการแก้ปัญหาของความโน้มถ่วงสูงสุดโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

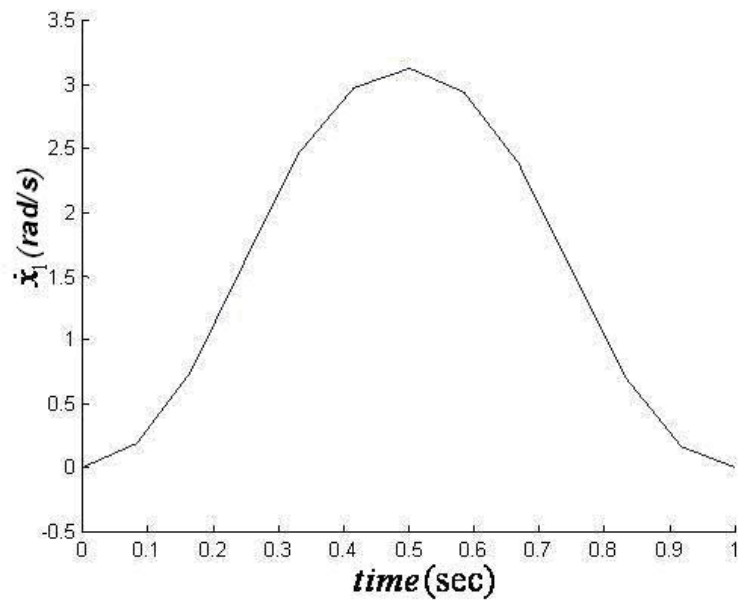
จากการใช้ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาโดย พ.อ.ศ.ดร.ทวิวัชร วีระเกล้า มาแก้ปัญหาของความโน้มถ่วงสูงสุดโดยวิธีทางอ้อม (Minimum Indirect Jerk Problem) ในงานวิจัยนี้ได้นำระเบียบวิธีการทางตัวเลข (Nonlinear programming) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีการทางตัวเลขที่ใช้ในการหาค่าความเหมาะสมสูงสุดมาใช้ในการหาคำตอบที่ต้องการ

4.1.1 ผลการทดสอบหาค่าความโน้มถ่วงสูงสุดโดยวิธีทางอ้อม (Minimum Indirect Jerk)



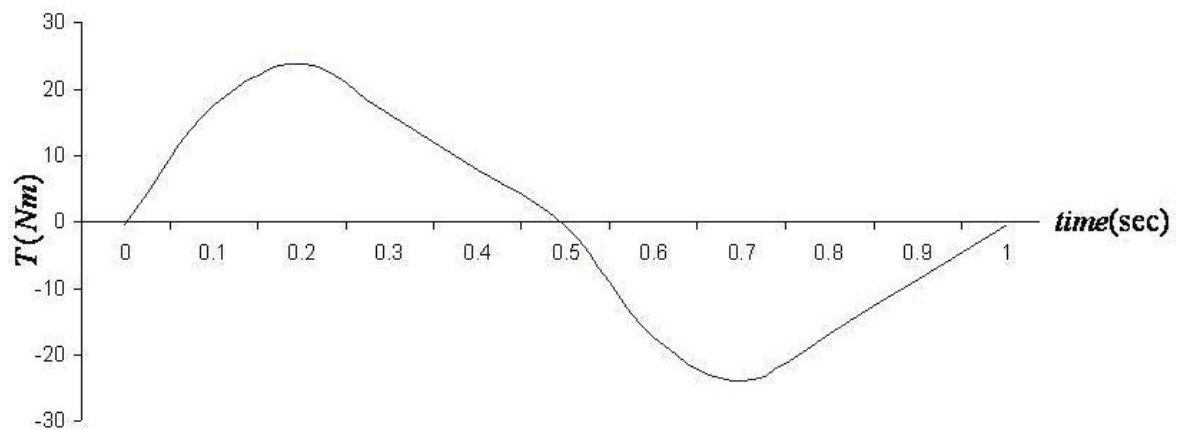
ภาพประกอบ 30 แสดงการเคลื่อนที่ของ $x_1(t)$ เทียบกับเวลา

จากภาพประกอบ 30 กราฟ x_1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ และเวลาที่ช่วงระยะเวลาเริ่มต้น t_0 ถึงเวลาสุดท้าย t_f เป็นผลจากการหาอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่เทียบกับเวลาตามสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาการใช้ความโน้มถ่วงสูงสุด



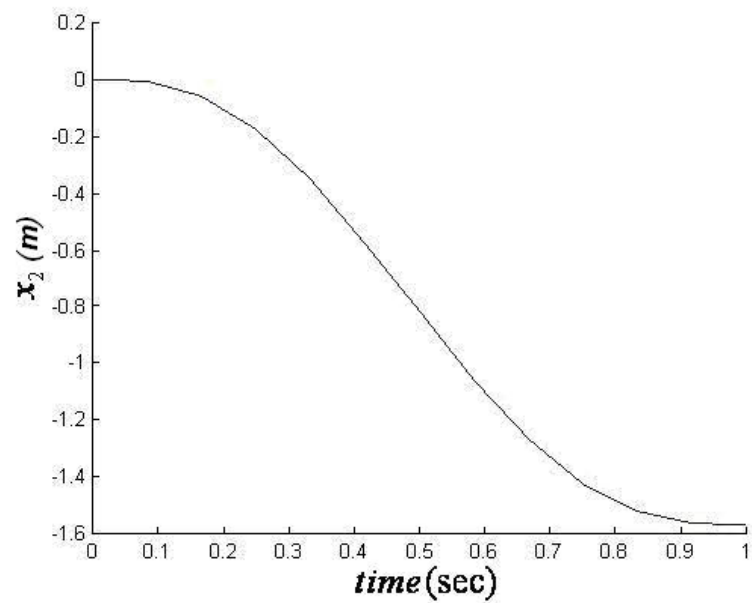
ภาพประกอบ 31 แสดงความเร็วของ $\dot{x}_1(t)$ เทียบกับเวลา

จากภาพประกอบ 31 กราฟ \dot{x}_1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว และเวลาที่ช่วงระยะเวลาเริ่มต้น t_0 ถึงเวลาสุดท้าย t_f เป็นผลจากการหาอนุพันธ์ของความเร็วเทียบกับเวลาตามสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาการใช้ความโน้มถ่วงสูงสุด



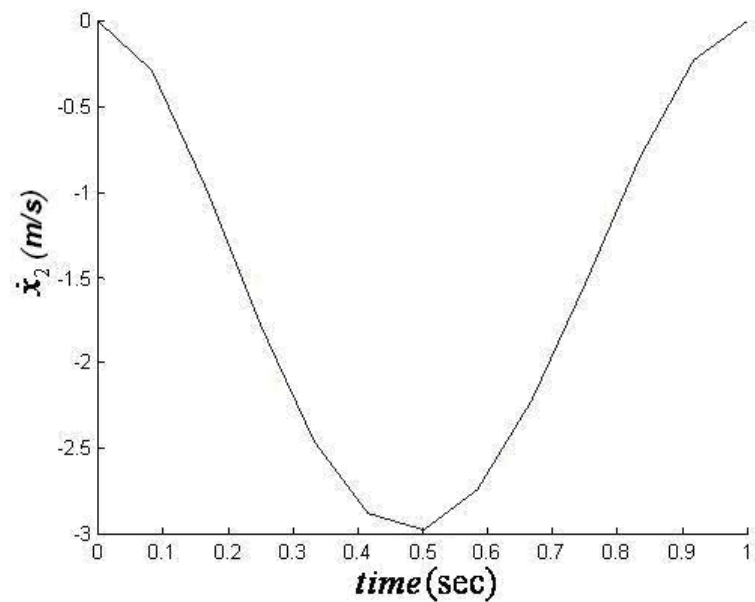
ภาพประกอบ 32 แสดงแรงบิดของเฟรมที่ 1 เทียบกับเวลา จากการแก้ปัญหาของความโน้มถ่วง สูงสุด

จากภาพประกอบ 32 แสดงแรงบิดของเฟรมที่ 1 เทียบกับเวลา และเวลาที่ช่วงระยะเวลาเริ่มต้น t_0 ถึงเวลาสุดท้าย t_f นำค่าที่ได้จากภาพประกอบ 30 และ 31 แทนค่าลงในสมการการเคลื่อนที่ของเฟรมที่ 1 โดยมีแรงบิดสูงสุดอยู่ที่ 23.7 Nm.



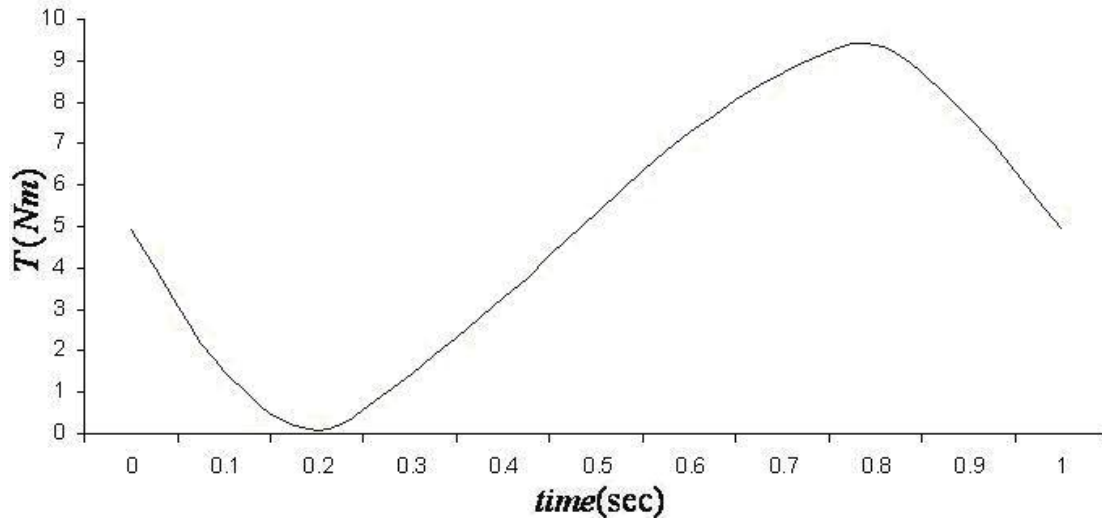
ภาพประกอบ 33 แสดงการเคลื่อนที่ของ $x_2(t)$ เทียบกับเวลา

จากภาพประกอบ 33 กราฟ x_2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ และเวลาที่ช่วงระยะเวลาเริ่มต้น t_0 ถึงเวลาสุดท้าย t_f เป็นผลจากการหาอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่เทียบกับเวลา ตามสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาการใช้ความโน้มถ่วงสูงสุด



ภาพประกอบ 34 แสดงความเร็วของ $\dot{x}_2(t)$ เทียบกับเวลา

จากภาพประกอบ 34 กราฟ \dot{x}_2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว และเวลาที่ช่วงระยะเวลาเริ่มต้น t_0 ถึงเวลาสุดท้าย t_f เป็นผลจากการหาอนุพันธ์ของความเร็วเทียบกับเวลาตามสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาการใช้ความโน้มถ่วงสูงสุด



ภาพประกอบ 35 แสดงแรงบิดของเฟรมที่ 2 เทียบกับเวลา จากการแก้ปัญหาของความโน้มถ่วงสูงสุด

จากภาพประกอบ 35 แสดงแรงบิดของเฟรมที่ 2 เทียบกับเวลา และเวลาที่ช่วงระยะเวลาเริ่มต้น t_0 ถึงเวลาสุดท้าย t_f นำค่าที่ได้จากภาพประกอบ 33 และ 34 แทนค่าลงในสมการการเคลื่อนที่ของเฟรมที่ 2 โดยมีแรงบิดสูงสุดอยู่ที่ 9.4 Nm.

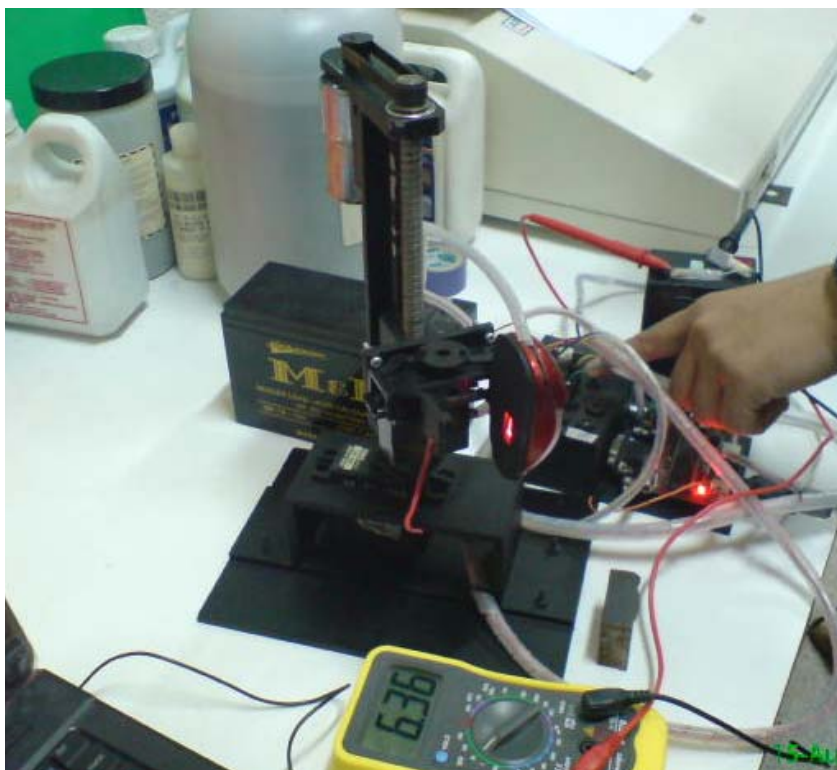
จากสมการการเคลื่อนที่ของแขนกล 2 สมการสามารถนำมาหาค่ากำลังในการขับเคลื่อนที่เหมาะสมสูงสุดได้ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Nonlinear programming) มาเป็นเครื่องมือช่วยในการแก้ปัญหาที่กำหนดให้อยู่ในรูปของปัญหา (Fix end time and end point) ซึ่งกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตให้อยู่ในรูปของการเคลื่อนที่ และความเร็ว สามารถหาแรงบิดที่เหมาะสมสูงสุดจากภาพประกอบ 32 และ 35 นำเลือกใช้มอเตอร์มาเป็นต้นกำลัง และออกแบบระบบควบคุมได้อย่างเหมาะสม แล้วทำการสร้างแขนกลตามรายละเอียดในแบบดังแสดงไว้ในภาคผนวก

4.2 ผลการเคลื่อนที่ของแขนกล และมือกล

การจับยกชิ้นงานให้ได้แรงที่เหมาะสมสูงสุดด้วยนั้นต้องอาศัยแขนกลเป็นตัวยกมือกลขึ้นจึงมีความสำคัญมากก่อนการจับยกชิ้นงานจะต้องทำตรวจสอบสภาพโดยทั่วไป และการเคลื่อนที่ตามตำแหน่งต่างๆของแขนกล เพื่อปรับแก้ความผิดพลาดของแขนกล และมือกลให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามการออกแบบ

ตาราง 3 ตรวจสอบสภาพโดยทั่วไปของแขนกล และมือกล

รายการตรวจสอบ	ดี	แก้ไข	หมายเหตุ
1. สภาพโดยทั่วไปของแขนกล และมือกล	/		
2. จุดต่อของสายไฟของแขน และมือกล		/	หางปลาย้ำสายหลุดทำการเปลี่ยนใหม่
3. สภาพโดยทั่วไปของวัสดุรองจับฟองน้ำ และยาง	/		
4. ตรวจสอบสายพานส่งกำลังของมอเตอร์		/	สายพานส่งกำลังมีการฉีกขาดทำการเปลี่ยนใหม่
5. แขนกลสามารถเคลื่อนที่ในตำแหน่งที่กำหนด	/		
6. มือกลสามารถเลื่อนนิ้วเข้าจับยกชิ้นงานได้	/		
7. มือกลเคลื่อนที่ขึ้นลงได้ตามตำแหน่งที่กำหนด	/		
8. สภาพโดยทั่วไปของแบตเตอรี่		/	ชาร์จแบตเตอรี่ใหม่
9. การทำงานของเมาส์แสง และเมาส์ลูกกลิ้ง	/		
10. การทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ และดีซีมอเตอร์	/		
11. การทำงานของสเตรนเกจวัดแรงกด	/		
12. การทำงานของระบบควบคุมมือกล และแขนกล		/	ทำการแก้ไขโปรแกรม



ภาพประกอบ 36 แสดงตรวจสอบการเคลื่อนที่ของแขนกล และมือกล

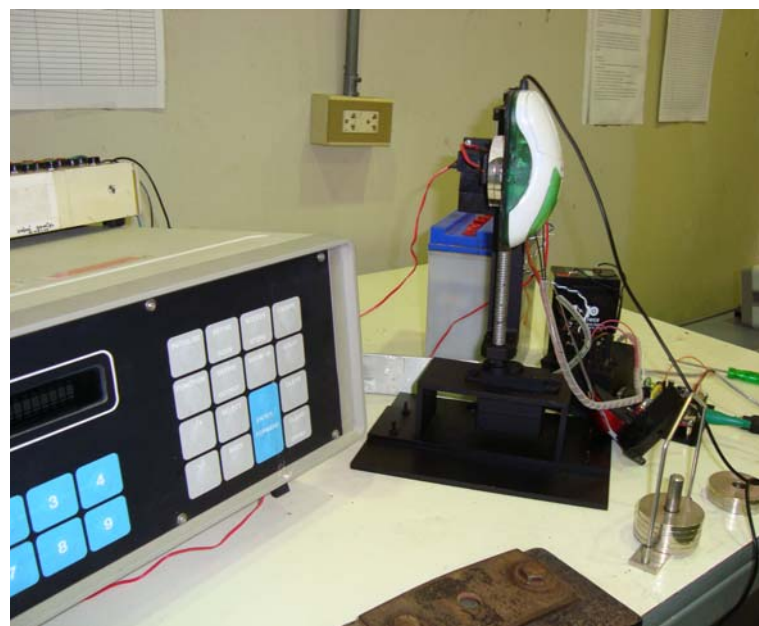
จากตาราง 3 ตรวจสอบสภาพโดยทั่วไปของแขนกลพบว่าสภาพโดยทั่วไปของแขนกลและมือกล
ต้องมีการแก้ไขปรับปรุงบ้างเล็กน้อยในบางส่วนโดยรวมแล้วเป็นไปตามการออกแบบ และสามารถ
ใช้ทำการจับยกชิ้นงานได้

4.3 ผลการจับยกชิ้นงานด้วยมือกลที่ติดตั้งเม้าส์แสง และเม้าส์ลูกกลิ้ง

ในการจับยกชิ้นงานทำการจับยกด้วยมือกลที่ติดตั้งเม้าส์แสง ก่อนจากนั้นทำการจับยกชิ้นงานด้วยมือกลที่ติดตั้งเม้าส์ลูกกลิ้ง การจับยกชิ้นงานนั้นจะมีชิ้นงานที่มีน้ำหนักมาตรฐาน 1 N, 2 N, 3 N และ 4 N โดยจะจับยกแต่ละชุดน้ำหนักทั้งหมด 10 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยนำมาเขียนเป็นกราฟ

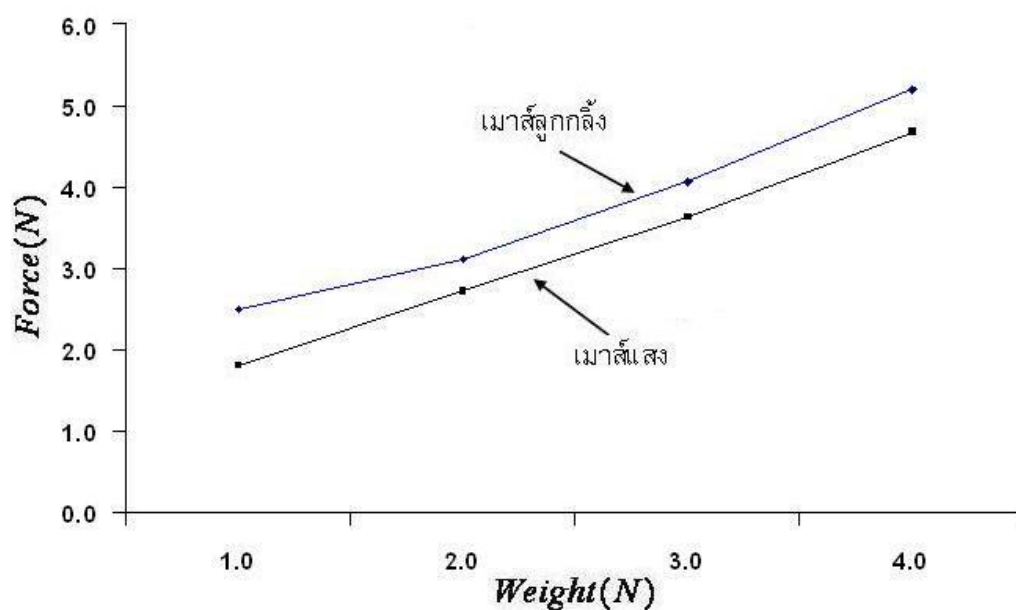


ภาพประกอบ 37 แสดงการจับยกชิ้นงานของมือกลติดตั้งเม้าส์แสง



ภาพประกอบ 38 แสดงการจับยกชิ้นงานของมือกลติดตั้งเม้าส์ลูกกลิ้ง

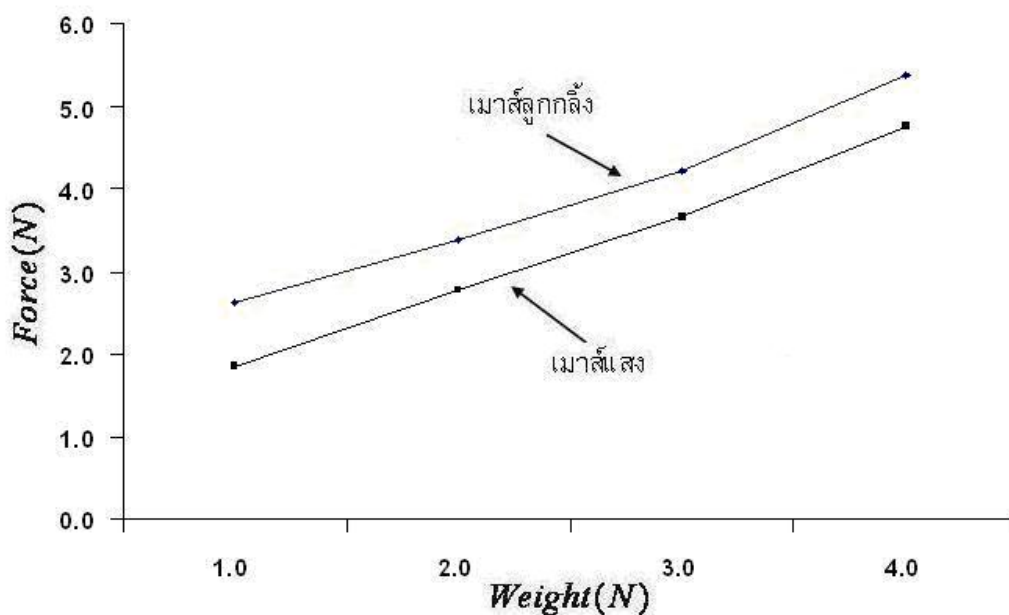
4.3.1 จับยกชิ้นงานที่น้ำหนัก 1 N ถึง 4 N โดยมือกลติดตั้งเม้าส์ และเม้าส์ลูกกลิ้งมีวัสดุรองจับเป็นยาง ทำการจับยกทั้งหมด 10 ครั้ง นำค่าเฉลี่ยของแรงที่ใช้จับยกชิ้นงานมาเขียนเป็นกราฟได้ดังภาพประกอบ 39 แสดงผลการจับยกชิ้นงานของมือกลติดตั้งเม้าส์ และเม้าส์ลูกกลิ้งมีวัสดุรองจับเป็นยาง



ภาพประกอบ 39 แสดงผลการจับยกชิ้นงานของมือกลติดตั้งเม้าส์แสง และเม้าส์ลูกกลิ้งมีวัสดุรองจับเป็นยาง

จากภาพประกอบ 39 พบว่ามือกลติดตั้งเม้าส์แสงใช้แรงจับยกชิ้นงานเท่ากับ 1.81 N, 2.71 N, 3.63 N และ 4.67 N และมือกลติดตั้งเม้าส์ลูกกลิ้งใช้จับยกชิ้นงานเท่ากับ 2.49 N, 3.11 N, 4.07 N และ 5.20 N นำข้อมูลมาเปรียบเทียบกันจะเห็นว่ามือกลติดตั้งเม้าส์แสง มีวัสดุรองจับเป็นยางใช้แรงจับยกชิ้นงานน้อยกว่า 13% และประสิทธิภาพดีกว่า 16.5% เมื่อเทียบกับมือกลติดตั้งเม้าส์ลูกกลิ้ง

4.3.2 จับยกชิ้นงานที่น้ำหนัก 1 N ถึง 4 N โดยมือกลติดตั้งเมาส์ และเมาส์ลูกกลิ้งมีวัสดุรองจับเป็นฟองน้ำ ทำการจับยกทั้งหมด 10 ครั้ง นำค่าเฉลี่ยของแรงที่ใช้จับยกชิ้นงานมาเขียนเป็นกราฟได้ดังภาพประกอบ 40 แสดงผลการจับยกชิ้นงานของมือกลติดตั้งเมาส์ และเมาส์ลูกกลิ้งมีวัสดุรองจับเป็นฟองน้ำ

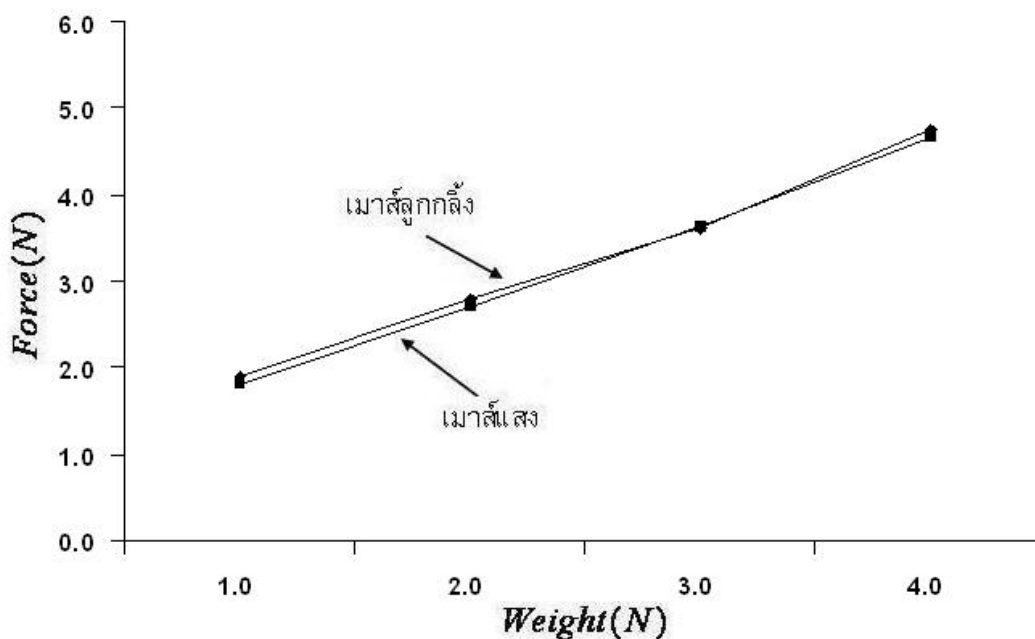


ภาพประกอบ 40 แสดงผลการจับยกชิ้นงานของมือกลติดตั้งเมาส์แสง และเมาส์ลูกกลิ้งมีวัสดุรองจับเป็นฟองน้ำ

จากภาพประกอบ 40 พบว่ามือกลติดตั้งเมาส์แสงใช้แรงจับยกชิ้นงานเท่ากับ 1.86 N, 2.78 N, 3.66 N และ 4.75 N และมือกลติดตั้งเมาส์ลูกกลิ้งใช้จับยกชิ้นงานเท่ากับ 2.63 N, 3.38 N, 4.22 N และ 5.38 N นำข้อมูลมาเปรียบเทียบกันจะได้ว่ามือกลติดตั้งเมาส์แสงใช้แรงจับยกชิ้นงานน้อยกว่า 16% และประสิทธิภาพดีกว่า 20% เมื่อเทียบกับมือกลติดตั้งเมาส์ลูกกลิ้ง

4.4 เปรียบเทียบผลการจับยกชิ้นงาน

เมื่อนำแรงที่ใช้จับยกชิ้นงานของมือกลติดตั้งเม้าส์แสง มีวัสดุรองจับเป็นยางมาเปรียบเทียบกับมือกลติดตั้งเม้าส์ลูกกลิ้งที่พัฒนาโดย สรวุฒิ สิริเกษมสุข. (2551). ทำการจับยกชิ้นงานที่น้ำหนัก 1 N ถึง 4 N มาเขียนเป็นกราฟได้ดังภาพประกอบ 41 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างมือกลติดตั้งเม้าส์แสงกับมือกลติดตั้งเม้าส์ลูกกลิ้ง



ภาพประกอบ 41 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างมือกลติดตั้งเม้าส์แสงกับมือกลติดตั้งเม้าส์ลูกกลิ้ง

จากภาพประกอบ 41 พบว่ามือกลติดตั้งเม้าส์แสงใช้แรงจับยกชิ้นงานเท่ากับ 1.81 N, 2.71 N, 3.63 N และ 4.67 N และมือกลติดตั้งเม้าส์ลูกกลิ้งพัฒนาโดย สรวุฒิ สิริเกษมสุข. (2551). ใช้แรงจับยกชิ้นงานเท่ากับ 1.90 N, 2.78 N, 3.62 N และ 4.75 N นำข้อมูลมาเปรียบเทียบกันจะพบว่ามือกลติดตั้งเม้าส์แสงใช้แรงจับยกชิ้นงานน้อยกว่า 1.75% และประสิทธิภาพดีกว่า 1.80% เมื่อเทียบกับมือกลติดตั้งเม้าส์ลูกกลิ้ง

บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้สรุปผล และนำเสนอไว้เป็นหัวข้อต่อไปนี้

1. สรุปผล
2. ข้อเสนอแนะทั่วไป
3. ข้อเสนอแนะงานวิจัยครั้งต่อไป

5.1 สรุปผล

การวิจัยเรื่องการออกแบบสร้างมือกลที่เหมาะสมที่สุดในการจับยกชิ้นงานสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

ผลจากวิธีความโน้มถ่วงสูงสุด โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Nonlinear programming) หาค่าของความเหมาะสมสูงสุดของระบบพลศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น กับแขนกลที่มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบหมุน และการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นที่มีระดับชั้นความเร็วสองค่า พบว่าแขนกลสามารถเคลื่อนที่ได้โดยโน้มถ่วง โดยเริ่มเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นอย่างช้า และเพิ่มความเร็วตามลำดับพอใกล้ถึงจุดสุดท้ายแขนกลจะค่อยๆลดความเร็วลง และหยุดนิ่งเมื่อถึงจุดสุดท้าย

ผลการจับยกชิ้นงานของมือกลที่ติดตั้งเมาส์แสง โดยมีวัสดุรองรับเป็นฟองน้ำใช้แรงจับยกชิ้นงานน้อยกว่า 16% และประสิทธิภาพดีกว่า 20% เมื่อเปรียบเทียบกับมือกลที่ติดตั้งเมาส์ลูกกลิ้ง โดยมีวัสดุรองรับเป็นฟองน้ำ และมือกลที่ติดตั้งเมาส์แสง โดยมีวัสดุรองรับเป็นยางใช้แรงจับยกชิ้นงานน้อยกว่า 13% และประสิทธิภาพดีกว่า 16.5% เมื่อเปรียบเทียบกับมือกลที่ติดตั้งเมาส์ลูกกลิ้ง โดยมีวัสดุรองรับเป็นยาง ขณะที่มือกลที่ติดตั้งเมาส์แสงโดยมี วัสดุรองรับเป็นยางใช้แรงจับยกชิ้นงานน้อยกว่า 1.7% และประสิทธิภาพดีกว่า 1.8% เมื่อเปรียบเทียบกับมือกลที่ติดตั้งเมาส์แสงโดยมีวัสดุรองรับเป็นฟองน้ำ ดังนั้นมือกลติดตั้งเมาส์แสงโดยมีวัสดุรองรับเป็นยางจึงเป็นมือกลที่ใช้แรงอย่างเหมาะสมสูงสุดในการจับยกชิ้นงาน

5.2 ข้อเสนอแนะทั่วไป

ในการวิจัยครั้งนี้มีการออกแบบสร้างมือกลที่ติดตั้งเมาส์แสง และมือกลที่ติดตั้งเมาส์ลูกกลิ้งมีวัสดุรองรับเป็นฟองน้ำ และยาง ซึ่งวัสดุรองรับมีผลอย่างมากในการช่วยเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานที่จับยกกับนิ้วทั้ง 2 ข้างของมือกลจึงเป็นการช่วยลดแรงในขณะจับยกชิ้นงานของมือกลแต่วัสดุรองรับที่นำมาใช้มีเพียง 2 ชนิด อาจเป็นตัวเลือกที่น้อยเกินไป สำหรับการเลือกใช้วัสดุรองรับ

5.3 ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนางานจับยกชิ้นงานด้วยเม้าส์แสง

ในการพัฒนาครั้งต่อไปควรปรับตั้งองศาการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ที่ใช้สำหรับเลื่อนนิ้วมือกลทั้ง 2 ข้าง เพื่อบีบชิ้นงานให้มีความถี่มากขึ้น เนื่องจากการจับยกชิ้นงานพบว่าองศาการหมุนของมอเตอร์มีความสำคัญมากเพราะแรงที่ใช้จับยกชิ้นงานมากหรือน้อยมาจากการปรับตั้งองศาการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์จากการเขียนเงื่อนไขลงในโปรแกรมควบคุมมือกลด้วย

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- จำนงค์ ผายสระน้อย. (2551). การศึกษาผลลัพธ์ที่ได้จากการรวม ความนิ่มนวลที่สุดและพลังงานน้อยที่สุดของระบบพลศาสตร์เชิงเส้น. ปรินซ์ตันนิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล).
กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- ดอนสัน ปงผาบ. (2546). การเขียนโปรแกรม ภาษา C ในงานควบคุม (ฉบับปรับปรุง). กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริม เทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น)
- วรัตน์ ภัทรอมรกุล และมนัส สัจวรศิลป์. (2543). คู่มือ MATLAB ฉบับสมบูรณ์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์อินโฟเพรส.
- วิรัช สิริทรัพย์ไพบูลย์. (2551). โปรแกรมเชื่อมต่อกับผู้ใช้ทางกราฟิกในการหาสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม MATLAB. ปรินซ์ตันนิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล).
กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- สถาพร ลักษณะเจริญ. (2548). วิศวกรรมหุ่นยนต์ *Robotics Engineering*. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). ถ่ายเอกสาร.
- สรารุณี สิริเกษมสุข. (2551). การออกแบบมือจับชิ้นงานเพื่อให้ใช้แรงที่เหมาะสมที่สุดในการยกชิ้นงาน. ปรินซ์ตันนิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- Dennis A. Nowak, Joachim Hermsdorfer. (2003). *Selective deficits of grip force control during object manipulation in patients with reduced sensibility of the grasping digits*. IEEE. pp. 65-72.
- Erika Ottaviano; Maria Toti; & Marco Ceccarelli.(2000) *Grasp Force Control in Two-Finger Grippers with Pneumatic Actuation*. IEEE. pp. 1976-1981.
- Jun Ueda; Member; Atsutoshi Ikeda; & Tsukasa Ogasawara. (2005). *Grip-Force Control of an Elastic Object by Vision-Based Slip-Margin Feedback During the Incipient Slip*. IEEE. pp. 1139-1147.
- Nobuaki Nakazawa; Il-hwan Kim; Hikaru Inooka; & Ryojun Ikeura. (1999). *Force Control of a Robot Hand Emulating Human's Grasping Motion*. IEEE. pp. 774-779.

- Sunil K. Agrawal; Veeraklaew, T.; & Fabien, B.C. (1998). Direct and Indirect Optimization of Linear Time-Invariant Dynamic Systems Using Transformations. *Optimal Control Applications and Methods*. 19: 393-410.
- Takashi Maeno, Shinichi Hiromitsu and Takashi Kawai.(2000). *Control of grasping force by detecting stick-slip distribution at the curved surface of an elastic finger*. IEEE. pp. 3895-3900.
- T. Veeraklaew.(2000). *Extensions of Optimization Theory and New Computational Approaches for Higher-order Dynamic systems [Dissertation]*. The University of Delaware.USA
- T. Veeraklaew.; & Salaluk, P. (2005). *The Comparison of Using Minimum Energy and Minimum Jerk in Dynamic Systems*. The 19 th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand.
- Yotsak Saisanit. (2005). *Maximum Velocity of a Five Degree of Freedom Racing Car*. Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee : Lt. Col. Assist. Prof. Dr. Tawiwat Veeraklaew: Major. Dr. Settapong Malisuwan.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตารางบันทึกผลการจัดกิจกรรม

ตาราง 4 แสดงผลการแก้ปัญหาความถี่มวลสูงสุดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

Time (sec)	$x_1(t)$ (m)	$\dot{x}_1(t)$ (m)	$\ddot{x}_1(t)$ (m)	μ_r (N)	$x_2(t)$ (m)	$\dot{x}_2(t)$ (m)	$\ddot{x}_2(t)$ (m)	μ_2 (N)
0.0	0.000	-0.000	0.000	99.713	0.000	-0.000	-0.000	.41.138
0.1	0.005	0.191	4.584	72.742	-0.007	-0.286	-6.867	-16.816
0.2	0.042	0.753	8.912	-89.143	-0.058	-0.975	-9.676	1.700
0.3	0.139	1.623	11.965	-99.825	-0.173	-1.770	-9.391	14.590
0.4	0.311	2.463	8.204	-99.868	-0.350	-2.972	-3.241	22.166
0.5	0.540	3.128	3.984	-99.958	-0.574	-2.736	0.908	24.811
0.6	0.797	2.933	-0.232	-77.200	-0.820	-2.220	4.752	17.229
0.7	1.052	1.532	-4.442	85.744	-1.061	-1.528	7.631	8.145
0.8	1.276	0.691	-11.882	99.496	-1.426	-0.804	8.990	-3.627
0.9	1.532	0.172	-8.303	99.224	-1.564	-0.227	5.463	-17.446
1	1.570	0.000	0.000	-99.958	-1.570	-0.000	0.000	-32.690

ตาราง 5 แสดงผลการจับยกชิ้นงานที่น้ำหนัก 1 N

ครั้งที่	มือกลเคลื่อนที่ขึ้น (mm)	มือกลติดตั้งเมาส์แสงจับยกชิ้นงาน		มือกลติดตั้งเมาส์ลูกลิ้งยกชิ้นงาน	
		วัสดุรองจับมือกลเป็นฟองน้ำ (N)	วัสดุรองจับมือกลเป็นยาง (N)	วัสดุรองจับมือกลเป็นฟองน้ำ (N)	วัสดุรองจับมือกลเป็นยาง (N)
1	150	1.86	1.82	1.93	3.30
2	150	1.85	1.81	2.97	2.88
3	150	1.87	1.80	3.21	2.70
4	150	1.86	1.83	3.51	2.79
5	150	1.86	1.80	2.61	2.79
6	150	1.85	1.82	2.52	2.61
7	150	1.87	1.83	2.79	1.85
8	150	1.88	1.80	1.89	1.98
9	150	1.86	1.81	1.80	1.89
10	150	1.87	1.80	3.06	2.07
แรงเฉลี่ย		1.86	1.81	2.63	2.49

ตาราง 6 แสดงผลการจับยกชิ้นงานที่น้ำหนัก 2 N

ครั้งที่	มือกลเคลื่อนที่ขึ้น (mm)	มือกลติดตั้งเมาส์แสงจับยกชิ้นงาน		มือกลติดตั้งเมาส์ลูกลิ้งยกชิ้นงาน	
		วัสดุรองจับมือกลเป็นฟองน้ำ (N)	วัสดุรองจับมือกลเป็นยาง (N)	วัสดุรองจับมือกลเป็นฟองน้ำ (N)	วัสดุรองจับมือกลเป็นยาง (N)
1	150	2.77	2.69	3.15	2.79
2	150	2.76	2.70	2.97	2.83
3	150	2.78	2.73	4.01	3.27
4	150	2.79	2.69	4.22	3.79
5	150	2.75	2.71	3.06	3.19
6	150	2.79	2.73	3.23	2.88
7	150	2.78	2.69	2.93	2.89
8	150	2.76	2.71	3.38	3.39
9	150	2.79	2.73	3.29	2.97
10	150	2.80	2.72	3.51	3.07
แรงเฉลี่ย		2.78	2.71	3.38	3.11

ตาราง 7 แสดงผลการจับยกชิ้นงานที่น้ำหนัก 3 N

ครั้งที่	มือกล เคลื่อนที่ขึ้น (mm)	มือกลติดตั้งเมาส์แสงจับยกชิ้นงาน		มือกลติดตั้งเมาส์ลูกลิ้งยกชิ้นงาน	
		วัสดุรองจับมือกล เป็นฟองน้ำ (N)	วัสดุรองจับมือกล เป็นยาง (N)	วัสดุรองจับมือกล เป็นฟองน้ำ (N)	วัสดุรองจับมือกล เป็นยาง (N)
1	150	3.69	3.61	4.09	4.31
2	150	3.65	3.59	4.57	3.99
3	150	3.67	3.61	4.32	4.12
4	150	3.64	3.69	4.62	4.37
5	150	3.68	3.58	4.23	3.97
6	150	3.62	3.64	3.71	3.97
7	150	3.69	3.67	4.37	4.07
8	150	3.66	3.63	4.01	3.81
9	150	3.71	3.65	3.93	4.13
10	150	3.63	3.61	4.39	3.93
แรงเฉลี่ย		3.66	3.63	4.22	4.07

ตาราง 8 แสดงผลการจับยกชิ้นงานที่น้ำหนัก 4 N

ครั้งที่	มือกล เคลื่อนที่ขึ้น (mm)	มือกลติดตั้งเมาส์แสงจับยกชิ้นงาน		มือกลติดตั้งเมาส์ลูกลิ้งยกชิ้นงาน	
		วัสดุรองจับมือกล เป็นฟองน้ำ (N)	วัสดุรองจับมือกล เป็นยาง (N)	วัสดุรองจับมือกล เป็นฟองน้ำ (N)	วัสดุรองจับมือกล เป็นยาง (N)
1	150	4.69	4.67	5.67	5.21
2	150	4.78	4.62	4.99	5.11
3	150	4.71	4.69	5.57	5.09
4	150	4.79	4.66	4.98	5.24
5	150	4.73	4.68	5.79	5.37
6	150	4.76	4.70	5.38	4.99
7	150	4.77	4.71	5.43	5.43
8	150	4.79	4.68	5.76	5.33
9	150	4.73	4.67	5.35	5.07
10	150	4.71	4.64	4.87	5.18
แรงเฉลี่ย		7.75	4.67	5.38	5.20

ภาคผนวก ข
โปรแกรมควบคุมมือกล

```

{{ *****
* Example4.1 : For "ET-BASE PX32 V1.0 *
*
* File Name : Control Gripper and Robot *
* Compiler : Propeller V1.06 *
* Create By : Artit Kamtai *
* Last Update : 28/January/2008 *
* Function : Move Curser Mouse On TV *
***** }}

```

CON

```

_clkmode = xtal1 + pll16x
_xinfreq = 5_000_000
_stack = ($3000 + $3000 + 100) >> 2 'accomodate display memory and stack

{ x_tiles = 16
  y_tiles = 12

  paramcount = 14
  bitmap_base = $2000
  display_base = $5000

  lines = 5
  thickness = 2
}

_1uS = 1_000_000 / 1 'Divisor for 1 uS

ZonePeriod = 5_000 '5mS (1/4th of typical servo period of 20mS)
NoGlitchWindow = 2_500 '2.5mS Glitch prevention window (set value
larger than maximum servo width of 2mS)
'Use at least 500uS for overhead (actual overhead
about 300uS)

```

VAR

```

long mousex, mousey

{ long tv_status '0/1/2 = off/visible/invisible      read-only
  long tv_enable '0/? = off/on                      write-only
  long tv_pins   '%ppmmm = pins                      write-only
  long tv_mode   '%ccinp = chroma,interlace,ntsc/pal,swap write-only
  long tv_screen 'pointer to screen (words)          write-only
  long tv_colors 'pointer to colors (longs)          write-only
  long tv_hc     'horizontal cells                   write-only
  long tv_vc     'vertical cells                     write-only
  long tv_hx     'horizontal cell expansion          write-only
  long tv_vx     'vertical cell expansion            write-only
  long tv_ho     'horizontal offset                  write-only
  long tv_vo     'vertical offset                    write-only
  long tv_broadcast 'broadcast frequency (Hz)        write-only
  long tv_auralcog 'aural fm cog                     write-only

word screen[x_tiles * y_tiles]
long colors[64]
}
  long ZoneClocks
  long NoGlitch
  long ServoPinDirection
  long ServoData[31]                                '0-31 Servo Pulse Width information

```

OBJ

```

{tv : "tv"
gr : "graphics"
}
mouse : "mouse"
RS232 : "FullDuplexSerial" "Include Function in File FullDuplexSerial.spin
servo : "Servo32v3"

```

PUB main | x, y, i, color1, color2, color3, click, receive

```
servo.start
```

```

servo.set(0,1000)
mouse.start(24, 25)

'RS232.start(31,30,0,9600)      "Start RS232:Set P31= Rx,P30=Tx , Baud Rate=9600
ms_delay(1000)

'DirA[0] := 1                  " Set P0 = Output

' RS232.str(String("Enter Key : ")) "Sent Text to Hyperterminal
repeat
'receive := RS232.rx          "Receive Key From Hyperterminal
y := mouse.abs_y
' RS232.tx(mousey)           "Sent ASCII Key return to Hyperterminal
' OutA[0] ^= 1               " Toggle P0(LED=ON/OFF)

x := y
if(x>i)
i := y
x := x+1000
if(x<i)
i:= y
x := 1000-x

servo.set(0,x)
ms_delay(300)
{
'----- Start TV -----
longmove(@tv_status, @tvparams, paramcount)
tv_screen := @screen
tv_colors := @colors
tv.start(@tv_status)

'----- Init colors -----

repeat i from $00 to $0F
colors[i] := $074E0802 'keep Color:$07=white,$4E=Sky Blue,$08=Green,Back Ground $02= Black

```

```

repeat i from $10 to $1F
  colors[i] := $077E5802 'keep Color:$07=white,$7E=Light Green , $58=Red,Back Ground $02=
Black
repeat i from $20 to $2F
  colors[i] := $07EE9802 'keep Color:$07=white,$EE=Pink,$98=Blue,Back Ground $02= Black

'----- Init tile screen -----

repeat x from 0 to tv_hc - 1
  repeat y from 0 to tv_vc - 1
    case y
      0..3 : i := x
      4..7 : i := $10 + x
      8..11: i := $20 + x
      other: i := 0

    screen[x + y * tv_hc] := i << 10 + display_base >> 6 + x * tv_vc + y

'----- Start and setup graphics -----
gr.start
gr.setup(16, 12, 0, 0, bitmap_base)

}

'----- Start mouse -----

' mouse.start(24, 25)
{mousex := 128    "Set Position Mouse X,Y: Display On TV
mousey := 95
color1 := 3      "Set Color Text 3 = white
color2 := 3
color3 := 3

repeat

gr.clear          "Clear Screen

```

```

'----- Display Text "ETT DEMO MOUSE" -----

gr.textmode(2,2,6,5)    "Set Text Size
gr.colorwidth(color1,2) "Set Pixel Color and Width=2 (Pixel Circle)
gr.text(130,160,@str0)

gr.textmode(2,2,6,5)    "Set Text Size
gr.colorwidth(color2,18) "Set Pixel Color and Width=18 (Pixel rectang)
gr.text(130,95,@str0)

gr.textmode(2,2,6,5)    "Set Text Size
gr.colorwidth(color3,2) "Set Pixel Color and Width=2 (Pixel Circle)
gr.text(130,30,@str0)

'----- Draw mouse pointe -----

gr.width(1)
}
{mousex := mousex + mouse.delta_x #> 0 <# 245    "Update Position Mouse x
mousey := mousey + mouse.delta_y #> 10 <# 190    "Update Position Mouse y
}
' mousey := mouse.delta_y

{ gr.pix(mousex,mousey,0,@arrow_mouse)          "Plot Arrow Mouse

click := mouse.buttons                          "Read Mouse Button

if click == 1                                    "Click Left
  if mousey < 63                                 "Check Limit Mouse
    color3 := 1
  if mousey < 127 and mousey > 62
    color2 := 1
  if mousey > 126
    color1 := 1

```

```

elseif click == 2          "Click Right
  if mousey < 63          "Check Limit Mouse
    color3 := 2
  if mousey < 127 and mousey > 62
    color2 := 2
  if mousey > 126
    color1 := 2

else                      "No Click Mouse
  color1 := 3
  color2 := 3
  color3 := 3

gr.copy(display_base)    "Copy bitmap to display
}
{
DAT
tvparams      long 0      'status
              long 1      'enable
              long %001_0101  'pins
              long %0000    'mode
              long 0      'screen
              long 0      'colors
              long x_tiles  'hc
              long y_tiles  'vc
              long 10     'hx
              long 1      'vx
              long 0      'ho
              long 0      'vo
              long 60_000_000  'broadcast
              long 0      'auralcog

arrow_mouse
              word        'arrow pointer
              byte 1,5,0,4  'size:x=1,y=5,Position original x=0,y=4
              word %%11110000

```

```
word %%11100000
word %%11110000
word %%10111000
word %%00011000
```

```
str0      byte "***_ETT DEMO MOUSE_***",0
```

```
}
```

```
PUB ms_delay(delay)      "Delay for # of ms
waitcnt((clkfreq/1_000) * delay + cnt)
```

ภาคผนวก ค

โปรแกรมการคำนวณการหาค่าความหืนมวลสูงสุด

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%This matlab file is called user.m which need information from user %
%in order to run the higher-order optimization algorithm which will %
%result as optimal state and control trajectories. Therefore, user %
%has to follow the instruction closely without changing the fixed %
%variables in this matlab file, also this file needed Matlab version %
%5.1 such that the algorithm can be run. %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% 1. Number of state variables...format>>> n=?;
n=2;

% 2. Number of control variables...format>>> m=?;
m=2;

% 3. Number of the highest derivative of state variable...
%format>>> p=?;
p=3;
ps=[3;3];

% 4. Number of the intervals***...format>>> N=?;
% This interval means that users can set the accuracy of the %
%solutions. If N is large, it will be more accuracy of the solutions,%
%but not always*.
N=12;

% 5. Initial time...format>>> t0=?;
t0=0;

% 6 Final time...format>>> tf=?;
% where N=N in section4.
tf=1;
M1=sym(['M1']);
M2=sym(['M2']);
M3=sym(['M3']);
M4=sym(['M4']);
M5=sym(['M5']);
M6=sym(['M6']);
M7=sym(['M7']);
M8=sym(['M8']);

% 7. This is where the cost function needed to be defined in the sym-%
%bolic format with one must understand what is the logic below in or-%
%der to defined the cost function correctly. %
% 7.1 Control inputs must set as u1, u2, ..., um. %
% 7.2 State variables...As the user know that how many state vari-%
%ables he/she has. %
% State variables must set as x10, x11, ..., x1p, x20, x21, %
% ..., x2p, ..., xn0, xn1, ..., xnp %
% where x10=x1, x11=x1_dot, and so on. %
% Format>>> L=sym('?');
L=sym('u1^2+u2^2');
phi=sym('0');

% 8. This place is where the state equations have to be defined as %
%format below: %

```

```

% Format>>> fs(1,1)=sym('?');, ..., fs(n,1)=sym('?'); %
fs(1,1)=sym('2.00045*x13+0.14715*cos(x10)*x11+0.14715*sin(x10)*x11-u1');%
fs(2,1)=sym('0.5*x23-u2'); %

% 9. Also, at this point, users need to provide all constraints. %
% Format>>> cu(1,1)=sym('?');, ..., cu(m,1)=sym('?'); where m is %
% the number of the control input. cu must be defined for all %
% control variables.***** %
% Format>>> cx(1,1)=sym('?');, ..., cx(r,1)=sym('?'); where r is %
% the number of the constraints %
% Detail: %
% cu means constraints contain only control inputs. %
% cx means constraints contain only state or both control and sta-%
% te variables. %
% 9.1 Further more for the lower and upper bound of the inequality%
% constraints. If one has the equality constraints, the lower %
% and upper bounds must defined as the same values. %
% Format>>> cu_l(1,1)=?; , ..., cu_l(m,1)=?; %
% cu_u(1,1)=?; , ..., cu_u(m,1)=?; %
% and so on where l and u mean upper/lower bound respectively.%
%*****%
cu(1,1)=sym('u1'); %
cu(2,1)=sym('u2'); %
%cu(2,1)=sym('u2'); %

cu_l(1,1)=-100; %
cu_l(2,1)=-100; %
cu_u(1,1)= 100; %
cu_u(2,1)= 100; %
%cu_l(2,1)=-4; %
%cu_u(2,1)= 4; %
%*****%

r=0; % remember this is a number of the constraint of x and u. %
%%%%%%%%%%%%%% %
%cx(1,1)=sym('x12'); %
%cx_l(1,1)=-4; %
%cx_u(1,1)=4; %
%%%%%%%%%%%%%% %

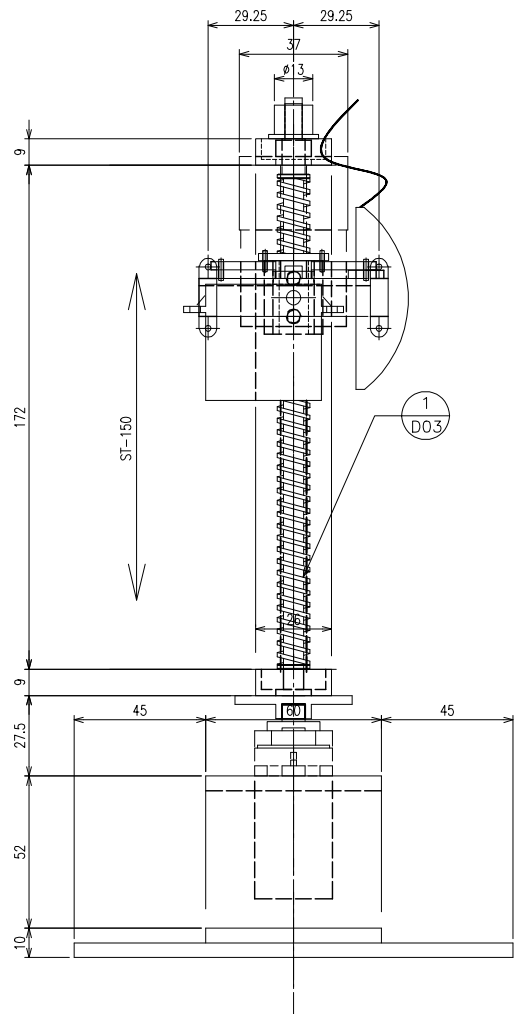
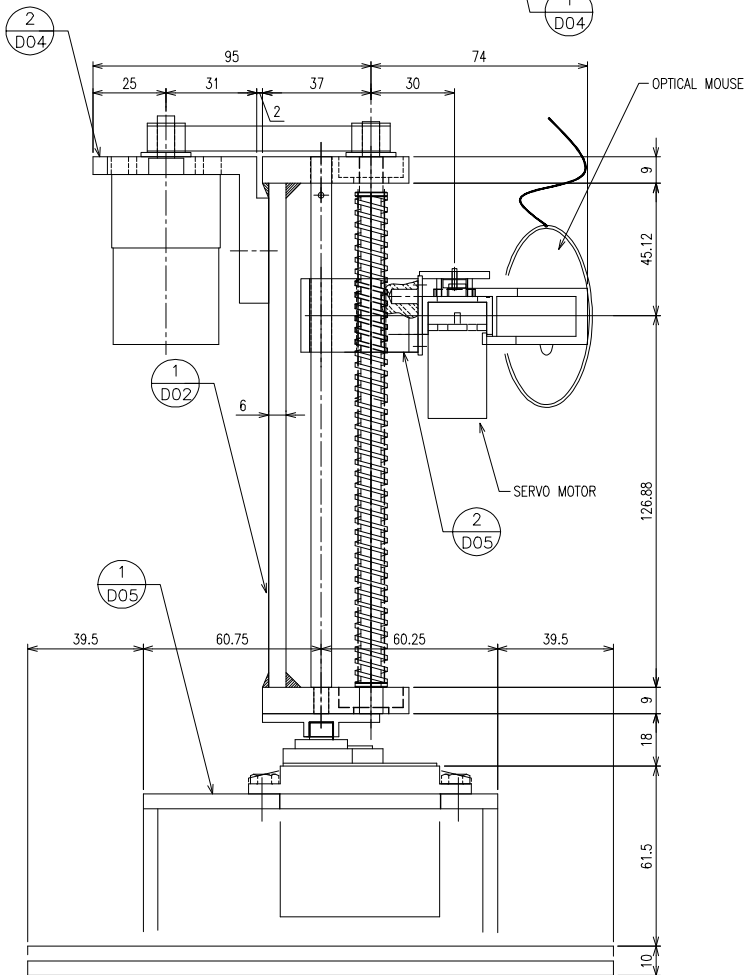
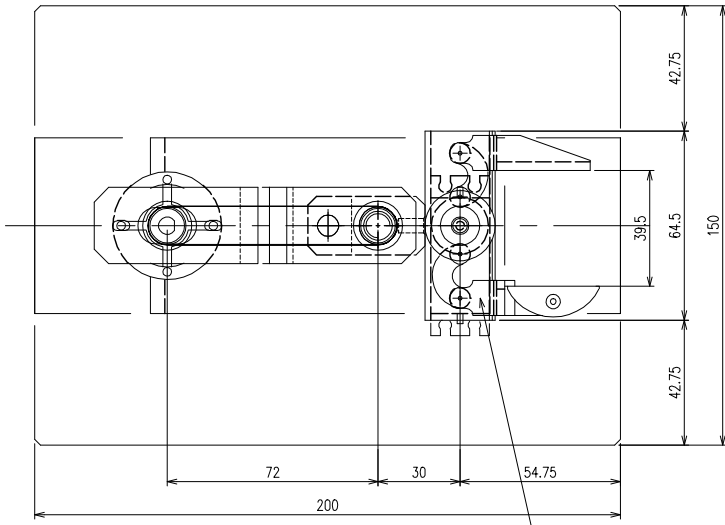
% 10. Boundary Conditions %
% Format>>> x0(i)=?; and xf(i)=?; %
% where x0(1) =x10dot, x0(2) =x11dot, ..., x0(p) =x1pdot %
% x0(p+1)=x20dot, x0(p+2)=x21dot, ..., x0(2p)=x2pdot %
% ... %
% x0((n-1)p+1)=xn0dot, x0((n-1)p+2)=xn1dot, ..., x0(np)=xnpdot, %
% and repeat with the same logic for xf(1),...,xf(np). %

x0(1,1)=sym('x10'); %
x0(2,1)=sym('x11'); %
x0(3,1)=sym('x12'); %
x0(4,1)=sym('x20'); %
x0(5,1)=sym('x21'); %
x0(6,1)=sym('x22'); %
%Bound of x0 %
x0_l(1,1)=0; %

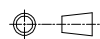
```


ภาคผนวก ง
แบบแผนกลและมือกล

DWG. NO.



No.	REVISIONS	DATE	REVISED
△			
△			
△			
△			



THIS DRAWING AND DESIGN IS EXCLUSIVE PROPERTY OF SWU.AC.TH

SPARE	REQ'D	Q'TY	MARK	DESCRIPTION	MATERIAL	UNIT	TOTAL	REMARKS
1	SET						WEIGHT (KG)	
				GRIPPER USE OPTICAL MOUSE				DRAW ARTIT K.
				MECHANICAL ENGINEERING				DES'D ARTIT K.
				ASSEMBLY DWG				CHK'D TAWIWAT V.
								APR'D TAWIWAT V.
								SCALE DATE REV. 00



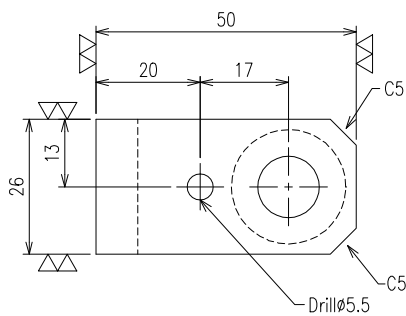
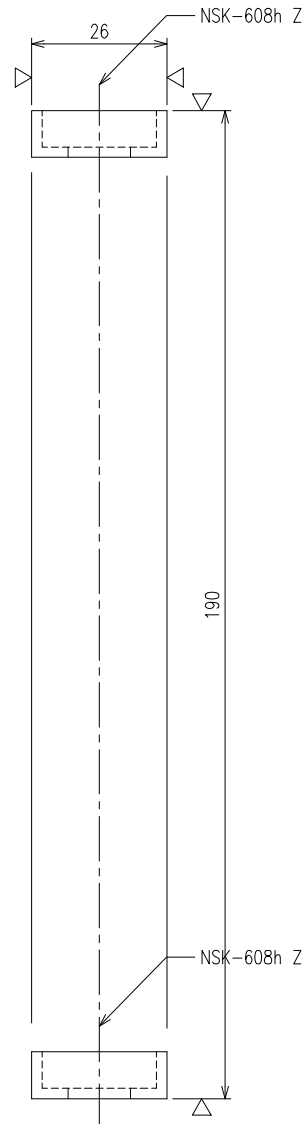
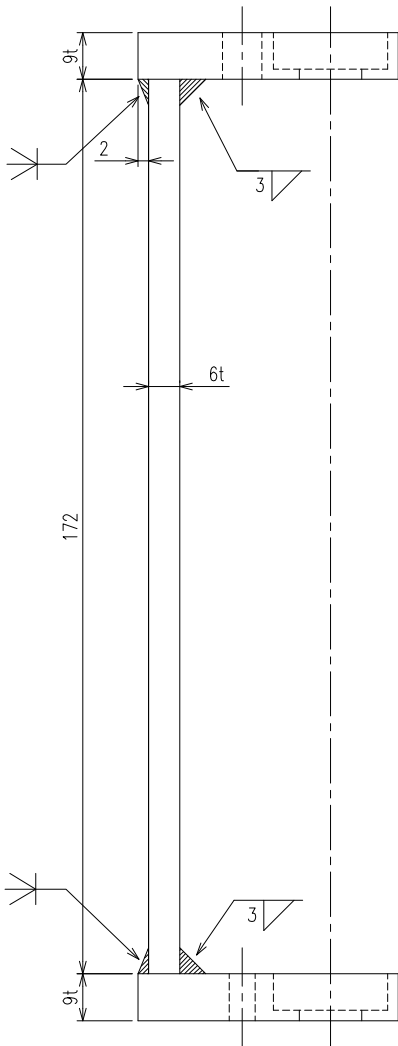
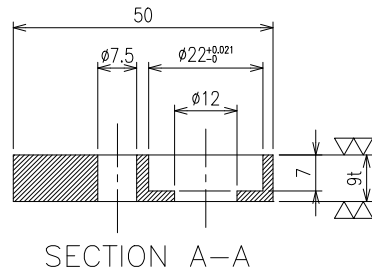
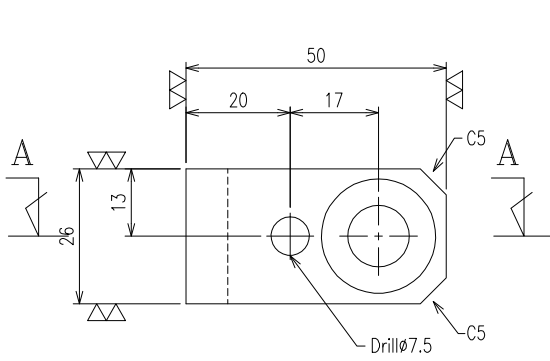
For more information visit us at www.swu.ac.th



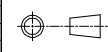
DWG No. D9002A01

DWG. NO.

① SS400



No.	REVISIONS	DATE	REVISED
△			
△			
△			
△			



THIS DRAWING AND DESIGN IS EXCLUSIVE PROPERTY OF
SWU.AC.TH

SPARE	REQ'D	Q'TY	MARK	DESCRIPTION	MATERIAL	UNIT	TOTAL WEIGHT (KG)	REMARKS
-	1	1	1	FRAME	SS400	-	-	M/C
				GRIPPER USE OPTICAL MOUSE			DRAW	ARTIT K.
				MECHANICAL ENGINEERING			DES'D	ARTIT K.
				DETAIL DWG			CHK'D	TAWIWAT V.
							APR'D	TAWIWAT V.
							SCALE	DATE
							1:10	REV. 00

JOB No. :

PRIORITY

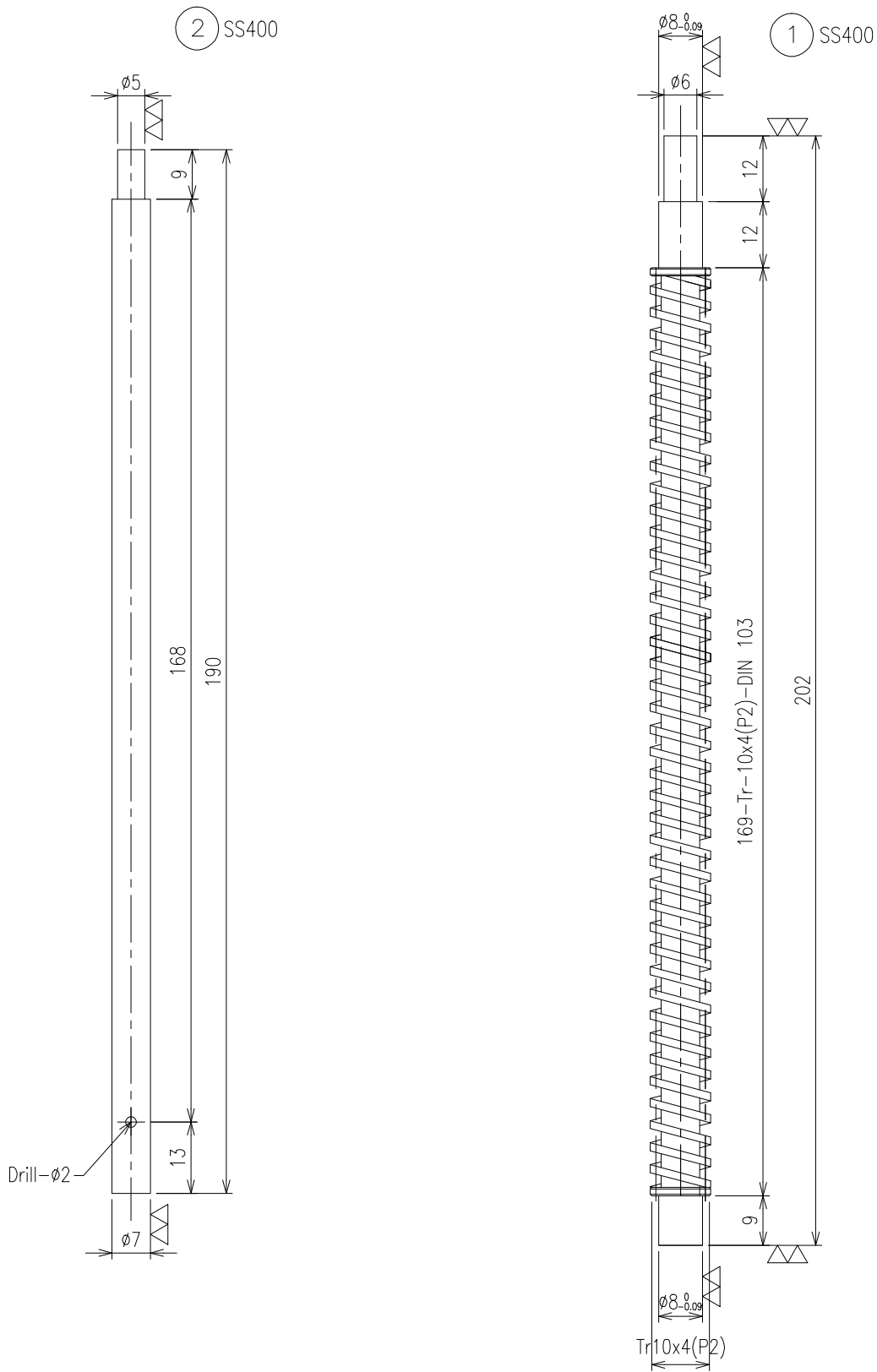
DESIGN

DATE

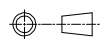
CUSTOMER



DWG No. D9002D02



No.	REVISIONS	DATE	REVISED
△			
△			
△			
△			

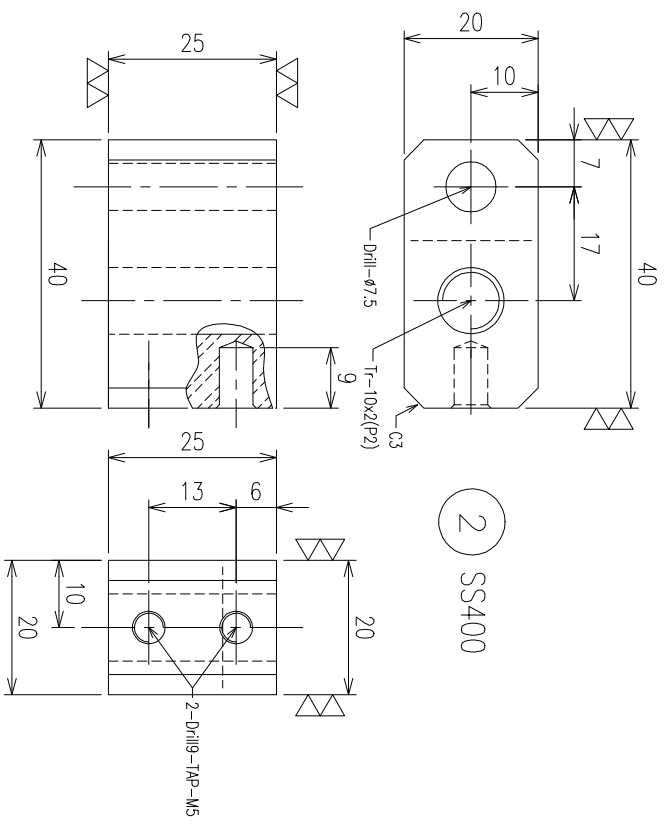
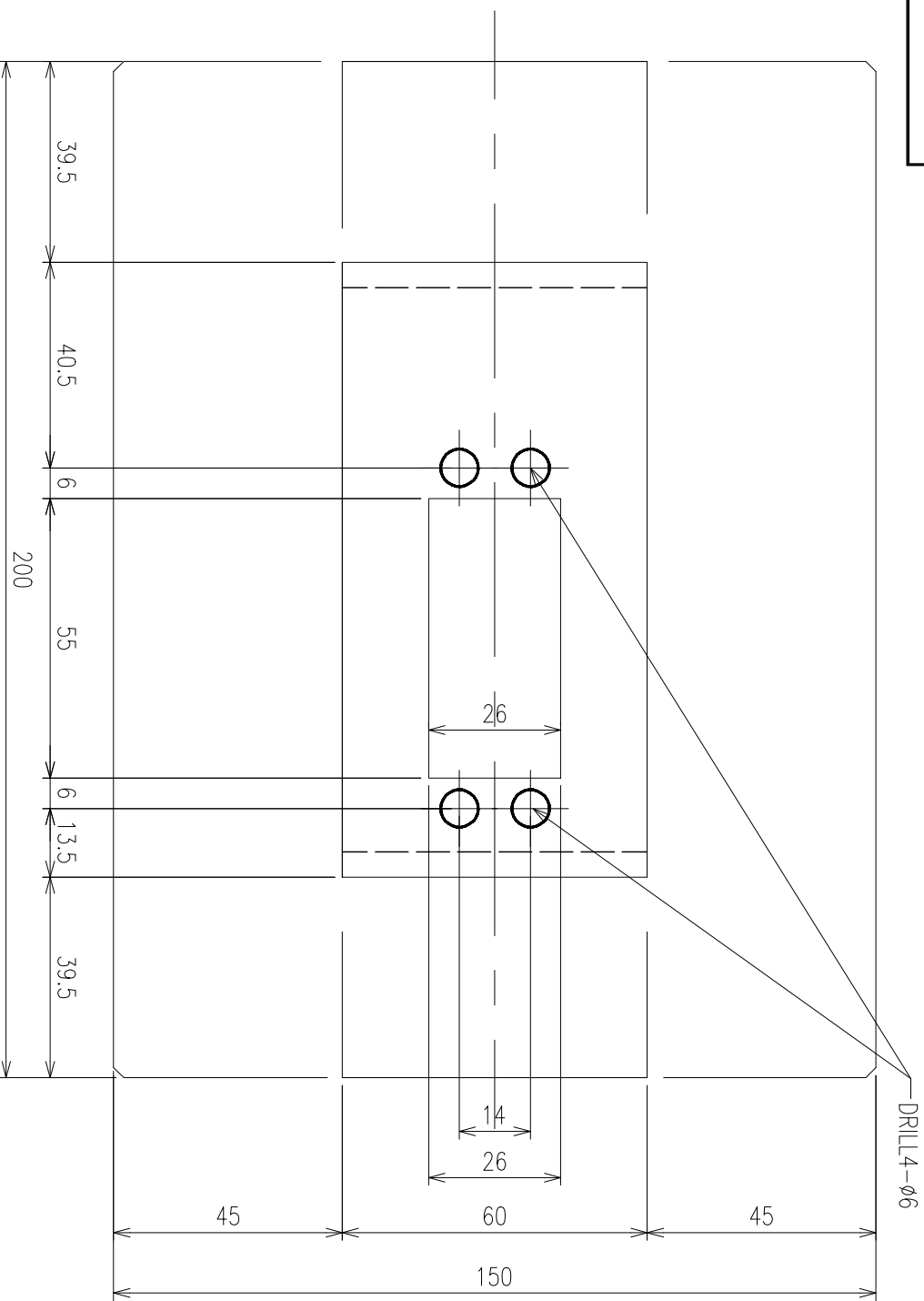


THIS DRAWING AND DESIGN IS EXCLUSIVE PROPERTY OF SWU.AC.TH

SPARE	REQ'D	QTY	MARK	DESCRIPTION	MATERIAL	UNIT	TOTAL WEIGHT (KG)	REMARKS
-	1	1	2	ROUND BARS	SS400	-	-	-
-	1	1	1	TR.BOLT	SS400	-	-	Tr.M10

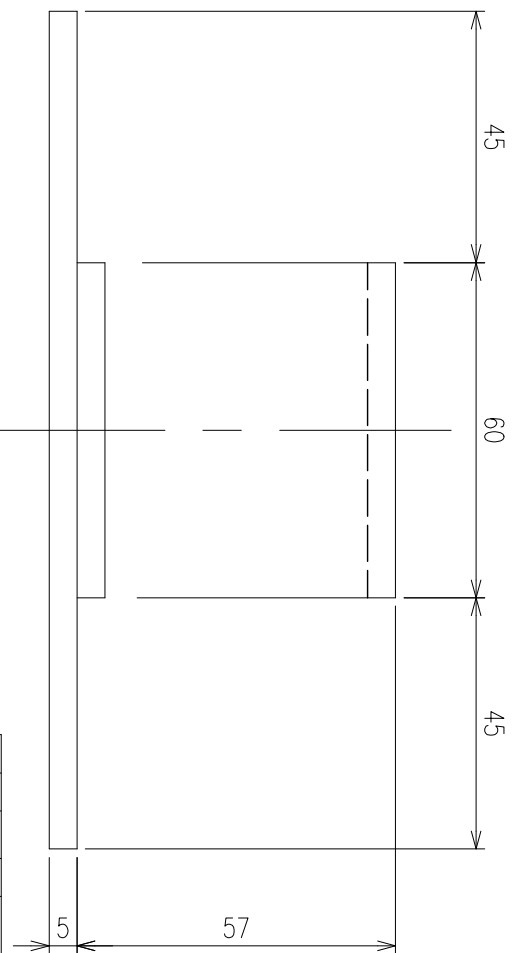
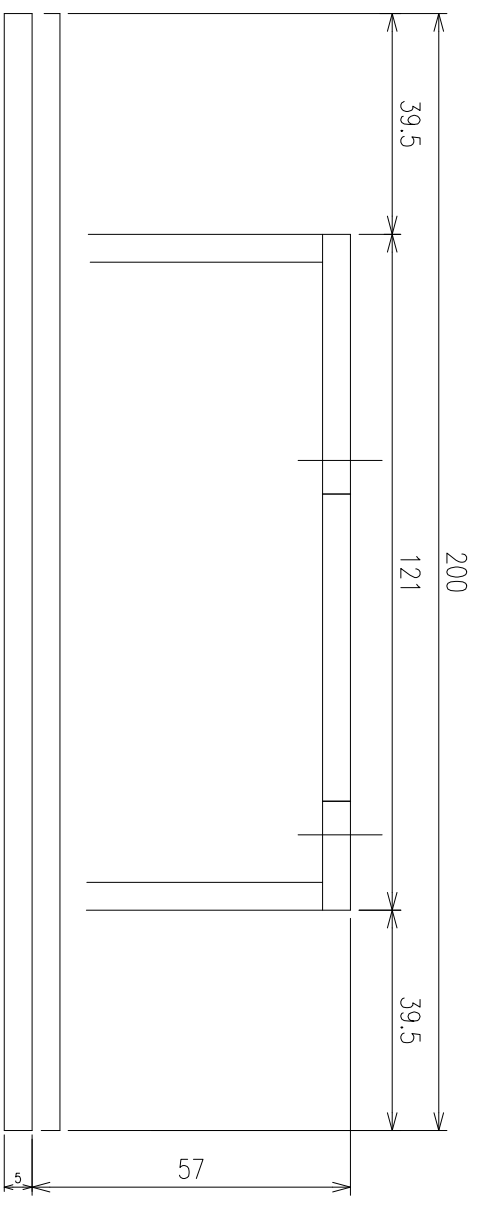
JOB No. :	DESIGNED	ARTIT K.
	DRAWN	ARTIT K.
	CHECK'D	TAWIWAT V.
	APPR'D	TAWIWAT V.
	SCALE	DATE

GRIPPER USE OPTICAL MOUSE MECHANICAL ENGINEERING DETAIL DWG		DRAW DES'D ARTIT K. CHECK'D TAWIWAT V. APPR'D TAWIWAT V. SCALE 1:2 DATE REV. 00
D9002D03		DWG No.



2 SS400

1



THE NORMAL TOLERANCE NOT DESIGNATED MUST FOLLOW THE BELOW-MENTIONED TABLE

NORMAL CUTTING TOLERANCE	CLASS	UNIT : mm.	NORMAL TOLERANCE OF FIN-MACHINED ARTICLE	UNIT : mm.
SIZE CLASSIFICATIONS	COARSE	UNIT : mm. <td>FINER</td> <td>UNIT : mm. </td>	FINER	UNIT : mm.
OVER 0.6 LESS THEN 3	±0.1	OVER 0.5 LESS THEN 63	±1.6	
OVER 3 LESS THEN 6	±0.1	OVER 63 LESS THEN 125	±2.0	
OVER 6 LESS THEN 30	±0.2	OVER 125 LESS THEN 250	±2.5	
OVER 30 LESS THEN 120	±0.3	OVER 250 LESS THEN 500	±3.5	
OVER 120 LESS THEN 315	±0.5	OVER 500 LESS THEN 1000	±4.0	
OVER 315 LESS THEN 2000	±0.8	OVER 1000 LESS THEN 2000	±5.0	
OVER 2000 LESS THEN 4000	±1.2	OVER 2000 LESS THEN 4000	±6.3	

FINISHING SURFACE ROUNDRNESS	SIZE CLASSIFICATIONS	UNIT : mm.	FINISHING SURFACE ROUNDRNESS	UNIT : mm.
OVER 0.6 LESS THEN 3	±0.1	PARALLELISM	0.05/100	No.
OVER 3 LESS THEN 6	±0.1	SQUARENESS		
OVER 6 LESS THEN 30	±0.2	CONCENTRICITY	0.02/100	SYMMETRY 0.2
OVER 30 LESS THEN 120	±0.3	ROUNDNESS AND CYLINDERABILITY	LESS THEN 30%	
OVER 120 LESS THEN 315	±0.5	PRESS BENDING	PERPENDICULAR BENDING 1°	
OVER 315 LESS THEN 2000	±0.8	ANGLE DIFFERENCE	OTHER BENDINGS ±3°	
OVER 2000 LESS THEN 4000	±1.2			

REVISIONS	DATE	REVISED

SERIAL NO.	QTY	DESCRIPTION	MATERIAL	REMARKS
1	1	SLIDE GUIDE	SS400	
1	1	ACRYLIC FLATE	PVC	
1	1			

GRIPPER USE OPTICAL MOUSE MECHANICAL ENGINEERING DETAIL DWG

DRW: ARTTI K. DESG: ARTTI K.
 CHKD: TAWIAT V. APRD: TAWIAT V.
 SCALE: 1:30 DATE: - / - / 00

DWG No. **D9002D05**

JOB No. :	-
PROJECT :	
CUSTOMER :	

THIS DRAWING AND DESIGN IS EXCLUSIVE PROPERTY OF SWU.A.C.T.H

MECHANICAL ENGINEERING DETAIL DWG

DRW: ARTTI K. DESG: ARTTI K.
 CHKD: TAWIAT V. APRD: TAWIAT V.
 SCALE: 1:30 DATE: - / - / 00

DWG No. **D9002D05**

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายอาทิตย์ คำต่าย
วันเดือนปีเกิด	11 พฤษภาคม 2524
สถานที่เกิด	จังหวัด ฉะเชิงเทรา
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	22/2 หมู่6 ต.โยธะกา อ.บางน้ำเปรี้ยว จ.ฉะเชิงเทรา 24150
ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน	วิศวกรแผนกออกแบบ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท ช่างกิว-ไทย จำกัด
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2536	ประถมศึกษา (ป.6) จาก โรงเรียนวัดบางไทร จ.ฉะเชิงเทรา
พ.ศ. 2539	มัธยมศึกษาตอนต้น (ม.3) จาก ปัญจพิทยาคาร จ.ฉะเชิงเทรา
พ.ศ. 2543	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.ช่างยนต์) จาก เทคโนโลยีฉะเชิงเทรา
พ.ศ. 2545	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.ช่างอุตสาหกรรม) จาก วิทยาลัยเทคนิคดอนเมือง
พ.ศ. 2547	ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (คอ.บ.เครื่องกล) จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พ.ศ. 2552	บัณฑิตศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.เครื่องกล) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ