

**การออกแบบและสร้างแขนกลสองแขนกันรถยนต์ที่ควบคุม
โดยใช้หลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุด**
**Design and Fabrication Two Arm Robot Model Application for Automatic
Barrier Gate System Minimum Jerk Control**

ทวิวัชร วีระแก้ว^{1*}, อนุวัฒน์ บำรุงกิจ^{2**}, และวิชิต บัวแก้ว^{3***}

¹ สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) กระทรวงกลาโหม ชั้น4 อาคารสำนักงานปลัดกระทรวงกลาโหม (แจ้งวัฒนะ)
47/433 หมู่3 ต.บ้านใหม่ อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120

^{2,3} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ต.ศรีพระกระบือ
อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

ติดต่อ: โทรศัพท์: 081-8517583*, 086-3365782**, 0-37322609 หรือ (662) 6641000 ต่อ 2055***

E-mail: tawiwat@hotmail.com*, time_08255@hotmail.com**, vichitb@swu.ac.th***

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ให้ความสนใจการทำงานของหุ่นยนต์ ที่มีการทำงานและการเคลื่อนที่คล้ายกับมนุษย์หรือแขนกล ที่ช่วยในการเคลื่อนย้ายสิ่งของ ตลอดทั้งการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยการวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้าง แขนกลแบบสองแขน ประยุกต์ใช้กับการควบคุมการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุด (Minimum Jerk) และทำการเปรียบเทียบ ผลลัพธ์ที่ได้จากทฤษฎีกับการวัดจริง โดยการเคลื่อนที่นั้นใช้มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) และเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) เป็นต้นกำลัง ในการทดลองทำการวัดค่าความเร็วเชิงมุม ค่าความเร่งเชิงมุม และแรงบิดของ มอเตอร์ โดยวัดค่าจากกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ในการหมุน จากการวิจัยพบว่า ความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุม และแรงบิดที่วัดจริง ของแขนกลและมอเตอร์ตัวที่ 1 และ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงนั้น มากกว่าค่าที่ได้จากทฤษฎี 33% และ 54%, 41% และ 37%, 40% และ 40% ตามลำดับ สรุปได้ว่าการทำงานจริงของแขนกลที่เป็นผลมาจากการควบคุมโดยหลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุดนั้นมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นเพียง 39% จากทฤษฎี

คำสำคัญ: แขนกล, ความนุ่มนวลที่สุด, การควบคุม

Abstract

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

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ เทคโนโลยีมีการพัฒนา อย่าง ต่อเนื่องทำให้มีการพัฒนาวิธีการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์เกิดขึ้นและวิธีการควบคุมแบบการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุดก็เป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถช่วยลดการสั่นสะเทือนได้ ทั้งนี้ลักษณะการทำงานของเครื่องกั้นรถยนต์นั้นมีการเคลื่อนที่ขึ้นและลง ซ้ำๆ ในแต่ละวัน โดยในขณะที่เครื่องกั้นรถยนต์เคลื่อนที่นั้นน้ำหนักของแขน จะส่งผลต่อแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้า กล่าวคือเมื่อเครื่องกั้นรถยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่ง 0° แรงบิด และ ค่าความเร่งเชิงมุมของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดจากนั้นจะลดลงจนถึงจุดสุดท้ายของการเคลื่อนที่คือที่ตำแหน่ง 90° และจะเป็นลักษณะเดียวกันในขณะที่แขนกล เคลื่อนที่ลง ซึ่งแรงบิดที่เพิ่มขึ้นนั้นก็ทำให้มอเตอร์ใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่ก่อนที่แขนกลจะหยุดการเคลื่อนที่นั้น จะเกิดการสวิตช์ และเป็นผลทำให้เกิดการสั่นสะเทือน ถ้าหากนำหลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุดมาใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลกั้นรถยนต์ ปัญหาดังกล่าวก็จะไม่เกิดขึ้น อีกทั้งยังสามารถช่วยลดการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าได้เช่นกัน

ดังนั้นผู้ทําวิจัยจึงสนใจที่จะทำการออกแบบและสร้างแขนกลสองแขนกั้นรถยนต์ที่ควบคุมโดยใช้หลักการนุ่มนวลที่สุด โดยใช้สมการของออยเลอร์ -ลากรางจ์ (Euler-Lagrange Equation) ซึ่งจะคำนึงถึงโมเมนต์ความเฉื่อย และพลังงานจลน์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเร็วเชิงมุม ค่าความเร่งเชิงมุม และแรงบิดของมอเตอร์ที่จุดต่อของแขนกลกั้นรถยนต์ ทั้งนี้เมื่อสามารถทำการวิจัยเป็นผลตามที่ตั้งไว้ ก็ สามารถช่วยลดการสั่นสะเทือนของแขนกลได้

2. ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีความนุ่มนวลที่สุด (Minimum Jerk)

หลักการความนุ่มนวลที่สุด (Minimum Jerk) นั้นมีหลักการเริ่ม ต้นจากระบบชั้นความเสรีเดี่ยว (Single-Stage Systems) และระบบหลายระดับชั้นความเสรี (Multistage Systems) ตามลำดับ

สัญลักษณ์ที่ใช้แทนแคลคูลัสของฟาริเอชันส์ (Calculus of Variation) ก็คือฟังก์ชันนอล (Functional) เขียนเป็นสมการได้เป็น

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

เมื่อ x, u คือจำนวนจริงใดๆ 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 (Higher Order) ดังสมการที่ 2

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

หรือ

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

จากสมการที่ 1 จะได้ว่า

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

แต่หลักการความนุ่มนวลที่สุดนี้แบ่งออกเป็นสองวิธีดังนี้

2.1.1 ปัญหาความ นุ่มนวล ที่สุดโดยวิธีทางตรง (Minimum Direct Jerk Problem)

คอสฟังก์ชัน (Cost Function) ของการหาค่าความนุ่มนวลที่สุดโดยวิธีทางตรงกำหนดไว้ดังนี้

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

2.1.2 ปัญหาความ นุ่มนวล ที่สุดโดยวิธีทางอ้อม (Minimum Indirect Jerk Problem)

คอสฟังก์ชัน (Cost Function) ของการหาค่าความนุ่มนวลที่สุดโดยวิธีทางอ้อมกำหนดไว้ดังนี้

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

ซึ่งในการกำหนด คอสฟังก์ชัน (Cost Function) ในเทอมของสมการทั้งสองนั้น ต้องทำการมิไนไมซ์ (Minimized) โดยใช้ แคลคูลัสของฟาริเอชันส์

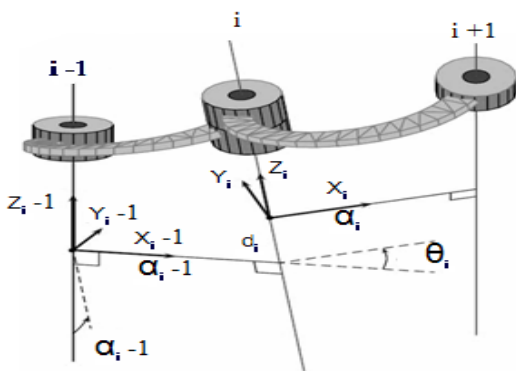
(Calculus of Variations) หาตัวแปรเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ออกมา ซึ่งมีผู้ทำวิจัยเปรียบเทียบการหาคำตอบด้วยวิธีทางตรงและทางอ้อมพบว่า การแก้ปัญหาทั้งสองวิธีนั้นให้คำตอบที่เหมือนกันเพียงแต่ว่าการแก้ปัญหาความนุ่มนวลที่สุดด้วยวิธีทางอ้อมนั้นง่ายกว่าในการแก้สมการ [5]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการหาความ นุ่มนวลที่สุดโดยวิธีทางอ้อม

2.2 หลักการกำหนด D-H parameters

D-H Parameters ย่อมาจากคำว่า เดเนวิท - ฮาเทินเบิร์ก พารามิเตอร์ (Denavit - Hartenberg Parameters) เป็นการสร้างตัวแปรเพื่อนำมาใช้ในการหาสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ซึ่งมีตัวแปรทั้งหมด 4 ตัวได้แก่

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



รูปที่ 1 แสดงรายละเอียดของตำแหน่งตัวแปรต่างๆ ของ D-H Parameters

2.3 หลักการ Euler - Lagrange

เป็นผลจากสมการดิฟเฟอเรนเชียล (Differential equation) อธิบายการเปลี่ยนแปลงของ

เวลาของระบบกลศาสตร์ (Mechanical system) สามารถเขียนสมการได้ในรูป

$$T = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i}, i=1, \dots, n \quad (7)$$

โดยที่ Lagrangian (L) = พลังงานศักย์ (Potential energy (V)) - พลังงานจลน์ (Kinetic energy (K)), T คือ ตัวแปรควบคุมของระบบ (Control Inputs), q คือ State Variables ของระบบ และ n คือ จำนวนองศาอิสระ (Degree of Freedom) ดังนั้นสามารถเขียนสมการ Euler-Lagrange ได้ใหม่ว่า

$$T_k = \sum_j d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i,j} c_{ijk} \dot{q}_i \dot{q}_j + \phi_k(q), k=1, \dots, n \quad (8)$$

ซึ่งผลคำตอบของสมการนี้ก็คือสมการการเคลื่อนที่ของระบบพลศาสตร์ [4]

3. การดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ แบ่งขั้นตอนการดำเนินการวิจัยนั้นแบ่งเป็น 4 ส่วนดังนี้

3.1 การออกแบบแขนกลกัณฑ์รยยนต์แบบ 2 แขน

แขนกลแบบสองแขนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากอะลูมิเนียมกล่อง หนา 1.3 cm. กว้าง 3.7 cm. และมีความยาวดังนี้ ท่อนที่ 1 ยาว 120 cm. น้ำหนัก 0.224 kg., ท่อนที่ 2 ยาว 100 cm. น้ำหนัก 0.076 kg ซึ่งทำให้สามารถกั้นพื้นที่ยาว 220 cm. และขาตั้งสูง 85 cm. ขนาดของมอเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยหาได้จากสมการที่ 9

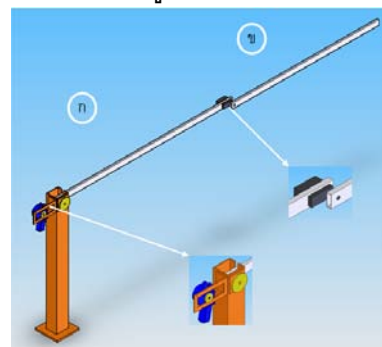
$$M_M = WL \quad (9)$$

จะได้ว่า

$$\text{แรงบิด } M_{M1} = 0.438 \text{ kg.} \times 220 \text{ cm.} = 96.36 \text{ kg.cm.}$$

$$\text{แรงบิด } M_{M2} = 0.0716 \text{ kg.} \times 100 \text{ cm.} = 7.16 \text{ kg.cm.}$$

ที่ตำแหน่ง แรงบิด 0° และลักษณะของแขนกลกัณฑ์รยยนต์จึงมีลักษณะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของแขนกลสองแขนกัณฑ์รยยนต์

โดย ก คือแขนที่ 1 มีความยาว 120cm. ข คือ
แขนที่ 2 มีความยาว 100cm.

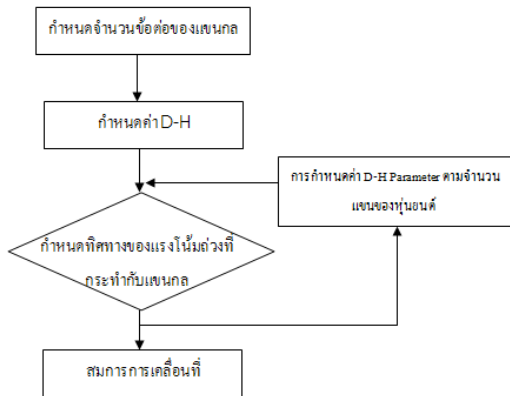
3.2 การหาสมการการเคลื่อนที่

จากหัวข้อ 3.1 ทำให้ทราบถึงค่า DH-
Parameters ดังตารางที่ 1

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	$x_2(t)$

โดยที่ i คือจำนวนของของแขนกล, a_i คือความยาว
ของแขน, α_i คือมุมระหว่างของแขนที่ 1 และ 2, d_i
คือระยะห่างของแขนจากจุดหมุน, θ_i คือมุมของแขน
ที่ 1 และ 2 ที่เคลื่อนที่จากนั้นนำค่า DH-Parameters
มาหาสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยการหาทราน
ฟอร์มเมชันเมตริกซ์ (Transformation Matrix) ในส่วน
นี้ได้ใช้โปรแกรม แมทแลบ (MATLAB) ในการหา
สมการการเคลื่อนที่ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ [7]



รูปที่ 3 แสดงขั้นตอนการประมวลผลของโปรแกรม
แมทแลบ (MATLAB)

ทำให้ได้สมการการเคลื่อนที่สองสมการ โดยที่ u_1, u_2
คือแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 1, 2 ตามลำดับ x_i คือ ตัว
แปรสแตท (State Variables) สมการการเคลื่อนที่ที่ได้
เป็นดังนี้

$$U_1 = 0.18\ddot{\cos}(\theta_1) + 5.13\ddot{\theta}_1 + 2.15\ddot{\theta}_2 + 0.37\ddot{\theta}_2\cos(\theta_2) - 0.36\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin(\theta_2) - 0.18\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2\sin(\theta_2) + 3.53\sin(\theta_1) - 3.53\cos(\theta_1) + 0.75\sin(\theta_1 + \theta_2) - 0.75\cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (10)$$

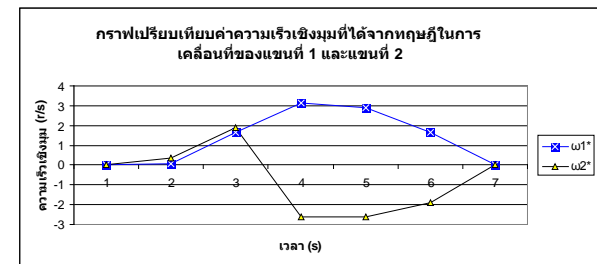
$$U_2 = 0.18\ddot{\cos}(\theta_2) + 2.15\ddot{\theta}_2 + 1.08\ddot{\theta}_2 - 0.36\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin(\theta_2) - 0.18\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2\sin(\theta_2) + 0.18\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2\cos(\theta_2) + 0.75\dot{\theta}_1\cos(\theta_1 + \theta_2) + 0.75\dot{\theta}_2\cos(\theta_1 + \theta_2) + 0.75\dot{\theta}_1\sin(\theta_1 + \theta_2) + 0.75\dot{\theta}_2\sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (11)$$

เมื่อได้สมการการเคลื่อนที่ของแขนกลแล้วก็ทำการ
ดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Equation) หนึ่งครั้งเพื่อ
ทำให้สมการอยู่ในรูปของ ตัวแปร Jerk (Jerk
Variables) ซึ่งทำให้ได้อีกสองสมการใหม่คือ

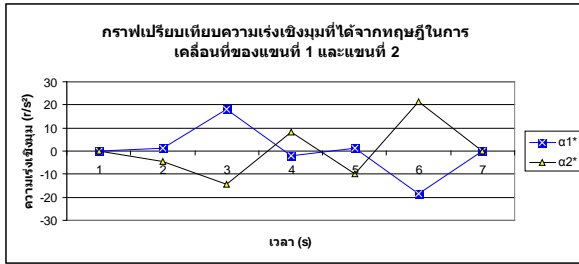
$$\ddot{U}_1 = 0.18\ddot{\cos}(\theta_1) - 0.18\dot{\theta}_1\ddot{\sin}(\theta_1) + 5.13\ddot{\theta}_1 + 2.15\ddot{\theta}_2 + 0.37\ddot{\theta}_2\cos(\theta_2) - 0.37\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin(\theta_2) - 0.36\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin(\theta_2) - 0.36\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\cos(\theta_2) - 0.18\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2\sin(\theta_2) - 0.18\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2\cos(\theta_2) + 3.53\dot{\theta}_1\cos(\theta_1) + 3.53\dot{\theta}_1\sin(\theta_1) + 0.75\dot{\theta}_1\cos(\theta_1 + \theta_2) + 0.75\dot{\theta}_2\cos(\theta_1 + \theta_2) + 0.75\dot{\theta}_1\sin(\theta_1 + \theta_2) + 0.75\dot{\theta}_2\sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (12)$$

$$\ddot{U}_2 = 0.18\ddot{\cos}(\theta_2) - 0.18\dot{\theta}_2\ddot{\sin}(\theta_2) + 2.15\ddot{\theta}_1 + 1.08\ddot{\theta}_2 - 0.36\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin(\theta_2) - 0.36\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\sin(\theta_2) - 0.36\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2\cos(\theta_2) - 0.36\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2\sin(\theta_2) - 0.18\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2\cos(\theta_2) + 0.36\dot{\theta}_1\sin(\theta_2) + 0.18\dot{\theta}_2\dot{\theta}_2\cos(\theta_2) + 0.75\dot{\theta}_1\cos(\theta_1 + \theta_2) + 0.75\dot{\theta}_2\cos(\theta_1 + \theta_2) + 0.75\dot{\theta}_1\sin(\theta_1 + \theta_2) + 0.75\dot{\theta}_2\sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (13)$$

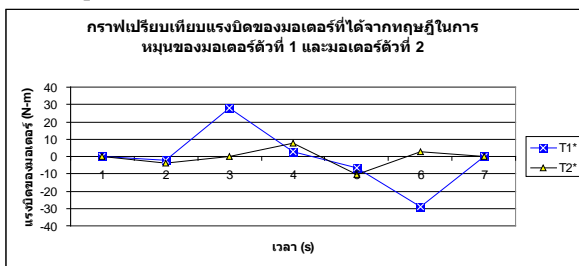
จากนั้นทำการแก้สมการโดยใช้ สมการที่ (6)
เป็น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ซึ่งจะ
ได้ค่าความเร็วเชิงมุม, ความเร่งเชิงมุม และค่าแรงบิด
ของมอเตอร์ดังนี้



รูปที่ 4 แผนภาพการเปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมที่ได้
จากทฤษฎีในการเคลื่อนที่ของแขนที่ 1 และ
แขนที่ 2
จากรูปที่ 4 พบว่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่
2 จะมีค่าสูงกว่าแขนที่ 1



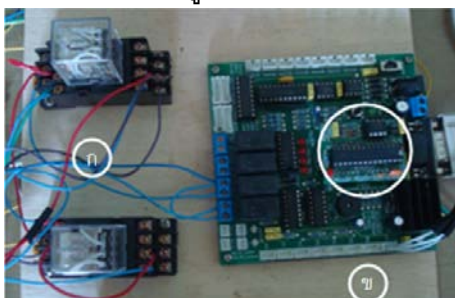
รูปที่ 5 แผนภาพการเปรียบเทียบความเร่งเชิงมุมที่ได้จากทฤษฎีในการเคลื่อนที่ของแขนที่ 1 และแขนที่ 2 จากรูปที่ 5 พบว่าความเร่งเชิงมุมของแขนที่ 2 จะมีค่าสูงกว่าแขนที่ 1



รูปที่ 6 แผนภาพการเปรียบเทียบแรงบิดของมอเตอร์ที่ได้จากทฤษฎีในการหมุนของมอเตอร์ตัวที่ 1 และมอเตอร์ตัวที่ 2 จากรูปที่ 6 พบว่าแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 1 มีค่ามากกว่ามอเตอร์ตัวที่ 2 ซึ่งค่าตัวแปรทั้งสามจะใช้เป็นค่าเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริง [3]

3.3 การออกแบบอุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลกึ่งรถยนต์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีชื่อเรียกว่า เบสิกสเตตมป์ 2SX ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์สำเร็จรูป ซึ่งใช้ภาษาพีเบสิก (PBASIC) ในการพัฒนาโปรแกรมเพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกต่างๆ ซึ่งมีชุดคำสั่งในการใช้งาน 66 คำสั่งและสามารถใส่ชุดคำสั่งได้ 10,000 คำสั่งภาษาเบสิกต่อวินาที และมีลักษณะดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงลักษณะการต่ออุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม

คุมการทำงานของแขนกลกึ่งรถยนต์โดย ก เป็น รีเลย์สำหรับการสลับการหมุนของมอเตอร์, ข เป็นลักษณะของเบสิกสเตตมป์ 2SX

3.4 การเก็บข้อมูล

ในการทำวิจัยนั้นได้แบ่งขั้นตอนในการเก็บข้อมูลออกเป็น 5 ส่วนดังนี้

3.4.1 การเก็บค่ากระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ (A)

โดยวัดขณะที่แขนกลเคลื่อนที่ขึ้นและลง องศาต่างกันตั้งแต่ 0°-90° ทุกๆช่วงเวลาที่ได้จากทฤษฎีซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลกึ่งรถยนต์แบบสองแขน โดยที่ (ก) เป็นลักษณะของแขนกล ณ ตำแหน่ง 0°, (ข) เป็นลักษณะของแขนกล ณ ตำแหน่ง 45° และ(ค)เป็นลักษณะของแขนกล ณ ตำแหน่ง 90°

3.4.2 การเก็บค่ากำลังของมอเตอร์ (W)

โดยทำการคำนวณหาค่ากำลังทางไฟฟ้าจากค่ากระแสไฟฟ้าจากสมการที่ 14

$$P = IE \quad (14)$$

3.4.3 การเก็บค่าแรงบิดของมอเตอร์ (T)

โดยทำการคำนวณหาค่าแรงบิดของมอเตอร์จากสมการที่ 15

$$T = P\Delta t \quad (15)$$

3.4.4 การเก็บค่าความเร่งเชิงมุมของแขนที่ 1 และ 2 (m/s²)

โดยทำการคำนวณหาค่าความเร่งเชิงมุมขณะเคลื่อนที่จากสมการที่ 17

$$T = I\alpha \quad (16)$$

$$T = \frac{1}{12} mL^2 \alpha$$

$$\alpha = \frac{12T}{mL^2} \quad (17)$$

3.4.5 การเก็บค่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 1 และ 2 (m/s)

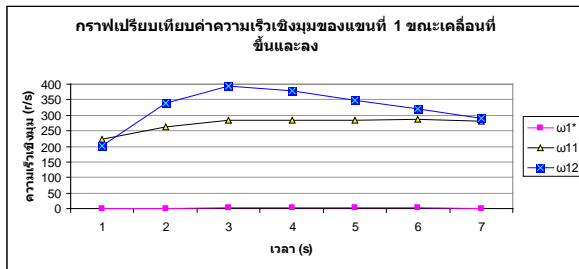
โดยทำการคำนวณหาค่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 1 และ 2 จากสมการที่ 18

$$\omega = \alpha(\Delta t) \quad (18)$$

4. ผลการวิจัย

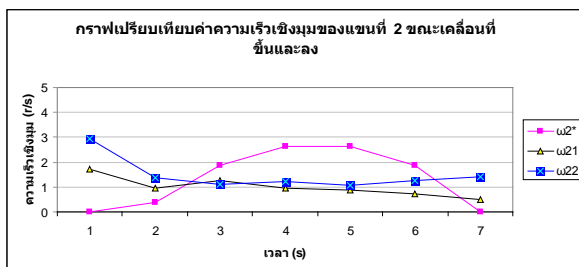
ในการวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าความเร็วเชิงมุมค่าความเร่งเชิงมุม และค่าแรงบิด ซึ่งเมื่อนำค่าดังกล่าวมาเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎีพบว่า

4.1 เปรียบเทียบค่าความเร็วเชิงมุมที่ได้จากการวัดจริงกับค่าที่ได้จากทฤษฎี



รูปที่ 9 แผนภาพการเปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมของแขนกลหุ่นยนต์ของแขนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลง

จากรูปที่ 9 พบว่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงมีความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยมากกว่าความเร็วจากทฤษฎี 99% และ 99%

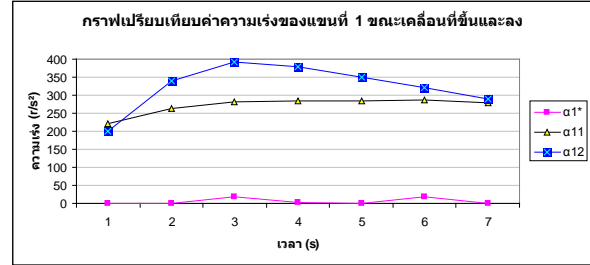


รูปที่ 10 แผนภาพการเปรียบเทียบความเร็วเชิงมุมของแขนกลหุ่นยนต์ของแขนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลง

จากรูปที่ 10 พบว่าความเร็วเชิงมุมของแขนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นจะมีความเร็วเชิงมุมน้อยกว่า

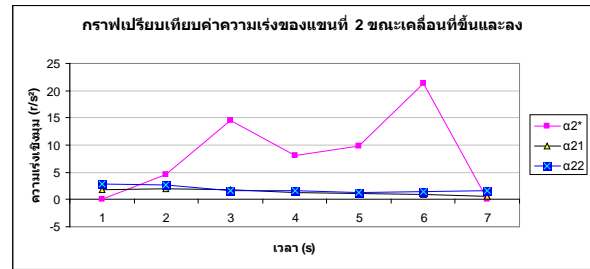
ทฤษฎี 27% และขณะเคลื่อนที่ลงมีความเร็วเชิงมุมมากกว่าค่าที่ได้จากทฤษฎี 10%

4.2 เปรียบเทียบค่าความเร่งเชิงมุมที่ได้จากการวัดจริงกับค่าที่ได้จากทฤษฎี



รูปที่ 11 แผนภาพการเปรียบเทียบความเร่งเชิงมุมของแขนกลหุ่นยนต์แขนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลง

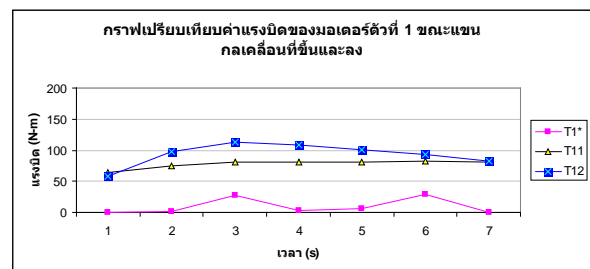
จากรูปที่ 11 พบว่าความเร่งเชิงมุมของแขนที่ 1 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงมีความเร่งเชิงมุมเฉลี่ยมากกว่าความเร่งจากทฤษฎี 97% และ 98%



รูปที่ 12 แผนภาพการเปรียบเทียบความเร่งเชิงมุมของแขนกลหุ่นยนต์แขนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลง

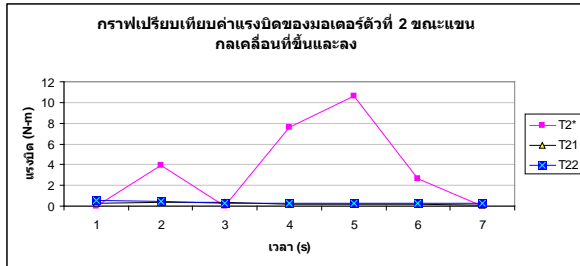
จากรูปที่ 12 พบว่าความเร่งเชิงมุมของแขนที่ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงมีความเร่งน้อยกว่าค่าที่ได้จากทฤษฎี 84% และ 76% ตามลำดับ

4.3 เปรียบเทียบค่าแรงบิดที่ได้จากการวัดจริงกับค่าที่ได้จากทฤษฎี



รูปที่ 13 แผนภาพการเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์ ตัวที่ 1 ขณะที่แขนกลเคลื่อนที่ขึ้นและลง

จากรูปที่ 13 พบว่ามอเตอร์ตัวที่ 1 ขณะแกนกลเคลื่อนที่ขึ้นและลงมีค่าแรงบิดของมอเตอร์เฉลี่ยมากกว่าแรงบิดของมอเตอร์จากทฤษฎี 87% และ 89%



รูปที่ 14 แผนภาพการเปรียบเทียบค่าแรงบิดของมอเตอร์ ตัวที่ 2 ขณะที่แกนกลเคลื่อนที่ขึ้นและลงจากรูปที่ 14 พบว่ามอเตอร์ตัวที่ 2 ขณะแกนกลเคลื่อนที่ขึ้นและลงมีค่าแรงบิดของมอเตอร์น้อยกว่าค่าที่ได้จากทฤษฎี 93% และ 90% ตามลำดับ

5. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้พบว่าเมื่อนำค่า ความเร็วเชิงมุม ความเร่งเชิงมุม และแรงบิด ของแกนกลและมอเตอร์ตัวที่ 1 และ 2 ขณะเคลื่อนที่ขึ้นและลงซึ่งถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ขึ้นลงตามหลักการความนุ่มนวลที่สุด (Minimum Jerk) นั้น มีค่าเฉลี่ยมากกว่าค่าที่ได้จากทฤษฎี 33% และ 54%, 41% และ 37%, 40% และ 40% ตามลำดับ

และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ 16 เห็นได้ว่าถ้าความเร่งเชิงมุม (α) มีค่าสูงขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าแรงบิดของมอเตอร์สูงขึ้นด้วยและแรงบิดของมอเตอร์ก็จะเป็นต้นเหตุทำให้เกิดความสั่นสะเทือนขณะที่แกนกลเกิดการเคลื่อนที่

ดังนั้นจากรูปที่ 11 และ 12 นั้นสรุปได้ว่าการทำงานจริงของแกนกลที่เป็นผลมาจากการควบคุมโดยหลักการเคลื่อนที่นุ่มนวลที่สุดนั้นมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นเพียง 39% เมื่อเทียบกับทฤษฎีและหากนำไปพัฒนาร่วมกับการออกแบบโดยใช้หลักการทดกำลังก็จะสามารถลดการใช้พลังงานได้อีกทางหนึ่ง

6. รายการสัญลักษณ์

- θ_i คือ มุมขณะเคลื่อนที่
- J คือ ความนุ่มนวลที่สุด
- M_M คือ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นขณะที่

แกนกลเคลื่อนที่

- P คือ กำลังทางไฟฟ้า
- I คือ กระแสไฟฟ้า
- E คือ ความต่างศักย์ทางไฟฟ้า
- T คือ แรงบิดของมอเตอร์
- F คือ แรงของมอเตอร์
- L คือ ความยาวของแขน
- m คือ มวลของแขน
- I คือ โมเมนต์อินเนอร์เซีย
- α คือ ความเร่งเชิงมุม
- ω คือ ความเร็วเชิงมุม
- Δt คือ เวลาในการเคลื่อนที่ของ

แกนกลจากตำแหน่งที่ 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

7. เอกสารอ้างอิง

7.1 รายงาน

[1] Sunil K. Agrawal Designing robot for optimal performance During Repetitive Motion, *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, No.14 Vol.5 2541 pp.771-777,

[2] Sunil K. Agrawal Fabien New Computation Framework fro Trajectory Optimization of Higher – Order Dynamic System, *AIAA Journal of Guidance Control and Dynamic* Vol.24 No.2 2544 pp.228 – 236

[3] Tawiwat Veeraklaew, Sunil K.Agrawal, “*Neighboring optimal Feedback Law of Hiher-Order Dynamic System*”, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*, Transaction of the ASME, 2002, Vol.124, No.3, 492-497.

[4] Saneewong Na Ayuttaya S. 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, Chulachomklao Royal Military Academy and Srinakharinwirot University, *สภาอาจารย์ ส่วน การศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า วารสาร ทางวิชาการ พ.ศ. 2549* หน้า 209 – 215

[5] Veeraklaew T., Phathana-im N. and Heame S. Comarison between Minimum Direct and Indirect Jerks of Linear Dynamic Systems. *Proceedings of World Academy of Science Engineering and Technology Vo.27February 2008 ISSN 1307-6884*, paa 26-30

7.2 หนังสือ

[6] สงบ ยอดสง่า ศึกษาแนวทางใหม่ในการหาคำตอบของการใช้พลังงานน้อยที่สุดประยุกต์ใช้กับแขนกลที่ใช้กั่นรถยนต์แบบอัตโนมัติ *วิทยานิพนธ์วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล)*. กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 2551

[7] วิรัช สิริทรัพย์ไพบูลย์, โปรแกรมเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานกราฟิกในการหาสมการการเคลื่อนที่ของ

หุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม MATLAB วิทยานิพนธ์วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล) . กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 2551