

การออกแบบและสร้างแกนกลสองแกนกันรบกวนที่ควบคุมโดยใช้
หลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุด

ปริญญานิพนธ์
ของ
อนุวัฒน์ บำรุงกิจ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มีนาคม 2553

การออกแบบและสร้างแกนกลสองแกนกันรยยนต์ที่ควบคุมโดยใช้
หลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุด

ปริญญานิพนธ์
ของ
อนุวัฒน์ บำรุงกิจ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มีนาคม 2553

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การออกแบบและสร้างแกนกลสองแขนก้านรถยนต์ที่ควบคุมโดยใช้
หลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุด

บทคัดย่อ

ของ

อนุวัฒน์ บำรุงกิจ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มีนาคม 2553

อนุวัฒน์ บำรุงกิจ. (2553). การออกแบบและสร้างแขนกลสองแขนกึ่งรยนต์ที่ควบคุมโดยใช้หลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุด. ปรินซ์นิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ:

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม:

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมมมงคล, พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวิวัชร วีระเกล้า.

งานวิจัยนี้ให้ความสนใจการทำงานของหุ่นยนต์ ที่มีการทำงานและการเคลื่อนที่คล้ายกับมนุษย์หรือแขนกล ที่ช่วยในการเคลื่อนย้ายสิ่งของ ตลอดทั้งการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยการวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างแขนกลแบบสองแขน ประยุกต์ใช้กับการควบคุมการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุด (Minimum Jerk) และทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากทฤษฎีกับการวัดจริง โดยการเคลื่อนที่นั้นใช้มอเตอร์กระแสตรง และ เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) เป็นต้นกำลัง ในการทดลองทำการวัดค่าความเร็วเชิงมุม ค่าความเร่งเชิงมุม และแรงบิดของมอเตอร์ โดยวัดค่าจากกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ในการหมุน

จากการวิจัยพบว่า ความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุม และแรงบิดที่วัดจริง ของแขนกลและมอเตอร์ตัวที่ 1 และ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงนั้น มากกว่าค่าที่ได้จากทฤษฎี 33% และ 54%, 41% และ 37%, 40% และ 40% ตามลำดับ สรุปได้ว่าการทำงานจริงของแขนกลที่เป็นผลมาจากการควบคุมโดยหลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุดนั้นมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นเพียง 39% จากทฤษฎี คำหลัก: แขนกล, ความนุ่มนวลที่สุด, การควบคุม

DESIGN AND FABRICATION TWO ARM ROBOT MODEL APPLICATION FOR AUTOMATIC
BARRIER GATE SYSTEM MINIMUM JERK CONTROL

AN ABSTRACT
BY
ANUWAT BUMRUNGKIT

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

March 2010

Anuwat Bumrungrkit. (2010). *Design and Fabrication Two Arm Robot Model Application for Automatic Barrier Gate System Minimum Jerk Control*. Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Asst.Prof.Dr.Pichai Asadamongkon: Col.Asst.Prof. Dr.Tawiwat Veeraklaew.

The research focuses on the operation of the robot. With mobility similar to human and or the Robot Arm to assist in moving the thing. Also focus on the movement of arms control. The design and build the Two Links and applied to motion control Minimum Jerk and compares the results from calculations with the actual work. The mobile is a direct current motor and Servo Motor is a measure of the experimental values. The angular velocity, Angular acceleration and torque motor. The measured value of the electricity used in the motor rotation.

The research that the angular velocity, angular acceleration and torque motor number 1, 2 movement up and down from measurement system has compared with the value at theory 33% 54%, 41% 37%, 40% 40%. Can summarize that true work of two arm robot that is from the minimum jerk control has the vibration trembler happens 39% from just the theory Keywords: Robot Arm, Minimum Jerk, Control.

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมมมงคล ประธานกรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์, พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีวัชร วีระแก้ว และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิจิต บัวแก้ว กรรมการควบคุมการทำปริญญานิพนธ์ ซึ่งทั้งสามท่านเสียสละเวลาอันมีค่ายิ่ง กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และแก้ไขความบกพร่องในการทำปริญญานิพนธ์ ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงตลอดไป

ขอขอบคุณราชภัฏทาสโมสร ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนการศึกษา

ขอขอบคุณท่านอาจารย์อัมราพร บุญประทะทอง ผู้ให้โอกาสทางการศึกษาในระดับปริญญาโทนี้

ขอขอบคุณรุ่นพี่และเพื่อนๆ ปริญญาโทโครงการความร่วมมือหลักสูตรปริญญาโท มศว และ ร.ร.จปร ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือตลอดหลักสูตร และนายสราวุฒิ สิริเกษมสุข เพื่อนร่วมชั้นเรียน ตั้งแต่ปริญญาตรีจนถึงปริญญาโท ผู้แนะนำและชักนำในทางที่ถูกที่ควรจนข้าพเจ้าสามารถศึกษาในระดับปริญญาโทได้เป็นผลสำเร็จ

ขอขอบคุณครอบครัวบำรุงกิจ ครอบครัวโตประยูร และครอบครัวพุทธศร ซึ่งให้ในสิ่งที่ดีงาม และเป็นสิ่งสำคัญยิ่งในการเรียนและการทำงานตลอดมา

อนุวัฒน์ บำรุงกิจ

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
นิยามศัพท์.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
หลักการเบื้องต้นของหุ่นยนต์.....	3
ทฤษฎีความนุ่มนวลที่สุด (Minimum Jerk)	7
หลักการกำหนดดีไฮเซนพารามิเตอร์ (D-H parameter)	9
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)	14
3 วิธีดำเนินการวิจัย	19
ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	19
แนวทางหรือหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการแก้ปัญหา.....	20
การออกแบบและสร้างแขนกลสองแขนก้นรถยนต์ที่ควบคุมโดยใช้หลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุด (Design and Fabrication Two Arm Robot Model Application for Automatic Barrier Gate System Minimum Jerk Control)	21
การหาสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลสองแขนก้นรถยนต์ที่ควบคุมโดยใช้หลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุดโดยใช้โปรแกรม MATLAB.....	25
ขั้นตอนการบันทึกค่าความเร็วเชิงมุม, ความเร่งเชิงมุมและแรงบิดของมอเตอร์จากการวัดจริง.....	29
4 การวิจัย	31
ตารางและแผนภาพเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมของแขนกลก้นรถยนต์แบบสองแขนที่เคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าความเร็วเชิงมุมที่ได้จากทฤษฎี.....	31

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 (ต่อ)	
ตารางและแผนภาพเปรียบเทียบค่าความเร่งเชิงมุมของแขนกลก้นรถยนต์แบบ สองแขน ที่เคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าความเร่งเชิงมุม ที่ได้จากทฤษฎี.....	36
ตารางและแผนภาพเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์ ขณะที่แขนกลเคลื่อนที่ ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากทฤษฎี..	
5 สรุปผล และข้อเสนอแนะ	39
สรุปผล	39
ข้อเสนอแนะทั่วไป.....	39
ข้อเสนอแนะงานวิจัยครั้งต่อไป.....	40
บรรณานุกรม	41
ภาคผนวก	44
ภาคผนวก ก	45
ภาคผนวก ข	47
ประวัติย่อผู้วิจัย	51

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงตาราง DH-Parameter ของแขนกล.....	25
2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี.....	32
3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี.....	33
4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร่งเชิงมุมของแขนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี.....	34
5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร่งเชิงมุมของแขนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี.....	35
6 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี.....	37
7 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี.....	38

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แสดงลักษณะของหุ่นยนต์ชนิดคาร์ทีเซียน	4
2 แสดงลักษณะของหุ่นยนต์ชนิดทรงกระบอกล	4
3 แสดงลักษณะของหุ่นยนต์ชนิดสเฟียโรคอลล	5
4 แสดงลักษณะของหุ่นยนต์ชนิดสกั๊ว	5
5 แสดงลักษณะของหุ่นยนต์ชนิดอาทิกูเลท	6
6 แสดงรายละเอียดของตำแหน่งตัวแปรต่างๆ ของ D-H Parameters	9
7 แสดงตัวอย่างแบบจำลองของหุ่นยนต์ 2 แขน	11
8 แสดงการเคลื่อนที่ของความเร็วเชิงมุม.....	12
9 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	19
10 แสดงแบบจำลองลักษณะการทำงานของแขนกลสองแขนกั๊นรยยนต์	20
11 แสดงตำแหน่งของน้ำหนักรแขนกลและน้ำหนักรมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่กระทำกับแขน	21
12 แสดงลักษณะของแขนทั้ง 2 แขน.....	22
13 แสดงลักษณะของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยโดยที่ 1 เป็นมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) 2 เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor)	22
14 แสดงอุปกรณ์ส่งกำลัง	23
15 แสดงลักษณะของแขนกลสองแขนกั๊นรยยนต์	23
16 แสดงลักษณะการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของแขนกลกั๊นรยยนต์	24
17 แสดงลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแขนกล	24
18 แสดงแบบจำลองการเคลื่อนที่	25
19 แสดงหน้าต่างโปรแกรม MATLAB	26
20 แสดงหน้าต่าง main สำหรับใส่จำนวนแขน	26
21 แสดงหน้าต่าง data-DH	27
22 แสดงหน้าต่าง File Conversion-Dynamic equation	27
23 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาที	32
24 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาที	33

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
25 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร่งเชิงมุมของแขนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาที.....	35
26 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร่งเชิงมุมของแขนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาที	36
27 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 1 ขณะแขนกลเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาที	37
28 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะแขนกลเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาที	38

บทที่ 1

บทนำ

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย

จากการที่เทคโนโลยีมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องนั้นทำให้นักวิจัยหลายท่านนำหลักการของหุ่นยนต์มาใช้ในการควบคุมอุปกรณ์และเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ เช่น เครื่องดูดฝุ่น หุ่นจ่ายน้ำมันในรถยนต์ เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากมนุษย์ต้องการความสะดวกสบายและความแน่นอนในการทำงานของเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ

ในทำนองเดียวกันเมื่อเทคโนโลยีมีการพัฒนาขึ้นก็ทำให้ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นตามไปด้วยไม่ว่าจะเป็นพลังงานน้ำมัน พลังงานไฟฟ้า ทำให้มีการสนับสนุนทั้งจากภาครัฐ และเอกชนให้ประชาชนช่วยกันประหยัดและลดการใช้พลังงาน ควบคู่ไปกับการหาแหล่งพลังงานทดแทน ด้วยเหตุผลนี้ทำให้นักวิจัยหลายท่านนำหลักการนี้มาใช้ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์และเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ เพื่อเป็นการลดการสิ้นเปลืองในการใช้พลังงานไฟฟ้า

อุปกรณ์ที่ใช้ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่สามารถพบเห็นได้ในหลายพื้นที่ของประเทศไทยก็คือเครื่องกันรถยนต์ ซึ่งสามารถพบเห็นได้ในพื้นที่จอดรถของศูนย์การค้า บริเวณด้านเก็บเงินค่าทางด่วน หรือสถานที่สำคัญทางราชการต่างๆ ที่มีรถยนต์เข้า ออก เป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ลักษณะการทำงานของเครื่องกันรถยนต์นั้นจะมีการเคลื่อนที่ขึ้นและลง ซ้ำๆ ในแต่ละวัน โดยในขณะที่เครื่องกันรถยนต์เคลื่อนที่นั้นน้ำหนักของแขน จะส่งผลต่อแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้า กล่าวคือเมื่อเครื่องกันรถยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง 0° แรงบิด และ ค่าความเร่งเชิงมุมของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดจากนั้นจะลดลงจนถึงจุดสุดท้ายของการเคลื่อนที่คือที่ตำแหน่ง 90° และจะเป็นลักษณะเดียวกันในขณะที่แขนกล เคลื่อนที่ลง ซึ่งแรงบิดที่เพิ่มขึ้นนั้นก็ทำให้มอเตอร์ใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ก่อนที่แขนกล จะหยุดการเคลื่อน จะเกิดการสั่นซึ่งส่งผลกระทบต่อมอเตอร์และข้อต่อต่างๆ ซึ่งถ้าหากสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลให้มีความนุ่มนวลได้ ปัญหาดังกล่าวก็จะไม่เกิดขึ้นอีกทั้งจะสามารถช่วยลดการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าได้อีกทางหนึ่งเช่นกัน

ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงสนใจที่จะทำการออกแบบและสร้างแขนกลสองแขนกันรถยนต์ที่ควบคุมโดยใช้หลักการนุ่มนวลที่สุด โดยใช้สมการของออยเลอร์-ลากรางจ์ (Euler-Lagrange Equation) ซึ่งจะคำนึงถึงโมเมนต์ความเฉื่อย และพลังงานจลน์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเร็วเชิงมุม ค่าความเร่งเชิงมุม และแรงบิดของมอเตอร์ที่จุดต่อของแขนกลกันรถยนต์ ทั้งนี้เมื่อสามารถทำการวิจัยเป็นผลตามที่ตั้งเป้าหมายไว้ ก็สามารถช่วยลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับแขนกลได้

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างแขนกลแบบสองแขนที่ใช้ก้านรถยนต์ที่ควบคุมโดยใช้หลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุด
2. เพื่อเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุม ค่าความเร่งเชิงมุม และค่าแรงบิดของมอเตอร์ ที่ได้จากการวัดจริงกับค่าที่ได้จากทฤษฎี

3. ขอบเขตของการวิจัย

1. แขนกลสองแขนก้านรถยนต์ที่ใช้ชิ้นทำจากอลูมิเนียมโดยที่แขนที่ 1 มีความยาว 120 cm. และแขนที่ 2 มีความยาว 100 cm.
2. ความสูงจากพื้นถึงแขนกลก้านรถยนต์เมื่อแขนกลก้านรถยนต์อยู่ในตำแหน่ง 0° คือ 85 cm.
3. มอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นมอเตอร์กระแสตรง (DC motor) และเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor)
4. ตัวแปรที่ต้องการทราบค่าประกอบด้วย
 - 4.1 ตัวแปรต้น คือ ค่าแรงบิด
 - 4.2 ตัวแปรตาม คือ ค่าความเร็วเชิงมุม และค่าความเร่งเชิงมุม

4. นิยามศัพท์

ความนุ่มนวลที่สุด คือ การเคลื่อนที่ของแขนกลสองแขนก้านรถยนต์ โดยไม่เกิดการสั่นสะเทือนที่ส่งผลกระทบต่อมอเตอร์และจุดเชื่อมต่อของแขนกลและต้องไม่เกิดการสวิงของแขนกลในขณะที่แขนกลกำลังจะหยุดการเคลื่อนที่

5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. สามารถนำหลักการและระบบควบคุมแบบนุ่มนวลที่สุดนี้ไปทำการเปรียบเทียบกับระบบควบคุมรูปแบบอื่นได้
2. เป็นพื้นฐานในการพัฒนาระบบควบคุมเพื่อใช้กับการควบคุมแขนกลที่มีลำดับขั้นความเสรี (Degree Of Freedom) มากกว่า 2 ค่าได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และนำเสนอตามหัวข้อดังนี้

1. หลักการเบื้องต้นของหุ่นยนต์
2. ทฤษฎีความนุ่มนวลที่สุด (Minimum Jerk)
3. หลักการกำหนดค่า D-H parameters
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

แขนกลก้นรถยนต์ที่พบเห็นนั้นส่วนมากจะเป็นแบบแขนเดียว (One Arm) แต่จะพบแบบสองแขน (Two Arm) ในกรณีที่ต้องกันช่องทางที่มีความกว้างมากๆ เช่นบริเวณทางข้ามรางรถไฟ แต่ถ้าเป็นกรณีที่ต้องการกันช่องทางที่มีความกว้างมากๆ แต่ถูกจำกัดด้วยระดับความสูง แขนกลสองแขนก้นรถยนต์นั้นก็จะเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่หน้าสนใจ แต่การจะควบคุมไม่ให้แขนกลเกิดการสั่นและมีลักษณะการเคลื่อนที่ ที่นุ่มนวลนั้นต้องอาศัยหลักการควบคุมรวมถึงการออกแบบที่เหมาะสมอีกเช่นกัน

ดังนั้นเนื้อหาในบทที่ 2 จะกล่าวถึง ทฤษฎีเบื้องต้นของหุ่นยนต์ ทฤษฎีความนุ่มนวลที่สุด (Minimum Jerk) หลักการกำหนดค่า D-H parameters รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

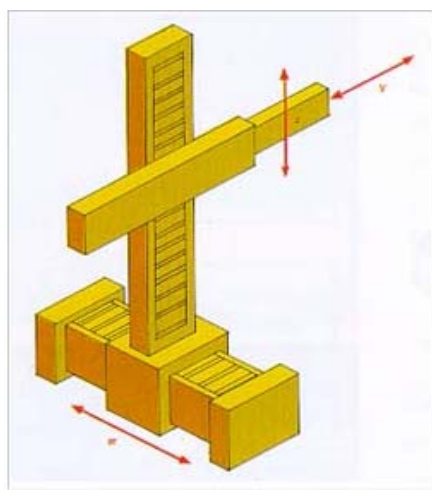
1. หลักการเบื้องต้นของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์ คือ เครื่องจักรกลชนิดหนึ่ง ที่มีลักษณะการทำงานแบบอัตโนมัติ (Automatics Machine) หรือกึ่งอัตโนมัติ (Semi automatics Machine) และสามารถโปรแกรมให้ทำงานได้อย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างได้ อย่างไรก็ดี RIA (The Robotics Industries Association) ได้ให้คำจำกัดความของหุ่นยนต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นที่ยอมรับกัน ในที่ประชุมระดับนานาชาติ ของบริษัทอุตสาหกรรมที่ใช้หุ่นยนต์ 11 แห่ง เมื่อปี ค.ศ.1981 (พ.ศ.2524) เขาไว้ว่า *An industrial robot is a reprogrammable, multifunction manipulator designed to move materials, part, tools or spacial devices through variable programmed motion for the performance of a variety of tasks.*

หรือแปลเป็นภาษาไทยได้ว่า หุ่นยนต์อุตสาหกรรม คือ เครื่องจักรกลที่สามารถทำการโปรแกรมใหม่ได้หลายครั้ง สามารถทำงานได้หลาย ๆ หน้าที่ ซึ่งมันได้รับการออกแบบมาเพื่อให้สามารถหยิบ จับ เคลื่อนย้าย วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ หรืออุปกรณ์พิเศษต่างๆ โดยการตั้งโปรแกรมเพื่อควบคุมการเคลื่อน ที่ให้ทำงานได้ตามต้องการ

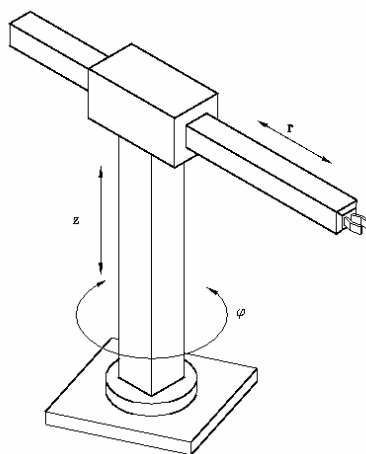
ถึงแม้ว่าหุ่นยนต์จะถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนสามารถทำงานได้หลายรูปแบบแต่เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจในงานวิจัยนี้จะขอจำแนกหุ่นยนต์ออกเป็น 5 ประเภท คือ

1. หุ่นยนต์ชนิดคาร์ทีเซียน (Cartesian manipulator) เป็นหุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างประกอบแบบตั้งฉากซึ่งกันและกัน 3 แกน โดยทำให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้



ภาพประกอบ 1 แสดงลักษณะของหุ่นยนต์ชนิดคาร์ทีเซียน

2. หุ่นยนต์ชนิดทรงกระบอ (Cylindrical manipulator) มีแขนเกาะกับแกนกลางซึ่งเป็นแกนหลัก โดยที่แขนทรงกระบอกลนี้สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลง หมุนรอบแกน บิดตัวและหดตัวได้



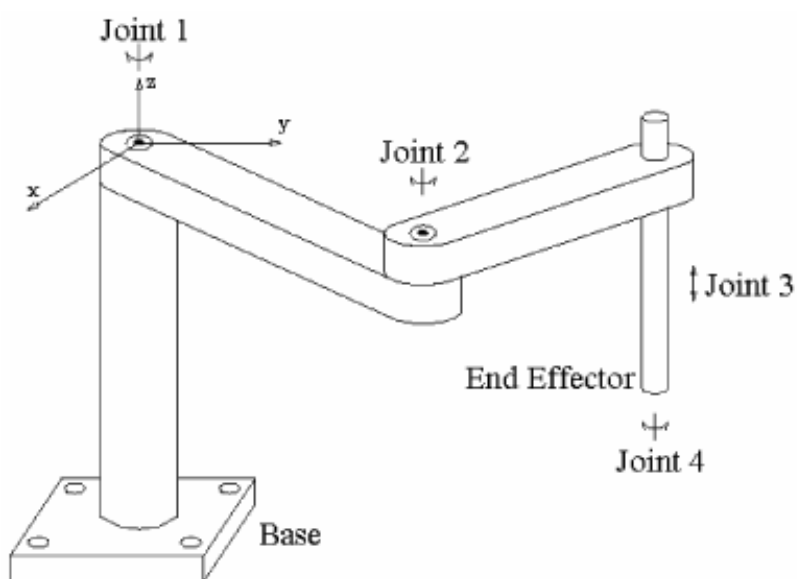
ภาพประกอบ 2 แสดงลักษณะของหุ่นยนต์ชนิดทรงกระบอ

3. หุ่นยนต์ชนิดสเฟียริคอล (Spherical manipulator) มีโครงสร้างการทำงานเป็นสองแกน ที่เคลื่อนที่ในลักษณะการหมุน ส่วนอีกแกนเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง



ภาพประกอบ 3 แสดงลักษณะของหุ่นยนต์ชนิดสเฟียริคอล

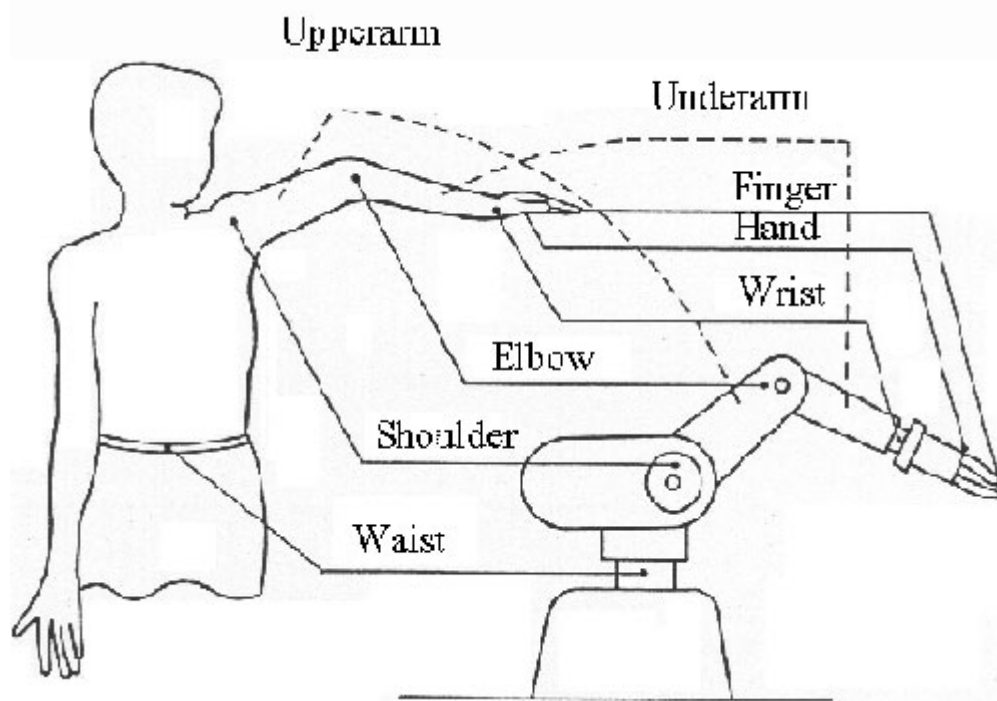
4. หุ่นยนต์ชนิดสการ์ว (SCARA manipulator) เป็นหุ่นยนต์ที่มีสองแกนที่มีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นการหมุนรอบแกนในแนวตั้ง และอีกหนึ่งแกนจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง



SCARA - Selective Compliance Assembly Robot Arm.

ภาพประกอบ 4 แสดงลักษณะของหุ่นยนต์ชนิดสการ์ว

5. หุ่นยนต์ชนิดอาทิคูเลท (Articulated manipulator) เป็นหุ่นยนต์ที่มีลักษณะการเคลื่อนที่ของทุกข้อต่อเป็นการหมุนโดยหุ่นยนต์ลักษณะนี้จะถูกออกแบบให้การทำงานคล้ายกับแขนของมนุษย์



ภาพประกอบ 5 แสดงลักษณะของหุ่นยนต์ชนิดอาทิคูเลท

6. โครงสร้างของหุ่นยนต์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนสำคัญ คือ ส่วนลำตัว (Body) แขน (Arm) และส่วนข้อมือ (Wrist) โดยมากแล้วส่วนลำตัวและแขนจะมีระดับขั้นความเร็ว 3 ระดับ และในส่วนข้อมือจะมีระดับขั้นของความเร็วอยู่ 2 – 3 ระดับ ที่ปลายของข้อมือจะเป็นวัตถุที่มีความสัมพันธ์กับงานที่หุ่นยนต์ต้องทำ ตัวอย่างเช่น วัตถุอาจจะเป็นชิ้นงานที่ต้องการส่งเข้าเครื่องจักรหรืออาจจะเป็นเครื่องมือที่หุ่นยนต์ต้องใช้ในกระบวนการผลิตบางอย่าง เป็นต้น ส่วนลำตัวและแขนของหุ่นยนต์จะใช้ในการจัดตำแหน่งที่ถูกต้องของวัตถุ และส่วนข้อมือของหุ่นยนต์จะใช้สำหรับจัดทิศทางการวางตัวที่เหมาะสมให้แก่วัตถุ

เพื่อที่จะวางตำแหน่งของวัตถุให้เหมาะสม ส่วนลำตัวและแขนของหุ่นยนต์จะต้องสามารถเคลื่อนวัตถุได้ทั้งสามทิศทางดังต่อไปนี้คือ

- 1) การเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง (การเคลื่อนที่ในแนวแกน z)
- 2) การเคลื่อนที่ในแนวรัศมี (เข้า ออก หรือการเคลื่อนที่ในแนวแกน y)
- 3) การเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา (การเคลื่อนที่ในแนวแกน x)

การที่จะทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ในลักษณะข้างต้นได้มีหลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของข้อต่อที่ใช้ในการสร้างลำตัวและแขนของหุ่นยนต์ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไปเพื่อที่จะทำให้เกิดการจัดทิศทางที่เหมาะสมของวัตถุ เราสามารถกำหนดระดับขั้นความเร็ว 3 ระดับสำหรับข้อมือของ

หุ่นยนต์ ตัวอย่างต่อไปนี้เป็นหนึ่งรูปแบบในการประกอบข้อมือของหุ่นยนต์เพื่อทำให้เกิดเป็น 3 ลำดับชั้นความเสรี (3 Degree of Freedom)

- 1) Roll ลำดับชั้นความเสรีลักษณะนี้ทำได้โดยใช้ข้อต่อแบบ T เพื่อที่จะหมุนวัตถุรอบแกนของแขน
- 2) Pitch เกี่ยวกับการหมุนขึ้นลงของวัตถุ ซึ่งทำได้โดยข้อต่อแบบ R (Rotational Joint)
- 3) Yaw เกี่ยวกับการหมุนซ้ายขวาของวัตถุ ซึ่งทำได้โดยใช้ข้อต่อแบบ R (Rotational Joint)

7. ส่วนประกอบของหุ่นยนต์

- 1) Actuator เป็นอุปกรณ์ หรือชุดขับเคลื่อนเพื่อให้แขนกล หรือหุ่นยนต์เคลื่อนไหวได้แก่มอเตอร์ กระบอกสูบ เป็นต้น
 - 2) Manipulators เป็นส่วนประกอบเพื่อช่วยเรื่องของการเคลื่อนที่ซึ่งประกอบ ด้วย แขน (Links) และข้อต่อ (Joints)
 - 3) End Effectors เป็นส่วนท้ายสุดของแขนกลไว้ใช้ในการทำงานต่างๆ เช่นหยิบจับสิ่งของ กัด กลึง เชื่อม ช่างงาน เป็นต้น
 - 4) Sensor เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบสถานะว่าตำแหน่ง หรือข้อมูลที่ต้องการได้รับหรือยัง หรือมีค่าเท่าไร เทียบได้กับประสาทสัมผัสของมนุษย์
 - 5) Power Supply เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ของแขนกล ไม่ว่าจะเป็นกระแสไฟฟ้า หรือวาล์วที่ใช้ควบคุมกระบอกสูบ
 - 6) Controller เปรียบเสมือนสมองของมนุษย์ ที่คอยควบคุมขั้นตอนต่างๆ ในการทำงาน ของระบบแขนกล โดยสั่งการไปยังชุดขับเคลื่อนเพื่อให้เป็นไปตามโปรแกรมที่ตั้งไว้
 - 7) Program เป็นการกำหนดขั้นตอนต่างๆ ของการทำงานเพื่อให้ได้งานตามที่ต้องการ
- ในงานวิจัยนี้จะใช้หุ่นยนต์แบบติดตั้งอยู่กับที่ (Fixed Robot) ซึ่งมีการเคลื่อนที่สองแกน คือ แกนระนาบ (แกน X) และแนวระดับ (แกน Z) อีกทั้งยังมีระดับชั้นความเสรี 2 ระดับ (2 Degree of Freedom) และในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงทฤษฎีที่จะนำมาใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

2. ทฤษฎีความนุ่มนวลที่สุด (Minimum Jerk)

หลักการความนุ่มนวลที่สุด (Minimum Jerk) นั้นมีหลักการเริ่มจากระบบชั้นความเสรีเดี่ยว (Single-Stage Systems) และระบบหลายระดับชั้นความเสรี (Multistage Systems) ตามลำดับสัญลักษณ์ที่ใช้แทนแคลคูลัสของฟาริเอชันส์ (Calculus of Variation) ก็คือฟังก์ชันนอล (Functional) เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m, t); i = 1, \dots, n \quad (1)$$

เมื่อ x , u คือตัวแปรสเตตและตัวแปรควบคุมตามลำดับ และ t คือ เวลาในการเคลื่อนที่ โดยให้ $x(t)$ เป็นสถานะเริ่มต้นและ $U(t)$ เป็นฟังก์ชันที่ควบคุม ซึ่งในหลักการความนุ่มนวลที่สุด (Minimum Jerk) นั้นจะกำหนดตำแหน่งและเวลาสุดท้ายของการเคลื่อนที่หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งก็คือ การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ซึ่งอยู่ในรูปของ $x(t_0)$, t_0 เป็นตำแหน่งและเวลาเริ่มต้น $x(t_f)$, t_f เป็นตำแหน่งและเวลาสุดท้าย แต่หลักการความนุ่มนวลที่สุดนั้นอยู่ในรูปของอนุพันธ์อันดับที่ 3 (Third Order) ดังสมการที่ 2

$$\text{Minimum Jerk} = \ddot{x} = \dot{u} \quad (2)$$

หรือ

$$\dot{u} = \ddot{u} \quad (3)$$

จากสมการที่ 1 จะได้ว่า

$$\dot{x}_i = f_i(x_1, \dots, x_{n+m}, \ddot{u}_1, \dots, \ddot{u}_m, t); i = 1, \dots, n+m \quad (4)$$

แต่หลักการความนุ่มนวลที่สุดนี้แบ่งออกเป็นสองวิธีดังนี้

1. ปัญหาความนุ่มนวลที่สุดโดยวิธีทางตรง (Minimum Direct Jerk Problem) Cost Function ของการหาค่าความนุ่มนวลที่สุดโดยวิธีทางตรงกำหนดไว้ดังนี้

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{i=1}^m \ddot{x}_i^2 dt \quad (5)$$

2. ปัญหาความนุ่มนวลที่สุดโดยวิธีทางอ้อม (Minimum Indirect Jerk Problem) Cost Function ของการหาค่าความนุ่มนวลที่สุดโดยวิธีทางอ้อมกำหนดไว้ดังนี้

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \sum_{i=1}^m \ddot{u}_i^2 dt \quad (6)$$

โดยสมการที่ 1 และ 2 นั้นใช้การกำหนด Cost Function และได้ทำการมิไนม์ (Minimized) โดยใช้ แคลคูลัสของพาริเอชันส์ (Calculus of Variations) หาคำตอบของสมการและพบว่าผลลัพธ์ที่ได้ออกมาเหมือนกัน ซึ่งมีผู้ทำวิจัยเปรียบเทียบการหาคำตอบด้วยวิธีทางตรงและทางอ้อมพบว่า

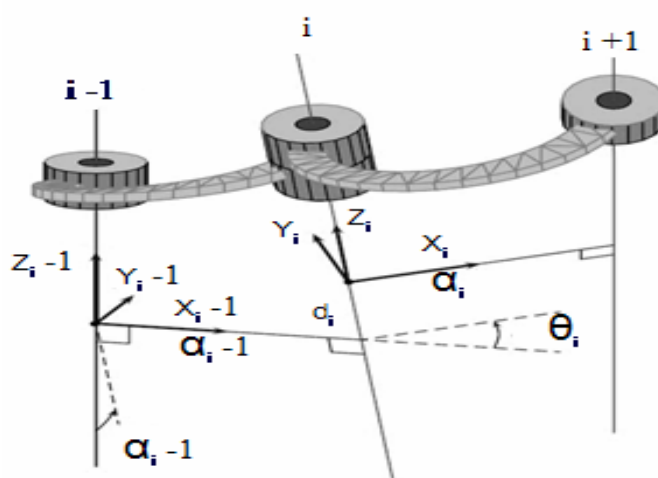
การแก้ปัญหาทั้งสองวิธีนั้นให้คำตอบที่เหมือนกันเพียงแต่ว่าการแก้ปัญหาคำนวณที่น้อยที่สุดด้วยวิธีทางอ้อมนั้นง่ายกว่าในการแก้สมการ แต่อย่างไรก็ตามทั้งสองวิธีจำเป็นต้องทำการกำหนดฟังก์ชันที่จะใช้ในการหาคำนวณความนุ่มนวล ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะขอเสนอเกี่ยวกับหลักการกำหนดค่า D-H parameters เพื่อใช้กำหนดฟังก์ชัน

3. หลักการกำหนด D-H parameters

D-H Parameters ย่อมาจากคำว่า Denavit - Hardenberg Parameters เป็นการสร้างตัวแปรเพื่อนำมาใช้ในการหาสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ซึ่งมีตัวแปรทั้งหมด 4 ตัวได้แก่

1. Link Length (a_i) คือ ระยะทางของ x_i ที่ตั้งฉากระหว่างแกน z_i ถึงแกน z_{i+1}
2. Link Twist (α_i) คือ มุมระหว่าง z_{i-1} และ z_i ที่มองจากหัวลูกศร x_{i-1} เข้าไป
3. Link Offset (d_i) คือ ระยะทางระหว่างแกน a_{i-1} ที่ตัดบนแกน z_i กับแกน a_i ที่ตัดบนแกน z_i
4. Joint Angle (θ_i) คือ มุมระหว่างแกน x_{i-1} กับแกน x_i โดยพิจารณาบนแกน z_i

จากคำอธิบายตัวแปรทั้ง 4 ตัวนั้น สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 แสดงรายละเอียดของตำแหน่งตัวแปรต่างๆ ของ D-H Parameters

1. การหาเวกเตอร์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

หลังจากที่ได้ค่า D-H Parameters แล้วต่อไปทำการหาค่าทรานฟอร์มเมชันเมตริกซ์ (Transformation Matrix: T) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด 4×4 ซึ่งภายในเมตริกซ์นี้ประกอบไปด้วยเมตริกซ์การหมุน และเวกเตอร์การเคลื่อนที่ โดยการระบุค่าต่างๆ ของ D-H Parameters ลงในสมการที่ 7

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

โดย T คือ ทราานฟอร์มเมชันเมตริกซ์ (Transformation Matrix)

i คือ จำนวนแขน (Link)

a_i คือ ความยาวของแขน (Link Length)

θ_i คือ มุมระหว่างแขน (Link Twist)

d_i คือ ระยะเยื้องศูนย์กลางของแขน (Link Offset)

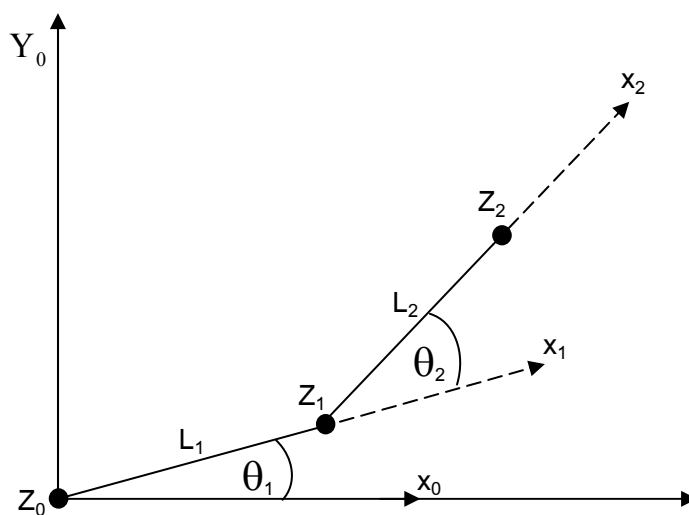
α_i คือ มุมระหว่างข้อต่อ (Joint Angel)

จากสมการที่ 7 จะได้เมตริกซ์การหมุน และเวกเตอร์การเคลื่อนที่ดังสมการที่ 8 และ 9 ตามลำดับ

$$\text{เมตริกซ์การหมุน} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\text{เวกเตอร์การเคลื่อนที่} = \begin{bmatrix} a_i \cos\theta_i \\ a_i \sin\theta_i \\ d_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

หากหุ่นยนต์นั้นมีจำนวนแขน i แขน (Link) จะต้องนำค่าทราานฟอร์มเมชันเมตริกซ์ (T) มาคูณกันทางเมตริกซ์ เช่น หุ่นยนต์มีแขน 2 แขน ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 แสดงตัวอย่างแบบจำลองของหุ่นยนต์ 2 แขน

จากภาพประกอบ 2 สามารถหาค่า D-H Parameters โดยพิจารณาทีละแขน ได้ดังนี้

แขน L_1 มี D-H Parameters 4 ตัว ดังนี้

a_i มีค่า L_1

θ_i มีค่า $\theta_1(t)$

d_i มีค่า 0

α_i มีค่า 0

แขน L_2 มี D-H Parameters 4 ตัว ดังนี้

a_i มีค่า L_2

θ_i มีค่า $\theta_2(t)$

d_i มีค่า 0

α_i มีค่า 0

หลังจากกำหนดค่า D-H Parameters เสร็จแล้ว ต่อไปเป็นการหาค่าทราานฟอร์มเมชันเมตริกซ์ (Transformation Matrix) ดังนี้

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & L_1\cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & L_1\sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$T_1^2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & L_2\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & L_2\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

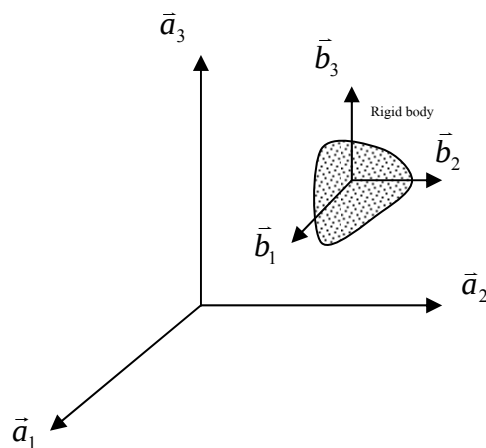
$$T_0^2 = T_0^1 \cdot T_1^2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & L_1\cos\theta_1 + L_2\cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & L_1\sin\theta_1 + L_2\sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

จากสมการที่ 12 จะได้เวกเตอร์การเคลื่อนที่ (Translation Vector) ของหุ่นยนต์ตามแนวกัด xyz ได้ดังนี้

1. แกน x มีเวกเตอร์การเคลื่อนที่ คือ $L_1\cos\theta_1 + L_2\cos(\theta_1 + \theta_2)$
2. แกน y มีเวกเตอร์การเคลื่อนที่ คือ $L_1\sin\theta_1 + L_2\sin(\theta_1 + \theta_2)$
3. แกน z มีเวกเตอร์การเคลื่อนที่ คือ 0 (ไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน z)

เท่านี้ก็ได้เวกเตอร์การเคลื่อนที่ของแกนต่างๆ ของหุ่นยนต์ ในหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงวิธีการหาค่าความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์

2. ความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity)



ภาพประกอบ 8 แสดงการเคลื่อนที่ของความเร็วเชิงมุม

กำหนดให้ b_1, b_2, b_3 เป็นแนวแกนอ้างอิงของวัตถุตามกฎมือขวาซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน กำหนดหน่วยของเวกเตอร์วัตถุ B เคลื่อนที่โดยอ้างอิงเฟรม A ความเร็วเชิงมุม B ในเฟรม A กำหนดการแทนค่าเป็น ${}^A\omega^B$ ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

ปริมาณเวกเตอร์เขียนอยู่ในรูป ω

$${}^A\omega^B \triangleq \frac{{}^AdB_2}{dt} \cdot b_3 + b_2 \frac{{}^Adb_3}{dt} \cdot b_1 + b_3 \frac{{}^Adb_1}{dt} \cdot b_2 \quad (13)$$

และลดรูปของสมการในแบบสมการ Differential Equations

$$\begin{aligned} {}^A\omega^B \triangleq \dot{b}_2 \times b_3 + b_2 \dot{b}_3 \times b_1 + b_3 \dot{b}_1 \times b_2 \\ {}^A\omega^B \times b_1 = b_2 \times b_1 \dot{b}_3 \cdot b_1 + b_3 \times b_1 \dot{b}_1 \cdot b_2 \\ {}^A\omega^B \times b_1 = -b_3 \dot{b}_3 \cdot b_1 + b_2 \dot{b}_1 \cdot b_2 \end{aligned} \quad (14)$$

Differentiation เทียบกับเวลา $b_1 \cdot b_1 = 1$ และ $b_3 \cdot b_1 = 0$ จะได้ว่า

$$\dot{b}_1 \cdot b_1 = 0 \quad \dot{b}_3 \cdot b_1 = -\dot{b}_1 \cdot b_3 \quad (15)$$

และเขียนสมการใหม่ได้

$${}^A\omega^B \times b_1 = b_1 \dot{b}_1 \cdot b_1 + b_2 \dot{b}_1 \cdot b_2 + b_3 \dot{b}_1 \cdot b_3 \quad (16)$$

จากสมการของกฎมือขวาทำให้สามารถเขียนสมการใหม่ได้ว่า

$${}^A\omega^B \times b_1 = \dot{b}_1 \quad {}^A\omega^B \times b_2 = \dot{b}_2 \quad {}^A\omega^B \times b_3 = \dot{b}_3 \quad (17)$$

และเวกเตอร์ใดๆในเฟรม B กำหนดให้ β เป็น ความเร็วเชิงมุมเขียนสมการได้

$$\begin{aligned}
\beta &= \beta_1 b_1 + \beta_2 b_2 + \beta_3 b_3 \\
\beta_1, \beta_2, \beta_3 &\text{ คงที่} \\
\dot{\beta} &= \dot{\beta}_1 b_1 + \dot{\beta}_2 b_2 + \dot{\beta}_3 b_3 \\
\dot{\beta}_1 &= \beta_1 {}^A\omega^B \times b_1 + \beta_2 {}^A\omega^B \times b_2 + \beta_3 {}^A\omega^B \times b_3 \\
&= {}^A\omega^B \times (\beta_1 b_1 + \beta_2 b_2 + \beta_3 b_3) = {}^A\omega^B \times \beta
\end{aligned} \tag{18}$$

3. ความเร่งเชิงมุม (Angular Acceleration)

ความเร่งเชิงมุมสามารถทำให้อยู่ในรูปของ ${}^A\alpha^B$ ซึ่งหมายความว่าความเร่งของวัตถุ B อ้างอิงจากเฟรม A

โดยที่

$${}^A\alpha^B = \frac{{}^A d {}^A\omega^B}{dt} = \frac{{}^B d {}^A\omega^B}{dt} \tag{19}$$

แต่

$${}^A\alpha^D \neq {}^A\alpha^B + {}^B\alpha^C + {}^C\alpha^D \tag{20}$$

สามารถเขียนสมการได้

$${}^A\omega^{A_1} = \dot{q}_1 k_1 \tag{21}$$

$${}^A\omega^{A_2} = \dot{q}_2 k_2 \tag{22}$$

$${}^{A_2}\omega^B = \dot{q}_3 k_3 \tag{23}$$

$${}^A\alpha^B = \frac{{}^A d}{dt} ({}^A\omega^{A_1} + {}^{A_1}\omega^{A_2} + {}^{A_2}\omega^B) \tag{24}$$

$${}^A\alpha^B = \frac{{}^A d}{dt} (\dot{q}_1 k_1 + \dot{q}_2 k_2 + \dot{q}_3 k_3) \tag{25}$$

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review)

สงบ ยอดสง่า (2550) ศึกษาแนวทางใหม่ในการหาคำตอบของการใช้พลังงานน้อยที่สุด ประยุกต์ใช้กับแขนกลที่ใช้กันรยยนต์แบบอัตโนมัติ โดยวิจัยเพื่อศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ของแขนกลที่ใช้กันรยยนต์อัตโนมัติที่มีระดับขั้นความเร็วหนึ่งค่าเพื่อหาสมการการเคลื่อนที่โดยใช้ทฤษฎีของระบบหุ่นยนต์พร้อมทั้งเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และในการวิจัยนี้ได้สร้างแขนกลสำหรับกันรยยนต์แบบอัตโนมัติ 1 ชุด เพื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบเปรียบเทียบกับค่าพลังงานที่ใช้ในการยกขึ้นลง ของแขนกลที่แปรผันตามเวลาระหว่างค่าที่ได้ทางทฤษฎีกับค่าที่ได้จากการทดสอบ อีกทั้งยังทำการ

หาสมการการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นที่มีระดับชั้นความเร็วหนึ่งค่า โดยใช้สมการของออยเลอร์-ลากรางจ์ (Euler-Lagrange Equation) ทำให้สามารถวิเคราะห์การทำงานของเครื่องกั้นรถยนต์แบบอัตโนมัติได้ และจากการเปรียบเทียบผลที่ได้ทั้งจากทางทฤษฎีกับผลจากการทดลองพบว่าที่เวลาและเงื่อนไขเดียวกัน ความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุม จากการประยุกต์ใช้หลักการใช้พลังงานน้อยที่สุดจะมีวิธีการเคลื่อนที่ที่ราบเรียบกว่า รวมถึงค่าแรงบิดที่จุดหมุนของข้อต่อจะมีค่าน้อยกว่า ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าเมื่อใช้ทฤษฎีของหุ่นยนต์ซึ่งสามารถปรับค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อลดขนาดของมอเตอร์และสามารถประหยัดพลังงานได้

ปณณัฐ สารลักษณะ (2550) ศึกษาการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้พลังงานน้อยที่สุดกับการใช้ความนิ่มนวลที่สุดในระบบพลศาสตร์ (The Comparison of Using Minimum Energy and minimum Jerk in Dynamic System) เป็นการนำเสนอปัญหาในการหาค่าความเหมาะสมสูงสุดของระบบพลศาสตร์ในรูปแบบของความต้องการความนิ่มนวลของระบบตลอดการทำงาน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการกำหนดฟังก์ชันของค่าความเหมาะสมสูงสุดของระบบพลศาสตร์นั้นนิยมใช้ พลังงาน เวลา ความเร็ว และระยะขจัด แต่ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอความนิ่มนวลของระบบเนื่องจากเป็นที่ทราบกันดีว่าในการทำงานของระบบพลศาสตร์นั้นความนิ่มนวลเป็นสิ่งที่ต้องการให้เกิดขึ้นในหลายระดับ เช่น ความนิ่มนวลในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ จากการวิจัยสรุปได้ว่าคำตอบที่ได้มีความใกล้เคียงกับการใช้พลังงานน้อยที่สุดเป็นฟังก์ชันของค่าความเหมาะสมสูงสุดซึ่งมีผลดีต่อการวิเคราะห์ทางตัวเลขและนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม คือได้ทั้งความนิ่มนวลและประหยัดพลังงาน

สุวิมล เสนิงค์ ณ อยุธยา (2548) ศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างผ้าคลุมรถยนต์อัตโนมัติที่ใช้การออกแบบจากทฤษฎีของระบบหุ่นยนต์โดยอาศัยกลไกการทำงานของแขนกลสองตำแหน่งซึ่งเคลื่อนที่ทั้งแบบหมุนและแบบเชิงเส้นเพื่อให้ได้สมการการเคลื่อนที่ของผ้าคลุมรถยนต์อัตโนมัติซึ่งอธิบายโดยสมการออยเลอร์-ลากรางจ์ (Euler-Lagrange Equation) เพื่อนำค่าแรงบิดและแรงภายนอกของโมเมนต์มาวิเคราะห์การทำงานของแขนกลทำให้ทราบค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มอเตอร์สามารถทำงานได้ โดยการพัฒนาโปรแกรมทางการควบคุมที่ได้ผลสูงสุดทางระบบพลศาสตร์โดยทั่วไปจำเป็นต้องกำหนดเป้าหมายที่ต้องการให้ระบบเสียก่อนและรวบรวมเงื่อนไขต่างๆ ของระบบในสถานะ หรือ ณ เวลาที่สนใจ เช่นเวลาเริ่มต้น และเวลาสุดท้าย เพื่อนำมาพิจารณาพร้อมกันในการหาคำตอบ ซึ่งวิธีการหาคำตอบสามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับรูปแบบของปัญหาว่าวิธีใดที่จะนำมาใช้ในการแก้ปัญหา แต่โดยทั่วไปจะนำหลักการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการหาค่าความเหมาะสมที่สุดและใช้ร่วมกับการแก้ปัญหาของโปรแกรมที่ไม่เป็นเชิงเส้น แต่เนื่องจากปัญหาเป็นแบบพารามิเตอร์ที่ขึ้นกับเวลาจึงต้องทำการแปลงปัญหาทางออปติไมเซชันผ่านวิธีทางแคลคูลัสของความแปรปรวน ซึ่งเป็นวิธีที่ช่วยให้ปัญหาถูกแปลงจากปัญหาทางการควบคุมที่ได้ผลสูงสุดทางระบบพลศาสตร์เป็นปัญหาทางการ

ควบคุมที่ได้ผลสูงสุดของระบบสถิติศาสตร์โดยจากการทดสอบด้วยโปรแกรมที่มีความแม่นยำและความเร็วในการหาคำตอบ ซึ่งสามารถจำลองโครงสร้างการทำงานเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบของจริงต่อไป

ทวิวัชร วีระเกล้า (2547) ทำการศึกษาปัญหาเรื่องความเหมาะสมสูงสุดของการใช้เวลาน้อยที่สุดของการเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้น (The Minimum Time Problem of Linear Dynamic Optimization) โดยใช้หลายวิธีในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขซึ่งขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของปัญหาเรื่องการใช้เวลาน้อยที่สุด (Minimum Time Problem) ซึ่งมีแนวคิดคือการพิจารณาปัญหาการใช้เวลาที่น้อยที่สุดมีความคล้ายกับปัญหาการใช้พลังงานสูงสุดที่ไม่คำนึงถึงเวลาสุดท้าย (Maximum Energy With free Final Time Problem) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงรายละเอียดความเหมือนกันระหว่างปัญหาทั้งสองข้อ คือ ปัญหาพลังงานสูงสุดที่ไม่คำนึงถึงเวลาสุดท้ายและปัญหาเวลาที่น้อยที่สุด สำหรับระบบที่เป็นเชิงเส้นแต่การพิจารณาโดยวิธีการใช้พลังงานสูงสุดที่ไม่คำนึงถึงเวลาสุดท้ายมีข้อดีกว่า

เอกราวอล (Agrawal. (2001: 228 – 236) ศึกษากระบวนการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีไฮเออร์ ออเดอร์ไดนามิก (Fabien New Computation Framework fro Trajectory Optimization of Higher – Order Dynamic System, AIAA Journal of Guidance Control and Dynamic Vol.24 No.2 pp.228 – 236,) การใช้ทฤษฎีของระบบวิเคราะห์ปัญหาของการหาค่าต่ำสุดและสูงสุดนั้นเป็นที่ยอมรับแล้วว่า ระบบการเคลื่อนที่ที่อยู่ในรูปอนุพันธ์อันดับสูงมีข้อได้เปรียบเป็นอย่างมากในเรื่องของการคำนวณเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเคลื่อนที่ที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งโดยเฉพาะสมการการเคลื่อนที่ทางด้านวิศวกรรมเครื่องกลจะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์อันดับที่สองเสมอ อันเนื่องมาจากการเป็นกรใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำเสนอข้อมูลเปรียบเทียบอย่างชัดเจนในการคำนวณระหว่างสมการการเคลื่อนที่ที่อยู่ในรูปสมการอันดับสูง และ สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง การที่จะเปรียบเทียบได้นั้นผู้วิจัยได้สร้างซอฟต์แวร์ขึ้นด้วยวิธีทางตรงและทางอ้อมเพื่อสามารถยืนยันได้ว่าไม่ว่าสมการการเคลื่อนที่จะอยู่ในรูปแบบใดก็สามารถที่จะใช้โปรแกรมเดียวกันนี้หาคำตอบเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบได้

เอกราวอล (Agrawal. 1998: 771-777) ศึกษาและออกแบบหุ่นยนต์ด้วยวิธีการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่สุด (Designing Robot for Optimal Performance During Repetitive Motion, IEEE Transaction on Robotics and Automation, No.14 Vol.5 pp.771-777,) โดยศึกษาการทำงานแบบซ้ำๆของหุ่นยนต์และสิ่งที่ส่งผลกระทบกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์นั่นก็คือ มวลและความยาวของแขนหุ่นยนต์ เนื่องจากมีส่วนเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงานที่ใช้ในหนึ่งรอบการทำงาน ดังนั้นจึงได้เสนอวิธีการหาค่าตัวแปรต่างๆเพื่อให้ได้ผลของความเหมาะสมสูงสุดระหว่างการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุด

หนึ่งในระยะเวลาที่กำหนด โดยไม่สนใจในส่วนตัวแปรลากรางจ์ ซึ่งจากผลงานวิจัยนี้พบว่าค่าตัวแปรของระบบหุ่นยนต์จะถูกปรับเปลี่ยนในขณะที่หุ่นยนต์กำลังเคลื่อนที่

จิโวนานี โทนีตี และ อันโตนิโอ บิคชี (Giovanni Tonietti; & Antonio Bicchi. 2002: 1992-1997) ศึกษาเรื่องการประยุกต์ใช้การควบคุมตำแหน่งและการควบคุมความล้าเพื่อให้แขนกลมีความนิ่มนวล (Adaptive Simultaneous Position and Stiffness Control for a Soft Robot Arm, Centro "E. Piaggio", University of Pisa, Italy, Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and System EPFL, Lausanne, Switzerland – October 2002 PP.1992 – 1997) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบระบบการควบคุมความล้า (Stiffness Control) กับการควบคุมด้วย PID (PID Control) ซึ่งสนใจว่าวิธีการควบคุมแบบใดให้ความนิ่มนวลมากกว่ากัน

โคอิชิโร เดกูชิ, ฮิโรนาริ ซากุไร ; และ ชุน อุซิดะ (Koichiro Deguchi, Hironari Sakurai; & Shun Ushida. 2008: 3034-3039) ศึกษาเรื่อง การทำให้วัตถุทรงกลมไปยังเป้าหมายในเวลาที่กำหนดโดยใช้แขนกล (A Goal Oriented Just-In-Time Visual Servoing for Ball Catching Robot Arm, Tohoku University, Japan, 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and System Acropolis Convention center Nice, France, Sept, 22-26, 2008 pp. 3034 – 3039) ศึกษาเรื่องการควบคุมด้วยภาพ (Visual Control) โดยควบคุมให้แขนกลพาวัตถุทรงกลมไปยังเป้าหมายในเวลาที่กำหนดมีส่วนที่ทำการศึกษา 3 ส่วนด้วยกันคือ 1) ใช้การควบคุมแบบ 3 มิติ (3D) โดยพัฒนามาจากการควบคุมแบบ 2 มิติ (2D), 2) การควบคุมการเคลื่อนที่แบบ 2 มิติ (2D) โดยเปรียบเทียบแขนกลสองตัวที่ทำงานพร้อมกัน 3) เปรียบเทียบการควบคุมการเคลื่อนที่แบบ 3 มิติ กับการควบคุมการเคลื่อนที่แบบ 2 มิติ โดยกำหนดเวลาในการเคลื่อนที่เท่ากัน ซึ่งใช้หลักการของจาโคเบีย (Jacobian) ในการควบคุมการเคลื่อนที่แบบ 3 มิติ และใช้สายตากับกล้องเป็นอุปกรณ์เปรียบเทียบ

โคดาบันเดฮูลู (Khodabandehloo. 2009) ศึกษาเรื่องการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของหุ่นยนต์แบบสองแขน (Performance Analysis of a Two Arm Robot, R.O.Buckingham, AMIEE, P.N.Bratt, AMIMEchE, MIEE, IEEE) โดยศึกษาประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในพื้นที่การทำงาน (Workspace) เพื่อใช้ในการออกแบบ ในงานวิจัยนี้จะคำนึงถึงผลกระทบที่มีต่อประสิทธิภาพในการทำงานของแขนกล เช่น ข้อต่อต่างๆที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ที่ผิดปกติ สาเหตุที่ทำการวิจัยในหัวข้อนี้คือต้องการลดความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ลง และยังคำนึงถึงการทำงานขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงาน

ในงานวิจัยนี้จะนำหลักการควบคุมหุ่นยนต์โดยใช้หลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุด รวมถึงนำหลักการ D-H Parameters มาใช้ในการกำหนดสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลสองแขนกันรยยนต์เพื่อหาค่าความเร็วเชิงมุม ค่าความเร่งเชิงมุมที่ส่งผลต่อแรงบิดของมอเตอร์ จากนั้นทำการแก้ปัญหาด้วย

วิธีการทางคณิตศาสตร์และนำค่าตัวแปรที่ได้นั้นมาเปรียบเทียบกับการวัดจริงเพื่อลดการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

บทที่ 3

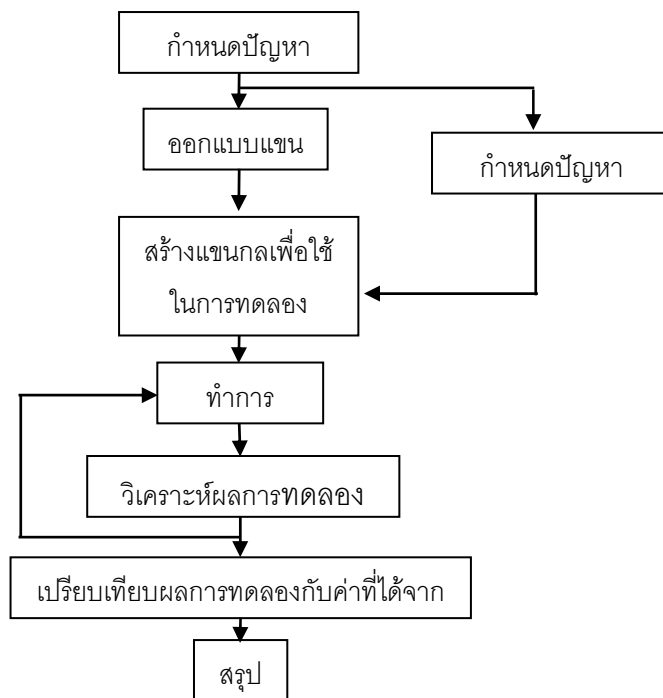
วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. ขั้นตอนดำเนินการวิจัย
2. แนวทางหรือหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการแก้ปัญหา
3. การออกแบบแผนกลสองแขนงกันรยนต์ที่ควบคุมโดยใช้หลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุด
4. สมการการเคลื่อนที่ของแผนกลสองแขนงกันรยนต์ที่ควบคุมโดยใช้หลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุด
5. ขั้นตอนการบันทึกค่าความเร็วเชิงมุม, ความเร่งเชิงมุมและแรงบิดของมอเตอร์จากการวัดจริง

1. ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

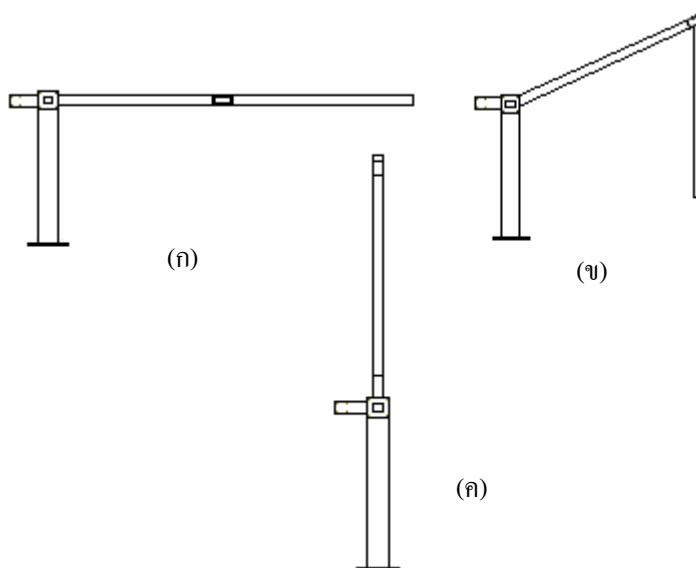
ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยการออกแบบและสร้างแผนกลสองแขนงกันรยนต์ที่ควบคุมโดยใช้หลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุดได้ทำตามขั้นตอนดังนี้



ภาพประกอบ 9 แสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

2. แนวทางหรือหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการแก้ปัญหา

หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาและควบคุมการทำงานของแขนกลสามแขนกันรยยนต์นั้น ผู้ทำวิจัยจะนำหลักการของ Denavit Hartenberg Parameter (D-H Parameter) มาใช้ในการกำหนด ตำแหน่งและทิศทางในการเคลื่อนที่ของแขนกลกันรยยนต์เพื่อช่วยในการวิเคราะห์ด้วยกระบวนการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ทราบถึงค่าความเร่งเชิงมุม และแรงบิดที่จะเกิดขึ้นในขณะที่มีการเคลื่อนที่ใน ตำแหน่งต่างๆ



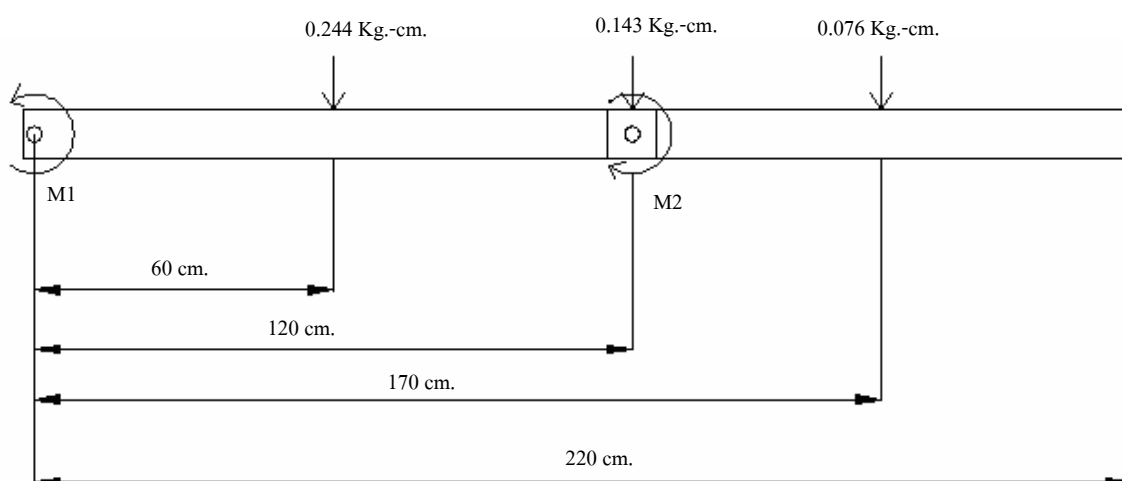
ภาพประกอบ 10 แสดงแบบจำลองลักษณะการทำงานของแขนกลสองแขนกันรยยนต์โดยที่ ก คือ สภาวะเริ่มต้นของแขนกลกันรยยนต์ (0°) ข คือสภาวะที่แขนกลกำลังเคลื่อนที่ ค คือสภาวะที่ แขนกลเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งสุดท้าย (90°)

จากนั้นนำค่าความเร่งเชิงมุมและแรงบิดที่ได้ มาใช้ในหลักการนุ่มนวลที่สุดที่เขียนอยู่รูป ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 6 โดยที่ J คือ ความนุ่มนวลที่สุดที่ต้องควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) t คือเวลาที่แขนกลกันรยยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง 0° ถึงตำแหน่ง 90° และค่า $\ddot{u}$ คือค่า แรงบิดป้อนเข้าซึ่งจะได้จากการแก้สมการการเคลื่อนที่ของแขนกลสองแขนกันรยยนต์ แต่ต้องกำหนด เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ซึ่งเป็นเงื่อนไขในการแก้ปัญหาด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ จากนั้นนำค่าตัวแปรต่างๆที่ได้จากการคำนวณมากำหนดให้กับอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของแขนกล สองแขนกันรยยนต์ที่ออกแบบไว้ จากนั้นจึงเริ่มทำการทดลองและสรุปผลการทดลอง

3. การออกแบบและสร้างแขนกลสองแขนกัณรยยนต์ที่ควบคุมโดยใช้หลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุด (Design and Fabrication Two Arm Robot Model

Application for Automatic Barrier Gate System Minimum Jerk Control)

ในการออกแบบแขนกลสองแขนกัณรยยนต์ที่ควบคุมโดยใช้หลักการนุ่มนวลที่สุดนั้น ได้ทำการออกแบบให้สอดคล้องกับอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้วนั้นคือ มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) และ เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) โดยที่มีความยาวรวมของแขนกลกัณรยยนต์ 220 cm. ดังนั้นเมื่อทำการคำนวณหาน้ำหนักของแขนแต่ละแขนจะได้ว่า



ภาพประกอบ 11 แสดงตำแหน่งของน้ำหนักแขนกลและน้ำหนักของมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่กระทำกับแขน

เมื่อ มอเตอร์ตัวที่ 1 มีแรงบิด 30 Kg.-cm. โดยใช้กระแสไฟ 2 แอมป์ (A) และแรงดัน 12 โวลต์ (V) มอเตอร์ตัวที่ 2 มีแรงบิด 15 Kg.-cm. โดยใช้กระแสไฟ 200 มิลลิแอมป์ (mA) และแรงดัน 6 โวลต์ (V)

ดังนั้นเมื่อทำการหาโมเมนต์ของตำแหน่งที่ 1 (M1) และ 2 (M2) จะได้ว่า

$$M1 = (0.224\text{kg.} * 60\text{cm.}) + (0.143\text{kg.} * 120\text{cm.}) + (0.076\text{kg.} * 170\text{cm.})$$

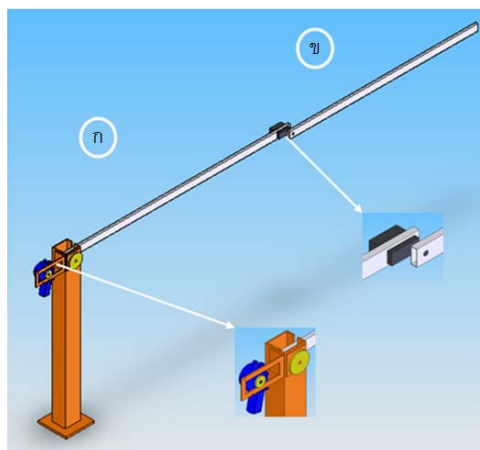
$$M1 = 44.72 \approx 45 \text{ kg.-cm.}$$

$$M2 = (0.076\text{kg.} * 50\text{cm.})$$

$$M2 = 3.8 \approx 4 \text{ kg.-cm.}$$

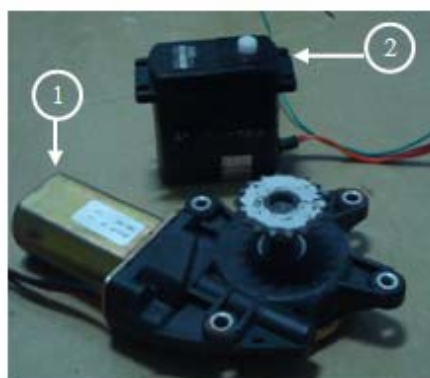
ซึ่งพบว่าน้ำหนักของแขนและมอเตอร์ตัวที่ 2 ทำให้เกิดโมเมนต์ที่จุด 1 มากกว่าขนาดของมอเตอร์กระแสตรงที่มีอยู่ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้แหล่งจ่ายไฟที่มี แรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ และให้กระแส 7 แอมป์ ส่วนน้ำหนักของแขนที่ 2 นั้นทำให้เกิดโมเมนต์ที่ไม่เกินขนาดของเซอร์โวมอเตอร์

1. ส่วนประกอบของแขนกลก้านรถยนต์ ประกอบด้วยแขนที่นำมาต่อเข้าด้วยกันโดยใช้ชุดเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) เป็นตัวเชื่อมต่อซึ่งทั้งสองแขนทำจากอะลูมิเนียมกล่อง โดยแขนที่ 1 มีขนาดความหนา 1.35 cm. ความกว้าง 3.75 cm. ยาว 120 cm. ซึ่งมีน้ำหนัก 0.244 kg. แขนที่ 2 มีขนาดความหนา 1.35 cm. ความกว้าง 3.75 cm. ยาว 100 cm. ซึ่งมีน้ำหนัก 0.076 kg.



ภาพประกอบ 12 แสดงลักษณะของแขนทั้ง 2 แขน

2. มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) และ เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) ใช้เป็นชุดขับเคลื่อนซึ่งแขนกลก้านรถแบบสองแขนนี้จะใช้ DC มอเตอร์ 1 ตัว แรงบิด 30 kg.-cm. ความเร็วรอบ 100 RPM และเซอร์โวมอเตอร์จำนวน 1 ตัว มีแรงบิด (Torque) ขนาด 15 kg.- cm. ซึ่งมีขนาด กว้าง 3.2 cm. ยาว 6.3 cm. สูง 6.16 cm. มีน้ำหนัก 0.1424 kg. ใช้ไฟขนาด 6 v.



ภาพประกอบ 13 แสดงลักษณะของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย โดยที่ 1 เป็นมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) 2 เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor)

3. อุปกรณ์ส่งกำลัง ประกอบด้วยเฟืองขับขนาดใหญ่มี 32 ฟัน เฟืองตามขนาดเล็กมี 16 ฟัน และโซ่ส่งกำลัง 1 เส้น



ภาพประกอบ 14 แสดงอุปกรณ์ส่งกำลัง

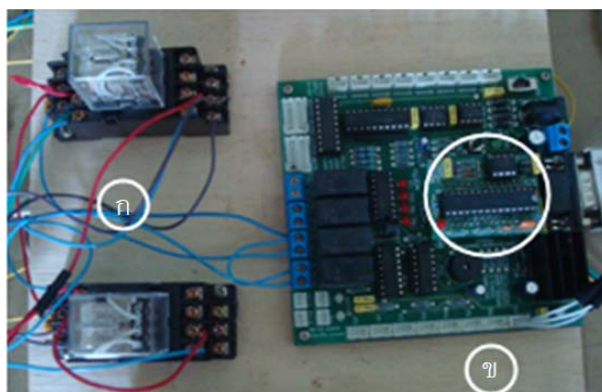
4. ชุดแท่นแขนกลซึ่งทำจากเหล็กกล่อง 7.5 cm. x 7.5 cm x 85 cm.



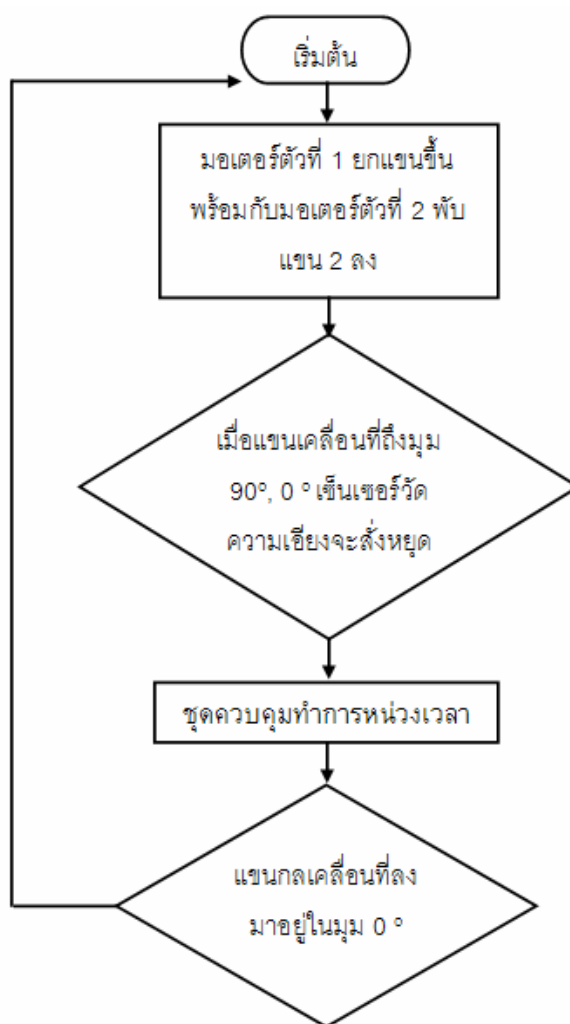
ภาพประกอบ 15 แสดงลักษณะของแขนกลสองแขนกันรถยนต์ โดย ก คือแขนที่ 1 มีความยาว 120cm. ข คือแขนที่ 2 มีความยาว 100cm.

5. แผนวงจรควบคุมการทำงานของแขนกล

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีชื่อเรียกว่า เบสิกสเตมป์ 2SX ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์สำเร็จรูป ใช้ภาษาพีเบสิก (PBASIC) ในการพัฒนาโปรแกรมเพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก [11] ซึ่งมีลักษณะดังภาพประกอบ 16 และมีขั้นตอนการทำงานดังภาพประกอบ 17

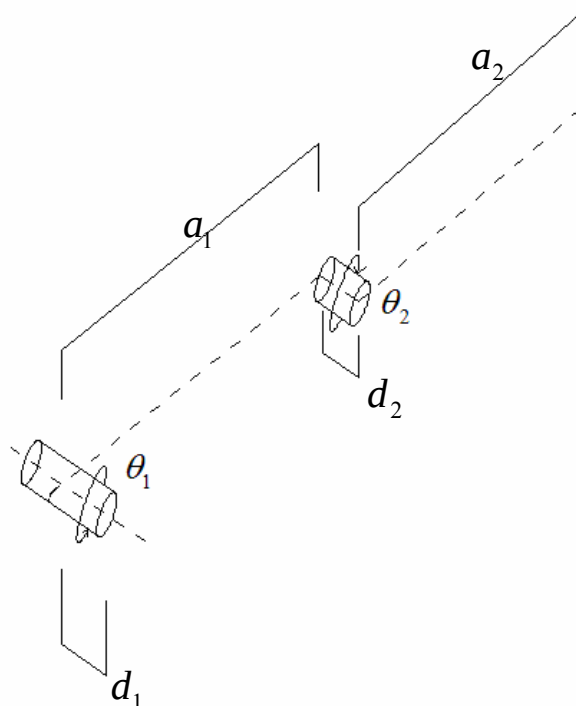


ภาพประกอบ 16 แสดงลักษณะการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ โดย ก เป็น รีเลย์สำหรับการสับการหมุนของมอเตอร์, ข เป็นลักษณะของเบสิกแพลตฟอร์ม 2SX



ภาพประกอบ 17 แสดงลักษณะของการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแขนกล

4. การหาสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลสองแขนกันรถยนต์ที่ควบคุมโดยใช้หลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุดโดยใช้โปรแกรม MATLAB



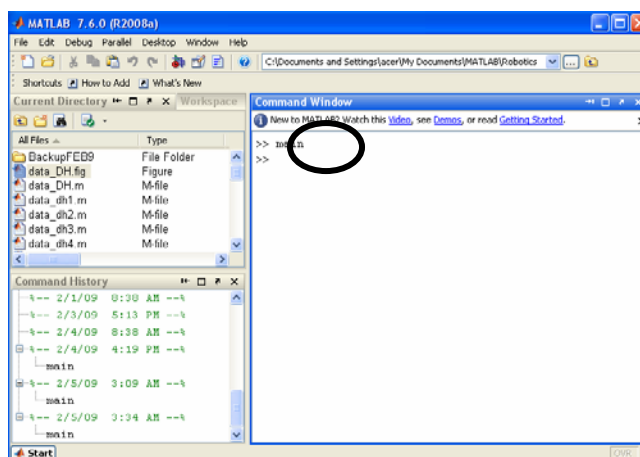
ภาพประกอบ 18 แสดงแบบจำลองการเคลื่อนที่

ตาราง 1 แสดงตาราง DH-Parameter ของแขนกล

i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	1.2 m	0	0.08 m	$x_1(t)$
2	1 m	0	0.034 m	$x_2(t)$

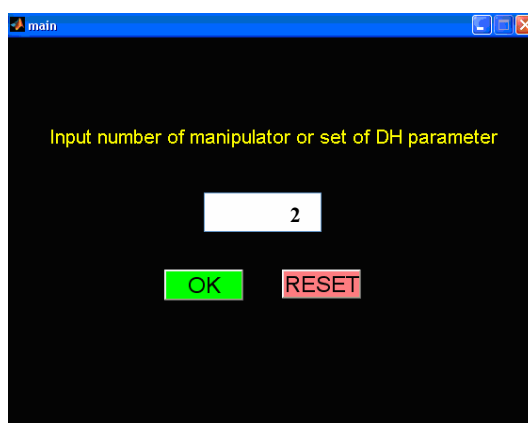
จากนั้นนำค่า DH-Parameter มาทำการหาสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยการหาทรานส์ฟอร์มเมชันเมตริกซ์ (Transformation Matrix) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมกราฟิกสำหรับเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน และมีขั้นตอนดังนี้ [2]

1. นำไฟล์ที่ชื่อว่า Robotic มาวางไว้ในโฟลเดอร์ MATLAB หลังจากนั้นเปิดโปรแกรม MATLAB และ ดับเบิลคลิกในโฟลเดอร์ Robotic ที่แสดงอยู่ในหน้าต่าง All Files แล้วพิมพ์คำสั่ง "main" บนหน้าต่าง Command Window จากนั้นกด Enter



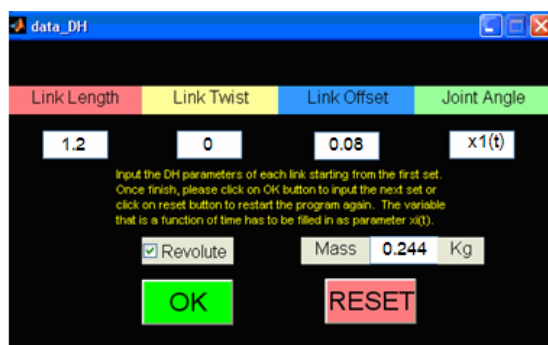
ภาพประกอบ 19 แสดงหน้าต่างโปรแกรม MATLAB

2. หลังจากนั้นโปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง main สำหรับการป้อนจำนวนแขนของหุ่นยนต์ (Robot)



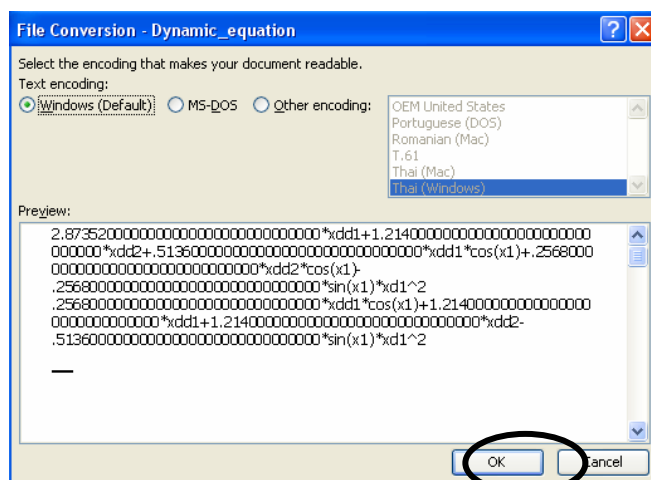
ภาพประกอบ 20 แสดงหน้าต่าง main สำหรับใส่จำนวนแขน

3. เมื่อใส่จำนวนแขนเรียบร้อยแล้วให้ทำการเลือกที่ปุ่ม OK โปรแกรมจะเข้าสู่หน้าต่างของ data-DH ซึ่งมีไว้สำหรับเติมข้อมูลของ DH-Parameter คือข้อมูลของความยาวแขน (Link Length), ข้อมูลของ(Link Twist), ระยะเยื้องศูนย์ (Link Offset), มุมระหว่างข้อต่อ (Joint Angle) และขนาดของมวลของแขน เมื่อทำการใส่ข้อมูลเรียบร้อยแล้วให้เลือก OK โปรแกรมจะเข้าสู่หน้าต่างของแขนต่อไปให้ทำซ้ำ



ภาพประกอบ 21 แสดงหน้าต่าง data-DH

4. เมื่อทำการใส่ข้อมูลเรียบร้อยแล้วโปรแกรมจะเข้าสู่หน้าต่าง gravity ให้ทำการเติมข้อมูลดังนี้ $x = 0$, $y = 0$, $z = -1$ ที่ z เป็น -1 เนื่องจากเราตั้งแกน z มีทิศทางชี้ขึ้นแต่ค่าแรงโน้มถ่วงมีทิศทางพุ่งลง เมื่อเติมข้อมูลเรียบร้อยแล้วให้เลือก OK โปรแกรมจะทำการประมวลผลและสรุปให้อยู่ในรูปของสมการซึ่งจัดเก็บไฟล์เป็น Microsoft Word ซึ่งอยู่ในโฟลเดอร์ Robotic



ภาพประกอบ 22 แสดงหน้าต่าง File Conversion-Dynamic equation

5. เมื่อเข้าสู่หน้าต่างของโปรแกรม Microsoft word และจะเห็นว่าเมื่อจบหนึ่งสมการ โปรแกรมจะทำการขึ้นบรรทัดใหม่ให้ซึ่งง่ายต่อการแยกแต่ละสมการ

สมการที่ได้นั้นเป็นสมการการเคลื่อนที่ (Dynamic-Equation) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการ Differential Equation ซึ่งในงานวิจัยนี้มีสมการการเคลื่อนที่ในรูปของตำแหน่งมวล (point mass) สอง สมการคือ

สมการที่ 1

$$u_1 = (0.136*\ddot{x}_1*\cos(\theta_2)) + (0.2568*\ddot{x}_1*\cos(\theta_2)) + (2.87352*\ddot{x}_1) + (1.214*\ddot{x}_2) - (0.2568*\sin(\theta_2)*\dot{x}_2*(2*\dot{x}_1+\dot{x}_2)) \quad (26)$$

สมการที่ 2

$$u_2 = (0.2568*\ddot{x}_1*\cos(\theta_2)) + (1.214*\ddot{x}_1) + (1.214*\ddot{x}_2) + [(0.2568*\sin(\theta_2))*((-2*\dot{x}_1*\dot{x}_2)-(\dot{x}_1^2+\dot{x}_2^2))] \quad (27)$$

จากนั้นทำการ Differential Equation หนึ่งครั้งเพื่อให้สมการอยู่ในรูปของความนุ่มนวลที่สุด (Minimum Jerk) ซึ่งทำให้ได้อีกสองสมการใหม่คือ

สมการที่ 3

$$\begin{aligned} \tilde{u}_1 = & [-0.5136*\sin(\theta_2)*\ddot{x}_1] + [0.5136*\cos(\theta_2)*\ddot{x}_1] - [0.2568*\sin(\theta_2)*\ddot{x}_2] \\ & + [0.2568*\cos(\theta_2)*\ddot{x}_2] + (2.87352*\ddot{x}_1) + (1.214*\ddot{x}_2) \\ & - [0.5136*\cos(\theta_2)*\dot{x}_1*\dot{x}_2] - [0.5136*\sin(\theta_2)*\ddot{x}_1*\dot{x}_2] \\ & - [0.5136*\sin(\theta_2)*\dot{x}_1*\ddot{x}_2] - [0.2568*\cos(\theta_2)*\dot{x}_2^2] \\ & - [0.5136*\sin(\theta_2)*\ddot{x}_2] \end{aligned} \quad (28)$$

สมการที่ 4

$$\begin{aligned} \tilde{u}_2 = & [-0.2568*\sin(\theta_2)*\ddot{x}_1] + [0.2568*\cos(\theta_2)*\ddot{x}_1] + (1.214*\ddot{x}_1) + (1.214*\ddot{x}_2) \\ & + [0.5136*\cos(\theta_2)*\dot{x}_1*\dot{x}_2] + [0.5136*\sin(\theta_2)*\ddot{x}_1*\dot{x}_2] \\ & + [0.5136*\sin(\theta_2)*\dot{x}_1*\ddot{x}_2] - [0.2568*\cos(\theta_2)*\dot{x}_2^2] \\ & - [0.5136*\sin(\theta_2)*\ddot{x}_2] + [0.2568*\cos(\theta_2)*\dot{x}_1^2] \\ & + [0.5136*\sin(\theta_2)*\ddot{x}_1] \end{aligned} \quad (29)$$

จากนั้นนำสมการที่ 28 และ 29 พร้อมเงื่อนไขขอบเขต มาใส่ข้อมูลให้กับโปรแกรม MATLAB เพื่อทำการแก้สมการต่อไป

5. ขั้นตอนการบันทึกค่าความเร็วเชิงมุม, ความเร่งเชิงมุมและแรงบิดของมอเตอร์ จากการวัดจริง

1. วัดค่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลง ณ องศาต่างๆตั้งแต่ $0^\circ - 90^\circ$ ตามช่วงเวลาที่ได้จากสมการ

2. ทำการหาค่ากำลังของมอเตอร์ (วัตต์) ด้วยสมการ

$$P=IE \quad (30)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้าของมอเตอร์ (W), I คือกระแสของมอเตอร์ (A), E คือความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (V)

3. ทำการหาค่าแรงบิดของมอเตอร์ (T) จากสมการ

$$T=P\Delta t \quad (31)$$

เมื่อ T คือ แรงบิดของมอเตอร์ (N-m), Δt คือเวลาที่เคลื่อนที่จากตำแหน่งที่ 1 ไปตำแหน่งที่ 2 (s)

4. ทำการหาค่าแรงบิดของมอเตอร์ (N) จากสมการ

$$T=I\alpha \quad (32)$$

เมื่อ I คือโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) จะได้ว่า

$$I=\frac{1}{12}mL^2 \quad (33)$$

นำค่า I จากสมการที่ 34 แทนในสมการที่ 33 จะได้ว่า

$$T = \frac{1}{12} mL^2 \alpha \quad (34)$$

เมื่อ T คือ แรงบิดของมอเตอร์ (N-m), m คือ มวลของแขนกลแต่ละท่อน (N), L คือ ความยาวของแขนกลแต่ละท่อน, α คือ ความเร่งเชิงมุมของแขนกล (r/s^2)

5. ทำการหาค่าความเร็วเชิงมุมในการเคลื่อนที่จากสมการ

$$\omega = \alpha \Delta t \quad (35)$$

เมื่อ ω คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ (r/s), Δt คือ เวลาในการเคลื่อนที่ (s)

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในการนำเสนอการวิจัยและผลการวิจัยมีหัวข้อดังนี้

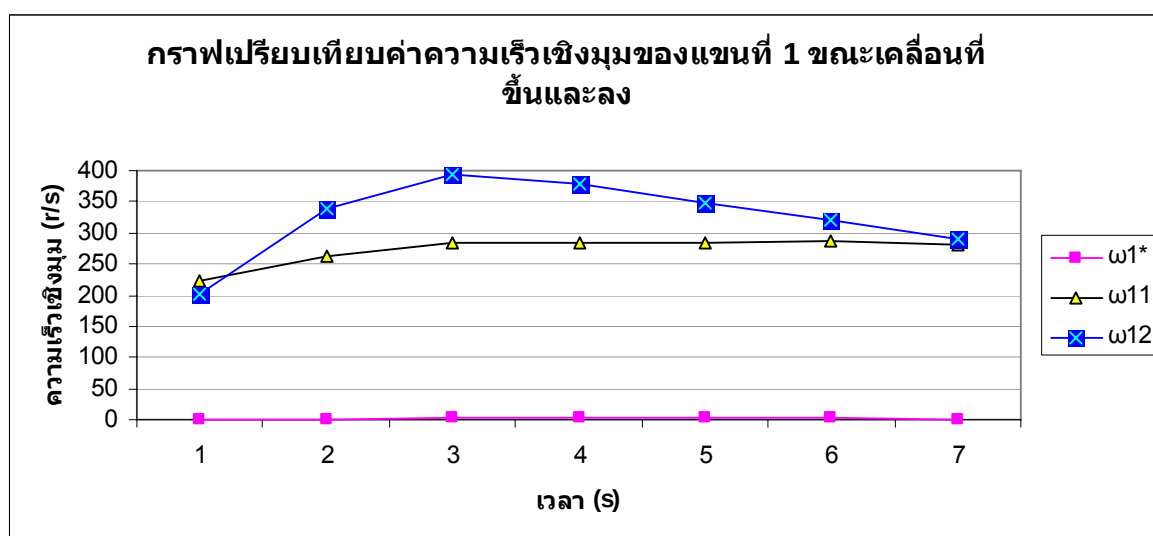
1. ตารางและกราฟเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมที่ได้จากทฤษฎีกับการทดลอง
2. ตารางและกราฟเปรียบเทียบค่าความเร่งเชิงมุมที่ได้จากทฤษฎีกับการทดลอง
3. ตารางและกราฟเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากทฤษฎีกับการทดลอง

1. ตารางและภาพประกอบเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมของแกนกลั่นรยยนต์แบบสองแกน ที่เคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าความเร็วเชิงมุมที่ได้จากทฤษฎี

1. ω_1^* คือ ค่าความเร็วเชิงมุมของแกนที่ 1 ที่ได้จากทฤษฎี
2. ω_{11} คือ ค่าความเร็วเชิงมุมของแกนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นด้วยเวลา 7 วินาที
3. ω_{12} คือ ค่าความเร็วเชิงมุมของแกนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ลงด้วยเวลา 7 วินาที
4. ω_2^* คือ ค่าความเร็วเชิงมุมของแกนที่ 2 ที่ได้จากการทฤษฎี
5. ω_{21} คือ ค่าความเร็วเชิงมุมของแกนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นด้วยเวลา 7 วินาที
6. ω_{22} คือ ค่าความเร็วเชิงมุมของแกนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ลงด้วยเวลา 7 วินาที

ตาราง 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี

เวลา (s)	ค่าที่ได้จากทฤษฎี	ค่าที่ได้จากการทดลอง	
	ω_1^* (r/s)	ω_{11} (r/s)	ω_{12} (r/s)
1	0	222	201
2	0.084	263	340
3	1.627	283	393
4	3.119	284	378
5	2.915	284	349
6	1.646	288	322
7	0	279	289

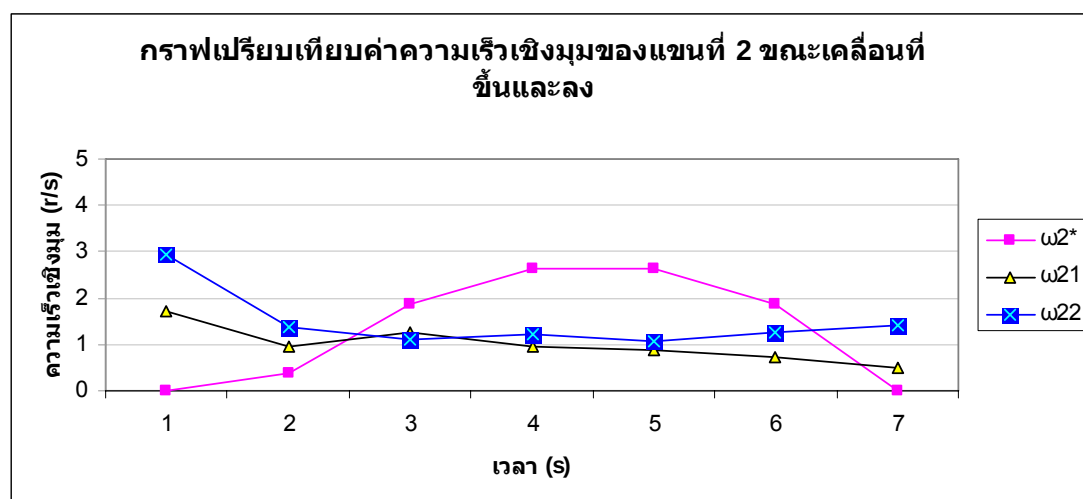


ภาพประกอบ 23 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาที

จากตาราง 2 และภาพประกอบ 23 พบว่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงมีความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยมากกว่าความเร็วเชิงมุมจากทฤษฎี 100% และ 100% ตามลำดับ

ตาราง 3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี

เวลา (s)	ค่าที่ได้จากทฤษฎี	ค่าที่ได้จากการทดลอง	
	ω_2^* (r/s)	ω_{21} (r/s)	ω_{22} (r/s)
1	0	1.73	2.92
2	0.368	0.95	1.36
3	1.878	1.25	1.11
4	2.626	0.96	1.23
5	2.618	0.87	1.07
6	1.88	0.72	1.27
7	0	0.49	1.42



ภาพประกอบ 24 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาที

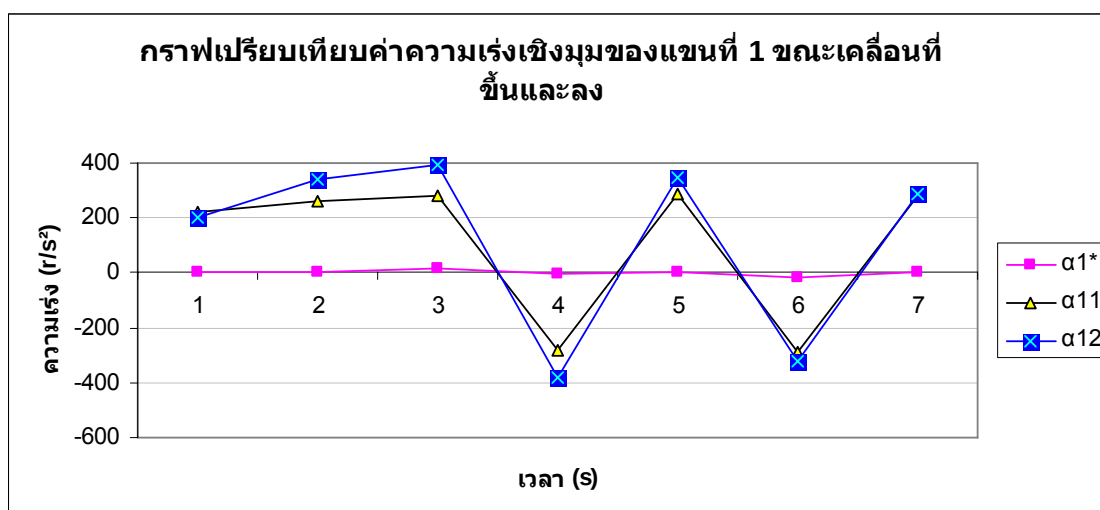
จากตาราง 3 และแผนภาพ 24 พบว่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงมีความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยน้อยกว่าความเร็วเชิงมุมจากทฤษฎี 34% และ 10% ตามลำดับ

2. ตารางและภาพประกอบเปรียบเทียบค่าความเร่งเชิงมุมของแกนกลั่นรถยนต์แบบสองแกน ที่เคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าความเร่งเชิงมุมที่ได้จากทฤษฎี

1. α_1^* คือ ค่าความเร่งเชิงมุมของแกนที่ 1 ที่ได้จากทฤษฎี
2. α_{11} คือ ค่าความเร่งเชิงมุมของแกนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นด้วยเวลา 7 วินาที
3. α_{12} คือ ค่าความเร่งเชิงมุมของแกนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ลงด้วยเวลา 7 วินาที
4. α_2^* คือ ค่าความเร่งเชิงมุมของแกนที่ 2 ที่ได้จากทฤษฎี
5. α_{21} คือ ค่าความเร่งเชิงมุมของแกนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นด้วยเวลา 7 วินาที
6. α_{22} คือ ค่าความเร่งเชิงมุมของแกนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ลงด้วยเวลา 7 วินาที

ตาราง 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร่งเชิงมุมของแกนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี

เวลา (s)	ค่าที่ได้จากทฤษฎี	ค่าที่ได้จากการทดลอง	
	α_1^* (r/s ²)	α_{11} (r/s ²)	α_{12} (r/s ²)
1	0	222	201
2	1.119	263	340
3	18.197	283	393
4	-2.238	-284	-378
5	1.297	284	349
6	-18.635	-288	-322
7	0	279	289

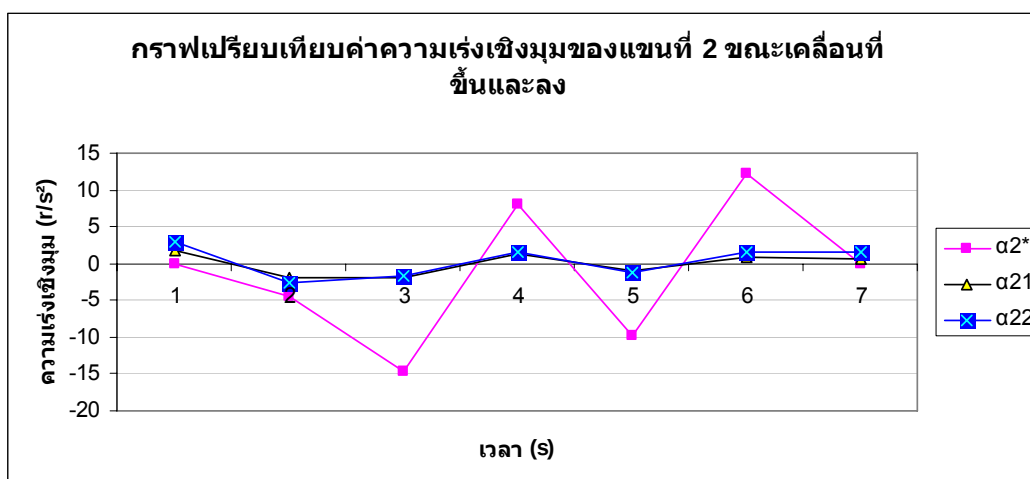


ภาพประกอบ 25 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร่งเชิงมุมของแกนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาที

จากตาราง 4 และภาพประกอบ 25 พบว่าความเร่งเชิงมุมของแกนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงมีความเร่งเชิงมุมเฉลี่ยมากกว่าความเร่งเชิงมุมจากทฤษฎี 98% และ 98% ตามลำดับ

ตาราง 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร่งเชิงมุมของแกนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี

เวลา (s)	ค่าที่ได้จากทฤษฎี	ค่าที่ได้จากการทดลอง	
	α_2^* (r/s ²)	α_{21} (r/s ²)	α_{22} (r/s ²)
1	0	1.73	2.9
2	-4.553	-1.89	-2.72
3	-14.561	-1.88	-1.66
4	8.045	1.28	1.64
5	-9.890	-1.09	-1.34
6	12.263	0.87	1.53
7	0	0.57	1.66



ภาพประกอบ 26 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเร่งเชิงมุมของแขนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาที

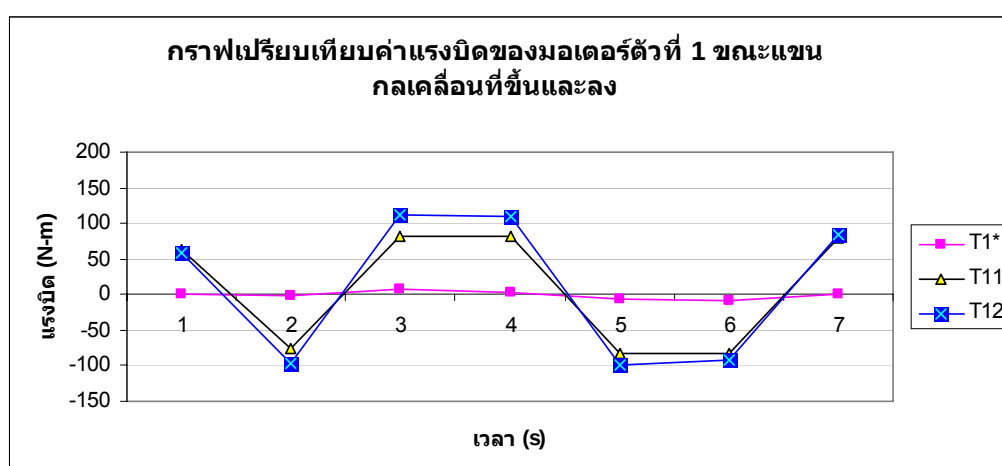
จากตาราง 5 และภาพประกอบ 26 พบว่าความเร่งเชิงมุมของแขนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงมีความเร่งเชิงมุมเฉลี่ยน้อยกว่าความเร่งเชิงมุมจากทฤษฎี 16% และ 24% ตามลำดับ

3. ตารางและภาพประกอบเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์ ขณะที่แขนกลเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากทฤษฎี

1. T_1^* คือ ค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 1 ขณะแขนกลเคลื่อนที่ขึ้นที่ได้จากทฤษฎี
2. T_{11} คือ ค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 1 ขณะแขนกลเคลื่อนที่ขึ้นด้วยเวลา 7 วินาที
3. T_{12} คือ ค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 1 ขณะแขนกลเคลื่อนที่ลงด้วยเวลา 7 วินาที
4. T_2^* คือ ค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะแขนกลเคลื่อนที่ขึ้นที่ได้จากทฤษฎี
5. T_{21} คือ ค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะแขนกลเคลื่อนที่ขึ้นด้วยเวลา 7 วินาที
6. T_{22} คือ ค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะแขนกลเคลื่อนที่ลงด้วยเวลา 7 วินาที

ตาราง 6 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี

เวลา (s)	ค่าที่ได้จากทฤษฎี	ค่าที่ได้จากการทดลอง	
	T_1^* (N-m)	T_{11} (N-m)	T_{12} (N-m)
1	0	64	58
2	-2.018	-76	-98
3	28.190	81	113
4	2.859	82	109
5	-6.734	-82	-100
6	-29.277	-83	-92
7	0	80	83

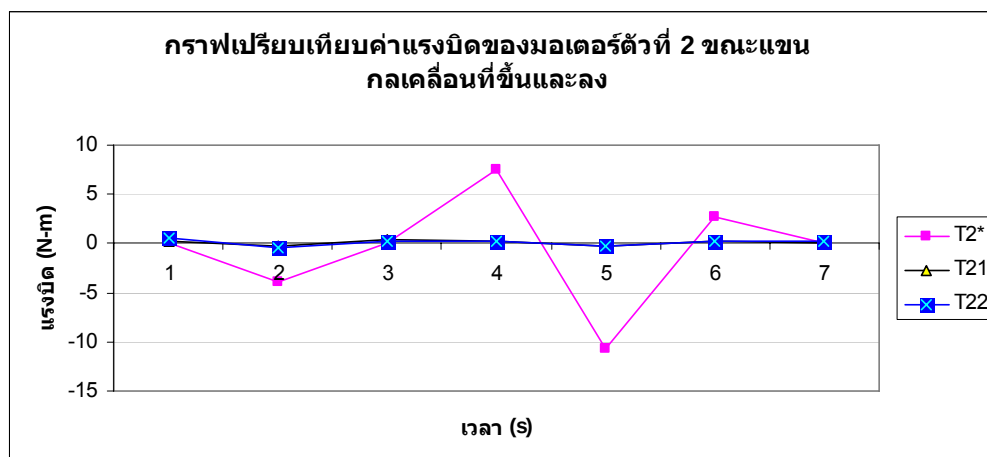


ภาพประกอบ 27 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 1 ขณะขนกลเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาที

จากตาราง 6 และภาพประกอบ 27 พบว่ามอเตอร์ตัวที่ 1 ขณะขนกลเคลื่อนที่ขึ้นและลงมีค่าแรงบิดของมอเตอร์มากกว่าแรงบิดของมอเตอร์จากทฤษฎี 87% และ 89% ตามลำดับ

ตาราง 7 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาทีเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี

เวลา (s)	ค่าที่ได้จากทฤษฎี	ค่าที่ได้จากการทดลอง	
	T_2^* (N-m)	T_{21} (N-m)	T_{22} (N-m)
1	0	0.3	0.51
2	-3.972	-0.33	-0.48
3	0.045	0.33	0.29
4	7.582	0.22	0.29
5	-10.631	-0.19	-0.23
6	2.649	0.15	0.27
7	0	0.1	0.29



ภาพประกอบ 28 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะขนกลเคลื่อนที่ขึ้นและลงด้วยเวลา 7 วินาที

จากตาราง 7 และภาพประกอบ 28 พบว่ามอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะขนกลเคลื่อนที่ขึ้นและลงมีค่าแรงบิดของมอเตอร์น้อยกว่าแรงบิดของมอเตอร์จากทฤษฎี 7% และ 10% ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผล และข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้สรุปผล และนำเสนอไว้เป็นหัวข้อต่อไปนี้

1. สรุปผล
2. ข้อเสนอแนะทั่วไป
3. ข้อเสนอแนะงานวิจัยครั้งต่อไป

1. สรุปผล

การวิจัยเรื่องการออกแบบและสร้างแขนกลสองแขนก้านรถยนต์ที่ควบคุมโดยใช้หลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุดนั้นพบว่า

ความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุม และแรงบิดที่วัดจริง ของแขนกลและมอเตอร์ตัวที่ 1 และ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงนั้น โดยการนำค่าที่วัดได้จริงมาทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี และทำการหาค่าเฉลี่ย ซึ่งพบว่าค่าที่วัดได้จริงนั้นมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากทฤษฎี 33% และ 54%, 41% และ 37%, 40% และ 40% ตามลำดับ

สรุปได้ว่าการทำงานจริงของแขนกลที่เป็นผลมาจากการควบคุมโดยหลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุดนั้นสามารถหยุดการเคลื่อนที่ในตำแหน่งสุดท้ายขณะเคลื่อนที่ขึ้นและเมื่อเคลื่อนที่กลับลงมายังตำแหน่งเริ่มต้นก็สามารถหยุดการเคลื่อนที่ได้ตรงตามตำแหน่ง ซึ่งเป็นผลมาจากการแก้สมการที่ 6 ซึ่งใช้เป็นสมการตั้งต้นเพราะเมื่อแขนกลหยุดการเคลื่อนที่นั้นเกิดการสั่นเล็กน้อยซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้

2. ข้อเสนอแนะทั่วไป

ในการวิจัยครั้งนี้มีการออกแบบสร้างแขนกลก้านรถยนต์แบบสองแขนโดยแขนที่ 1 มีน้ำหนัก 0.244kg. แขนที่ 2 มีน้ำหนัก 0.214kg. อีกทั้งใช้มอเตอร์ต้นกำลังตัวที่ 1 เป็นมอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) และมอเตอร์ตัวที่ 2 เป็นเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) ซึ่งได้ผลออกมาดังที่ได้กล่าวไปแล้วแต่ทั้งนี้ ในงานวิจัยไม่ได้คำนึงถึงแรงเสียดทานระหว่างจุดเชื่อมต่อของแขนแต่ละท่อนซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการตรวจวัดข้อมูลได้ นอกจากนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแขนกลทั้งขึ้นและลง (7 วินาที) ซึ่งก็ส่งผลถึงขอบเขตที่กำหนดให้กับสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลด้วยเช่นกัน อาจมีความล่าช้าในการใช้งานได้ แต่เหตุผลที่เลือกใช้ระยะเวลาดังกล่าวเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากแรงบิดของมอเตอร์และการกระแทกขณะแขนกลกำลังจะหยุดการเคลื่อนที่ เนื่องจากวัสดุที่

ใช้สร้างแกนกลเป็นอลูมิเนียมซึ่งมีน้ำหนักเบาและบาง แต่ถ้าเป็นวัสดุอื่นที่มีความแข็งแรงมากกว่าก็ยังสามารถลดระยะในการเคลื่อนเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานได้

3. ข้อเสนอแนะงานวิจัยครั้งต่อไป

ในการพัฒนาครั้งต่อไปควรนำไปประยุกต์ใช้กับแกนกลที่มีลำดับชั้นความเสถียรมากกว่า 2 หรืออาจใช้ในการเปรียบเทียบกับระบบควบคุมรูปแบบอื่นที่มีการวิเคราะห์ในส่วนของคุณภาพเชิงมุม, ความเร่งเชิงมุม และแรงบิดของมอเตอร์เพื่อทดสอบว่าระบบการควบคุมแบบความนุ่มนวลที่สุดนี้เหมาะสมกับลักษณะงานรูปแบบใดบ้าง หรืออาจนำผลจากงานวิจัยนี้ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อเปรียบเทียบลักษณะการเคลื่อนที่ของแกนกลกับรอกยนต์แบบสองแกนที่ใช้วัสดุอื่นที่แตกต่างกับงานวิจัยนี้

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- วิรัช สิริทรัพย์ไพบุลย์. (2551). โปรแกรมเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานกราฟิกในการหาสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม MATLAB. ปรินูญานินพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- วรพจน์ กรแก้ววัฒนกุล, และชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล (ม.ป.ป.) คุณสมบัติทางฮาร์ดแวร์และชุดคำสั่งของเบสิก แสตมป์ 2SX (Architecture and Instruction set of BASIC Stamp 2SX). ม.ป.ท.
- สงบ ยอดสง่า. (2551). ศึกษาแนวทางใหม่ในการหาคำตอบของการใช้พลังงานน้อยที่สุดประยุกต์ใช้กับแขนกลที่ใช้กัณรณต์แบบอัตโนมัติ. ปรินูญานินพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- Giovanni Tonietti; & Antonio Bicchi. (2002, October). *Adaptive Simultaneous Position and Stiffness Control for a Soft Robot Arm*. Centro “E. Piaggio”, University of Pisa, Italy, Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and System EPFL, Lausanne, Switzerland – October 2002 PP.1992 – 1997.
- Koichiro Deguchi, Hironari Sakurai; & Shun Ushida. (2008). *A Goal Oriented Just-In-Time Visual Servoing for Ball Catching Robot Arm*. Tohoku University, Japan, 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and System Acropolis Convention center Nice, France, Sept, 22-26, 2008 pp. 3034 – 3039.
- Khodabandehloo, K. (2009). *Performance Analysis of a Two Arm Robot*. R.O.Buckingham, AMIEE, P.N.Bratt, AMIMechE, MIEE, IEEE.
- Saneewong N.A.; & S. Ayuttaya. (2009). *A Study on the Comparison Between Minimum Jerk and Minimum Energy of Nonlinear Dynamic Systems*. Joint Post Graduated Program (SWU-CRMA) Department of Mechanical Engineering, Chulachomkiao Royal Military Academy and Srinakharinwirot University.
- Sunil K. Agrawal. (2001). *Designing robot for optimal performance During Repetitive Motion*. IEEE Transaction on Robotics and Automation.
- (1998, May). Fabien New Computation Framework fro Trajectory Optimization of Higher – Order Dynamic System. AIAA Journal of Guidance Control and Dynamic. 24(2): 228–236.

- Tawiwat Veeraklaew, & Sunil K. Agrawal. (2002, July). Neighboring optimal Feedback Law of Hiher-Order Dynamic System. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, Transaction of the ASME*. 124(3): 492-497.
- Veeraklaew T., Phathana-im N.; & Heame S. (2008, March). Comparison between Minimum Direct and Indirect Jerks of Linear Dynamic Systems. *Proceedings of World Academy of Science Engineering and Technology*. 27(1307-6884): 26-30.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

θ_i	คือ	มุมขณะเคลื่อนที่
J	คือ	ความนุ่มนวลที่สุด
M_M	คือ	โมเมนต์ที่เกิดขึ้นขณะที่แขนกลเคลื่อนที่
P	คือ	กำลังทางไฟฟ้า
I	คือ	กระแสไฟฟ้า
E	คือ	ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า
T	คือ	แรงบิดของมอเตอร์
F	คือ	แรงของมอเตอร์
L	คือ	ความยาวของแขน
m	คือ	มวลของแขน
α	คือ	ความเร่งเชิงมุม
ω	คือ	ความเร็วเชิงมุม
Δt	คือ	เวลาในการเคลื่อนที่ของแขนกลจากตำแหน่งที่ 1 ไปตำแหน่งที่ 2
ω_1^*, ω_2^*	คือ	ค่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 1 และ 2 ที่ได้จากทฤษฎี
ω_{11}, ω_{12}	คือ	ค่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงซึ่งได้จากการวัดจริง
ω_{21}, ω_{22}	คือ	ค่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงซึ่งได้จากการวัดจริง
α_1^*, α_2^*	คือ	ค่าความเร่งเชิงมุมของแขนที่ 1 และ 2 ที่ได้จากทฤษฎี
α_{11}, α_{12}	คือ	ค่าความเร่งเชิงมุมของแขนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงซึ่งได้จากการวัดจริง
α_{21}, α_{22}	คือ	ค่าความเร่งเชิงมุมของแขนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงซึ่งได้จากการวัดจริง
T_1^*, T_2^*	คือ	ค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 1 และ 2 ที่ได้จากทฤษฎี
T_{11}, T_{12}	คือ	ค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 1 ที่ได้จากการวัดจริง
T_{21}, T_{22}	คือ	ค่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่ได้จากการวัดจริง

ภาคผนวก ข

```

' {$STAMP BS25x}
' {$PBASIC 2.5}
' System I/O and constant , please do not make change
SD PIN 13 ' Sci-BOX serial communication port
'LDRSD PIN 14 ' Sci-BOX serial communication port
BAUD CON 240 ' 9600bps constant
CMD CON $FE ' SLCD command constant

' Variable defined
VALUE0 VAR Word ' VALUE as SENSOR0 variable
VALUE1 VAR Word ' VALUE as SENSOR0 variable
S1 VAR Word ' VALUE as SENSOR0 variable
S2 VAR Word ' VALUE as SENSOR0 variable
VALUE3 VAR Word ' VALUE as SENSOR0 variable
LDR0 VAR Word ' VALUE as SENSOR0 variable
LDR1 VAR Word ' VALUE as SENSOR0 variable
LDR2 VAR Word ' VALUE as SENSOR0 variable
LDR3 VAR Word ' VALUE as SENSOR0 variable
i VAR Byte
max_ldr VAR Byte

stpro:

LOW SD: PAUSE 1: HIGH SD ' Break signal
SEROUT SD,BAUD,[0] ' Request SENSOR0
SERIN SD,BAUD,[VALUE0.LOWBYTE,VALUE0.HIGHBYTE] ' Received data 2 byte to 1 word
LOW SD: PAUSE 1: HIGH SD ' Break signal
SEROUT SD,BAUD,[1] ' Request SENSOR0
SERIN SD,BAUD,[VALUE1.LOWBYTE,VALUE1.HIGHBYTE] ' Received data 2 byte to 1 word
    IF (VALUE0>500)THEN
        VALUE0=0
    ELSEIF (VALUE0<500)THEN
        VALUE0=1
    ENDIF

    IF (VALUE1>500)THEN
        VALUE1=0
    ELSEIF (VALUE1<500)THEN
        VALUE1=1
    ENDIF

    IF (VALUE0=0) AND (VALUE1=0) THEN
        DEBUG "0" ,CR
        GOTO cm0
    ELSEIF (VALUE0=1) AND (VALUE1=0) THEN
        DEBUG "90" ,CR
        GOTO cm90
    ELSEIF (VALUE0=0) AND (VALUE1=1) THEN
        DEBUG "270" ,CR
        GOTO cm270

```

```

ELSEIF (VALUE0=1) AND (VALUE1=1) THEN
  DEBUG "180" ,CR
  GOTO cm180
ENDIF

cm0:
  GOTO cm180
cm90:
  GOTO cm270

cm270:
  LOW SD: PAUSE 1: HIGH SD ' Break signal
  SEROUT SD,BAUD,[2] ' Request SENSOR0
  SERIN SD,BAUD,[S1.LOWBYTE,S1.HIGHBYTE] ' S2
  DEBUG "270-",DEC S1,CR
    PAUSE 13
    HIGH 10
    PAUSE 25
    LOW 10
    PAUSE 100
    IF (S1>100)THEN

GOTO ste
ELSE
GOTO cm270

ENDIF

cm180:
  LOW SD: PAUSE 1: HIGH SD ' Break signal
  SEROUT SD,BAUD,[3] ' Request SENSOR0
  SERIN SD,BAUD,[S2.LOWBYTE,S2.HIGHBYTE] ' S1
  DEBUG "180-",DEC S2,CR
    PAUSE 55
    HIGH 11
    PAUSE 20
    LOW 11

    IF (S2>100)THEN

GOTO ste2
ELSE
GOTO cm180
ENDIF
ste:
  PAUSE 50
  HIGH 1
  PULSOUT 0,3500
  IF (i=50) THEN
    GOTO n

```

```
        ELSE
        DEBUG DEC i
        i=i+1
        GOTO ste
    ENDIF
n :
ste2:
```

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายอนุวัฒน์ บำรุงกิจ
วันเดือนปีเกิด	28 สิงหาคม 2526
สถานที่เกิด	จังหวัด นครนายก
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	289 ม.4 ต.ศรีกะอาง อ.บ้านนา จ.นครนายก
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	วิศวกรเครื่องกล
สถานที่ทำงาน	บริษัทจำกัด สแควร์ คลูลิ่งทาวเวอร์
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2544	มัธยมศึกษาปีที่ 6 จาก โรงเรียนบ้านนา “นายกพิทยากร” อ.บ้านนา จ.นครนายก
พ.ศ. 2549	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2553	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ