



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์แบบข้อต่อยืดหยุ่นได้โดยใช้เทคนิค
คอมมานด์เชปปีง

Command Shaping Applied to Point-to-Point Motion of a One-link Flexible-Joint Robot

นามผู้วิจัย นายธีรพงษ์ ตระกูลโชคอำนวย

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์วิฑิต นัตรรัตนกุลชัย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย ศิวะโกศิษฐ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, D.Phil.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์แบบข้อต่อยืดหยุ่นได้ โดยใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปีง

Command Shaping Applied to Point-to-Point Motion of a One-link Flexible-Joint Robot

โดย

นายธีรพงษ์ ตระกูลโชคอำนวย

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2552

ธีรพงษ์ ตระกูลโชคอำนวย 2552: การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์แบบข้อต่อ
ยึดหยุ่นได้ โดยใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปีง วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์วิฑิต ฉัตรรัตนกุลชัย, Ph.D. 72 หน้า

ความยืดหยุ่นของข้อต่อช่วยลดการเสียหายจากการชน จริงๆแล้วข้อต่อของแขนหุ่นยนต์
ทุกชนิด มีความยืดหยุ่นอยู่บ้างจากคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ ผลในอดีตรับว่า หากไม่นำความ
ยืดหยุ่นของข้อต่อเข้ามาพิจารณาในการออกแบบ อาจทำให้เกิดความเสียหายจากการสั่นพ้อง
(Resonance) และประสิทธิภาพในการควบคุมลดลงอย่างไรก็ตาม การควบคุมหุ่นยนต์แบบข้อต่อ
ยึดหยุ่นได้ยังเป็นปัญหาเปิดทางการวิจัยเนื่องจากแบบจำลองมีความซับซ้อน และการที่ระบบเป็น
แบบ Under-actuated ความยืดหยุ่นของข้อต่อทำให้แขนหุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เร็ว
เนื่องจากการสั่นสะเทือนที่ End Point จากการที่ Reference Signals ได้แก่ความเร่ง ความเร็ว และ
การขจัดที่มี Power Spectrum สูงในทุกย่านความถี่ ไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของระบบ ใน
งานวิจัยนี้เราได้ใช้ ฟังก์ชันพื้นฐานเริ่ม ไซน์ซอຍในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference
Signals เพื่อลดค่าพลังงานกระตุ้นในช่วงที่เกิดความถี่ธรรมชาติ เพื่อลดการสั่นพ้อง ผลจาก
Simulation และจากการทดลองจริง เห็นได้ชัดว่าการสั่นสะเทือนของแขนหุ่นยนต์จากการใช้
Command Shaping ลดลง ทำให้แขนกลเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น

Teeraphong Trakoolchokumnuay 2009: Command Shaping Applied to Point-to-Point Motion of a One-link Flexible-Joint Robot. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Mr. Withit Chatlatanagulchai, Ph.D. 72 pages.

Joint flexibility is used to reduce damage from accidental collision. Actually, robot's joint has the flexibility from basic property of its material. The past research specified that ignorance of the joint flexibility during the design phase may damage joint due to resonance, and the control design has less efficiency. However, the control design of the flexible-joint robot is an open research problem because the mathematical model of the robot is complicated, and the flexible-joint robot is under-actuated. The robot cannot move too fast because of the residual vibration at the end point due to the joint flexibility. Traditional reference acceleration signal is a square wave, which has high power spectrum energy over a broad frequency range. When this reference acceleration is intergraded to become reference velocity and position, they also have high power spectrum energy over a broad frequency range. This high power spectrum signals, when used as reference signals, will excite the robot's natural frequency causing resonance. In this research, we use a ramped sinusoidal basis function to reconstruct the reference signals to reduce power energy at the natural frequency and, therefore, reduce resonance. Simulation and experimental results show that the residual vibration of the flexible-joint robot using shaped reference signals is lower, and the flexible-joint robot achieves faster move time.

_____/_____/_____
Student's signature Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์วิทิต ถัตรีรัตนกุลชัย ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือให้วิชาความรู้ คำแนะนำต่างๆ รวมถึงการวางแผนการทำงานวิจัยทำให้วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชัย ศิวะโกศิษฐ กรรมการที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำแนวคิดในงานวิจัยรวมถึงข้อเสนอแนะในการเขียนเล่ม วิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ CRV Lab ทุกคนที่ได้ให้กำลังใจ ความช่วยเหลือ และ ความรู้ดีๆ มาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ อากง เตี้ย แม่ อาโก อาเจ้ อาเฮีย น้องๆ รวมถึงทุกคนในครอบครัว ตระกูลโชคอำนวย ในความรัก ความเมตตา ที่มีให้ข้าพเจ้าเสมอมา

ความสำเร็จ และคุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์

ธีรพงษ์ ตระกูลโชคอำนวย

กุมภาพันธ์ 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญภาพ	(2)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	11
อุปกรณ์	11
วิธีการ	15
ผลและวิจารณ์	42
ผล	42
วิจารณ์	45
สรุปและข้อเสนอแนะ	46
สรุป	46
ข้อเสนอแนะ	46
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	48
ภาคผนวก	51
ภาคผนวก ก โปรแกรม Matlab สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ ในการทำ System ID	52
ภาคผนวก ข โปรแกรม Matlab สำหรับการใช้ Fast Fourier Transform หาความถี่ธรรมชาติในการทดลองจริง	54
ภาคผนวก ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Input Spectrum และ Residual Acceleration Amplitude	56
ภาคผนวก ง โปรแกรม Matlab สำหรับเทคนิคคอมมานด์เซปปีงในการปรับเปลี่ยน โครงสร้างของ Reference Signals	62
ภาคผนวก จ ผลจากการทดลองการเปรียบเทียบการใช้คอมมานด์เซปปีงกับ ไม่ใช้คอมมานด์เซปปีง	66
ภาคผนวก ฉ ผลจากการทดลองการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องของแขนกล	68
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	72

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงแกนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้	11
2	วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (Power Amplifier)	12
3	เอนโคเดอร์ ของ Omron รุ่น E6B2-CW26C	12
4	Accelerometer	13
5	การรับส่งข้อมูล (Data Acquisition) NI PCI 6221	13
6	แสดงโครงสร้างระบบทั้งหมดที่ใช้ทำการทดลอง	14
7	แสดงแกนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นและอุปกรณ์ตรวจรู้	15
8	แสดงโครงสร้างของแกนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้	16
9	แสดงการหาสมการการเคลื่อนที่ของแกนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้	19
10	รูปบนแสดงมุมการเคลื่อนที่ของแกนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น รูปล่าง แสดงผลของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์	20
11	แสดงผลการเคลื่อนที่ของแกนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น จากแบบจำลอง แกนกลกับแกนกลจริง	22
12	แสดงบล็อกระบบควบคุมแบบปิด	23
13	แสดงการควบคุมแบบ Inverse Dynamics	29
14	บนล่างแสดงการติดตั้ง Accelerometer กับแกนกล	32
15	แสดงผลการคำนวณความถี่ธรรมชาติจาก FFT	33
16	แสดง Two-Mass System Model	37
17	แสดง reference trajectories (square wave)	39
18	แสดงการ shaped input	40
19	แสดง reference trajectories (ramped sine)	41
20	แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแกนกล จากการใช้เทคนิค คอมมานด์เชปปีง	42
21	แสดงผลของของความเร็วทั้งสองกรณี	43
22	แสดงผลของ Input Voltages ทั้งสองกรณี	44

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	แอมพลิจูดความเร่งของการสั่นสะเทือน
a_k, a_l	=	จำนวนลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับพื้นฐานฟังก์ชัน
a_m	=	ความเร็วสูงสุด
B_k, B_l	=	สัมประสิทธิ์ของพื้นฐานฟังก์ชัน
c	=	ค่าความหน่วงที่จุดหมุนของแขนกล
D	=	Dissipative Power
d	=	ระยะระหว่างจุดยึดสปริงบน Hub ถึงจุดหมุนแขนกลในแนวตั้ง
e	=	Error
F	=	แรงสูงสุด (Peak Force)
F_{cs}^*	=	ฟูเรีย ทรานฟอร์มที่ไม่มีหน่วยของ Command Shaped profile
F_{max}	=	แรงสูงสุด (Peak Force Amplitude)
$F(\omega_n)$	=	ฟูเรีย ทรามฟอร์ม ของ Input Function
f	=	แรง
f_{cs}	=	Command Shaped profile
f_n	=	ความถี่
f_r	=	Bang-Bang command profile
G	=	ตัวควบคุม (Controller)
I	=	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์
J	=	โมเมนต์ความเฉื่อย
J_{hub}	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของ Hub
J_{link}	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกล
K	=	พลังงานจลน์
k_{stiff}	=	ค่าความยืดหยุ่นของสปริงแบบขด
k	=	ค่าความยืดหยุ่นของสปริง
k_b	=	Motor back emf constant
k_m	=	Motor torque constant
k_g	=	Gear Ratio
L	=	จำนวนเทอมของพื้นฐานฟังก์ชันเริ่ม ไซนูซอย
m	=	มวล

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

N	=	จำนวนของความถี่ต่างๆรอบบริเวณความถี่ธรรมชาติ
P	=	พลังงานศักย์ยืดหยุ่น
p^{-1}	=	Inverse Model
Q_1, Q_2	=	พลังงานภายนอกของสมการลากรางจ์
R_m	=	ค่าความต้านทานของมอเตอร์
SF	=	Scale Factor
T_f	=	Command Shaped input ที่มีความสัมพันธ์กับเวลา
T_r, T_s	=	Square Wave หรือ Bang-Bang input ของระบบที่มีการเคลื่อนที่กับเวลา
T	=	ทอร์กของมอเตอร์
y_e	=	ตำแหน่งการสิ้นสุดการเคลื่อนที่ (endpoint position)
y_f	=	ตำแหน่งสุดท้ายของการเคลื่อนที่ (final position)
y_m	=	ตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ (motor position)
V	=	แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์
θ_1	=	มุมของ Link แขนกลเทียบกับฐาน
θ_2	=	มุมของ Hub เทียบกับฐาน
$\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta$	=	Reference Signals ได้แก่ ความเร่ง ความเร็ว และการจัด
ω_A	=	ความถี่ธรรมชาติจริงของระบบ (actual natural frequency)
ω_N	=	ความถี่ธรรมชาติประมาณ (nominal natural frequency)
ω_i, ω_n	=	ความถี่ธรรมชาติ
ρ	=	น้ำหนัก
τ_m	=	แรงบิดสูงสุด
Δv	=	ช่วงของการเปลี่ยนความเร็ว
Γ	=	Scale Function

การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์แบบข้อต่อยืดหยุ่นได้ โดยใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปีง

Command Shaping Applied to Point-to-Point Motion of a One-link Flexible-Joint Robot

คำนำ

เนื่องจากในโลกปัจจุบันเป็นโลกแห่งเทคโนโลยีซึ่งมีการพัฒนาตั้งแต่อดีตที่เป็นช่วงปฏิวัติอุตสาหกรรมที่มีการใช้เครื่องจักรไอน้ำแทนแรงงานคนอย่างแท้จริงเป็นครั้งแรก เพราะเนื่องจากแรงงานคนเป็นอะไรที่ไม่แน่นอนทั้งค่าแรงงานที่ต้องเสีย และผลงานที่ได้รับนั้นเราไม่สามารถกำหนดได้แน่นอนว่าจะเป็นอย่างไรจนยุคต่อๆมาก็ได้มีการพัฒนาเครื่องจักรที่จะมาแทนแรงงานคนเรื่อยมาจนถึงปัจจุบันได้พัฒนาจนถึงว่าเครื่องจักรนั้นต้องมีความยืดหยุ่นสูงก็ต้องสามารถทำงานได้หลายรูปแบบแล้วต้องเป็นระบบที่สามารถทำงานได้เองเป็นอัตโนมัติ ซึ่งในระยะยาวจะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากและเครื่องจักรที่มีความยืดหยุ่นสูงส่วนมากก็คือแขนกล

ความยืดหยุ่นของแขนกลถือได้ว่าเป็นส่วนประกอบหนึ่งในหุ่นยนต์ที่มีความสำคัญในการทำงานต่างๆ ของระบบ โดยส่วนใหญ่แล้วข้อต่อของแขนกลทุกชนิดจะมีความยืดหยุ่นซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของแขนกล ซึ่งความยืดหยุ่นของแขนกลนั้นจะช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการชนและอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นเพราะแขนกลนั้นจะมีการเคลื่อนที่ค่อนข้างเร็วอยู่ตลอดเวลา

เหตุผลที่สำคัญประการหนึ่งในการออกแบบแขนกลคือความยืดหยุ่น หากไม่นำความยืดหยุ่นมาพิจารณาในการออกแบบข้อต่อของแขนกลแล้ว ในการนำไปใช้งานจริงนั้นอาจเกิดความเสียหายจากการสั่นพ้อง (Resonance) และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการควบคุมแขนกลลดลง

การควบคุมแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้นั้นยังเป็นปัญหาเปิดทางงานวิจัยเพราะว่าส่วนใหญ่แล้วแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลจะเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ต้องทำการหาซึ่งจะสามารถช่วยอธิบายพฤติกรรมของระบบแขนกล แต่ปัญหาที่สำคัญคือระบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นมีความยากต่อการทำให้ระบบมีความแม่นยำ และจากการที่ระบบของแขนกลเป็น

แบบ Under-actuated ความยืดหยุ่นของข้อต่อทำให้แขนกลไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เร็ว เนื่องจากเมื่อเกิดการเคลื่อนที่จะมีการสั่นสะเทือนที่จุดปลายของแขนกล (End Point)

จากสัญญาณอ้างอิงของระบบคือ Reference Signals ซึ่งได้แก่ ความเร่ง ความเร็ว และการจัดซึ่งค่า Reference Signals ทั้งสามนี้จะมี Power Spectrum สูงในทุกย่านความถี่โดยจะไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของระบบทำให้แขนกลนั้นเกิดการสั่นสะเทือน

ในงานวิจัยนี้เราให้ใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปีงในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals เพื่อลดค่าพลังงานกระตุ้นในช่วงที่เกิดความถี่ธรรมชาติเพื่อลดการสั่นพ้องและงานวิจัยนี้เราใช้ฟังก์ชันพื้นฐานของเรียม์ ไซนูซอยเข้ามาใช้ในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals ผลจาก Simulation และจากการทดลองจริง แสดงให้เห็นว่าการสั่นสะเทือนของแขนกลจากการใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปีงลดลงและทำให้แขนกลเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและออกแบบการควบคุมแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น โดยใช้เทคนิคคอมมานด์เปชปีง
2. สร้างแบบจำลองทางสมการคณิตศาสตร์และหาสมการการเคลื่อนที่ทางคณิตศาสตร์ของแขนกล (System ID) เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นในการออกแบบการควบคุมแขนกล
3. ทำการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น โดยใช้เทคนิคคอมมานด์เปชปีงและนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบระหว่าง การใช้ Unshaped Command กับ Shaped Command

การตรวจเอกสาร

แกนกลถือได้ว่าเป็นส่วนประกอบหนึ่งในหุ่นยนต์ที่มีความสำคัญในการทำงานต่างๆ ของระบบโดยส่วนใหญ่แล้วการทำงานของแกนกลนั้นจะมีการเคลื่อนที่ค่อนข้างเร็วอยู่ตลอดเวลา ผลที่ตามมาก็คือเกิดการสั่นสะเทือนของแกนกล โดยการสั่นสะเทือนนี้อาจส่งผลทำให้เกิดความเสียหายของระบบและผู้ควบคุมได้

การสั่นสะเทือนทางกลนั้นจะเกิดจากการเคลื่อนที่แบบสั่นไปมาของระบบที่ประกอบด้วยมวลและสภาพยืดหยุ่น(Elasticity)ในช่วงเวลาที่กำหนดในช่วงเวลาหนึ่งเรียกว่า การสั่นสะเทือน (Vibration) ในโครงสร้างของระบบทางพลศาสตร์นั้นจะมีการสั่นพ้อง (Resonance) ที่สามารถเกิดขึ้นได้ เมื่อระบบของเราถูกกระตุ้นจาก Input ที่ให้กับระบบ

การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับระบบหรือว่าแกนกลนั้น มีความสำคัญอย่างมากในการควบคุม เพราะส่วนใหญ่แล้วแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแกนกลจะเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ต้องทำการหา เพราะจะสามารถช่วยอธิบายพฤติกรรมของระบบแกนกล แต่ปัญหาที่สำคัญคือระบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีความยากต่อการทำให้ระบบมีความแม่นยำเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ คือการทำให้ระบบนั้นลดการสั่นสะเทือนและเข้าสู่จุดสมดุลได้เร็วขึ้นเมื่อเกิดการเคลื่อนที่รวมถึงการออกแบบการควบคุมระบบและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบด้วย

มีเทคนิคต่างๆ ในการควบคุมการสั่นสะเทือนของแกนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น ซึ่งประกอบด้วย การควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้พื้นฐานรูปแบบทางพลศาสตร์ (Bayo and Moulin, 1989), คอมมานด์เชปปีง (Meckl and Seering, 1987; Singer and Seering, 1990; Singhose, Seering and Singer, 1996) อะแด็ปทีฟและการควบคุมความทนทาน (Tzes and Yurkovich, 1989; Khorrami, *et al.*, 1995) การลดการสั่นสะเทือนโดยใช้ Piezoelectric Actuators (Ge, *et al.*, 2001) เทคนิคคอมมานด์เชปปีงเป็นเทคนิคที่ดีมีความถูกต้องแม่นยำสูง ในการลดการสั่นสะเทือน เมื่อระบบมีการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว โดยเทคนิคนี้เป็นการปรับเปลี่ยนค่า Input เพื่อลดพลังงานกระตุ้นของระบบที่เกิดขึ้นในช่วงที่เกิดความถี่ธรรมชาติ

Aspinwall (1980) เป็นบุคคลแรกที่ได้นำพื้นฐานของฟังก์ชันมาสังเคราะห์การ Shaped Commands ในการควบคุมการเคลื่อนที่กลไกการทำงานของเครื่องจักรแบบยืดหยุ่น Meckl (1984) เป็นคนต่อมาที่ได้นำพื้นฐานฟังก์ชันมาใช้ โดยใช้วิธี Least-Squares วัตถุประสงค์หลักคือต้องการ

สังเคราะห์ Input Command ที่มีพลังงานสูง เพื่อให้มีค่าความถี่น้อยๆ โดยจะไม่ตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบ เพื่อลดการสั่นสะเทือน

ข้อต่อแบบยึดหยุ่นเป็นส่วนประกอบหนึ่งในหุ่นยนต์ สามารถที่จะเคลื่อนที่ได้จากการขบกันของฟันเฟืองหรือสายพาน ในบางตัวอย่างของการนำข้อต่อไปใช้ โดยส่วนใหญ่แล้วถ้าเราไม่คำนึงหรือพิจารณาความยึดหยุ่นมาใช้ในการออกแบบก็จะเกิดความเสียหายจากการสั่นพ้องและประสิทธิภาพของการควบคุมก็จะลดลง

ความยึดหยุ่นนั้นจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วเนื่องจากเกิดการสั่นสะเทือนที่จุดปลายโดยเทคนิคคอมมานด์เซปป์จะเป็นการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals ที่เรียกว่า Bang-Bang ให้มีพลังงานกระตุ้นลดลง โดยเราได้ใช้พื้นฐานฟังก์ชันของแรมไซนูซอยมาใช้ในการ Shaped Commands และนำผลการทดลองของการทำ Unshaped Command และ Shaped Command มาเปรียบเทียบว่าสามารถที่จะลดการสั่นสะเทือนของแกนกลแบบข้อต่อยึดหยุ่นได้

การนำเทคนิคคอมมานด์เซปป์มาประยุกต์ใช้กับแกนกลแบบข้อต่อยึดหยุ่นก็ได้มีงานวิจัยของ kinceler and Meckl (1997) ที่ได้สังเคราะห์ Command Function ของแกนกลแบบข้อต่อยึดหยุ่น 2 Link ในระนาบ

Aspinwall (1980) แสดงการใช้พื้นฐานฟังก์ชันในการสังเคราะห์ Shaped Command สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่เครื่องจักรแบบยึดหยุ่น โดยการใช้ Finite Fourier Series Expansion ที่ทำให้ความถี่มีค่าน้อยๆ โดยการจำกัดขอบเขตของความถี่ส่วนที่เกิน

Meckl (1984) ได้เป็นผู้คิดค้นสมการ Cost Function ซึ่งอยู่ในรูปฟูเรียร์ทรานฟอร์ม ในการอธิบายลักษณะของเทคนิคคอมมานด์เซปป์ที่ทำให้ค่า Square มีค่าน้อยๆจากความแตกต่างระหว่างการสังเคราะห์ Command Function และ Bang-Bang Command Function ซึ่งได้อธิบายถึงขอบเขตของสเปกตรัมของความถี่ธรรมชาติของระบบจากสมการ Cost Function

$$J_c = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} \frac{1}{\tau_m^2} [f_r(t) - f_{cs}(t)]^2 dt + \rho \sum_{i=1}^N (\omega_i T_r)^2 |F_{cs}^*(\omega_i T_f)|^2$$

โดยที่

- T_r เป็น square wave หรือ bang-bang input ของระบบที่มีการเคลื่อนที่กับเวลา
 T_f เป็น command shaped input ที่มีความสัมพันธ์กับเวลา
 f_r เป็น bang-bang command profile
 f_{cs} เป็น command shaped profile
 ω_i เป็น ความถี่ธรรมชาติของระบบ
 ρ เป็น น้ำหนัก
 τ_m เป็น แรงบิดสูงสุด
 N เป็น จำนวนของความถี่ต่างๆรอบบริเวณความถี่ธรรมชาติ
 F_{cs}^* เป็น ฟังก์ชันทรานส์ฟอร์มที่ไม่มีหน่วยของ command shaped profile

เราสามารถหาอนุพันธ์ย่อยของ Cost Function และให้สัมพันธ์ของฟังก์ชันเท่ากับศูนย์ จะได้ผลลัพธ์ของระบบที่เป็นเชิงเส้นอยู่ในสมการ Algebraic ซึ่งจะสามารถแก้ค่าสัมพันธ์ของ Command Profile ได้ ในส่วนของ Actual Input สามารถคำนวณหาจาก Shaped Command Profile โดยค่าที่ได้จะอยู่ในรูปเวกเตอร์ของความถี่ธรรมชาติที่ไม่มีหน่วย (ωT_r) โดยที่ L เป็นจำนวนของ เทอมที่ประกอบอยู่ใน Command Profile และมีความสัมพันธ์กับน้ำหนัก (ρ)

สำหรับระบบที่ไม่มีความเร็วมาเกี่ยวข้องได้ใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่ม ไซน์ซอซ จากสมการ

$$f_{rs}(t) = \tau_m \sum_{k=1}^L \frac{\beta_k}{\alpha_k^2} \Phi_k^*(t)$$

และ

$$\Phi_k^*(t) = \alpha_k \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{t}{T_f} \right) + \sin \left(\alpha_k \frac{t}{T_f} \right) - \frac{\alpha_k}{2} \cos \left(\alpha_k \frac{t}{T_f} \right) \quad (1)$$

เป็นพื้นฐานฟังก์ชันเริ่ม ไซน์ซอซที่ไม่มีหน่วย B_k เป็นสัมพันธ์ของพื้นฐานฟังก์ชัน k^{th} และ α_k เป็นจำนวนลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับพื้นฐานฟังก์ชัน k^{th} จำนวนลักษณะคือค่าที่เลือกไว้ ดังนั้นพื้นฐานของฟังก์ชันจะมีขนาดเป็นศูนย์ และความชันจะอยู่ที่จุดปลาย โดยเมื่อเราใช้เงื่อนไข

ของขอบเขต หาค่าที่เทียบกับเวลาของสมการ (1) และทำการหาค่าที่จุดปลาย เราจะได้จำนวน
ลักษณะที่เราต้องการจากสมการ

$$\frac{\alpha_k}{2} \sin \alpha_k + \cos \alpha_k - 1 = 0, \text{ (for } \alpha_k \neq 2\pi n, n = 1, 2, \dots).$$

พื้นฐานฟังก์ชันเวอรัซายคือ

$$f_{vs}(t) = \tau_m \sum_{k=1}^L \beta_k \Phi_k^*(t)$$

และ

$$\Phi_k^*(t) = 1 - \cos\left(\frac{2\pi kt}{T_p}\right)$$

และ

$T_p = \Delta v / a_m$ แสดงถึงความต้องการของเวลาที่จะทำให้ถึงค่าความเร็ว

Δv เป็นช่วงของการเปลี่ยนความเร็ว

a_m เป็นความเร็วสูงสุดที่ระบบจะรับได้

พื้นฐานฟังก์ชันเวอรัซายสามารถใช้กับความเร่งของระบบ จากความเร็วค่าหนึ่งไปสู่
ความเร็วอีกค่าหนึ่ง

Meckl (1988) ได้เป็นผู้เสนอเทคนิคคอมมานด์เซปปีงในการลดการสั่นสะเทือนของระบบ
ที่มีการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว โดยใช้วิธีการหารูปแบบของแรงภายนอกที่จะนำไปใช้ในการลด
พลังงานกระตุ้นที่เกิดจากความถี่ธรรมชาติที่กระทำกับระบบ โดยรูปแบบของแรงที่นำมาใช้ได้มี
การปรับปรุงมาจากฟังก์ชันเรียมไซนูซอย และการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก วิธีการคือทำการเลือก
ตัวเลขสัมประสิทธิ์ในการลดพลังงานสเปกตัมที่เกิดจากความถี่ธรรมชาติของระบบเพื่อจะนำไป
แก้ไขฟังก์ชันให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นที่เกิดจากความไม่แน่นอนจากตัวแปรหรือปัจจัยต่างๆ ในของ
ส่วนการเคลื่อนที่แบบต่างๆนั้นมีการประยุกต์นำฟังก์ชันเวอรัซาย มาใช้ในกรณีถ้าระบบมีการ
เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่หรือมีการจำกัดความเร็ว ก็จะมีการหารูปแบบฟังก์ชันเวอรัซายมาใช้กับ

การเคลื่อนที่ที่มีความเร็วมาเกี่ยวข้อง และผลจากการทดลองเมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองจริงของฟังก์ชันแรมป์ ไชนูซอย และฟังก์ชันเวอร์ซายจะเห็นว่าสามารถลดการสั่นสะเทือนของระบบที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งก็มีความถูกต้องจริงตามผลการทดลองและเป็นที่ยอมรับได้

Mohamed and Tokhi (2003) ได้เสนอวิธีการควบคุมแบบ Feed-Forward สำหรับการควบคุมการสั่นสะเทือนของแขนกล โดยใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปีงบนพื้นฐาน Input Shaping Low-Pass และ Band-Stop Filtering โดยการบังคับประนาบของ Single-Link ของแขนกล รูปแบบทางพลศาสตร์ของระบบสามารถหาได้จากการใช้ระเบียบวิธีการของ Finite Element ส่วนของ Unshaped Bang-Bang เป็นแรงบิดที่ใส่เข้าไปเพื่อจะหาลักษณะของตัวแปรในระบบในการออกแบบและประมาณการควบคุม เพราะว่าการควบคุมแบบ Feed-Forward ตัวควบคุมจะถูกออกแบบบนพื้นฐานความถี่ธรรมชาติและอัตราการหน่วงของระบบ ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลจากการใช้ Shaped และ Filtered Inputs จะแสดงอยู่ใน Time Domain และ Frequency Domain ซึ่งสามารถที่จะลดระดับการสั่นสะเทือนของแขนกลได้

Kamram (2003) ได้เสนอเทคนิคคอมมานด์เชปปีงในการลดระดับของการสั่นสะเทือนในระหว่างการเคลื่อนที่ และได้้นำเทคนิคคอมมานด์เชปปีงนี้มาประยุกต์ใช้กับ Wire Bonder โดยมีกรนำแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ มาจากการประยุกต์ใช้ลากรานจ์เข้ามาช่วย เพื่อที่จะได้จัดรูปแบบของสมการให้อยู่ในปริภูมิ มีการสร้าง Simulink Model ในการทำนายลักษณะการเคลื่อนที่ของ Wire Bonder ในแกน Z เทคนิคคอมมานด์เชปปีงที่นำมาใช้กับ Wire Bonder ได้ทำการสังเคราะห์รูปคลื่นจากฟังก์ชันแรมป์ ไชนูซอย ในการเอาพลังงานที่อยู่บริเวณรอบของรูปคลื่นออก ส่วนผลการทดลองสามารถลดการสั่นสะเทือนของ Wire Bonder ได้

Chatlatanagulchai (2006) ได้เสนอเทคนิคคอมมานด์เชปปีงที่นำมาประยุกต์ใช้กับแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นสองแขน มีการใช้การควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อต้องการความแม่นยำสูง และได้ใช้รูปแบบของคำสั่งต่างๆ ในการทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือน และเข้าสู่จุดสมดุลได้เร็วขึ้น โดยรูปแบบคำสั่งที่ใช้ได้มาจากคำสั่งสังเคราะห์จากรูปแบบของ Bang-Bang เป็นรูปแบบที่ Unshaped และฟังก์ชันแรมป์ ไชนูซอย กับฟังก์ชันเวอร์ซาย ที่เป็นรูปแบบที่ Shaped แล้ว ส่วนผลของการทดลองฟังก์ชันเวอร์ซายจะมีประสิทธิภาพดีกว่าฟังก์ชันแรมป์ ไชนูซอยในการลดการสั่นสะเทือน

Singer and Seering (1990) ได้พัฒนาเทคนิค Input Shaping สำหรับการควบคุมการสั่นสะเทือน มีการใช้ Impulse Function ในการ Shaped Input โดยสัญญาณ Input นั้นเป็นการรวมกันของ Time-Shifted ที่มากกว่า 2 ครั้ง และการแบ่ง Version ของสัญญาณ Original Input โดยเทคนิค Input Shaping จะมีการถูกเพิ่มเติมสัญญาณต่างๆเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือน Input Shaping เป็นการทำบนพื้นฐาน Time Domain สามารถที่จะใช้ได้กับระบบที่เป็น Linear ส่วนระบบที่เป็น Nonlinear นั้นประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนจะน้อยลง

Tuttle and Seering (1996) ได้ทำการสร้างวิธีการ Time-Optimal สำหรับระบบที่เป็น Linear System โดยวิธีการนี้จะสามารถช่วยแก้ปัญหาต่างๆของระบบทางพลศาสตร์ต่างๆไป วิธีการของ Time-Optimal นั้นโดยส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในการหาค่าพลังงานที่มีค่ามากที่สุด

Meckl and Seering (1987) ได้ทำการสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง Frequency Spectrum ของ Input Functions สำหรับ Undamped กับระบบ Lightly Damped และผลของแอมพลิจูดความเร่งที่เหลืออยู่ สำหรับระบบ Lightly Damped ได้ถูกอธิบายว่าการที่พลังงานของระบบมีค่าสูงขึ้นนั้นส่งผลให้ระบบเกิดการสั่นพ้องและทำให้เกิดแอมพลิจูดของความเร่ง ดังนั้นเราต้องลดค่าพลังงานของระบบที่ Input Function ในช่วงของความถี่ธรรมชาติของระบบ ผลที่ได้ก็คือทำให้การสั่นสะเทือนลดลง จาก Input Forcing Function เราได้ทำการพิจารณาจากฟังก์ชันของแอมพลิจูดความเร่งที่สัมพันธ์ ที่จะช่วยลดค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นที่อยู่บริเวณรอบความถี่ของระบบ โดยจะสามารถควบคุมการสั่นสะเทือนได้ดี

Bayo and Moulin (1989) ใช้วิธีของ Linear Quadratic Optimal Control ในการสร้าง Optimal Trajectory ของระบบที่มีความยืดหยุ่น โดยที่ Optimal Inputs จะมีการเพิ่มเติมของ Ramp ใน Sine Wave เพื่อให้ความถี่นั้นเท่ากับความถี่ธรรมชาติ โดยวิธีการนี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ความถี่ของ Ramp โดยการทำให้ Spectrum Energy มีค่าเป็นศูนย์ใน Input ค่าความถี่นั้นจะมีค่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบ และถ้าเราสมมุติว่าระบบไม่มีความหน่วงจะสามารถลดการสั่นสะเทือนได้หรือไม่ Bayo และ Moulin ได้ทำการสรุปไว้ว่าผลของความหน่วงมีผลต่อการสร้าง Optimal Trajectory

Chang and Park (2001) ได้ใช้ Command Shaping ในโรงงาน Microelectronics สำหรับควบคุมการสั่นสะเทือนของ Chip Mounter และการออกแบบ เทคนิคคอมมานด์เชปปีง นั้นได้ถูกเสนอว่ามีประสิทธิภาพสามารถใช้กับระบบที่มีการเคลื่อนที่เร็วและสามารถช่วยลดค่า Overshoot และ Setting Time

Meckl and Umemoto (2000) ได้ใช้ฟังก์ชันของแรมป์ ไซนูซอยในการ Shaped Input Torques เพื่อที่จะลดการสั่นสะเทือนสารกึ่งตัวนำของเครื่องจักรการ Shaped Torques เป็นการทำให้เวลาในการเคลื่อนที่ลดลงและหลบหลีกค่า Overshoot ที่เกิดขึ้น โดยผลของการ Shaped Torques ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่า Polynomial Reference Input ซึ่งให้ผลว่าสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วและลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น

Meckl and Kinceler (1994) ได้เสนอฟังก์ชันแรมป์ ไซนูซอยในการควบคุมขอบเขตของพลังงานความถี่ที่สูงขึ้น และการใช้ฟังก์ชันแรมป์ ไซนูซอยในการลดการสั่นสะเทือนของระบบ มีการนำผลมาเปรียบเทียบกับระหว่างการใช้ Optimal Minimum Energy Input กับ Filtered Ramp Input โดยที่ผลของ Input จากการใช้ฟังก์ชันแรมป์ ไซนูซอยนั้นสามารถควบคุมพลังงานที่เพิ่มขึ้น และค่าของความถี่ที่สูงขึ้นได้

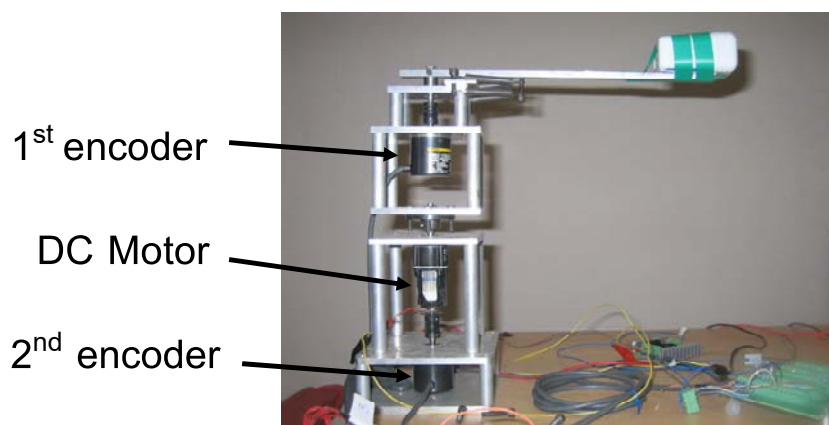
Singhose, *et al.* (1996) ได้พัฒนาเทคนิคคอมมานด์เชปปีงสำหรับ Coordinate Measuring Machine (CMM) ในการลดพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงและทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดให้มีความแม่นยำมากขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วย แขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ ระบบป้อนเข้าสัญญาณ ซึ่งประกอบด้วยระบบควบคุมความแรงดันไฟฟ้ามอเตอร์และแหล่งจ่ายพลังงาน ระบบป้อนกลับสัญญาณคือระบบรับค่าสัญญาณจากตัวตรวจรู้ ตัวควบคุมประกอบด้วยการ์ดรับส่งสัญญาณติดตั้งภายในคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็น Target Computer และ Host Computer สำหรับงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Labview ของบริษัท National Instrument และโปรแกรม Matlab ในการจำลองการทำงานและทำการทดลองจริง

1. แขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้



ภาพที่ 1 แสดงแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้

แขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ที่ใช้ในการทดลองนี้ตั้งอยู่ที่ห้อง Control of Robot and Vibration Laboratory (CRV Lab) ตึก RDiPt ชั้น 5 โครงสร้างของแขนกลทำด้วยอลูมิเนียม แขนกลมีลักษณะการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ ข้อต่อยืดหยุ่นโดยการติดสปริงทั้งสองข้างระหว่างแขนกลกับ Link ของแขนกล มี Encoder ตัวที่ 1 ที่ติดตั้งอยู่ส่วนบนของแขนกลทำหน้าที่ในการวัดมุมการเคลื่อนที่ของ Link และ Encoder ตัวที่ 2 ที่ติดตั้งอยู่ส่วนล่างของฐานแขนกลทำหน้าที่ในการวัดมุมการเคลื่อนที่ของ Hub โดย Encoder ทั้งสองเป็นของ Omron รุ่น E6B2-CW26C ความละเอียด 2000 และ 360 P/R ตามลำดับ แขนกลจะถูกขับโดยมอเตอร์กระแสตรงมีอัตราทด 64:1 แสดงในภาพที่ 1

2. วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (Power Amplifier)



ภาพที่ 2 แสดงวงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (Power Amplifier)

วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงทำหน้าที่ขยายกระแสไฟฟ้าโดยอุปกรณ์นี้จะรับสัญญาณป้อนเข้าคือกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดและปริมาณต่ำและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดและแรงดันสูงกว่า โดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 0-18 Volt ทนกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องได้ 10 แอมแปร์ ทนกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ 15 แอมแปร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์รุ่น Sabertooth2x10

3. เอนโคเดอร์ (Encoder)



ภาพที่ 3 แสดงเอนโคเดอร์ ของ Omron รุ่น E6B2-CW26C

เอนโคเดอร์ (Encoder) คือ เป็นอุปกรณ์วัดตำแหน่งที่อาศัยการยิงลำแสงผ่านแถบมืด-สว่างและส่งสัญญาณเป็นดิจิทัล แขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นจะมี Encoder ตัวที่ 1 ที่ติดตั้งอยู่ส่วนบนของแขนกลทำหน้าที่ในการวัดมุมการเคลื่อนที่ของ Link และ Encoder ตัวที่ 2 ที่ติดตั้ง

อยู่ส่วนล่างของฐานแขนกลทำหน้าที่ในการวัดมุมการเคลื่อนที่ของ Hub โดย Encoder ทั้งสองเป็นของ Omron รุ่น E6B2-CW26C ความละเอียด 2000 และ 360 P/R ตามลำดับ

4. Accelerometer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับค่าความเร่งเชิงมุม ค่าที่ได้จะเป็นค่าสัญญาณต่อเนื่อง (Analog) อุปกรณ์นี้ใช้สำหรับหาค่าความถี่ธรรมชาติ



ภาพที่ 4 แสดง Accelerometer

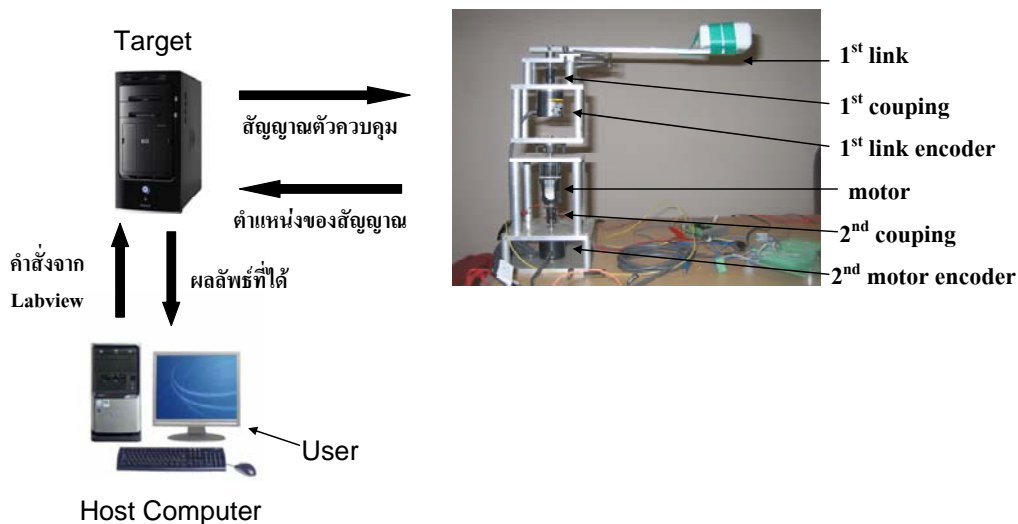
5. Target Computer คือคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมของระบบการทำงานของแขนกล ใน Target Computer จะถูกติดตั้งการ์ดรับส่งข้อมูล (Data Acquisition) NI PCI 6221 ทำหน้าที่รับส่งสัญญาณอนาล็อกและดิจิทัล Target Computer นี้ติดตั้งโปรแกรม Labview Realtime OS และ Labview ETS



ภาพที่ 5 แสดงการ์ดรับส่งข้อมูล (Data Acquisition) NI PCI 6221

6. Host Computer คือคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างแอปพลิเคชัน และ Host Computer ได้ติดตั้งโปรแกรม Labview Realtime โปรแกรม Labview Control โปรแกรม Labview Simulation และโปรแกรม Matlab

7. แหล่งจ่ายไฟ ได้ใช้ Power Supply GW INSTEK รุ่น GPS-3030D



ภาพที่ 6 แสดงโครงสร้างระบบทั้งหมดที่ใช้ทำการทดลอง

ภาพที่ 6 ได้แสดงโครงสร้างทั้งหมดที่ใช้ทำการทดลองประกอบด้วยแกนกลแบบมีข้อต่อ ยึดหยุ่นได้ทำมาจากอลูมิเนียม ตัวของแกนกลก็จะมีส่วนประกอบต่างๆคือ Link ของแกนกลทำจาก แท่งอลูมิเนียมและติดมวลไว้ด้านบน คัปปลิงทำหน้าที่ลดความเสียหายเมื่อเกิดอุบัติเหตุจากการชน เอนโคเดอร์ คือ เป็นอุปกรณ์วัดตำแหน่งของแกนกลที่ส่งสัญญาณเป็นดิจิทัล แกนกลจะมี Encoder ตัวที่ 1 ที่ติดตั้งอยู่ส่วนบนของแกนกลทำหน้าที่ในการวัดมุมการเคลื่อนที่ของ Link และ Encoder ตัวที่ 2 ที่ติดตั้งอยู่ส่วนล่างของฐานแกนกลทำหน้าที่ในการวัดมุมการเคลื่อนที่ของ Hub แกนกลจะถูกขับ โดยมอเตอร์กระแสตรง

การประมวลผลและการควบคุมแกนกลนั้นจะมีคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าเป็น Host Computer และ Target Computer โดยคอมพิวเตอร์ทั้งสองจะเชื่อมต่อกันผ่านทางสาย LAN ภายใน Target Computer จะถูกติดตั้งการ์ดรับส่งข้อมูลซึ่งจะทำหน้าที่รับค่าตำแหน่งต่างๆ จากอุปกรณ์ตรวจรู้ที่ได้ จากแกนกลและในทางกลับกัน Target Computer ก็จะทำการส่งสัญญาณการควบคุมไปยังแกนกล ในส่วนของผู้ใช้นั้นก็จะเป็น Host Computer ซึ่งจะทำหน้าที่แสดงผลที่ได้จาก Target Computer และทำการอัปเดตคำสั่งต่างๆ ของผู้ใช้ผ่านทาง Host Computer

วิธีการ

1. การสร้างแบบจำลองของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น

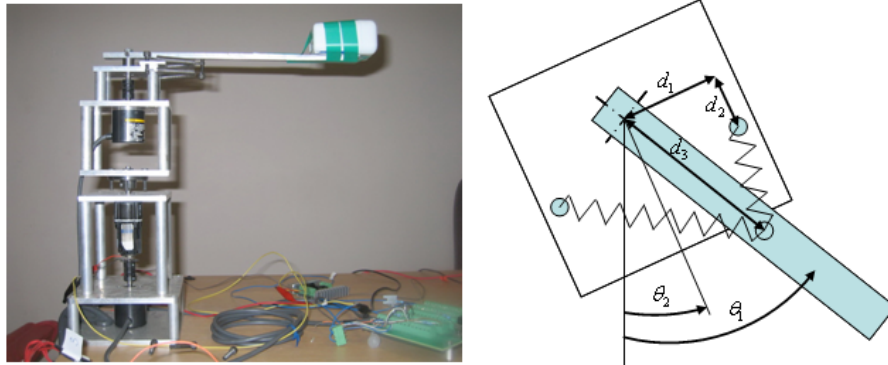
การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ โดยใช้วิธีการพลังงานของลากรางจ์ ซึ่งจะช่วยอธิบายพฤติกรรมการทำงานในส่วนต่างๆของแขนกลได้



ภาพที่ 7 แสดงแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นและอุปกรณ์ตรวจรู้

แขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้จะมีการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ เมื่อแขนกลเกิดการเคลื่อนที่มุมของ link แขนกลที่หมุนไปจะถูกวัดโดย encoder ตัวที่ 1 ที่ทำการติดตั้งอยู่บริเวณส่วนบนของแขนกล และมุมของ hub แขนกลที่หมุนไปจะถูกวัดโดย encoder ตัวที่ 2 ที่ติดตั้งอยู่บริเวณด้านล่างของฐานดังแสดงในภาพที่ 7 เป็นโครงสร้างของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ที่ใช้ในการทดลองซึ่งตั้งอยู่ที่ห้อง Control of Robot and Vibration Laboratory (CRV Lab) ตึก RDiPT ชั้น 5

พลศาสตร์ลากรางจ์ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้



ภาพที่ 8 แสดงโครงสร้างของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้

การเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้สามารถหาได้จากสมการงานพลังงานของลากรางจ์ได้ จากสมการพลังงานจลน์คือ

$$K = \frac{1}{2} J_{hub} \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} J_{link} \dot{\theta}_1^2$$

สมการพลังงานศักย์ยืดหยุ่นคือ

$$P = \frac{1}{2} k_{stiff} (\theta_1 - \theta_2)^2$$

สมการ Dissipative Power จาก Viscous Friction คือ

$$D = \frac{1}{2} c (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)^2$$

พลังงานภายนอกที่เกิดจาก แรงบิดของมอเตอร์คือ

$$Q_1 = 0$$

$$Q_2 = T$$

จากสมการของลาگرانจะได้อสมการคือ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta_i} + \frac{\partial P}{\partial \theta_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_i} = Q_i \quad , \quad i=1,2$$

เมื่อให้ $i=1$

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_1} &= J_{link} \dot{\theta}_1 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_1} \right) &= J_{link} \ddot{\theta}_1 \\ \frac{\partial K}{\partial \theta_1} &= 0 \\ \frac{\partial P}{\partial \theta_1} &= k_{stiff} (\theta_1 - \theta_2) \\ \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_1} &= c(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \end{aligned}$$

เมื่อให้ $i=2$

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_2} &= J_{hub} \dot{\theta}_2 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_2} \right) &= J_{hub} \ddot{\theta}_2 \\ \frac{\partial K}{\partial \theta_2} &= 0 \\ \frac{\partial P}{\partial \theta_2} &= -k_{stiff} (\theta_1 - \theta_2) \\ \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_2} &= -c(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \end{aligned}$$

สมการการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้คือ

$$\begin{aligned} J_{link} \ddot{\theta}_1 + k_{stiff} (\theta_1 - \theta_2) + c(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) &= 0 \\ J_{hub} \ddot{\theta}_2 - k_{stiff} (\theta_1 - \theta_2) - c(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) &= T \end{aligned} \quad (2)$$

ค่าทอร์กที่มอเตอร์สร้างขึ้นคือ

$$\begin{aligned} V &= IR_m + k_m k_g \dot{\theta}_2 \\ T &= k_g k_m I \end{aligned}$$

จะได้

$$T = \frac{k_g k_m V}{R_m} - \frac{k_m^2 k_g^2}{R_m} \dot{\theta}_2 \quad (3)$$

แทนค่าสมการ (3) ในสมการ (2) ได้

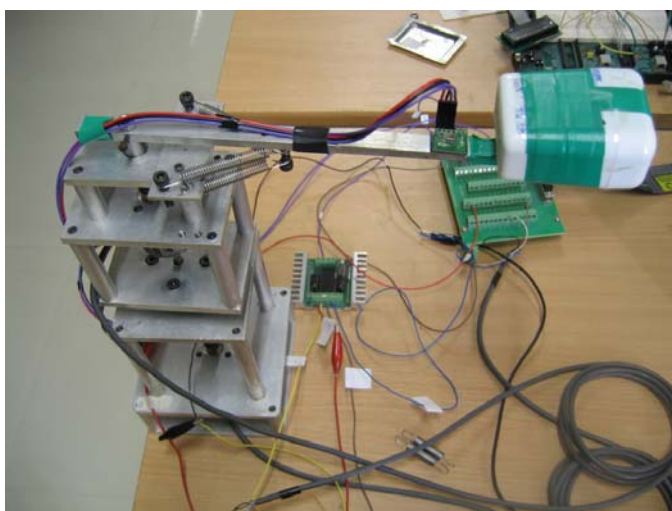
$$\begin{aligned} J_{link} \ddot{\theta}_1 + k_{stiff} (\theta_1 - \theta_2) + c (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) &= 0 \\ J_{hub} \ddot{\theta}_2 - k_{stiff} (\theta_1 - \theta_2) - c (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) &= \frac{k_g k_m V}{R_m} - \frac{k_m^2 k_g^2}{R_m} \dot{\theta}_2 \end{aligned}$$

ทำการจัดรูปใหม่จะได้

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_1 &= -\frac{k_{stiff}}{J_{link}} \theta_1 - \frac{c}{J_{link}} \dot{\theta}_1 + \frac{k_{stiff}}{J_{link}} \theta_2 + \frac{c}{J_{link}} \dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_2 &= \frac{k_{stiff}}{J_{hub}} \theta_1 + \frac{c}{J_{hub}} \dot{\theta}_1 - \frac{k_{stiff}}{J_{hub}} \theta_2 - \left(\frac{c}{J_{hub}} + \frac{k_m^2 k_g^2}{R_m J_{hub}} \right) \dot{\theta}_2 + \frac{k_m k_g}{R_m J_{hub}} V \end{aligned} \quad (4)$$

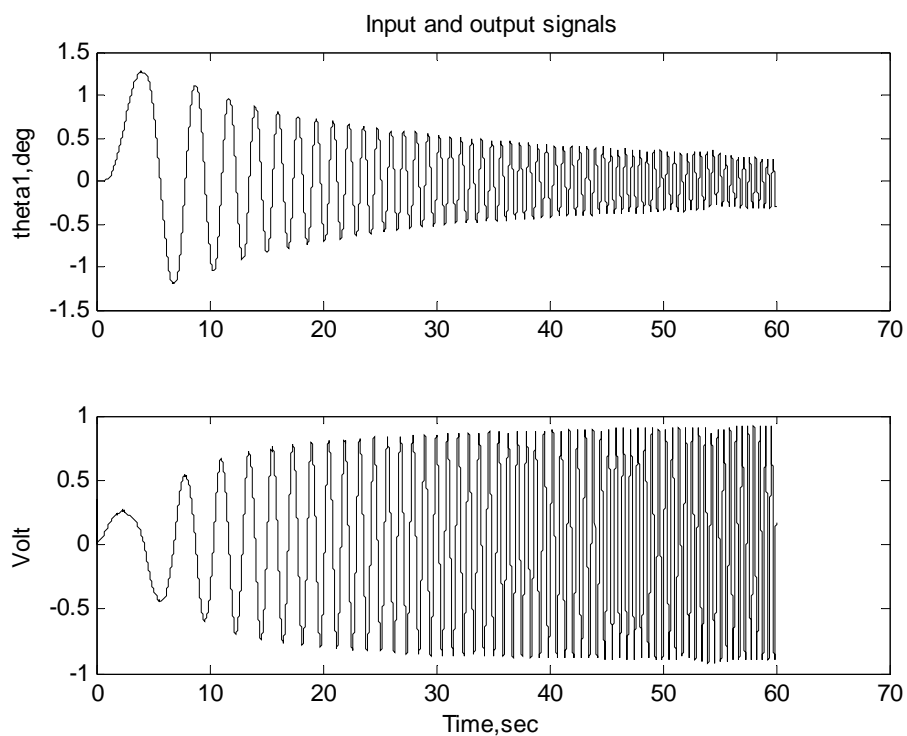
2. การหาสมการการเคลื่อนที่ของแขนกล (system identification)

ในส่วนนี้จะเป็นการทดลองทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ โดยใช้โปรแกรม Matlab สำหรับการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแขนกลในการทำ System ID ดังแสดงใน ภาคผนวก ก ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของแขนกลนั้นประกอบด้วย แรงดึงไฟฟ้าที่ให้กับมอเตอร์ในการขับ มุมการเคลื่อนที่ของ Link และมุมการเคลื่อนที่ของ Hub เพื่อนำมาสร้างสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้



ภาพที่ 9 แสดงการหาสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้

ภาพที่ 9 แสดงการทดลองเก็บค่าพารามิเตอร์ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้นั้น เราได้ให้แรงดันไฟฟ้ากับมอเตอร์เป็นสัญญาณ Sine Wave ซึ่งมีช่วงของการเปลี่ยนความถี่ที่ใช้ทำการทดลองตั้งแต่ 0.01 ถึง 1 Hz ค่าแอมพลิจูดที่ใช้คือ 1.5 ใช้เวลาในการทดลอง 60 วินาที และผลที่ได้จากการทำ System ID ได้แสดงในภาพที่ 10 โดยรูปบนแสดงมุมการเคลื่อนที่ของแขนกลซึ่งเป็นมุมรวมระหว่างมุมการเคลื่อนที่ของ Link และมุมการเคลื่อนที่ของ Hub รูปล่างแสดงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์



ภาพที่ 10 รูปบนแสดงมุมการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น
รูปล่างแสดงผลของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

จากกฎของนิวตันจะได้

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = T \quad (5)$$

เมื่อ

T คือค่าทอร์ก

k คือค่าคงที่ของสปริง

J คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

θ คือมุมการเคลื่อนที่ของแขนกล

c คือค่าความหน่วง

ค่าพอร์คของมอเตอร์ที่สร้างขึ้นคือ

$$V = IR_m + k_b k_g \dot{\theta}_2 \quad (6)$$

และ

$$T = k_g k_m I \quad (7)$$

เมื่อ

- V คือ ค่าแรงดันที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์
 I คือ กระแสในขดลวด
 R_m คือ ความต้านทานของขดลวดในมอเตอร์ (motor armature resistance)
 k_b คือ ค่า (motor back emf constant)
 k_m คือ ค่า (motor torque constant)
 k_g คือ ค่า (gear ratio)

จากสมการ (6) และ (7) จะได้

$$T = \frac{k_g k_m V}{R_m} - \frac{k_b k_m k_g^2}{R_m} \dot{\theta}_2 \quad (8)$$

สมการ Transfer Function ของการเคลื่อนที่เชิงมุมโดยที่ Input ของระบบคือ V และ Output ของระบบคือ θ เพราะฉะนั้นจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการคือ

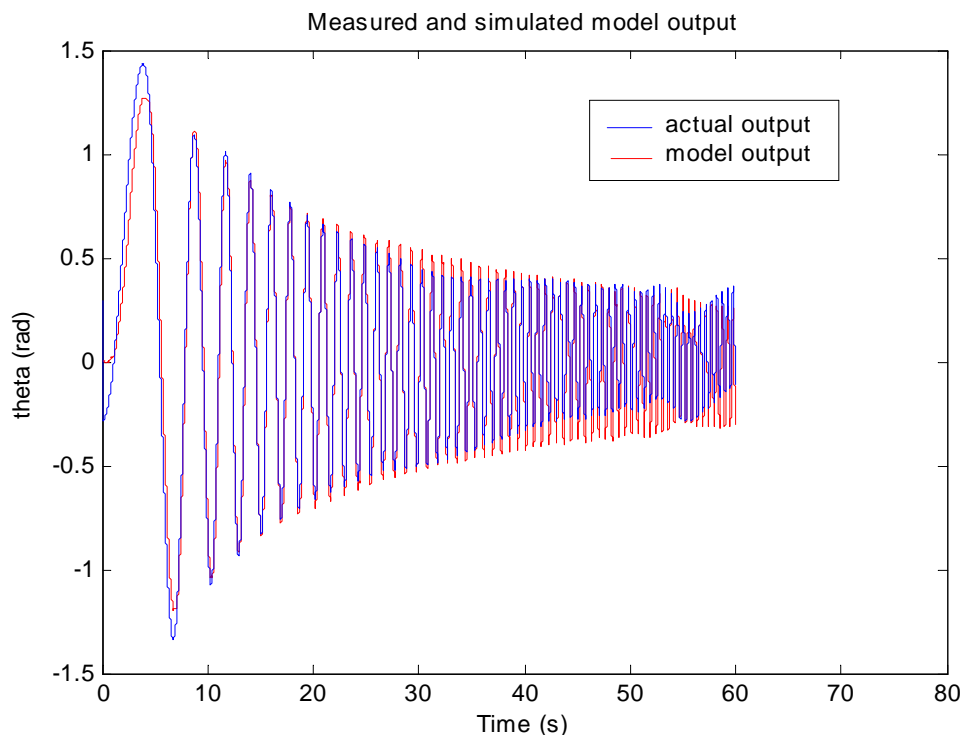
$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{k}{(Tw s)^2 + (2 Zeta Tw)s + 1} \quad (9)$$

หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากสมการที่ (9) ได้คือ

$$K = [12.0333], Tw = [0.33261], Zeta = [5.0546]$$

เพราะฉะนั้นจะได้ สมการ Transfer Function คือ

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{12.03}{0.1106s^2 + 3.3620s + 1} \quad (10)$$



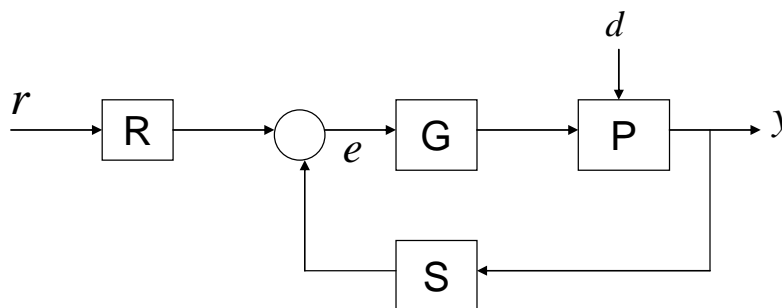
ภาพที่ 11 แสดงผลการเคลื่อนที่ของแกนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น
จากแบบจำลองแกนกลกับแกนกลจริง

ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของแกนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ ดังแสดงในภาพที่ 11 เส้นสีแดงคือผลการจำลองการเคลื่อนที่ของแกนกล ส่วนแล้วสีน้ำเงินคือผลการเคลื่อนที่จริงของแกนกล ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่นั้นมีความถูกต้อง 80.79% ซึ่งนับว่าเป็นค่าที่มีความถูกต้องในเกณฑ์ที่ดี แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างซึ่งเป็นผลมาจากแบบจำลองสมการการเคลื่อนที่ของแกนกลกับแกนกลจริงนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ ดังนั้นเราต้องมีตัวควบคุมซึ่งทำหน้าที่ลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นซึ่งได้กล่าวในส่วนที่ 3 เป็นการออกแบบระบบควบคุม

3. การออกแบบระบบควบคุม

การออกแบบระบบควบคุมซึ่งถือว่ามีส่วนสำคัญในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล เนื่องจาก ความไม่แน่นอนของระบบแล้วและอีกส่วนหนึ่งก็คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เราหาได้นั้นกับระบบจริงนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ดังนั้นเราต้องมีตัวควบคุมเพื่อช่วยลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นกับระบบให้มีค่าน้อยที่สุดเพื่อให้ระบบของเราตอบสนองตามที่เราร้องการ

การออกแบบระบบควบคุมมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีอาทิเช่น PID Controller, Feedback Linearization, Adaptive Control, Intelligent System, Singular Perturbation, Integral Manifold ฯลฯ แต่ระบบควบคุมระบบหนึ่งที่มีความสำคัญมากก็คือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Controller) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบหรือแขนกลที่ต้องการจะควบคุม โดยระบบควบคุมแบบอัตโนมัตินี้จะมีส่วนทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดของตัวแปรต่างๆจริงของระบบด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้ (Sensor) แล้วนำค่าเหล่านั้นมาเปรียบเทียบกับค่าตัวแปรที่ต้องการ และเมื่อทำการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นแล้วความต่างนี้จะถูกใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุมซึ่งสามารถลดการเปลี่ยนแปลงหรือความผิดพลาดที่เกิดขึ้นลงได้ เพื่อให้ความผิดพลาดเหล่านั้นมีค่าน้อยที่สุดหรือเท่ากับศูนย์ ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติที่สร้างสัญญาณควบคุม (Control Signal) ที่เกิดขึ้นนี้เราจะเรียกว่ากิริยาควบคุม (Control Action)



ภาพที่ 12 แสดงบล็อกแสดงระบบควบคุมแบบปิด

จากภาพที่ 12 เป็นบล็อกแสดงระบบควบคุมแบบปิด โดยที่ r คือ Command Reference, y คือ Output, d คือ ความไม่แน่นอน (Disturbance), R คือ Reference Sensor, G คือ ตัวควบคุม (Controller), P คือระบบ(Plant), S คือ Output Sensor, e คือ ความคลาดเคลื่อน (Error) สัญญาณคำสั่งอ้างอิง (Command Reference) จะถูกเปลี่ยนรูปแบบด้วยระบบตรวจรู้อ้างอิง (Reference Sensor)

เพื่อเปลี่ยนแปลงสัญญาณคำสั่งอ้างอิงให้มีลักษณะเดียวกับสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้หรืออีก ในความหนึ่งก็คือต้องการให้คำสั่งอ้างอิงมีหน่วยเดียวกับสัญญาณที่ออกจากอุปกรณ์ตรวจรู้ขาออก (Output Sensor) เพื่อสามารถให้เปรียบเทียบกันได้ เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะส่งสัญญาณผิดพลาด (Error) สัญญาณผิดพลาดนี้จะถูกส่งไปยังตัวควบคุม (Controller) เพื่อที่จะสร้างสัญญาณควบคุม (Control Input) และสัญญาณจากตัวควบคุมนี้จะให้เป็นสัญญาณควบคุมที่ส่งเข้าไปยังระบบที่เรา ต้องการควบคุม (Plant) ตัวควบคุมหรือ Controller นี้จะมีบทบาทมากในการตอบสนองสัญญาณ เอาต์พุตที่ต้องการและตัวควบคุมนั้นจะมีมาตรฐานหรือรูปแบบด้วยกันหลายประเภท

3.1 พื้นฐานของระบบควบคุม

อุปกรณ์ควบคุมจะถูกออกแบบไว้เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมไปควบคุมเมื่อมีสัญญาณ ความผิดพลาดเกิดขึ้น หลักหรือวิธีการควบคุมนั้นจะเรียกว่ากฎของการควบคุม หรือกฎการควบคุม เมื่อสัญญาณความผิดพลาดมีค่าไม่เป็นศูนย์ซึ่งอาจจะเป็นผลเนื่องมาจากเกิดการเปลี่ยนแปลงที่คำสั่ง หรือเกิดสัญญาณรบกวนได้ หน้าที่ของตัวควบคุมคือพยายามควบคุมตัวแปรของระบบให้มีค่า ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการซึ่งสามารถสรุปหน้าหน้าที่ของตัวควบคุมได้คือ

3.1.1 ลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (minimize the steady state error)

3.1.2 ลดค่าเวลาเข้าที่ (minimize the setting time)

3.1.3 เพื่อให้การตอบสนองในช่วงต้น (transient response) มีลักษณะตามที่กำหนดไว้ เช่น ต้องการให้ค่า Overshoot มีค่าเวลาอยู่ตัว กำหนดค่าอัตราส่วนการหน่วง และค่าความถี่ ธรรมชาติ

ในทางปฏิบัติแล้วการกำหนดลักษณะเฉพาะสำหรับการออกแบบระบบควบคุมนั้นยัง มีส่วนอื่นๆที่เกี่ยวข้องอีกมากมาย เช่น การออกแบบอาจจะต้องการกำหนดความกว้างแถบ (Bandwidth) ที่ทำให้ระบบมีความปลอดภัย ความปลอดภัยในที่นี้หมายถึง ระบบปลอดภัยจากการที่ ระบบจะไม่มีเสถียรภาพหรือไม่มีความสมดุล เราไม่สามารถรู้ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการ ควบคุมได้แน่ชัดหรือไม่สามารถรู้ค่าพารามิเตอร์ได้ถูกต้องแม่นยำ แต่ถ้าเราสามารถหาขอบเขตของ ความผิดพลาดหรือค่าเบี่ยงเบนของพารามิเตอร์ของระบบที่จะควบคุม เราก็สามารถเลือกออกแบบ ระบบควบคุมหรือตัวควบคุม (Controller) ชนิดต่างๆ หรือตัวควบคุมที่มีรูปแบบแตกต่างกัน เช่น

ตัวควบคุมแบบ พี, พีไอ, พีไอดี เป็นต้น โดยตัวควบคุมที่ออกแบบนี้จะมีควมไว (Sensitivity) มากน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงหรือเบี่ยงเบนของค่าพารามิเตอร์แตกต่างกันออกไปดังนั้นการออกแบบบางครั้งอาจจะต้องครอบคลุมถึงความไวของระบบควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของระบบด้วย เพื่อให้ระบบควบคุมโดยรวมมีความปลอดภัยต่อการใช้งานเมื่อค่าพารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงขณะระบบกำลังทำงาน

ระบบควบคุมที่ใช้กันมากในการควบคุมสามารถแบ่งได้ดังนี้คือ

1. ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด (two-position หรือ on-off controllers)
2. ตัวควบคุมเชิงสัดส่วน (Proportional controllers, P-control)
3. ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral controllers, P-control)
4. ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอินทิกรัล (Proportional-plus-Integral controllers, PI-control)
5. ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอนุพันธ์ (Proportional-plus-Derivative controllers, PD-control)
6. ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอนุพันธ์บวกอินทิกรัล (Proportional-plus-Integral-plus-Derivative controllers, PID-control)

3.2 ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม

ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นต้องเลือกรูปแบบของตัวควบคุมที่เหมาะสมกับระบบที่ต้องการจะควบคุมการออกแบบตัวควบคุมจะสมบูรณ์ได้นั้นจำเป็นต้องเลือกค่าอัตราขยายต่างๆของตัวควบคุมนั้น การเลือกค่าอัตราขยายหรือการคำนวณหาอัตราขยายนั้นก็ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะของการตอบสนองในช่วงภาวะชั่วคราว เช่น ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID-control) นั้นอาจจะมีกำหนดค่าคุณสมบัติเฉพาะของการตอบสนองในช่วงภาวะชั่วคราวคือ ค่าอัตราการหน่วง ค่าคงตัว

เวลาที่ช้าที่สุด (Dominant time constant) และค่าสัญญาณผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (Steady state error) ในทางปฏิบัตินั้นอาจมีรายละเอียดมากกว่านี้เช่น อาจจะต้องคำนึงถึง ช่วงเวลาขึ้น (Rise time), เวลาเข้าที่ (Settling Time), และค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด (Maximum Overshoot) ด้วย นอกจากนี้สมรรถนะการทำงานนั้นอาจจะบอกอยู่ในรูปแบบของความถี่ก็ได้ เช่น ความถี่การทำงาน (Bandwidth), ความถี่เรโซแนนต์ (Resonant Frequency), และค่าแอมพลิจูดสูงสุด (Peak Amplitude) ลักษณะของคุณสมบัติเฉพาะต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบควบคุมที่จะต้องคำนึงถึงการออกแบบตัวควบคุมสามารถสรุปได้คือ

1. คุณสมบัติที่ตำแหน่งสมดุล (equilibrium specifications)
 - 1.1 ความมีเสถียรภาพ (stability)
 - 1.2 ความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (steady state error)
2. คุณสมบัติช่วงการตอบสนองในภาวะชั่วครู่ (transient specifications)
 - 2.1 ความเร็วในการตอบสนอง (speed of response)
 - 2.2 รูปแบบของการตอบสนองซึ่งอาจจะบอกในรูปแบบของค่าการหน่วง (degree of damping)
3. คุณสมบัติบอกความไวของระบบ (sensitivity specification)
 - 3.1 ความไวของระบบที่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ (sensitivity to parameter variations)
 - 3.2 ความไวของระบบที่ขึ้นอยู่กับ การหาค่าพารามิเตอร์ของระบบไม่ละเอียด (sensitivity to model inaccuracies)
 - 3.3 การสามารถในการจำกัดสัญญาณรบกวน (noise rejection) ซึ่งอาจจะบอกเป็น ช่วงความถี่ (bandwidth)

4. ผลอันเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ (nonlinear effects)

4.1 ความมีเสถียรภาพ (stability)

4.2 ความสามารถของอุปกรณ์การควบคุม (final control element capabilities)

นอกเหนือจากการกำหนดคุณสมบัติของการตอบสนองช่วงภาวะชั่วคราวแล้วในบางครั้งก็ไม่สามารถโมเดลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ต้องการควบคุมให้มีความถูกต้องแม่นยำได้ เพราะวิธีข้างต้นอาจมีความยากลำบากในการที่จะคำนวณออกแบบค่าอัตราขยายต่างๆ เพื่อให้ระบบควบคุมของเรามีการตอบสนองตามที่เรารต้องการ เนื่องจากระบบควบคุมบางชนิดมีเกนอยู่หลายค่าที่เราต้องการปรับเพื่อให้การทำงานเป็นไปตามความต้องการ

3.3 ความสำคัญของการป้อนกลับ

การป้อนกลับสามารถปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของระบบ แต่ก็สามารถส่งผลกระทบต่อให้คุณสมบัติอื่นแย่ลงไปด้วย นี่ก็เป็นเหตุผลสำคัญที่เราต้องมีความรู้ความเข้าใจเป็นอย่างดีในระบบควบคุมแบบป้อนกลับซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างมากส่วนหนึ่งในการควบคุมแขนกลในงานวิจัยนี้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถที่จะปรับปรุงคุณสมบัติต่างเหล่านี้ได้คือ

1. ผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัว (steady state)
2. ผลตอบสนองชั่วคราว (transient), ช่วงเวลาขึ้น (rise time), การพุ่งเกิน (overshoot), ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time)
3. ความทนทาน, ส่วนเผื่ออัตราขยายและเฟส (gain and phase margins)
4. ผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวน

ความจริงแล้วการปรับปรุงค่าดังกล่าวอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อส่วนอื่นๆ ซึ่งในบางครั้งอาจส่งผลดีหรืออาจส่งผลเสียต่อระบบควบคุมแบบป้อนกลับได้

3.4 ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุม

การออกแบบระบบควบคุมต่าง ๆ นั้นสามารถสรุปความสำคัญขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุมได้ดังนี้คือ

1. ศึกษาระบบที่ต้องการควบคุม ทำการรวบรวมข้อมูลต่างๆของการควบคุม
2. หาโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบและพิจารณาว่าสามารถทำให้โมเดลง่ายขึ้นหรือไม่
3. วิเคราะห์โมเดลที่หาได้ พิจารณาคุณสมบัติและเปรียบเทียบผลตอบสนองกับระบบจริง
4. เลือกตัวแปรที่ต้องการควบคุม
5. ตัดสินใจเกี่ยวกับการวัดค่า output และเกี่ยวกับตัวแปรควบคุม พิจารณาเลือกตัวตรวจรู้ (sensor)
6. เลือกชนิดของตัวควบคุม
7. ทำการกำหนดความต้องการด้านสมรรถนะ
8. ออกแบบตัวควบคุม
9. ทำการวิเคราะห์ระบบการควบคุมและตรวจสอบว่าได้ตามความต้องการหรือไม่ ถ้าหากไม่ทำการเปลี่ยนรูปแบบของการควบคุม
10. ทำการจำลองการทำงานระบบรวม
11. เลือก Hardware และ Software แล้วทำการ Implement ตัวควบคุม
12. ทดสอบระบบรวมทั้งหมด

3.5 การควบคุมแบบ Inverse Dynamics

งานวิจัยนี้เราได้ทำการเลือกการควบคุมแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น โดยใช้การควบคุมแบบ Inverse Dynamics ซึ่งก็เป็นการควบคุมแบบป้อนกลับอย่างหนึ่งและเรามีการทำ Inverse Model ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เราได้หามานั้นเพราะว่า

จากสมการของลากรางจ์คือ

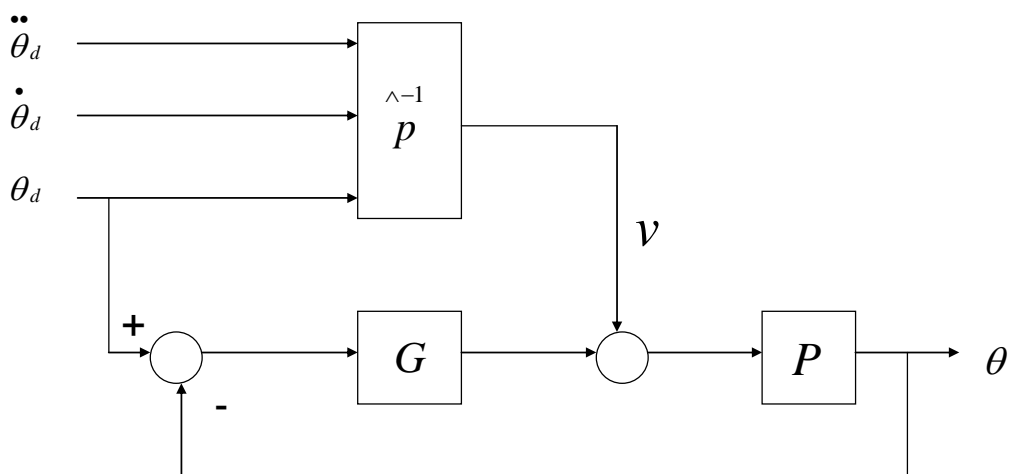
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta_i} + \frac{\partial P}{\partial \theta_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_i} = Q_i, \quad i = 1, 2.$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เราหามาได้จากสมการ (2) คือ

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + k(\theta_1 - \theta_2) + c_2(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) = 0$$

$$J_h \ddot{\theta}_2 - k(\theta_1 - \theta_2) + c_1 \dot{\theta}_2 - c_2(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) = T$$

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น Input คือ ทอร์ก (τ) Output ของระบบคือ มุม ($\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta$) เมื่อทำการ Inverse แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เราหามานั้น Input ของระบบคือ มุม ($\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta$) Output ของระบบคือ ทอร์ก (τ)



ภาพที่ 13 แสดงการควบคุมแบบ Inverse Dynamics

จากภาพที่ 13 เป็นบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) แสดงการควบคุมแบบ Inverse Dynamics เมื่อพิจารณาบล็อกไดอะแกรมนี้ ความต้องการที่เราจะทำการควบคุมระบบคือต้องการให้ θ ตาม θd เมื่อเรามาพิจารณาค่าของ \hat{p}^{-1} คือ Inverse Model กับ P คือ ระบบหรือ Plant

ถ้าเราสมมติให้ค่าของ \hat{p}^{-1} เท่ากับ P ค่าทั้งสองในระบบตัดกันโดยมีค่าเป็นศูนย์ สมมติเมื่อเราป้อนสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณ Sine Wave สัญญาณขาออกก็จะเป็นสัญญาณเดิมคือ Sine Wave นั้นหมายถึงระบบของเราที่ทำการควบคุมมีความถูกต้องและเป็นสิ่งที่เราต้องการ แต่ไม่ว่าจะเป็นทางปฏิบัติหรือทางทฤษฎี ค่าทั้งสองคือ \hat{p}^{-1} กับ P ไม่สามารถที่จะเท่ากันได้เพราะประการแรกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เราหามา นั้นมีความคลาดเคลื่อน ประการที่สองระบบของเราที่ทำการควบคุมมีความไม่แน่นอน (Uncertainty)

ดังนั้นเราจึงต้องมีค่า G คือตัวควบคุม (Controller) จะทำหน้าที่ลดค่าความผิดพลาด e (Error) คือสัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้ เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้คือ $e = \theta d - \theta$ โดยที่ตัวควบคุมจะทำหน้าที่ในการลดค่าความผิดพลาด e (Error) ให้มีค่าน้อยๆ หรือเท่ากับศูนย์เพื่อที่จะทำให้ระบบของเรามีการตอบสนองตามคำสั่งที่เราต้องการ

4. การหาความถี่ธรรมชาติของระบบ

ในส่วนนี้จะเป็นวิธีการหาความถี่ธรรมชาติของแกนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้ ซึ่งทำการทดลองโดยใช้อุปกรณ์ Accelerometer เป็นเครื่องมือในการหาความถี่ธรรมชาติของแกนกล เพื่อที่จะได้นำผลของความถี่ธรรมชาติไปทำการลดการสั่นสะเทือนของแกนกลโดยการ Shaped Input ของ Reference Signals โดยเป็นการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals เพื่อให้ผลของความถี่ที่เกิดขึ้นนั้นลดความถี่ธรรมชาติของแกนกลในการลดการสั่นสะเทือน

4.1 พื้นฐานของการสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือน (Vibration) คือการเคลื่อนที่แบบกลับไป-มาของระบบที่มีมวลและสภาพยืดหยุ่นในช่วงเวลาที่กำหนดในช่วงเวลาหนึ่ง โดยการสั่นสะเทือนนั้นสามารถจำแนกได้สองแบบคือ

1. การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free Vibration) คือ ระบบเมื่อถูกแรงภายนอกกระทำระบบจะสามารถสั่นไป-มาอย่างต่อเนื่องได้เมื่อปลดแรงนั้นออก และภายใต้การเคลื่อนแบบสั่นไป-มานี้ระบบจะสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ ซึ่งอาจเป็นความถี่เดียวหรือหลายความถี่ก็ได้

2. การสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Forced Vibration) คือระบบที่มีการเคลื่อนที่แบบสั่นไป-มาภายใต้แรงภายนอกกระทำด้วยความถี่ของแรงนั้น ถ้าความถี่ของแรงภายนอกที่กระทำนั้นเท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบ ระบบจะอยู่ในสภาวะสั่นพ้อง ทำให้ระบบสั่นอย่างรุนแรงและก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบได้

ในระบบของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นนั้นจะมีระดับขั้นความเสรี (Degrees of Freedom; DOF) เท่ากับสองดังนั้นความถี่ธรรมชาติของแขนกลจะมีความถี่ธรรมชาติสองค่า (ω_1, ω_2) โดยความถี่ธรรมชาตินี้จะขึ้นอยู่กับมวลและสภาพสปริงตัวได้จากสมการ

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (11)$$

โดยที่

k คือ ค่าคงที่ของสปริง

m คือ มวล

และ

$$\omega_n = 2\pi f_n \quad (12)$$

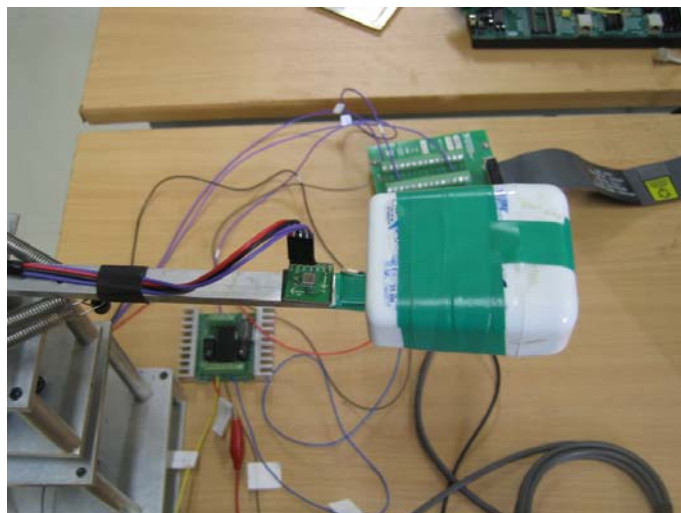
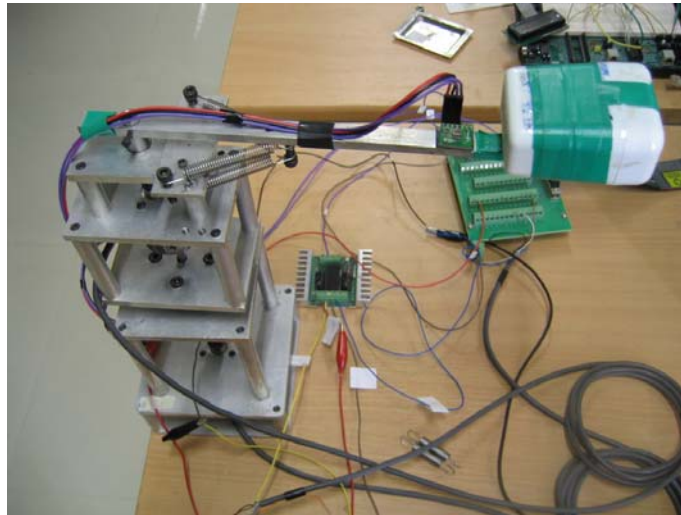
ω_n คือความถี่ธรรมชาติ (natural frequency)

f_n คือความถี่ (frequency)

โดยในการทดลองนั้นเราจะใช้ความสัมพันธ์ของสมการที่ (12) โดยให้ความช่วงถี่ (f_n) กับมอเตอร์เป็นสัญญาณ Sine Wave ในการกระตุ้นเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของแขนกล โดยความถี่ธรรมชาติของแขนกลนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อช่วงของความถี่ (f_n) ไปตรงกับความถี่ธรรมชาติของแขนกล และจากการที่แขนกลของเรามี DOF = 2 ความถี่ธรรมชาติของระบบเราจะมีสองค่า

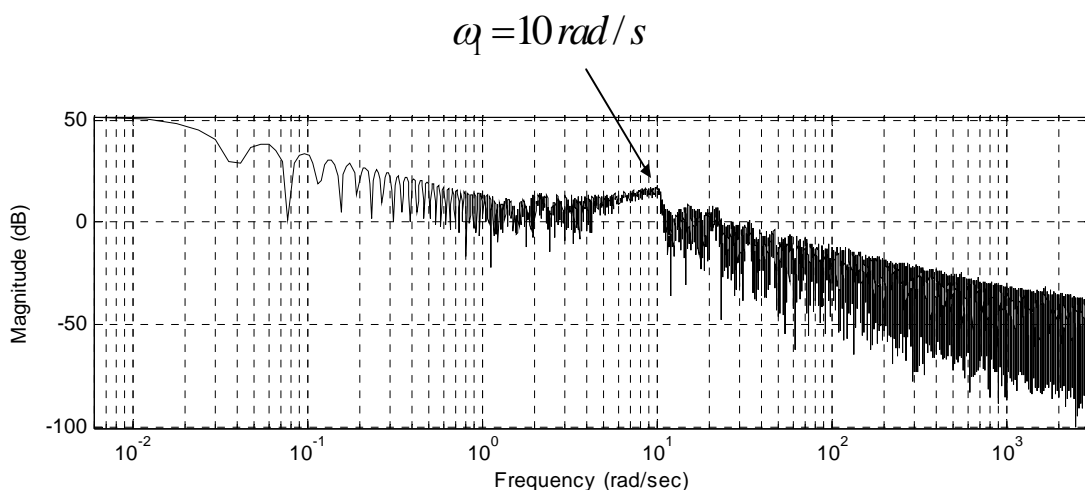
4.2 วิธีหาความถี่ธรรมชาติของแขนกลจากการทดลองโดยใช้ Accelerometer

1. ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งเชิงมุม (Accelerometer) ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 บนล่างแสดงการติดตั้ง Accelerometer กับแขนกล

2. ให้สัญญาณ Sine Wave กับมอเตอร์ โดยสร้างช่วงความถี่ 0.15-3 Hz แอมพลิจูดที่ 1.5 ค่าที่ Accelerometer รับเก็บค่าได้จะเป็นค่าความเร่งในแนวตั้งฉากกับ Link ของแขนกล และเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่อง (Analog signal)
3. นำค่าที่เก็บได้จาก Accelerometer ในรูปของ Text file ไปหาความถี่ธรรมชาติของแขนกลจากโปรแกรม Matlab โดยใช้วิธี Fast Fourier Transform (FFT) ดังแสดงในภาคผนวก ข



ภาพที่ 15 แสดงผลการค่าความถี่ธรรมชาติจาก FFT

ภาพที่ 15 แสดงผลของความถี่ธรรมชาติของแกนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 rad/s จริงๆแล้วเนื่องจากระบบของเรา มี $DOF = 2$ ค่าความถี่ธรรมชาติของแกนกลจะต้องมีสองความถี่ธรรมชาติ แต่จากการทำการทดลองหลายครั้ง โหมดความถี่ธรรมชาติที่ได้มีค่าเดียว เนื่องจากความถี่ธรรมชาติที่ได้นั้นเป็นค่าความถี่ธรรมชาติของสปริง และอีกค่าเป็นความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์ซึ่งจะมีค่าความถี่ธรรมชาติมากกว่าความถี่ธรรมชาติของสปริง ซึ่งสาเหตุที่เราไม่สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์ออกมาได้นั้น เนื่องมาจากสัญญาณ Sine Wave ที่ให้กับมอเตอร์ที่มีช่วง ความถี่ 0.15-3 Hz นั้นมีช่วงความถี่น้อยไปไม่สามารถไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์ เราจึงสรุปที่จะใช้ความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดลองที่มีค่าเท่ากับ 10 rad/s ในการทำการทดลอง ในขั้นตอนต่อไป

5. เทคนิคคอมมานด์เชปปีง (command shaping)

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายถึงเทคนิคคอมมานด์เชปปีง ที่นำพื้นฐานของฟังก์ชันเร็มไซนูซอยด์ ที่นำมาประยุกต์ใช้กับเทคนิคคอมมานด์เชปปีง รวมถึงแสดงความสัมพันธ์ของสมการ Cost Function ที่จะอธิบายถึงแอมพลิจูดของการสั่นและความถี่ธรรมชาติของระบบ

พื้นฐานของฟังก์ชันเร็มไซนูซอยด์จากสมการคือ

$$f(t) = \sum_{l=1}^L \frac{\beta_l}{\alpha_l^2} \Phi_l^*(t) \quad (13)$$

และ

$$\Phi_l^*(t) = \alpha_l \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{t}{T_f} \right) + \sin \left(\alpha_l \frac{t}{T_f} \right) - \frac{\alpha_l}{2} \cos \left(\alpha_l \frac{t}{T_f} \right) \quad (14)$$

แทนค่าสมการ (14) ใน (13) จะได้

$$f(t) = \sum_{l=1}^L \frac{\beta_l}{\alpha_l^2} \alpha_l \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{t}{T_f} \right) + \sin \left(\alpha_l \frac{t}{T_f} \right) - \frac{\alpha_l}{2} \cos \left(\alpha_l \frac{t}{T_f} \right) \quad (15)$$

เป็นพื้นฐานฟังก์ชันแรมป์ ไซนูซอยด์ที่ไม่หน่วย B_l เป็นสัมประสิทธิ์ของพื้นฐานฟังก์ชันและ α_l เป็นจำนวนลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับพื้นฐานฟังก์ชัน

โดยเราต้องการหาค่า B_l จากสมการที่ (15) ซึ่งเราสามารถคำนวณหาได้จากสมการ Cost Function ที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง Time-Optimality และ Vibration-Reduction คือ

$$J = \frac{1}{T_f} \left\{ \int_0^{T_f/2} [1 - f(t)]^2 dt + \int_{T_f/2}^{T_f} [-1 - f(t)]^2 dt \right\} + \rho \sum_{i=1}^{11} (\omega_i T_s)^2 |F^*(\omega_i T_f)|^2 \quad (16)$$

จากสมการที่ (16) เราต้องการ Minimize (J) ซึ่งผลต่างของ Square ซึ่งก็คือ

$$\left\{ \int_0^{T_f/2} [1 - f(t)]^2 dt + \int_{T_f/2}^{T_f} [-1 - f(t)]^2 dt \right\}$$

เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Bang-Bang command profile กับ Command shaped profile โดยเราต้องการให้ผลต่างของ Square คือค่า Command shaped profile มีค่าน้อยๆหรือเท่ากับศูนย์เพื่อที่จะให้ค่าเข้าใกล้ Bang-Bang เพราะว่า Bang-Bang จะมีการเคลื่อนที่เร็ว ส่วนค่าความถี่ธรรมชาติของแกนกลสามารถอธิบายจาก Input Frequency Spectrum ซึ่งก็คือ

$$\rho \sum_{i=1}^{11} (\omega_i T_s)^2 |F^*(\omega_i T_f)|^2$$

โดยพจน์สมการ Cost Function นี้จะบอกถึงความถี่ธรรมชาติของระบบ ω_i คือค่าความธรรมชาติของแกนกลที่มีความถี่ตั้งแต่ $i=1$ ถึง $i=11$ ความถี่โดยจะมีช่วงของความถี่ $\pm 10\%$ เพราะฉะนั้นขอบเขตความถี่ในระบบคือ $0.9\omega_n < \omega_i < 1.1\omega_n$

เราทำการ Minimize สมการที่ (16) คือ Objective Function (J) เพื่อที่ต้องการหา B_r และเวลา T_f โดยการหาอนุพันธ์ย่อยของสมการที่ (16) เทียบกับ B_r เปลี่ยนตัวแปร 1 เป็น r แล้วจับเท่ากับศูนย์

$$\partial J / \partial B_r = 0 \quad (17)$$

กำหนดให้

$$\sum_{l=1}^L B_l I'_{rl} = I_r^* \quad (18)$$

จะได้

$$I'_{rl} = I_r^* + \rho \sum_{i=1}^{11} (\omega_i T_r)^2 \frac{\alpha_i}{\alpha_i^2 - (\omega_i T_f)^2} \frac{\alpha_r}{\alpha_r^2 - (\omega_i T_f)^2} \left(\frac{2 \sin \frac{\omega_i T_f}{2} - \omega_i T_f \cos \frac{\omega_i T_f}{2}}{(\omega_i T_f)^2} \right) \quad (19)$$

$$I'_{rl} = \begin{cases} -\frac{1}{a_l^2 - a_r^2} \left\{ \frac{a_r}{a_l^2} \left[\frac{a_l^3}{12} + \left(\frac{a_l^2}{2} - 1 \right) \sin a_l \right. \right. \\ \left. \left. + a_l \cos a_l + \frac{a_l}{2} (\cos a_l - 1) \right] \right. \\ \left. - \frac{a_l}{a_r^4} \left[\frac{a_r^3}{12} + \left(\frac{a_r^2}{2} - 1 \right) \sin a_r \right. \right. \\ \left. \left. + a_r \cos a_r + \frac{a_r}{2} (\cos a_r - 1) \right] \right\} \quad (r \neq l) \\ \frac{1}{a_l^5} \left\{ \frac{a_l}{4} + \frac{5a_l^3}{24} + \frac{1}{4} \left[\left(\frac{a_l}{2} \right)^2 - 1 \right] \sin 2a_l \right. \\ \left. + \left(\frac{a_l^2}{2} - 2 \right) \sin a_l + \frac{a_l}{4} \cos 2a_l + 2a_l \cos a_l \right\} \quad (r = l) \end{cases} \quad (20)$$

$$I_r^* = \frac{1}{\alpha_r^3} \left[\left(\frac{\alpha_r}{2} \right)^2 - 2 \cos \left(\frac{\alpha_r}{2} \right) - \alpha_r \sin \left(\frac{\alpha_r}{2} \right) + \cos \alpha_r + \frac{\alpha_r}{2} \sin \alpha_r + 1 \right] \quad (21)$$

ถ้า T_f และ I'_{rl} เรารู้ค่าเราสามารถหา B_l ได้โดยจัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นในเมทริกซ์

$$[I'_{rl}][B_l] = [I_r^*] \quad (22)$$

ถ้า T_f เราไม่รู้ค่า แต่ B_l เรารู้ค่าซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ได้จากสมการคือ

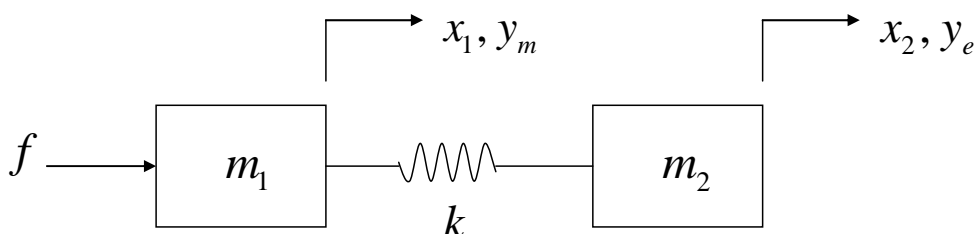
$$T_f = \Gamma T_r \quad (23)$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{3}{SF \sum_{l=1}^L \frac{B_l}{\alpha_l}}} \quad (24)$$

โดยที่ Γ เป็น Scale Function และ SF เป็น Scale Factor

5.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง Input Spectrum และ Residual Acceleration Amplitude

จากพื้นฐานของระบบ Two-mass undamped system ดังแสดงในภาพที่ 16 ซึ่งจะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Input function spectrum และแอมพลิจูดของการสั่นซึ่งความสัมพันธ์ทั้งสองนี้จะสามารถอธิบายถึงสมการที่ (16) ได้เป็นอย่างดี จากสมการที่ (25) ซึ่งรายละเอียดการหาความสัมพันธ์ได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก ค โดยจะบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างโดเมนสองโดเมน คือ แอมพลิจูดของการสั่นซึ่งจะอยู่บนโดเมนเวลา (Time Domain) และ Input function spectrum ซึ่งก็คือความถี่ธรรมชาติของระบบจะอยู่บนโดเมนความถี่ (Frequency Domain)



ภาพที่ 16 แสดง Two-Mass System Model

ระบบ Two-Mass System Model ให้ m_1 และ m_2 คือมวลของระบบ, k คือค่าของสปริง และ f คือ แรงที่มากระทำกับระบบทำให้ระบบเกิดการสั่นสะท้อนค่าความถี่ธรรมชาติของระบบที่เกิดขึ้นจะมีค่าเดียวโดยเราสามารถแสดงความสัมพันธ์นี้ได้จากสมการคือ

$$A^* = \frac{A}{F_{\max} / (m_1 + m_2)} = \omega_n T_f \left| F^*(\omega_n T_f) \right| \quad (25)$$

และ

$$\left| F^*(\omega_n T_f) \right| = \left| F(\omega_n) \right| / F_{\max} T_f$$

โดยที่

A คือ แอมพลิจูดความเร่งของการสั่นสะท้อน

F_{\max} คือ แรงสูงสุด (peck force amplitude)

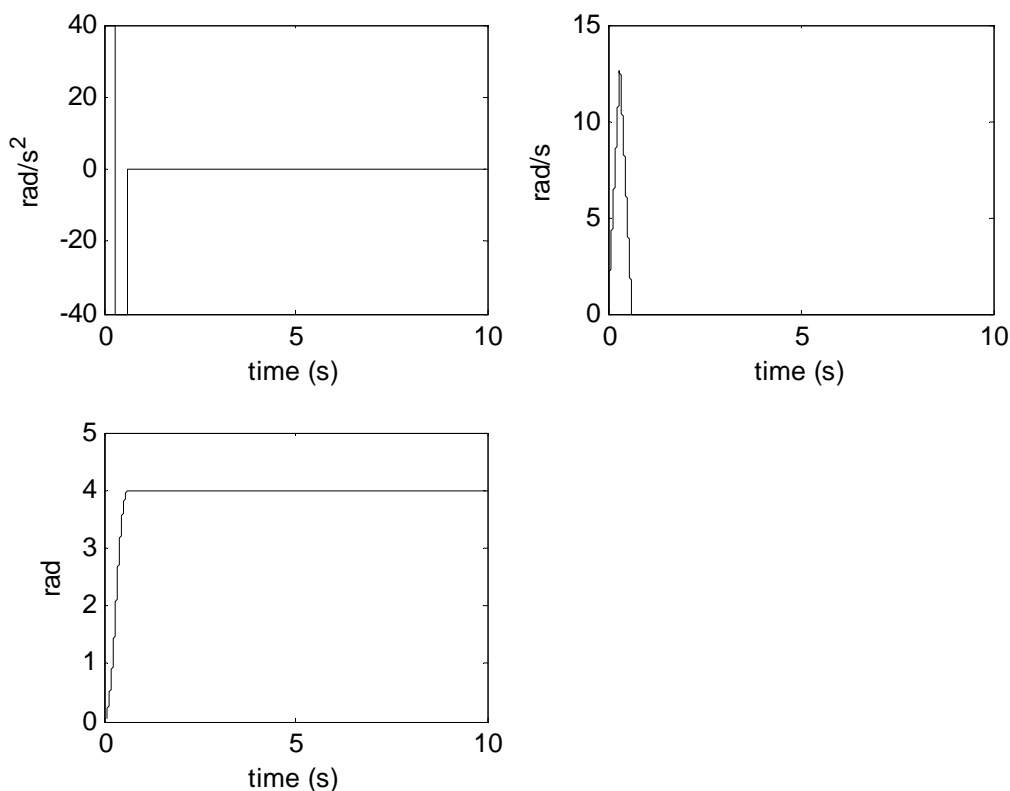
$F(\omega_n)$ คือ ฟูเรีย ทรามฟอร์ม ของ input function

5.2 เทคนิคคอมมานด์เซปป์งในการลดการสั่นสะเทือนของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น

ในส่วนนี้จะเป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคคอมมานด์เซปป์งมาใช้ในการลดการสั่นสะเทือนของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้ โดยจะได้อธิบายถึง Reference Trajectories (Square Wave) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทำการออกแบบขึ้นมาเพื่อให้แขนกลได้เคลื่อนที่ตามตำแหน่งที่เราต้องการ หลังจากนั้นทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบและทำการ Shaped Input เพื่อให้ความถี่ของ Reference Trajectories (Square Wave) ที่เราได้ออกแบบไว้นั้นหลบความถี่ธรรมชาติของแขนกลเพื่อลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น หลังจากการ Shaped Input แล้ว โครงสร้างที่ได้ปรับเปลี่ยนแล้วก็จะ เป็น Reference Trajectories (Ramped Sine)

5.2.1 Reference Trajectories (Square Wave)

Reference Trajectories (Square Wave) เป็น โครงสร้างพื้นฐานของ Bang-Bang command profile ที่ยังไม่ได้ทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อลดค่าพลังงาน ซึ่ง โครงสร้างของ Reference Trajectories (Square Wave) นั้นจะมี Power Spectrum สูงในทุกย่านความถี่มีผลไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของระบบทำให้เกิดการสั่นสะเทือนจากภาพที่ 17 รูปบนซ้ายคือความเร่ง เมื่อเราทำการอินทิเกรตจะได้ รูปบนขวาคือความเร็ว และทำการอินทิเกรตอีกครั้งจะได้ รูปล่างคือ ตำแหน่ง



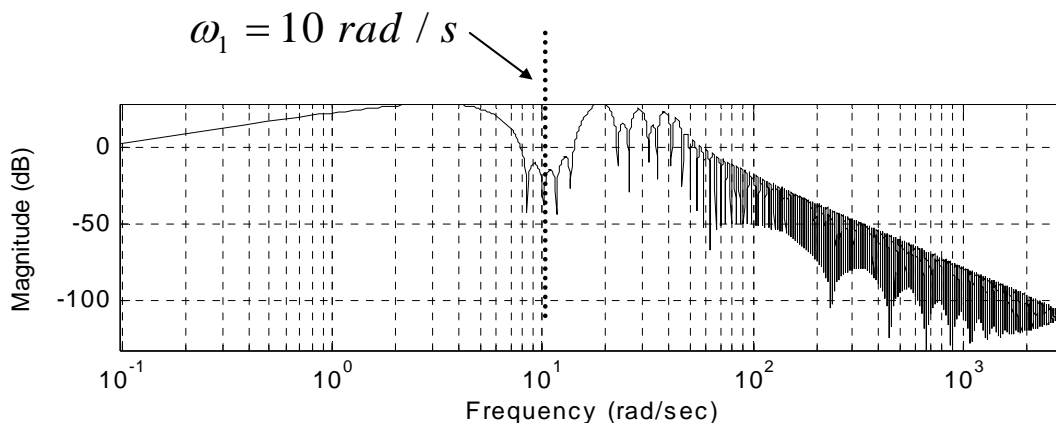
ภาพที่ 17 แสดง Reference Trajectories (Square Wave)

จาก Reference Trajectories (Square Wave) เราจะทำการออกแบบโครงสร้าง เพื่อให้แขนกลเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งโดยกำหนดมุมการเคลื่อนที่ของแขนกลคือ 4 เรเดียนค่าทอร์กที่ใช้คือ 40 N/m^2 ในพื้นฐานโครงสร้างของ Reference Trajectories (Square Wave) เราต้องการที่จะลดค่า Power Spectrum ให้น้อยลงเพื่อให้แขนกลของไม่มีการสั่นสะเทือนในระหว่างการเคลื่อนที่ซึ่งแขนกลจะสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น

เราจะทำการลดค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นโดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Trajectories (Square Wave) จากสมการที่ (16) ซึ่งเป็นสมการ Cost Function คือ

$$J = \frac{1}{T_f} \left\{ \int_0^{T_f/2} [1 - f(t)]^2 dt + \int_{T_f/2}^{T_f} [-1 - f(t)]^2 dt \right\} + \rho \sum_{i=1}^{11} (\omega_i T_s)^2 |F^*(\omega_i T_f)|^2$$

ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่จะใช้ในการออกแบบคือ $L, \rho, \omega_n, F_{\max}$ เพื่อที่จะ Minimize สมการที่ (16)

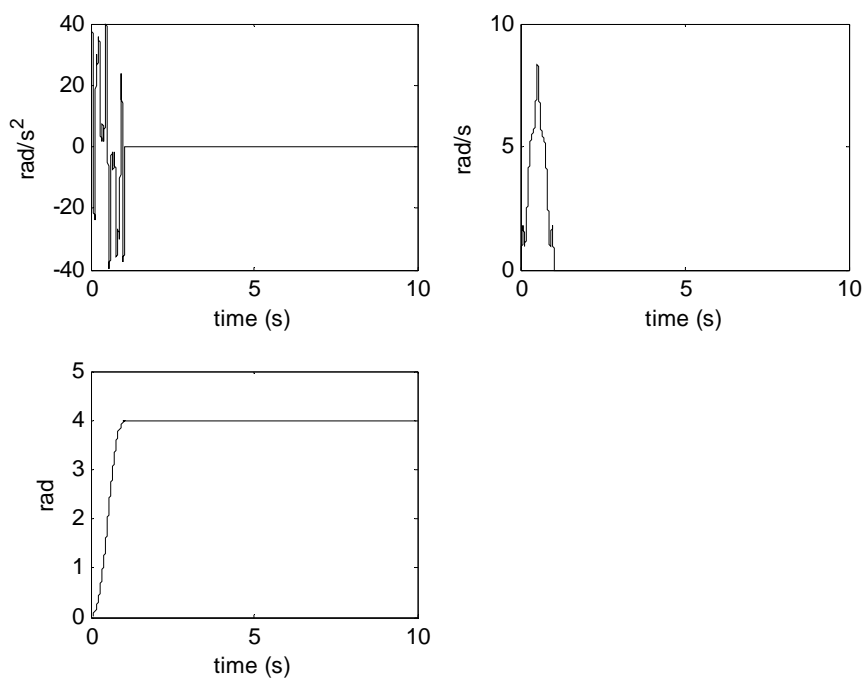


ภาพที่ 18 แสดงการ Shaped Input

จากภาพที่ 18 แสดง Frequency Spectrum จากการ Shaped Input ของโครงสร้าง Reference Trajectories (Square Wave) ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ คือ $L=10, \rho=10, \omega_n=10 \text{ rad} / \text{s}, F_{\max}=40$ ซึ่งผลของการ Shaped Input เพื่อทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างแล้วจะทำให้ Power Spectrum และค่าความถี่ต่างๆ ที่อยู่บริเวณโดยรอบความถี่ธรรมชาติ ลดลงซึ่งโครงสร้างที่ทำการปรับเปลี่ยนแล้วจะเรียกว่า Reference Trajectories (Ramped Sine)

5.2.2 Reference Trajectories (Ramped Sine)

Reference Trajectories (Ramped Sine) เป็น โครงสร้างที่ถูกออกแบบขึ้นในการเคลื่อนที่ของแขนกลและได้ทำการปรับเปลี่ยน โครงสร้างเพื่อลดค่า Power Spectrum ที่เพิ่มสูงขึ้น หลังจากนั้น ผลจากการ shaped input ของโครงสร้าง Reference Trajectories (Square Wave) จะทำให้แขนกลไม่เกิดการสั่นที่จุดปลาย (End Point) และมีการเคลื่อนที่เร็วขึ้น



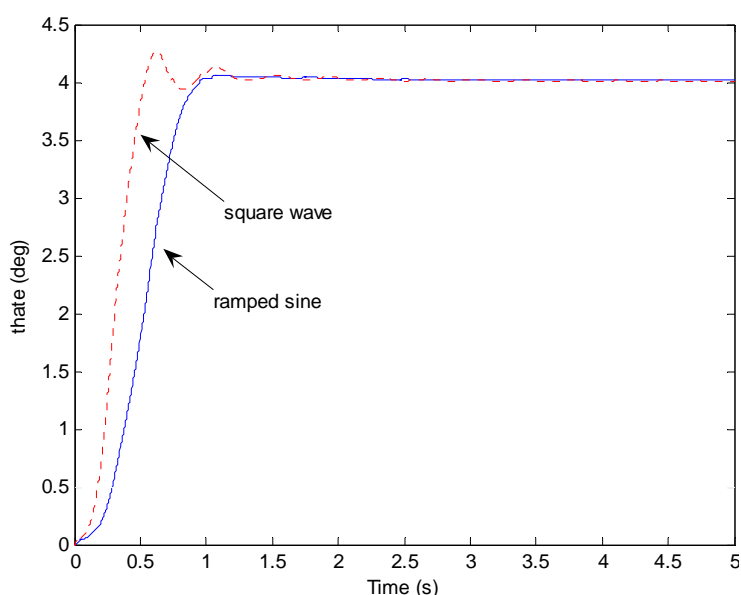
ภาพที่ 19 แสดง reference trajectories (ramped sine)

ภาพที่ 19 แสดง Reference Trajectories (Ramped Sine) ซึ่งเป็นโครงสร้างการเคลื่อนที่ของแขนกลและทำการปรับเปลี่ยน โครงสร้างแล้ว รูปบนซ้ายคือความเร่งเมื่อเราทำการอินทิเกรตจะได้ รูปบนขวาคือความเร็ว และทำการอินทิเกรตอีกครั้งจะได้รูปล่างคือตำแหน่ง ในการออกแบบโครงสร้าง Reference Trajectories (Ramped Sine) นั้นได้ใช้โปรแกรม Matlab ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ $L = 10$, $\rho = 10$, $\omega_n = 10 \text{ rad/s}$, $F_{\max} = 40$ ดังแสดงในภาคผนวก ง ซึ่งผลที่ได้จากการออกแบบและผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ก็จะนำไปใช้ทดลองการควบคุมแขนกล

ผลและวิจารณ์

ผล

ผลการทดลองของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้จากการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปปีง โดยการนำ Reference Trajectories (Ramped Sine) ซึ่งเป็น โครงสร้างที่ถูกออกแบบขึ้นในการเคลื่อนที่ของแขนกลและได้ทำการปรับเปลี่ยน โครงสร้างเพื่อลดค่า Power Spectrum ที่เพิ่มสูงขึ้น มาใช้ในการทดลองควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล จากภาพที่ 20, 21 และ 22 เป็นการเปรียบเทียบการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปปีงกับไม่ใช้เทคนิคคอมมานด์เซปปีงซึ่งก็คือ โครงสร้างของ Reference Trajectories (Square Wave) กับ โครงสร้าง Reference Trajectories (Ramped Sine) และได้แสดง การผลการเปรียบเทียบผลการทดลองจากการใช้โปรแกรม Matlab ดังแสดงในภาคผนวก จ

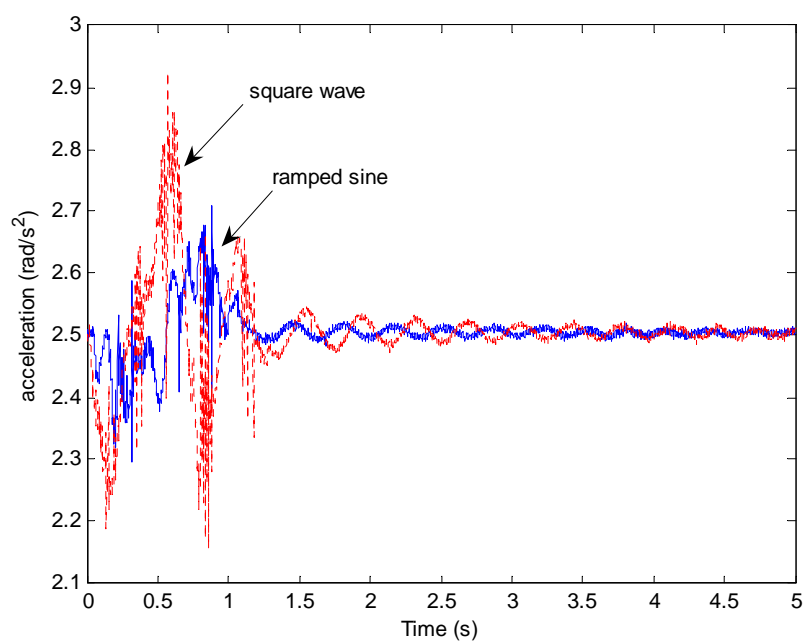


ภาพที่ 20 แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกล
จากการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปปีง

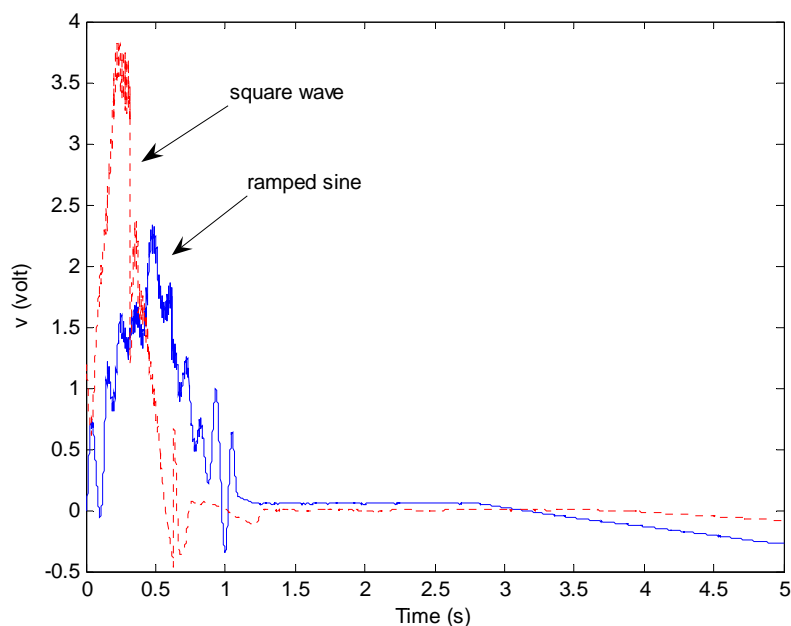
จากภาพที่ 20 แสดงผลการทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยเราต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งมุมที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแขนกลคือ 4 เรเดียน เป็นตำแหน่งที่แขนกลเคลื่อนที่ไปและจะหยุดนิ่ง โดยเส้นที่แดงและเส้นสีน้ำเงินเป็น Desired Trajectory ก็คือ Square Wave และ Ramped Sine ตามลำดับ Square Wave เป็น Reference Signals ที่เรายังไม่ได้ทำ

การ Shaped Input หรือว่ายังไม่ใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปีง ส่วน Ramped Sine เป็น Reference Signals ที่เราได้ทำการ Shaped Input ซึ่งก็คือการใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปีง

ผลจากการทดลองเส้นสีน้ำเงิน (Ramped Sine) เป็นการใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปีง สามารถที่จะเข้าสู่ Setting Time ที่ $\pm 3\%$ ได้เร็วกว่าเส้นสีแดง (Square Wave) ที่ 0.85 วินาทีและ 1.12 วินาที ตามลำดับ และผลจากการนำเทคนิคคอมมานด์เชปปีงมาใช้กับแกนกลนั้นสามารถที่จะลดค่า Overshoot ที่เกิดขึ้นได้



ภาพที่ 21 แสดงผลของความเร่งทั้งสองกรณี



ภาพที่ 22 แสดงผลของ Input Voltages ทั้งสองกรณี

จากภาพที่ 21 แสดงผลของแอมพลิจูดความเร่งของการสั่นสะเทือนจะเห็นว่าค่า Amplitude และ Overshoot นั้นจะมีค่าที่ลดต่ำลงเมื่อเราได้นำเทคนิคคอมมานด์เซปป์มาใช้ ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล ในการออกแบบการเคลื่อนที่ที่แขนกลนั้นเราใช้โปรแกรม Matlab ในการสร้าง Reference Trajectories ซึ่งสามารถทำให้แขนกลนั้นมีการเคลื่อนที่ในลักษณะต่างๆตามความต้องการของผู้ควบคุม เช่นในการทดลองเราสามารถออกแบบการเคลื่อนที่ที่แขนกลให้เคลื่อนที่แบบกลับไปมาอย่างต่อเนื่องได้ดังแสดงใน ภาพผนวก ฉ

ภาพที่ 22 แสดง Input Voltages ของ Square Wave และ Ramped Sine ซึ่งก็คือเส้นสีแดง และเส้นสีน้ำเงินตามลำดับ เทคนิคคอมมานด์เซปป์สามารถที่จะลดค่าพลังงานกระตุ้นจาก Square Wave ที่มี Power Spectrum สูงในทุกย่านความถี่ที่จะมีผลไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของแขนกลทำให้เกิดการสั่นสะเทือน และผลของ Ramped Sine นั้นจะเห็นว่าการนำเทคนิคคอมมานด์เซปป์มาใช้ช่วยลดพลังงานกระตุ้นให้น้อยลง ทำให้แขนกลนั้นลดการสั่นพ้อง (Resonance) และจากการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปป์นั้นทำให้แขนกลสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นและไม่มีการสั่นสะเทือนที่จุดปลายแขนกล (End Point)

ในการทดลองถ้ามีการใช้ Notch-filter แทนเทคนิคคอมมานด์เซปป์ ซึ่งวิธี Notch-filter เป็นการสร้าง Filtered time function ขึ้นมาและทำการตัดช่วงของความถี่ออกจาก ฟิวรี สเปกตัม ของ Square Wave ซึ่งเราจะได้ Time Function ขึ้นมาใหม่ เป็น Filtered Spectrum จากการ ใช้วิธี Inverse Fourier Transform ผลจากการใช้ Notch-filter สามารถที่จะลดการสั่นสะเทือนได้ แต่ผลตอบสนองต่อเวลาจะนานกว่าเพราะไม่มี Input Energy ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าความถี่ธรรมชาติของการสั่นสะเทือนของระบบ ถึงแม้วิธี Notch-filter จะช่วยลดการสั่นสะเทือนให้น้อยลงแต่ผลที่ได้ก็ดีไม่เท่ากับการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปป์

วิจารณ์

1. จากภาพที่ 11 แสดงผลการเคลื่อนที่ของแกนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นของแบบจำลองแกนกลกับแกนกลจริง ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่นั้นมีความถูกต้อง 80.79% แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างซึ่งเป็นผลมาจากแบบจำลองสมการการเคลื่อนที่ของแกนกลกับแกนกลจริงนั้นยังมีความคลาดเคลื่อน

2. ค่าความถี่ธรรมชาติที่หาได้จากการทดลองนั้น จากภาพที่ 15 แสดงผลการค่าความถี่ธรรมชาติจาก Fast Fourier Transform (FFT) จริงๆแล้วเนื่องจากระบบของเรา มี $DOF = 2$ ความถี่ธรรมชาติของระบบเราจะมีสองค่าแต่จากการทำการทดลองหลายครั้ง โหมดความถี่ธรรมชาติที่เราทำการทดลองได้มีสองค่าจริงตามทฤษฎี แต่เนื่องจาก โหมดของความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นจากมอเตอร์นั้นมีค่าที่สูงเราจึงไม่สามารถที่จะให้ความถี่ไปกระตุ้นแกนกลให้เจอความถี่ธรรมชาติได้ ดังนั้นเราจึงใช้ความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดลองที่มีค่าเท่ากับ 10 rad/s

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในการทำการทดลองของงานวิจัยนี้จากการใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปีงเราสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้เป็นอย่างดี รวมถึงสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลทำให้มีความรู้ความเข้าใจถึงพฤติกรรมของแขนกล และสมการการเคลื่อนที่ของแขนกล (System ID) ที่มีความถูกต้องและมีความแม่นยำในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ในส่วนของผลการทดลองนั้นได้ทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้จากการใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปีงและนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบระหว่าง การใช้ Unshaped Command กับ Shaped Command ซึ่งผลของเทคนิคคอมมานด์เชปปีงจากการใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเรียม ไชนูซอยเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนในระหว่างที่เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งของแขนกลอีกทั้งยังสามารถลดค่า Overshoot ให้น้อยลงทำให้แขนกลสามารถเข้าสู่ Settion Time ได้เร็วขึ้นซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ระบบเข้าสู่ Stable

เทคนิคคอมมานด์เชปปีงทำให้แขนกลมีการเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นจากการ Shaped Input ทำให้ Power Spectrum ของ Reference Signals ซึ่งก็คือ ความเร่ง ความเร็ว และการขจัด ที่มีค่าพลังงานสูงในทุกย่านความถี่ที่มีผลไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของระบบลดลง และช่วยลดความเสียหายที่ขึ้นจากการสั่นพ้อง (Resonance) ได้

ข้อเสนอแนะ

1. จากระบบของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ เราควรทำให้ระบบเป็น Non-Minimum-Phase ก่อน เพราะเมื่อผลจากการทำ Inverse Model แล้วระบบจะไม่เกิด Unstable
2. ค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลที่เกิดจากมอเตอร์นั้น มีค่าความถี่ที่สูงกว่าช่วงความถี่ที่ไปกระตุ้นแขนกล ดังนั้นเราควรใช้ช่วงความถี่ที่จะไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของแขนกลให้สูงขึ้น
3. การนำคอมมานด์เชปปีงไปใช้สำหรับ Unstable System นั้นเราควรทำให้ระบบนั้น stable ก่อนโดยการทำให้ Close-Loop system ใหม่แล้วทำการ Shaped Input ของระบบทั้ง Loop

สิ่งที่จะทำต่อในอนาคต

1. เนื่องจากเทคนิคคอมมานด์เซปปีงใช้ได้กับระบบแบบ Offline ซึ่งก็จะเกิดความลำบากในการนำไปใช้งานจริง ดังนั้นเราจะพัฒนาให้แขนกลสามารถใช้ได้กับระบบแบบ Online
2. นำเทคนิค Input Shaping มาใช้แทนเทคนิคคอมมานด์เซปปีง เพราะเทคนิค Input Shaping นั้นสามารถใช้กับระบบแบบ Online

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

มนตรี พิรุณเกษตร. 2548. การสั่นสะเทือนเชิงกล. สำนักพิมพ์ที่อุป, กรุงเทพฯ.

วโรดม ผู้จินดา. 2550. การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมทางวิศวกรรม.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. 2548. การควบคุมระบบพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Aspinwall, D.M. 1980. Acceleration Profiles for Minimizing Residual Response.

ASME Journal of Dynamics System, Measurement, and Control 102(1): 3-6.

Bayo, E. and H. Moulin. 1989. An Efficient Computation of the Inverse Dynamics of

Manipulators in the Time Domain. **IEEE International Conference on Robotics and
Automation** 2: 710-775.

Bhat, S.P. and B.P. Miu. 1991. Solutions to Point-to-Point Control Problems using Laplace

Transform Technique. **ASME Journal of Dynamic Systems** 113: 425-431.

Chang, P.H. and J. Park. 2001. A Concurrent Design of Input Shaping Technique and a Robust

Control for High-speed/high-precision Control of a Chip Mounter. **Control Engineering
Practice** 9: 1279-1285.

Chatlatanagulchai, W. 2006. **Command Shaping Applied to a Flexible Robot with**

Configuration-Dependent Resonance. Proc. American Control Conference
Minneapolis.

Ge, S.S., T.H. Lee and Z.P. Wang. 2001. Model-free Regulation of Multi-link Smart Materials

Robots. **IEEE International Conference on Robotics and Automation** 4: 3871-3876.

- Kamran A,G. 2003. **Command Shaping Control for the Z-axis of a Wire Bonder for Reducing Residual Vibration.** S.M. thesis M.E., Purdue University.
- Meckl, P.H. 1984. **Minimizing residual vibration of a linear system using appropriately shaped forcing functions.** S.M. thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- _____. 1988. **Control of vibration in mechanical system using shaped reference input.** Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology.
- Meckl, P.H. and K. Umemoto. 2000. Achieving Fast Motions in Semiconductor Manufacturing Machinery. **NEC Research and Development** 41(2): 232-237.
- Meckl, P.H., and R. Kinceler. 1994. Robust Motion Control of Flexible Systems Using Feedforward Forcing Functions. **IEEE Transactions on Control Systems Technology** 2(3): 245-254.
- Meckl, P.H. and W.P. Seering. 1987. Reducing Residual Vibration in Systems with Time-Varying Resonances. **IEEE International Conference on Robotics and Automation, Raleigh** 1690-1695.
- Khorrami, F., S. Jain and A. Tzes. 1995. Experimental Results on Adaptive Nonlinear Control and Input Preshaping for Multi-link Flexible Manipulators. **Automatica** 31: 83-97.
- Kinceler, R. and P. H. Meckl. n.d. Corrective input shaping for a flexible-joint manipulator. **American Control Conference** 1335-1339.
- Mohamed, Z. and M.O. Tokhi. 2003. **Command shaping techniques for vibration control of a flexible robot manipulator.** Department of Automatic Control and System Engineering, The University of Sheffield.

Singer, N.C. and W.P. Seering. 1990. Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration. **ASME Journal of Dynamic Systems** 112: 76-81.

Singhose, W.E., W.P. Seering and N.C. Singer. 1996. Improving Repeatability of Coordinate Measuring Machines with Shaped Command Signals. **Precision Engineering** 18: 138-146.

Tuttle, D.T. and P.W. Seering. 1996. Creating Time-Optimal Commands for Systems with Denominator Dynamics. **IEEE International Conference on Controls Applications Dearborn** 385-390.

Tzes, A.P. and S. Yurkovich. 1989. Adaptive Precompensators for Flexible-link Manipulator Control. **IEEE Conference on Decision and Control** 3: 2083-2088.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

โปรแกรม Matlab สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบในการทำ System ID

โปรแกรม Matlab สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบในการทำ System ID

```
clear
close all

%load raw data
V = load('C:\Documents and Settings\Administrator\My
Documents\poohnaruk\sys_id\V1_21.txt');
theta1 = load('C:\Documents and Settings\Administrator\My
Documents\poohnaruk\sys_id\theta1_21.txt');
theta2 = load('C:\Documents and Settings\Administrator\My
Documents\poohnaruk\sys_id\theta2_21.txt');
theta1 = theta1*pi/180;
theta2 = theta2*pi/180;

%time
ts = 0.001; %sampling time
t = 0:ts:ts*(length(V)-1);

figure(1),
subplot(311),plot(t,theta1)
subplot(312),plot(t,theta2)
subplot(313),plot(t,V)
```

ภาคผนวก ข

โปรแกรม Matlab สำหรับการใช้ Fast Fourier Transform หาความถี่ธรรมชาติในการทดลองจริง

โปรแกรม Matlab สำหรับการใช้ Fast Fourier Transform หาความถี่ธรรมชาติในการทดลองจริง

```
function [w,X] = MyFFT(t,x,N,showplot)

if ~exist('N') | isempty(N) | N<length(x)
    p = ceil(log(length(x))/log(2))+2;
    N = 2^p;
end

X = fft(x,N)/sqrt(N);
X = X(1:N/2);

dt = t(2)-t(1);
df = 1/(dt*N);
f = (0:N/2-1)*df;
w = 2*pi*f;

if exist('showplot') & lower(showplot)=='plot'
    mag = 20*log10(abs(X));
    %mag = abs(X);
    ph = unwrap(angle(X))*180/pi;

    subplot(211)
    semilogx(w,mag)
    axis([min(w) max(w) min(mag) max(mag)])
    grid on
    xlabel('Frequency (rad/sec)')
    ylabel('Magnitude (dB)')

    subplot(212)
    semilogx(w,ph)
    axis([min(w) max(w) min(ph) max(ph)])
    grid on
    xlabel('Frequency (rad/sec)')
    ylabel('Phase (deg)')
end

clear
close all

%load raw data
x = load('C:\Documents and Settings\Administrator\My
Documents\poohnaruk\sys_id\accelerate_22.txt');

%time
%ts = 0.0005; %sampling time
ts = 100/100000;
t = 0:ts:ts*(length(x)-1);

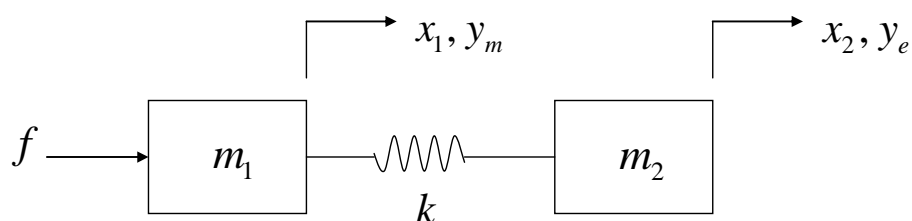
MyFFT(t,x,[],'plot')
```


ภาคผนวก ค

ความสัมพันธ์ระหว่าง Input Spectrum และ Residual Acceleration Amplitude

ความสัมพันธ์ระหว่าง Input Spectrum และ Residual Acceleration Amplitude

จากพื้นฐานของระบบ Two-mass undamped system ซึ่งจะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่าง input function spectrum และแอมพลิจูดของการสั่นซึ่งความสัมพันธ์ทั้งสองนี้จะสามารถอธิบายถึงสมการที่ (16) ได้เป็นอย่างดีในความสัมพันธ์ระหว่างโดเมนทั้งสองคือ แอมพลิจูดของการสั่นซึ่งจะอยู่บนโดเมนเวลา (Time Domain) และ input function spectrum ซึ่งก็คือค่าความถี่ของระบบจะอยู่บนโดเมนความถี่ (Frequency Domain) จากภาพที่ 16 แสดง Two-mass undamped system คือ



จะได้ความสัมพันธ์ของระบบจากสมการคือ

$$\frac{y_e^*}{f^*} = \frac{\left(\frac{\omega_A}{\omega_N}\right)^2}{s^2 \left[s^2 + \left(\frac{\omega_A}{\omega_N}\right)^2 \right]}$$

เราให้

y_e เป็น ตำแหน่งการสิ้นสุดการเคลื่อนที่ (endpoint position)

y_m เป็น ตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ (motor position)

f เป็น แรง (force)

การลดแอมพลิจูดของการสั่นของระบบที่ไม่มีการหน่วง ค่าต่างๆของพารามิเตอร์สามารถแสดงในตารางที่ 1

แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วยของระบบ

$$t^* = \omega_N t / 2\pi$$

$$y_e^* = \frac{y_e}{y_f}$$

$$y_e^* = \frac{y_e}{\omega_N^2 y_f}$$

$$F^* = \frac{F}{(m_1 + m_2) y_f \omega_N^2} = \left(\frac{2}{\omega_N T_s} \right)^2 \frac{F}{F_{\max}}$$

โดยที่

y_f เป็น ตำแหน่งสุดท้ายของการเคลื่อนที่ (final position)

T_s เป็น เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของ y_f ที่เรียกว่า square wave input

F เป็น แรงสูงสุด (peak force)

ความคลาดเคลื่อนของความถี่ธรรมชาติสามารถแสดงในรูปของอัตราส่วน คือ $\frac{\omega_A}{\omega_N}$

โดยที่

ω_A เป็น ความถี่ธรรมชาติจริงของระบบ (actual natural frequency)

ω_N เป็น ความถี่ธรรมชาติประมาณ (nominal natural frequency)

จากระบบ Two-Mass System Model จะมีความถี่ธรรมชาติของระบบค่าเดียว ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Magnitude input spectrum ของความถี่ธรรมชาติกับแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือน

จากสมการ

$$A = \sqrt{a_o^2 + \left(\frac{J_o}{\omega_n}\right)^2} \quad (26)$$

โดยที่

$a_o = \frac{d^2 y}{dt^2}(T_f)$ เป็นความเร่งของมวล m_2 ที่เวลา T_f

$J_o = \frac{d^3 y}{dt^3}(T_f)$ เป็นการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วที่เวลา T_f และ

$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_1} \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right)}$ เป็นความถี่ธรรมชาติของระบบ Two-mass system

โดย A จากสมการที่ (26) แสดงถึงแอมพลิจูดการสั่นที่ไม่มีภาระหน่วง เราสามารถแทนค่า a_o และ J_o ให้อยู่ใน Fourier transform ได้คือ

$$a_o = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Re}[F(\omega)H_a(\omega)] \cos \omega T_f d\omega$$

$$J_o = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Re}[F(\omega)H_J(\omega)] \cos \omega T_f d\omega$$

โดยที่

$F(\omega)$ เป็น ฟูเรีย ทรานฟอร์ม ของ input spectrum

$H_a(\omega)$ เป็น ฟูเรีย อินทิกรัล ที่แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนของ input force (f)

$$\text{ของ } \frac{d^2 y}{dt^2}$$

$H_J(\omega)$ เป็น ฟูเรีย อินทิกรัล ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ f และ $\frac{d^3 y}{dt^3}$

ฟังก์ชันใดๆ $f(t)$ เริ่มจากเวลา $t=0$ และสิ้นสุดที่เวลา $t=T_f$ จะเขียนให้อยู่ในของ ฟูเรีย ทรานฟอร์มได้คือ

$$F(\omega) = \int_0^{T_f} f(t) e^{-j\omega t} dt = [F_R(\omega) + jF_I(\omega)] e^{-j\frac{\omega T_f}{2}} \quad (27)$$

โดยที่ $f_r(\omega)$ และ $f_i(\omega)$ เป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพตามลำดับ ที่ได้มาจากการแทนฟูเรียร์ อินทิกรัล ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความเหมาะสม จากการให้ฟังก์ชันเอกลักษณะ คือ

$$H_a(\omega) = \frac{\omega_n^2}{m_1 + m_2} \left\{ \frac{1}{\omega_n^2 + \omega^2} + \frac{\pi}{2j\omega_n} [\delta(\omega - \omega_n) - \delta(\omega + \omega_n)] \right\} \quad (28)$$

$$H_j(\omega) = \frac{\omega_n^2}{m_1 + m_2} \left\{ \frac{j\omega}{\omega_n^2 + \omega^2} + \frac{\pi}{2} [\delta(\omega - \omega_n) - \delta(\omega + \omega_n)] \right\} \quad (29)$$

โดยที่ $\delta(\omega)$ เป็นฟังก์ชันเดลต้า ที่สามารถหาได้จากสมการคือ

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(\omega - \omega_o) \mathcal{O}(\omega) d\omega = \mathcal{O}(\omega_o) \quad (30)$$

โดยที่ $\mathcal{O}(\omega_o)$ เป็นฟังก์ชันที่กำหนดขึ้น

ทำการแทนฟูเรียร์ อินทิกรัลในการแสดงถึงค่า a_o และ J_o จะได้สมการคือ

$$a_o = \frac{\omega_n}{m_1 + m_2} \left[F_R(\omega_n) \sin \frac{\omega_n T_f}{2} + F_I(\omega_n) \cos \frac{\omega_n T_f}{2} \right] \quad (31)$$

$$\frac{J_o}{\omega_n} = \frac{\omega_n}{m_1 + m_2} \left[F_R(\omega_n) \cos \frac{\omega_n T_f}{2} + F_I(\omega_n) \sin \frac{\omega_n T_f}{2} \right] \quad (32)$$

ทำการแทนค่าในสมการที่ (26) จะได้

$$A = \frac{\omega_n}{m_1 + m_2} |F(\omega_n)| \quad (33)$$

โดยที่

$$|F(\omega_n)| = \sqrt{F_R^2(\omega_n) + F_i^2(\omega_n)}$$

สำหรับ Frequency Spectrum คือ

$$|F^*(\omega_n T_f)| = \frac{|F(\omega_n)|}{F_{\max} T_f} \quad (26)$$

โดยที่

F_{\max} คือ แอมพลิจูดสูงสุด (peck force amplitude)

T_f เป็นเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่แสดงถึงแอมพลิจูดการสั่น ซึ่งสามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปสมการคือ

$$A^* = \frac{A}{F_{\max} / (m_1 + m_2)} = \omega_n T_f |F^*(\omega_n T_f)| \quad (26)$$

และ

$$|F^*(\omega_n T_f)| = |F(\omega_n)| / F_{\max} T_f$$

โดยที่

A คือ แอมพลิจูดความเร่งของการสั่นสะเทือน

$F(\omega_n)$ คือ ฟุรีเย ทรามฟอร์ม ของ input function

ภาคผนวก ง

โปรแกรม Matlab สำหรับเทคนิคคอมมานด์เซปป์ในการปรับเปลี่ยน
โครงสร้างของ Reference Signals

โปรแกรม Matlab สำหรับเทคนิคคอมมานด์ชปีงในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals

```

clear
close all
clc

%Ramped sine desired
trajectories.....
load alpha
ts = 0.001; %sampling time (s)
T = 10; %end time (s)
tt = 0:ts:T-ts; %time (s)

J = 1; %inertia
wn = [10]; %natural frequencies (rad/s)
Yf = 4; %final position (rad)
Fmax = 40; %max torque (Nm)
rho = 10; %weight in the cost function
L=10; %number of sine terms

[B,Tf]=rs_coefs(wn, rho, L, Yf, Fmax, J);
t=0:ts/Tf:1; %dimensionless time (at sample rate)
F=forcfunc(t,B,a); %dimensionless force (torque)
tdim=0:ts:Tf; %dimensional time (s)
%SF = max(F);
SF = 1; % Modified by prof. Meckl at 13th of August, 2004
Fdim=F*Fmax/SF; % dimensional torque (N-m)
ndif=length(tdim)-length(Fdim);
Fdim=[Fdim zeros(1,ndif)];

alphard(1)=0; alphas(1)=0;

for i=1:length(Fdim)
    alphas2d(i) = Fdim(i);
end

for i=1:length(Fdim)-1
    alphard(i+1)= alphard(i) + ts*alphas2d(i);
    alphas(i+1) = alphas(i) + ts*alphard(i);
end

for i=length(Fdim)+1:T/ts
    alphas2d(i)=0;
    alphard(i)=0;
    alphas(i)=alphas(length(Fdim));
end

%Square-wave desired
trajectories.....

alphas2d_max = Fmax;
Tfs = sqrt(4*Yf/alphas2d_max); %End time for square wave

```



```

for i=1:round(Tfs/ts/2)
    alphas2d(i)=alphas2d_max;
    alphasd(i)=alphas2d_max*i*ts;
    alphas(i)=0.5*alphas2d_max*(i*ts)^2;
end
for i=round(Tfs/ts/2)+1:round(Tfs/ts)
    alphas2d(i)=-alphas2d_max;
    alphasd(i)=alphas2d_max*(Tfs-i*ts);
    alphas(i)=alphas2d_max*(Tfs*i*ts-0.25*Tfs^2-0.5*(i*ts)^2);
end
for i=round(Tfs/ts)+1:T/ts
    alphas2d(i)=0;
    alphasd(i)=0;
    alphas(i)=alphas(round(Tfs/ts));
end

%Plot.....
.....
figure(1)
subplot(221),plot(tt,alphanar2d)
subplot(222),plot(tt,alphanard)
subplot(223),plot(tt,alphanar)

figure(2)
subplot(221),plot(tt,alphas2d)
subplot(222),plot(tt,alphasd)
subplot(223),plot(tt,alphas)

figure(3)
%MyFFT(tdim,Fdim,[],'plot');
MyFFT(tt,alphanar2d,[],'plot');

figure(4)
MyFFT(tt,alphanard,[],'plot');

figure(5)
MyFFT(tt,alphanar,[],'plot');

figure(6)
MyFFT(tt,alphas2d,[],'plot');

figure(7)
MyFFT(tt,alphasd,[],'plot');

figure(8)
MyFFT(tt,alphas,[],'plot');

figure(9)
plot(tt,alphanar-alphas)

%write to files
fid=fopen('alphanar2d_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphanar2d);
status=fclose(fid);

```

```
fid=fopen('alphard_v2.txt','w');  
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphard);  
status=fclose(fid);
```

```
fid=fopen('alphan_v2.txt','w');  
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphan);  
status=fclose(fid);
```

```
fid=fopen('alphas2d_v2.txt','w');  
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphas2d);  
status=fclose(fid);
```

```
fid=fopen('alphasd_v2.txt','w');  
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphasd);  
status=fclose(fid);
```

```
fid=fopen('alphas_v2.txt','w');  
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphas);  
status=fclose(fid);
```

ภาคผนวก จ

ผลจากการทดลองการเปรียบเทียบการใช้คอมพิวเตอร์เซปิ้งกับไม่ใช้คอมพิวเตอร์เซปิ้ง

ผลจากจากการทดลองการเปรียบเทียบการใช้คอมมานด์เซปปีงกับไม่ใช้คอมมานด์เซปปีง

```

clear
close all
clc

ts = 0.001;
T = 5;
t = 0:ts:T;

%load raw data
vr = load('c:\Documents and Settings\Administrator\My
Documents\poohnaruk\sys_id\result\v_r.txt');
vs = load('c:\Documents and Settings\Administrator\My
Documents\poohnaruk\sys_id\result\v_s.txt');
alphan = load('c:\Documents and Settings\Administrator\My
Documents\poohnaruk\sys_id\result\theta1_r.txt');
alphas = load('c:\Documents and Settings\Administrator\My
Documents\poohnaruk\sys_id\result\theta1_s.txt');
accr = load('c:\Documents and Settings\Administrator\My
Documents\poohnaruk\sys_id\result\acc_r.txt');
accs = load('c:\Documents and Settings\Administrator\My
Documents\poohnaruk\sys_id\result\acc_s.txt');

%ts = 0.001;
%t = 0:ts:ts*(length(vr)-1);
%compute acceleration
%accr = diff(rater)/ts;
%accs = diff(rates)/ts;

%reference
ref = 0.5*ones(1,length(t));

figure(1),
plot(t,vr(1:length(t))),hold on, plot(t,vs(1:length(t)),'r:'),hold
off

figure(2),
plot(t,alphan(1:length(t))),hold on,
plot(t,alphas(1:length(t)),'r:'),hold on, plot(t,ref),hold off

figure(3),
plot(t,accr(1:length(t))),hold on,
plot(t,accs(1:length(t)),'r:'),hold off

```

ภาคผนวก จ

ผลจากจากการทดลองการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องของแขนกล

ผลจากจากการทดลองการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องของแขนกล

```

clear
close all
clc

%Ramped sine desired
trajectories.....
load alpha
ts = 0.001; %sampling time (s)
T = 3; %end time (s)
tt = 0:ts:T*10-ts; %time (s)

J = 1; %inertia
wn = [10]; %natural frequencies (rad/s)
Yf = 4; %final position (rad)
Fmax = 40; %max torque (Nm)
rho = 10; %weight in the cost function
L=10; %number of sine terms

[B,Tf]=rs_coefs(wn, rho, L, Yf, Fmax, J);
t=0:ts/Tf:1; %dimensionless time (at sample rate)
F=forcfunc(t,B,a); %dimensionless force (torque)
tdim=0:ts:Tf; %dimensional time (s)
%SF = max(F);
SF = 1; % Modified by prof. Meckl at 13th of August, 2004
Fdim=F*Fmax/SF; % dimensional torque (N-m)
ndif=length(tdim)-length(Fdim);
Fdim=[Fdim zeros(1,ndif)];

alphard(1)=0; alphas(1)=0;

for i=1:length(Fdim)
    alphas2d(i) = Fdim(i);
end

for i=1:length(Fdim)-1
    alphard(i+1)= alphard(i) + ts*alphas2d(i);
    alphas(i+1) = alphas(i) + ts*alphard(i);
end

for i=length(Fdim)+1:T/ts
    alphas2d(i)=0;
    alphard(i)=0;
    alphas(i)=alphas(length(Fdim));
end

%Square-wave desired
trajectories.....

alphas2d_max = Fmax;
Tfs = sqrt(4*Yf/alphas2d_max); %End time for square wave

```

```

for i=1:round(Tfs/ts/2)
    alphas2d(i)=alphas2d_max;
    alphasd(i)=alphas2d_max*i*ts;
    alphas(i)=0.5*alphas2d_max*(i*ts)^2;
end
for i=round(Tfs/ts/2)+1:round(Tfs/ts)
    alphas2d(i)=-alphas2d_max;
    alphasd(i)=alphas2d_max*(Tfs-i*ts);
    alphas(i)=alphas2d_max*(Tfs*i*ts-0.25*Tfs^2-0.5*(i*ts)^2);
end
for i=round(Tfs/ts)+1:T/ts
    alphas2d(i)=0;
    alphasd(i)=0;
    alphas(i)=alphas(round(Tfs/ts));
end
%Continuous desired
trajectories.....
%Square-wave
alphas2d = [alphas2d, -alphas2d, alphas2d, -alphas2d, alphas2d, -
alphas2d, alphas2d, -alphas2d, alphas2d, -alphas2d];
alphasd = [alphasd, -alphasd, alphasd, -alphasd, alphasd, -alphasd,
alphasd, -alphasd, alphasd, -alphasd];
for i=1:length(alphasd)-1
    alphas(i+1) = alphas(i)+ts*alphasd(i);
end

%Ramped sine
alphan2d = [alphan2d, -alphan2d, alphan2d, -alphan2d, alphan2d, -
alphan2d, alphan2d, -alphan2d, alphan2d, -alphan2d];
alphanrd = [alphanrd, -alphanrd, alphanrd, -alphanrd, alphanrd, -alphanrd,
alphanrd, -alphanrd, alphanrd, -alphanrd];
for i=1:length(alphanrd)-1
    alphan(i+1) = alphan(i)+ts*alphanrd(i);
end

%Plot.....
.....
figure(1)
subplot(221),plot(tt,alphan2d)
subplot(222),plot(tt,alphanrd)
subplot(223),plot(tt,alphan)

figure(2)
subplot(221),plot(tt,alphas2d)
subplot(222),plot(tt,alphasd)
subplot(223),plot(tt,alphas)

figure(3)
%MyFFT(tdim,Fdim,[],'plot');
MyFFT(tt,alphan2d,[],'plot');

figure(4)
MyFFT(tt,alphanrd,[],'plot');

figure(5)
MyFFT(tt,alphan,[],'plot');

```

```
figure(6)
MyFFT(tt,alphas2d,[],'plot');

figure(7)
MyFFT(tt,alphasd,[],'plot');

figure(8)
MyFFT(tt,alphas,[],'plot');

figure(9)
plot(tt,alphan-alphas)

%write to files
fid=fopen('alphan2d_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphan2d);
status=fclose(fid);

fid=fopen('alphan_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphan);
status=fclose(fid);

fid=fopen('alphan2d_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphan2d);
status=fclose(fid);

fid=fopen('alphan_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphan);
status=fclose(fid);

fid=fopen('alphan2d_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphan2d);
status=fclose(fid);

fid=fopen('alphan_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphan);
status=fclose(fid);
```


ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายธีรพงษ์ ตระกูลโชคอำนวย
วัน เดือน ปี ที่เกิด	17 พฤษภาคม 2527
สถานที่เกิด	จังหวัดนครปฐม
ประวัติการศึกษา	
ประถมศึกษา	โรงเรียนวังน้ำเขียว
มัธยมศึกษา	โรงเรียนสาธิตแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
อุดมศึกษาปริญญาตรี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	เงินทุนสนับสนุนงานวิจัย