

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

....

วิศวกรรมเครื่องกล	วิศวกรรมเครื่องกล		
สาขา	ภาควิชา		
เรื่อง การควบคุมการเคลื่อนที่ง คอมมานค์เชปปิ้ง	การควบคุมการเกลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์แบบข้อต่อยืดหยุ่นได้โดยใช้เทคนิค กอมมานด์เชปปิ้ง		
Command Shaping Appl	ied to Point-to-Point Motion of a One-link Flexible-Joint Robot		
นามผู้วิจัย นายธีรพงษ์ ตระกูล ได้พิจารณาเห็นชอบโดย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	โชกอำนวย		
	(อาจารย์วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย, Ph.D.)		
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย ศิวะ โกศิษฐ, Ph.D)		
หัวหน้าภาควิชา			

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, D.Phil.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กั	ญจนา ธีระกุล, D.Agr.)
	คณบดีบัย	ແ ຫື ຕ ີວາຍາຄັຍ	
วันที่	เดือน	พ.ศ	

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์แบบข้อต่อยึดหยุ่นได้ โดยใช้เทคนิคกอมมานด์เชปปิ้ง

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 ยืดหยุ่นได้ โดยใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปิ้ง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย, Ph.D. 72 หน้า

กวามยึดหยุ่นของข้อต่อช่วยลดการเสียหายจากการชน จริงๆแล้วข้อต่อของแขนหุ่นยนด์ ทุกชนิด มีความยืดหยุ่นอยู่บ้างจากคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ ผลในอดีตระบุว่า หากไม่นำความ ยึดหยุ่นของข้อต่อเข้ามาพิจารณาในการออกแบบ อาจทำให้เกิดความเสียหายจากการสั่นพ้อง (Resonance) และประสิทธิภาพในการควบคุมลดลงอย่างไรก็ตาม การควบคุมหุ่นยนต์แบบข้อต่อ ยึดหยุ่นได้ยังเป็นปัญหาเปิดทางการวิจัยเนื่องจากแบบจำลองมีความซับซ้อน และการที่ระบบเป็น แบบ Under-actuated ความยึดหยุ่นของข้อต่อทำให้แขนหุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เร็ว เนื่องจากการสั่นสะเทือนที่ End Point จากการที่ Reference Signals ได้แก่ความเร่ง ความเร็ว และ การขจัดที่มี Power Spectrum สูงในทุกย่านความถี่ ไปกระดุ้นความถี่ธรรมชาติของระบบ ใน งานวิจัยนี้เราได้ใช้ ฟังก์ชันพื้นฐานแร็ม ไซนูซอยในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals เพื่อลดค่าพลังงานกระตุ้นในช่วงที่เกิดความถี่ธรรมชาติ เพื่อลดการสั่นพ้อง ผลจาก Simulation และจากการทดลองจริง เห็นได้ชัคว่าการสั่นสะเทือนของแขนหุ่นยนต์จากการใช้ 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.

/ /

กิตติกรรมประกาศ

ง้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ ช่วยเหลือให้วิชาความรู้ คำแนะนำต่างๆ รวมถึงการวางแผนการทำงานวิจัยทำให้วิทยานิพนธ์นี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คร.วิชัย ศิวะโกศิษฐ กรรมการที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ข้อแนะนำแนวกิดในงานวิจัยรวมถึงข้อเสนอแนะในการเขียนเล่ม วิทยานิพนธ์

ขอขอบกุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ CRV Lab ทุกๆ คนที่ได้ให้กำลังใจ ความช่วยเหลือ และ ความรู้สึกดีๆ มาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ อากง เดี่ย แม่ อาโก อาเจ้ อาเฮีย น้องๆ รวมถึงทุกๆคนในครอบครัว ตระกูลโชคอำนวย ในความรัก ความเมตตา ที่มีให้ข้าพเจ้าเสมอมา

ความสำเร็จ และคุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์

> ธีรพงษ์ ตระกูลโชคอำนวย กุมภาพันธ์ 2552

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญภาพ	(2)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(3)
กำนำ	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	
หาความถี่ธรรมชาติในการทคลองจริง	54
ภาคผนวก ค ความสัมพันธ์ระหว่าง Input Spectrum และ	
Residual Acceleration Amplitude	56
ภาคผนวก ง โปรแกรม Matlab สำหรับเทกนิคกอมมานค์เชปปิ้งในการปรับเปลี่ยน	
โครงสร้างของ Reference Signals	62
ภาคผนวก จ ผลจากการทคลองการเปรียบเทียบการใช้คอมมานค์เชปปิ้งกับ	
ไม่ใช้กอมมานค์เชปปิ [้] ง	66
ภาคผนวก ฉ ผลจากการทคลองการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องของแขนกล	68
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	72

สารบัญภาพ

ภาพที่

1	แสดงแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้	11
2	วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (Power Amplifier)	12
3	เอนโคคเคอร์ ของ Omron รุ่น E6B2-CW26C	12
4	Accelerometer	13
5	การ์ครับส่งข้อมูล (Data Acquisition) NI PCI 6221	13
6	แสดงโครงสร้างระบบทั้งหมดที่ใช้ทำการทดลอง	14
7	แสดงแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นและอุปกรณ์ตรวจรู้	15
8	แสดงโครงสร้างของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้	16
9	แสดงการหาสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้	19
10	รูปบนแสดงมุมการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น รูปล่าง	
	แสคงผลของแรงคันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์	20
11	แสดงผลการเกลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น จากแบบจำลอง	
	แขนกลกับแขนกลจริง	22
12	แสดงบลี้อกระบบควบคุมแบบปิด	23
13	แสดงการควบคุมแบบ Inverse Dynamics	29
14	บนถ่างแสดงการติดตั้ง Accelerometer กับแขนกล	32
15	แสดงผลการค่าความถี่ธรรมชาติจาก 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	แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนของแขนกล จากการใช้เทคนิค	
	คอมมานด์เชปปิ้ง	42
21	แสดงผลของของความเร่งทั้งสองกรณี	43
22	แสดงผลของ Input Voltages ทั้งสองกรณี	44

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	แอมพลิจูดความเร่งของการสั่นสะเทือน
a_k, a_l	=	จำนวนลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับพื้นฐานฟังก์ชัน
a_m	=	ความเร็วสูงสุด
B_k, B_l	=	สัมประสิทธ์ของพื้นฐานฟังก์ชัน
С	=	ค่าความหน่วงที่จุดหมุนของแขนกล
D	=	Dissipative Power
d	=	ระยะระหว่างจุดยึดสปริงบน Hub ถึงจุดหมุนแขนกลในแนวตั้ง
е	=	Error
F	=	แรงสูงสุด (Peak Force)
F_{cs}^{*}	=	ฟูเรีย ทรานฟอร์มที่ไม่มีหน่วยของ Command Shaped profile
$F_{\rm max}$	=	แรงสูงสุด (Peck Force Amplitude)
$F(\omega_n)$	=	ฟูเรีย ทรามฟอร์ม ของ Input Function
f	=	1129
f_{cs}	=	Command Shaped profile
f_n	=	ความถื่
f_r	=	Bang-Bang command profile
G	=	ຕັວຄວນຄຸມ (Controller)
Ι	=	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์
J	=	โมเมนต์ความเฉื่อย
${m J}_{_{hub}}$	=	โมเมนต์กวามเฉื่อยของ Hub
$m{J}_{link}$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกล
K	=	พลังงานจลน์
k _{stiff}	=	ค่าความยืดหยุ่นของสปริงแบบขด
k	=	ค่าความยืดหยุ่นของสปริง
k_{b}	=	Motor back emf constant
k _m	=	Motor torque constant
k _g	=	Gear Ratio
L	=	จำนวนเทอมของพื้นฐานฟังก์ชันแร็ม ไซนูซอย
m	=	ກວຍ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Ν	=	จำนวนของความถี่ต่างๆรอบบริเวณความถี่ธรรมชาติ
Р	=	พลังงานศักย์ยึคหยุ่น
$\overset{\scriptscriptstyle \wedge -1}{p}$	=	Inverse Model
$\mathit{Q}_{\scriptscriptstyle 1}$, $\mathit{Q}_{\scriptscriptstyle 2}$	=	พลังงานภายนอกของสมการลากรานจ์
R_m	=	ค่าความต้านทานของมอเตอร์
SF	=	Scale Factor
T_{f}	=	Command Shaped input ที่มีความสัมพันธ์กับเวลา
T_r, T_s	=	Square Wave หรือ Bang-Bang input ของระบบที่มีการเคลื่อนที่กับเวลา
Т	=	ทอร์กของมอเตอร์
y _e	=	ตำแหน่งการสิ้นสุดการเคลื่อนที่ (endpoint position)
${\mathcal Y}_f$	=	คำแหน่งสุดท้ายของการเคลื่อนที่ (final position)
\mathcal{Y}_m	=	ตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ (motor position)
V	=	แรงคันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์
$\theta_{_{1}}$	=	มุมของ Link แขนกลเทียบกับฐาน
$ heta_2$	=	มุมของ Hub เทียบกับฐาน
$\ddot{ heta},\dot{ heta}, heta$	=	Reference Signals ได้แก่ ความเร่ง ความเร็ว และการขจัด
$\omega_{_{A}}$	=	ความถี่ธรรมชาติจริงของระบบ (actual natural frequency)
ω_{N}	=	ความถี่ธรรมชาติประมาณ (nominal natural frequency)
ω_i, ω_n	=	ความถี่ธรรมชาติ
ρ	=	น้ำหนัก
$ au_m$	=	แรงบิคสูงสุด
Δv	=	ช่วงของการเปลี่ยนความเร็ว
Г	=	Scale Function

การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์แบบข้อต่อยืดหยุ่นได้ โดยใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปิ้ง

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

คำนำ

เนื่องจากในโลกปัจจุบันเป็นโลกแห่งเทคโนโลยีซึ่งมีการพัฒนาตั้งแต่อดีตที่เป็นช่วงปฏิวัติ อุตสาหกรรมที่มีการใช้เครื่องจักรไอน้ำแทนแรงงานคนอย่างแท้จริงเป็นครั้งแรก เพราะเนื่องจาก แรงงานคนเป็นอะไรที่ไม่แน่นอนทั้งค่าแรงงานที่ต้องเสีย และผลงานที่ได้รับนั้นเราไม่สามารถ กำหนดได้แน่นอนว่าจะเป็นอย่างไรจนยุคต่อๆมาก็ได้มีการพัฒนาเครื่องจักรที่จะมาแทนแรงงาน คนเรื่อยมาจนมาถึงปัจจุบันได้พัฒนาจนถึงว่าเครื่องจักรนั้นต้องมีความยืดหยุ่นสูงคือต้องสามารถ ทำงานได้หลายรูปแบบแล้วต้องเป็นระบบที่สามารถทำงานได้เองเป็นอัตโนมัติ ซึ่งในระยะยาวจะ สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้มากและเครื่องจักรที่มีความยืดหยุ่นสูงส่วนมากก็คือแขนกล

ความยืดหยุ่นของแขนกลถือได้ว่าเป็นส่วนประกอบหนึ่งในหุ่นยนต์ที่มีความสำคัญใน การทำงานต่างๆ ของระบบ โดยส่วนใหญ่แล้วข้อต่อของแขนกลทุกชนิดจะมีความยืดหยุ่นซึ่งเป็น คุณสมบัติพื้นฐานของแขนกล ซึ่งความยืดหยุ่นของแขนกลนั้นจะช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้นจาก การชนและอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นเพราะแขนกลนั้นจะมีการเคลื่อนที่ก่อนข้างเร็วอยู่ตลอดเวลา

เหตุผลที่สำคัญประการหนึ่งในการออกแบบแขนกลคือความยึดหยุ่น หากไม่นำความ ยึดหยุ่นมาพิจารณาในการออกแบบข้อต่อของแขนกลแล้ว ในการนำไปใช้งานจริงนั้นอาจเกิด ความเสียหายจากการสั่นพ้อง (Resonance) และส่งผลให้ประสิทธิภาพในการควบคุมแขนกลลดลง

การควบคุมแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้นั้นยังเป็นปัญหาเปิดทางงานวิจัยเพราะว่า ส่วนใหญ่แล้วแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลจะเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ต้องทำการ หาซึ่งจะสามารถช่วยอธิบายพฤติกรรมของระบบแขนกล แต่ปัญหาที่สำคัญคือระบบสมการที่ไม่ เป็นเชิงเส้นนั้นมีความยากต่อการทำให้ระบบมีความแม่นยำ และจากการที่ระบบของแขนกลเป็น แบบ Under-actuated ความยึดหยุ่นของข้อต่อทำให้แขนกลไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เร็ว เนื่องจากเมื่อ เกิดการเคลื่อนที่จะมีการสั่นสะเทือนที่จุดปลายของแขนกล (End Point)

จากสัญญาณอ้างอิงของระบบคือ Reference Signals ซึ่งได้แก่ ความเร่ง ความเร็ว และ การขจัดซึ่งก่า Reference Signals ทั้งสามนี้จะที่มี Power Spectrum สูงในทุกย่านความถี่โดยจะไป กระตุ้นความถี่ธรรมชาติของระบบทำให้แขนกลนั้นเกิดการสั่นสะเทือน

ในงานวิจัยนี้เราให้ใช้เทคนิคคอมมานค์เชปปิ้งในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals เพื่อลคค่าพลังงานกระตุ้นในช่วงที่เกิคความถี่ธรรมชาติเพื่อลคการสั่นพ้องและงานวิจัยนี้เรา ใช้ฟังก์ชันพื้นฐานของแร็ม ไซนูซอยเข้ามาใช้ในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals ผลจาก Simulation และจากการทคลองจริง แสดงให้เห็นว่าการสั่นสะเทือนของแขนกลจากการใช้ เทกนิคกอมมานค์เชปปิ้งลคลงและทำให้แขนกลเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น

วัตถุประสงค์

 เพื่อศึกษาและออกแบบการควบกุมแขนกลแบบมีข้อต่อยึดหยุ่นโดยใช้เทคนิก กอมมานด์เปชปิ้ง

2. สร้างแบบจำลองทางสมการคณิตศาสตร์และหาสมการการเกลื่อนที่ทางคณิตศาสตร์ ของแขนกล (System ID) เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นในการออกแบบ การควบคุมแขนกล

 ทำการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นโดยใช้เทคนิค กอมมานด์เชปปิ้งและนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบระหว่าง การใช้ Unshaped Command กับ Shaped Command

การตรวจเอกสาร

แขนกลถือได้ว่าเป็นส่วนประกอบหนึ่งในหุ่นยนต์ที่มีความสำคัญในการทำงานต่างๆ ของ ระบบโดยส่วนใหญ่แล้วการทำงานของแขนกลนั้นจะมีการเกลื่อนที่ก่อนข้างเร็วอยู่ตลอดเวลา ผลที่ ตามมาก็คือเกิดการสั่นสะเทือนของแขนกลโดยการสั่นสะเทือนนี้อาจส่งผลทำให้เกิดความเสียหาย ของระบบและผู้ควบคุมได้

การสั่นสะเทือนทางกลนั้นจะเกิดจากการเคลื่อนที่แบบสั่นไปมาของระบบที่ประกอบด้วย มวลและสภาพยืดหยุ่น(Elasticity)ในช่วงเวลาที่กำหนดในช่วงเวลาหนึ่งเรียกว่า การสั่นสะเทือน (Vibration) ในโครงสร้างของระบบทางพลศาสตร์นั้นจะมีการสั่นพ้อง (Resonance) ที่สามารถ เกิดขึ้นได้ เมื่อระบบของเราถูกกระตุ้นจาก Input ที่ให้กับระบบ

การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับระบบหรือว่าแขนกลนั้น มีความสำคัญอย่างมากในการควบคุม เพราะส่วนใหญ่แล้วแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลจะเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ต้องทำ การหา เพราะจะสามารถช่วยอธิบายพฤติกรรมของระบบแขนกล แต่ปัญหาที่สำคัญคือระบบสมการ ที่ไม่เป็นเชิงเส้นมีความยากต่อการทำให้ระบบมีความแม่นยำเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ คือการทำให้ ระบบนั้นลดการสั่นสะเทือนและเข้าสู่จุดสมดุลได้เร็วขึ้นเมื่อเกิดการเคลื่อนที่รวมถึงการออกแบบ การควบคุมระบบและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบด้วย

มีเทคนิคต่างๆ ในการควบคุมการสั่นสะเทือนของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น ซึ่งประกอบ ด้วย การควบคุมการสั่นสะเทือนโดยใช้พื้นฐานรูปแบบทางพลศาสตร์ (Bayo and Moulin, 1989), กอมมานด์เซปปิ้ง (Meckl and Seering, 1987; Singer and Seering, 1990; Singhose, Seering and Singer, 1996) อะเด็ปทีปและการควบคุมความทนทาน (Tzes and Yurkovich, 1989; Khorrami, *et al.*, 1995) การลดการสั่นสะเทือนโดยใช้ Peizoeletric Actuators (Ge, *et al.*, 2001) เทคนิกคอมมานด์เซ ปปิ้งเป็นเทคนิคที่ดีมีความถูกต้องแม่นยำสูง ในการลดการสั่นสะเทือน เมื่อระบบมีการเคลื่อนที่ อย่างรวดเร็ว โดยเทคนิคนี้เป็นการปรับเปลี่ยนค่า Input เพื่อลดพลังงานกระตุ้นของระบบที่เกิดขึ้น ในช่วงที่เกิดความถี่ธรรมชาติ

Aspinwall (1980) เป็นบุคคลแรกที่ได้นำพื้นฐานของฟังก์ชันมาสังเคราะห์การ Shaped Commands ในการควบคุมการเคลื่อนที่กลไกการทำงานของเครื่องจักรแบบยืดหยุ่น Meckl (1984) เป็นคนต่อมาที่ได้นำพื้นฐานฟังก์ชันมาใช้ โดยใช้วิธี Least-Squares วัตถุประสงค์หลักคือต้องการ สังเคราะห์ Input Command ที่มีพลังงานสูง เพื่อให้มีค่าความถี่น้อยๆ โดยจะไม่ตรงกับความถี่ ธรรมชาติของระบบ เพื่อลดการสั่นสะเทือน

ข้อต่อแบบยืดหยุ่นเป็นส่วนประกอบหนึ่งในหุ่นยนต์ สามารถที่จะเกลื่อนที่ได้จากการขบ กันของฟันเฟือนหรือสายพาน ในบางตัวอย่างของการนำข้อต่อไปใช้ โดยส่วนใหญ่แล้วถ้าเรา ไม่คำนึงหรือพิจาณาความยืดหยุ่นมาใช้ในการออกแบบก็จะเกิดความเสียหายจากการสั่นพ้องและ ประสิทธิภาพของการควบคุมก็จะลดลง

ความยืดหยุ่นนั้นจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วเนื่องจากเกิดการสั่นสะเทือนที่จุดปลายโดย เทคนิคคอมมานด์เชปปิ้งจะเป็นการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals ที่เรียกว่า Bang-Bang ให้มีพลังงานกระตุ้นลดลง โดยเราได้ใช้พื้นฐานฟังก์ชันของแร็ม ไซนูซอยมาใช้ในการ Shaped Commands และนำผลการทดลองของการทำ Unshaped Command และ Shaped Command มาเปรียบเทียบว่าสามารถที่จะลดการสั่นสะเทือนของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้

การนำเทคนิคคอมมานค์เชปปิ้งมาประยุกต์ใช้กับแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นก็ได้มีงานวิจัย ของ kinceler and Meckl (1997) ที่ได้สังเคราะห์ Command Function ของแขนกลแบบข้อต่อ ยึดหยุ่น 2 Link ในระนาบ

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

Meckl (1984) ได้เป็นผู้คิดค้นสมการ Cost Function ซึ่งอยู่ในรูปฟูเรีย ทรานฟอร์ม ในการ อธิบายลักษณะของเทคนิคคอมมานค์เชปปิ้งที่ทำให้ค่า Square มีค่าน้อยๆจากความแตกต่างระหว่าง การสังเคราะห์ Command Function และ Bang-Bang Command Function ซึ่งได้อธิบายถึงขอบเขต ของสเป็กตัมของความถิ่ธรรมชาติของระบบจากสมการ Cost Function

$$J_{c} = \frac{1}{T_{f}} \int_{0}^{T_{f}} \frac{1}{\tau_{m}^{2}} \left[f_{r}(t) - f_{cs}(t) \right]^{2} dt + \rho \sum_{i=1}^{N} \left(\omega_{i} T_{r} \right)^{2} \left| F_{cs}^{*}(\omega_{i} T_{f}) \right|^{2}$$

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
- *ฒ*, เป็น ความถี่ธรรมชาติของระบบ
- ho เป็น น้ำหนัก
- au_m เป็น แรงบิดสูงสุด
- N เป็น จำนวนของความถี่ต่างๆรอบบริเวณความถี่ธรรมชาติ
- F_{cs}^* เป็น ฟูเรีย ทรานฟอร์มที่ไม่มีหน่วยของ command shaped profile

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

สำหรับระบบที่ไม่มีความเร็วมาเกี่ยวข้องได้ใช้พื้นฐานของฟังก์ชันแร็ม ไซนูซอย จากสมการ

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

ແລະ

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

เป็นพื้นฐานฟังก์ชันแร็ม ไซนูซอยที่ไม่หน่วย B_k เป็นสัมประสิทธ์ของพื้นฐานฟังก์ชัน kth และ a_k เป็นจำนวนลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับพื้นฐานฟังก์ชัน kth จำนวนลักษณะคือค่าที่เลือกไว้ ดังนั้นพื้นฐานของฟังก์ชันจะมีขนาดเป็นศูนย์ และความชันจะอยู่ที่จุดปลาย โดยเมื่อเราใช้เงื่อนไข ของขอบเขต หาอนุพันธ์เทียบกับเวลาของสมการ (1) และทำการหาค่าที่จุดปลาย เราจะได้จำนวน ลักษณะที่เราต้องการจากสมการ

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

พื้นฐานฟังก์ชันเวอร์ซายคือ

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

ແລະ

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

ແລະ

 $T_p = \Delta v / a_m$ แสดงถึงความต้องการของเวลาที่จะทำให้ถึงค่าความเร็ว Δv เป็นช่วงของการเปลี่ยนความเร็ว a_m เป็นความเร็วสูงสุดที่ระบบจะรับได้

พื้นฐานฟังก์ชันเวอร์ซายสามารถใช้กับความเร่งของระบบ จากความเร็วค่าหนึ่งไปสู่ ความเร็วอีกค่าหนึ่ง

Meckl (1988) ได้เป็นผู้เสนอเทคนิคคอมมานด์เชปปิ้งในการลดการสั่นสะเทือนของระบบ ที่มีการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว โดยใช้วิธีการหารูปแบบของแรงภายนอกที่จะนำไปใช้ในการลด พลังงานกระตุ้นที่เกิดจากความถี่ธรรมชาติที่กระทำกับระบบ โดยรูปแบบของแรงที่นำมาใช้ได้มี การปรับปรุงมาจากฟังก์ชันแร็ม ไซนูซอย และการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิค วิธีการคือทำการเลือก ตัวเลขสัมประสิทธ์ในการลดพลังงานสเป็กตัมที่เกิดจากความถี่ธรรมชาติของระบบเพื่อจะนำไป แก้ไขฟังก์ชันให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นที่เกิดจากความไม่แน่นอนจากตัวแปรหรือปัจจัยต่างๆ ในของ ส่วนการเคลื่อนที่แบบต่างๆนั้นมีการประยุกต์นำฟังก์ชันเวอร์ซาย มาใช้ในกรณีถ้าระบบมีการ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่หรือมีการจำกัดความเร็ว ก็จะมีการหารูปแบบฟังก์เวอร์ซายมาใช้กับ การเคลื่อนที่ที่มีความเร็วมาเกี่ยวข้อง และผลจากการทคลองเมื่อทำการเปรียบเทียบการทคลองจริง ของฟังก์ชันแเร็ม ไซนูชอย และฟังก์ชันเวอร์ซายจะเห็นว่าสามารถลดการสั่นสะเทือนของระบบที่ เกิดขึ้นได้ ซึ่งกีมีความถูกต้องจริงตามผลการทคลองและเป็นที่ยอมรับได้

Mohamed and Tokhi (2003) ได้เสนอวิธีการควบคุมแบบ Feed-Forward สำหรับการควบคุม การสั่นสะเทือนของแขนกล โดยใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปิ้งบนพื้นฐาน Input Shaping Low-Pass และ Band-Stop Filtering โดยการบังคับระนาบของ Single-Link ของแขนกล รูปแบบทางพลศาสตร์ ของระบบสามารถหา ได้จากการใช้ระเบียบวิธีการของ Finite Element ส่วนของ Unshaped Bang-Bang เป็นแรงบิดที่ใส่เข้าไปเพื่อจะหาลักษณะของตัวแปรในระบบในการออกแบบและประมาณ การควบคุม เพราะว่าการควบคุมแบบ Feed-Forward ตัวควบคุมจะถูกออกแบบบนพื้นฐานความถึ่ ธรรมชาติและอัตราการหน่วงของระบบ ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลจากการใช้ Shaped และFiltered Inputs จะแสดงอยู่ใน Time Domain และFrequency Domain ซึ่งสามารถที่จะ ลดระดับการสั่นสะเทือนของแขนกลได้

Kamram (2003) ได้เสนอเทคนิคคอมมานค์เชปปิ้งในการลดระดับของการสั่นสะเทือนใน ระหว่างการเคลื่อนที่ และ ได้นำเทคนิคคอมมานค์เชปปิ้งนี้มาประยุกต์ใช้กับ Wire Bonder โดยมีการ นำแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ มาจากการประยุกต์ใช้ลากรานจ์เข้ามาช่วย เพื่อที่จะ ได้ จัดรูปแบบของสมการให้อยู่ในปริภูมิ มีการสร้าง Simulink Model ในการทำนายลักษณะการ เคลื่อนที่ของ Wire Bonder ในแกน Z เทคนิคคอมมานค์เชปปิ้งที่นำมาใช้กับ Wire Bonder ได้ทำ การสังเคราะห์รูปคลื่นจากฟังก์ชันแร็ม ไซนูซอย ในการเอาพลังงานที่อยู่บริเวณรอบของรูปคลื่น ออก ส่วนผลการทดลองสามารถลดการสั่นสะเทือนของ Wire Bonder ได้

Chatlatanagulchai (2006) ได้เสนอเทคนิคคอมมานค์เชปปิ้งที่นำมาประยุกต์ใช้กับแขนกล แบบมีข้อต่อยืดหยุ่นสองแขน มีการใช้การควบคุมแบบป้องกลับเพื่อต้องการความแม่นยำสูง และ ได้ใช้รูปแบบของคำสั่งต่างๆในการทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือน และเข้าสู่ จุดสมคุลได้เร็วขึ้น โดยรูปแบบคำสั่งที่ใช้ได้จากมาจากสังเคราะห์จากรูปแบบของ Bang-Bang เป็น รูปแบบที่ Unshaped และฟังก์ชันแร็ม ไซนูซอย กับฟังก์ชันเวอร์ซาย ที่เป็นรูปแบบที่ Shaped แล้ว ส่วนผลของการทดลองฟังก์ชันเวอร์ซายจะมีประสิทธิภาพดีกว่าฟังก์ชันแร็ม ไซนูซอยในการลด การสั่นสะเทือน 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 สามารถที่จะใช้ได้ดีกับระบบที่เป็น Linear ส่วน ระบบที่เป็น Nonlinear นั้นประสิทธิภาพในการลดการสั่นสะเทือนจะน้อยลง

Tuttle and Seering (1996) ได้ทำการสร้างวิธีการ Time-Optimal สำหรับระบบที่เป็น Linear System โดยวิธีการนี้จะสามารถช่วยแก้ปัญหาต่างๆของระบบทางพลศาสตร์ทั่งๆไป วิธีการ ของ Time-Optimal นั้นโดยส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในการหาก่าพลังงานที่มีก่ามากๆ

Meckl and Seering (1987) ได้ทำการสร้างความสำพันธ์ระหว่าง Frequency Spectrum ของ Input Functions สำหรับ Undamped กับระบบ Lightly Damped และผลของแอมพลิจูดความเร่งที่ เหลืออยู่ สำหรับระบบ Lightly Damped ได้ถูกอธิบายว่าการที่พลังงานของระบบมีค่าสูงขึ้นนั้น ส่งผลให้ระบบเกิดการสั่นพ้องและทำให้เกิดแอมพลิจูดของความเร่ง ดังนั้นเราด้องลดค่าพลังงาน ของระบบที่ Input Function ในช่วงของความถี่ธรรมชาติของระบบ ผลที่ได้ก็คือทำให้การสั่นสะเทือน ลดลง จาก Input Forcing Function เราได้ทำการพิจารณาจากฟังก์ชันของแร็ม ไซนูซอยกับค่า สัมประสิทธ์ ที่จะช่วยลดค่าพลังงานที่เพิ่มขึ้นที่อยู่บริเวณรอบความถี่ของระบบ โดยจะสามารถ ควบคุมการสั่นสะเทือนได้ดี

Bayo and Moulin (1989) ใช้วิธีของ Linear Quadratic Optimal Control ในการสร้าง Optimal Trajectory ของระบบที่มีความยึดหยุ่นโดยที่ Optimal Inputs จะมีการเพิ่มเติมของ Ramp ใน Sine Wave เพื่อให้ความถิ่นั้นเท่ากับความถิ่ธรรมชาติ โดยวิธีการนี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลง ค่าคงที่ความถิ่ของ Ramp โดยการทำให้ Spectrum Energy มีค่าเป็นศูนย์ใน Input ค่าความถิ่นั้นจะ มีค่ากับค่าความถิ่ธรรมชาติของระบบ และถ้าเราสมมุติว่าระบบไม่มีความหน่วงจะสามารถลดการ สั่นสะเทือนได้หรือไม่ Bayo และ Moulin ได้ทำการสรุปไว้ว่าผลของความหน่วงมีผลต่อการ สร้าง Optimal Trajectory Chang and Park (2001) ได้ใช้ Command Shaping ในโรงงาน Microelectronics สำหรับกร ควบคุมการสั่นสะเทือนของ Chip Mounter และการออกแบบ เทคนิคคอมมานค์เชปปิ้ง นั้นได้ถูก เสนอว่ามีประสิทธิภาพสามารถใช้กับระบบที่มีการเคลื่อนที่เร็วและสามารถช่วยลดค่า Overshoot และ Setting Time

Meckl and Umemoto (2000) ได้ใช้ฟังก์ชันของแร็ม ไซนูซอยในการ Shaped Input Torques เพื่อที่จะลดการสั่นสะเทือนสารกึ่งตัวนำของเครื่องจักรการ Shaped Torques เป็นการทำให้ เวลาในการเคลื่อนที่ลดลงและหลบหลีกค่า Overshoot ที่เกิดขึ้น โดยผลของการ Shaped Torques ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่า Polynomial Reference Input ซึ่งให้ผลว่าสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วและ ลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น

Meckl and Kinceler (1994) ได้เสนอฟังก์ชันแร็ม ไซนูซอยในการควบคุมขอบเขตของ พลังงานความถี่ที่สูงขึ้น และการใช้ฟังก์ชันแร็ม ไซนูซอยในการลดการสั่นสะเทือนของระบบ มีการนำผลมาเปรียบเทียบระหว่างการใช้ Optimal Minimum Energy Input กับ Filtered Ramp Input โดยที่ผลของ Input จากการใช้ฟังก์ชันแร็ม ไซนูซอยนั้นสามารถควบคุมพลังงานที่เพิ่มขึ้น และค่าของความถี่ที่สูงขึ้นได้

Singhose, *et al.* (1996) ได้พัฒนาเทคนิคคอมมานค์เชปปิ้งสำหรับ Coordinate Measuring Machine (CMM) ในการลดพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลงและทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของ เครื่องมือวัคให้มีความแม่นยำมากขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์การทดลองประกอบด้วย แขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ ระบบป้อนเข้าสัญญาณ ซึ่งประกอบด้วยระบบควบคุมความแรงดันไฟฟ้ามอเตอร์และแหล่งจ่ายพลังงาน ระบบป้อนกลับ สัญญาณคือระบบรับค่าสัญญาณจากตัวตรวจรู้ ตัวควบคุมประกอบด้วยการ์ดรับส่งสัญญาณติดตั้ง ภายในคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็น Target Computer และ Host Computer สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ โปรแกรม Labview ของบริษัท National Instrument และ โปรแกรม Matlab ในการจำลองการ ทำงานและทำการทดลองจริง

1. แขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้



ภาพที่ 1 แสดงแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้

แขนกลแบบมีข้อต่อยึดหยุ่นได้ที่ใช้ในการทดลองนี้ตั้งอยู่ที่ห้อง Control of Robot and Vibration Laboratory (CRV Lab) ตึก RDiPt ชั้น 5 โครงสร้างของแขนกลทำด้วยอลูมิเนียม แขนกล มีลักษณะการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ ข้อต่อยืดหยุ่นโดยการติดสปริงทั้งสองข้างระหว่างแขนกลกับ Link ของแขนกล มี Encoder ตัวที่ 1 ที่ ติดตั้งอยู่ส่วนบนของแขนกลทำหน้าหน้าที่ในการวัดมุมการ เคลื่อนที่ของ Link และ Encoder ตัวที่ 2 ที่ติดตั้งอยู่ส่วนล่างของฐานแขนกลทำหน้าที่ในการวัดมุม การเคลื่อนที่ของ 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)

วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงทำหน้าที่ขยายกระแสไฟฟ้าโดยอุปกรณ์นี้จะรับสัญญาณ ป้อนเข้าคือกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดและปริมาณต่ำและจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดและแรงคันสูงกว่า โดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 0-18 Volt ทนระแสไฟฟ้าต่อเนื่องได้ 10 แอมแปร์ ทนกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ 15 แอมแปร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์รุ่น Sabertooth2x10

3. เอนโคดเดอร์ (Encoder)



ภาพที่ 3 แสดงเอนโคดเดอร์ ของ Omron รุ่น E6B2-CW26C

เอนโคคเคอร์ (Encoder) คือ เป็นอุปกรณ์วัคตำแหน่งที่อาศัยการยิงถำแสงผ่านแถบ มีค-สว่างและส่งสัญญาณเป็นดิจิตอล แขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นจะมี Encoder ตัวที่ 1 ที่ ติคตั้งอยู่ ส่วนบนของแขนกลทำหน้าหน้าที่ในการวัดมุมการเคลื่อนที่ของ Link และ Encoder ตัวที่ 2 ที่ติคตั้ง อยู่ส่วนล่างของฐานแขนกลทำหน้าที่ในการวัคมุมการเกลื่อนที่ของ Hub โดย Encoder ทั้งสองเป็น ของ Omron รุ่น E6B2-CW26C กวามละเอียด 2000 และ 360 P/R ตามลำคับ

4. Accelerometer เป็นอุปการณ์ที่ใช้ในการตรวจจับค่าความเร่งเชิงมุม ค่าที่ได้จะเป็นค่า สัญญาณต่อเนื่อง (Analog) อุปกรณ์นี้ใช้สำหรับหาค่าความถี่ธรรมชาติ



ภาพที่ 4 แสดง Accelerometer

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



ภาพที่ 5 แสดงการ์ครับส่งข้อมูล (Data Acquisition) NI PCI 6221

6. Host Computer คือคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างแอปพลิเคชัน และ Host Computer ใค้ ติดตั้งโปรแกรม 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 ได้แสดงโครงสร้างทั้งหมดที่ใช้ทำการทดลองประกอบด้วยแขนกลแบบมีข้อต่อ ยืดหยุ่นได้ทำมาจากอลูมิเนียม ตัวของแขนกลก็จะมีส่วนประกอบต่างๆคือ Link ของแขนกลทำจาก แท่งอลูมิเนียมและติดมวลไว้ด้านบน คัปปิ้งทำหน้าที่ลดความเสียหายเมื่อเกิดอุบัติเหตุจากการชน เอนโคดเดอร์ คือ เป็นอุปกรณ์วัดตำแหน่งของแขนกลที่ส่งสัญญาณเป็นดิจิตอล แขนกลจะมี Encoder ตัวที่ 1 ที่ติดตั้งอยู่ส่วนบนของแขนกลทำหน้าหน้าที่ในการวัดมุมการเคลื่อนที่ของ Link และ Encoder ตัวที่ 2 ที่ติดตั้งอยู่ส่วนอ่างของฐานแขนกลทำหน้าที่ในการวัดมุมการเคลื่อนที่ของ Hub แขนกลจะถูกขับโดยมอเตอร์กระแสตรง

การประมวลผลและการควบคุมแขนกลนั้นจะมีคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าเป็น Host Computer และ Target Computer โดยคอมพิวเตอร์ทั้งสองจะเชื่อมต่อกันผ่านทางสาย LAN ภายใน Target Computer จะถูกติดตั้งการ์ครับส่งข้อมูลซึ่งจะทำหน้ารับค่าตำแหน่งต่างๆ จากอุปกรณ์ตรวจรู้ที่ได้ จากแขนกลและในทางกลับกัน Target Computer ก็จะทำการส่งสัญญาณการควบคุมไปยังแขนกล ในส่วนของผู้ใช้นั้นก็จะเป็น Host Computer ซึ่งจะทำหน้าที่แสดงผลที่ได้จาก Target Computer และทำการอัพเกรดกำสั่งต่างๆ ของผู้ใช้ผ่านทาง Host Computer

ີວສີກາร

1. การสร้างแบบจำลองของแขนกลแบบข้อต่อยึดหยุ่น

การหาแบบจำลองทางกณิตศาสตร์ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ โดยใช้วิธีงาน พลังงานของลากรานจ์ ซึ่งจะช่วยอธิบายพฤติกรรมการทำงานในส่วนต่างๆของแขนกลได้



ภาพที่ 7 แสดงแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นและอุปกรณ์ตรวงรู้

แขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้จะมีการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ เมื่อแขนกลเกิดการเคลื่อนที่ มุมของ link แขนกลที่หมุนไปจะถูกวัด โดย encoder ตัวที่ 1 ที่ทำการติดตั่งอยู่บริเวณส่วนบนของ แขนกล และมุมของ hub แขนกลที่หมุนไปจะถูกวัด โดย encoder ตัวที่ 2 ที่ติดตั่งอยู่บริเวณด้านล่าง ของล่างของฐานดังแสดงในภาพที่ 7 เป็นโครงสร้างของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ที่ใช้ในการ ทดลองซึ่งตั้งอยู่ที่ห้อง Control of Robot and Vibration Laboratory (CRV Lab) ตึก RDiPT ชั้น 5

พลศาสตร์ลากรานจ์ของแขนกลแบบมีข้อต่อยึดหยุ่นได้



ภาพที่ 8 แสดงโครงสร้างของแขนกลแบบข้อต่อยึดหยุ่นได้

การเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้สามารถหาได้จากสมการงานพลังงานของ ลากรานจ์ได้ จากสมการพลังงานจลน์คือ

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

สมการพลังงานศักย์ยืดหยุ่นคือ

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

สมการ Dissipative Power จาก Viscous Friction คือ

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

พลังงานภายนอกที่เกิดจาก แรงบิดของมอเตอร์คือ

$$Q_1 = 0$$
$$Q_2 = T$$

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

เมื่อให้ i=1

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_{1}} = J_{link} \dot{\theta}_{1}$$
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_{1}} \right) = J_{link} \ddot{\theta}_{1}$$
$$\frac{\partial K}{\partial \theta_{1}} = 0$$
$$\frac{\partial P}{\partial \theta_{1}} = k_{stiff} (\theta_{1} - \theta_{2})$$
$$\frac{\partial D}{\partial \dot{\theta}_{1}} = c(\dot{\theta}_{1} - \dot{\theta}_{2})$$

เมื่อให้ i = 2

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

สมการการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้คือ

$$J_{link}\dot{\theta}_{1} + k_{stiff} (\theta_{1} - \theta_{2}) + c(\dot{\theta}_{1} - \dot{\theta}_{2}) = 0$$

$$J_{hub}\ddot{\theta}_{2} - k_{stiff} (\theta_{1} - \theta_{2}) - c(\dot{\theta}_{1} - \dot{\theta}_{2}) = T$$
(2)

ค่าทอร์กที่มอเตอร์สร้างขึ้นคือ

$$V = IR_m + k_m k_g \dot{\theta}_2$$
$$T = k_g k_m I$$

จะได้

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

แทนค่าสมการ (3) ในสมการ (2) ใด้

$$J_{link}\ddot{\theta}_{1} + k_{stiff} (\theta_{1} - \theta_{2}) + c(\dot{\theta}_{1} - \dot{\theta}_{2}) = 0$$
$$J_{hub}\ddot{\theta}_{2} - k_{stiff} (\theta_{1} - \theta_{2}) - c(\dot{\theta}_{1} - \dot{\theta}_{2}) = \frac{k_{g}k_{m}V}{R_{m}} - \frac{k_{m}^{2}k_{g}^{2}}{R_{m}}\dot{\theta}_{2}$$

ทำการจัดรูปใหม่จะได้

$$\ddot{\theta}_{1} = -\frac{k_{stiff}}{J_{link}} \theta_{1} - \frac{c}{J_{link}} \dot{\theta}_{1} + \frac{k_{stiff}}{J_{link}} \theta_{2} + \frac{c}{J_{link}} \dot{\theta}_{2}$$

$$\ddot{\theta}_{2} = \frac{k_{stiff}}{J_{hub}} \theta_{1} + \frac{c}{J_{hub}} \dot{\theta}_{1} - \frac{k_{stiff}}{J_{hub}} \theta_{2} - \left(\frac{c}{J_{hub}} + \frac{k_{m}^{2}k_{g}^{2}}{R_{m}J_{hub}}\right) \dot{\theta}_{2} + \frac{k_{m}k_{g}}{R_{m}J_{hub}} V$$

$$(4)$$

2. การหาสมการการเคลื่อนที่ของแขนกล (system identification)

ในส่วนนี้จะเป็นการทดลองทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น ได้ โดยใช้โปรแกรม Matlab สำหรับการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแขนกลในการทำ System ID ดังแสดงใน ภาคผนวก ก ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของแขนกลนั้นประกอบด้วย แรงดังไฟฟ้าที่ให้กับ มอเตอร์ในการขับ มุมการเคลื่อนที่ของ Link และมุมการเคลื่อนที่ของ Hub เพื่อนำมาสร้างสมการ การเคลื่อนที่ของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้



ภาพที่ 9 แสดงการหาสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบข้อต่อยึดหยุ่นได้

ภาพที่ 9 แสดงการทดลองเก็บค่าพารามิเตอร์ของแขนกลแบบมีข้อต่อยึดหยุ่นได้นั้น เราได้ ให้แรงดันไฟฟ้ากับมอเตอร์เป็นสัญญาณ Sine Wave ซึ่งมีช่วงของการเปลี่ยนความถี่ที่ใช้ทำการ ทดลองตั้งแต่ 0.01 ถึง 1 Hz ค่าแอมพลิจูดที่ใช้คือ 1.5 ใช้เวลาในการทดลอง 60 วินาที และผลที่ได้ จากการทำ System ID ได้แสดงในภาพที่ 10 โดยรูปบนแสดงมุมการเคลื่อนที่ของแขนกลซึ่งเป็น มุมรวมระหว่างมุมการเคลื่อนที่ของ Link และมุมการเคลื่อนที่ของ Hub รูปล่างแสดงแรงคันไฟฟ้า ที่จ่ายให้กับมอเตอร์



ภาพที่ 10 รูปบนแสดงมุมการเกลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น รูปล่างแสดงผลของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

จากกฎของนิวตันจะได้

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = T \tag{5}$$

เมื่อ

- T คือค่าทอร์ก
- k คือค่าคงที่ของสปริง
- J คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อย
- heta คือมุมการเคลื่อนที่ของแขนกล
- c คือค่าความหน่วง

ค่าทอร์กของมอเตอร์ที่สร้างขึ้นคือ

$$V = IR_m + k_b k_g \dot{\theta}_2 \tag{6}$$

ແລະ

$$T = k_g k_m I \tag{7}$$

เมื่อ

V	คือ	ค่าแรงดังที่ใช้ขับมอเตอร์
Ι	คือ	กระแสในขคลวด
R_m	คือ	ความด้ำนทานของขดลวดในมอเตอร์ (motor armature resistance)
k_{b}	คือ	ก่า (motor back emf constant)
k_m	คือ	ก่า (motor torque constant)
k_{g}	คือ	ก่า (gear ratio)

จากสมการ (6) และ (7) จะได้

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

สมการ Transfer Function ของการเคลื่อนที่แขนกล โดยที่ Input ของระบบคือ V และ Output ของระบบคือ 6 เพราะฉะนั้นจะได้ความสัมพันธ์ดังสมการคือ

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{k}{\left(Tw\,s\right)^2 + \left(2\,Zeta\,Tw\right)s + 1}\tag{9}$$

หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากสมการที่ (9)ได้คือ

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

เพราะฉะนั้นจะได้ สมการ Transfer Function คือ

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



ภาพที่ 11 แสดงผลการเกลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น จากแบบจำลองแขนกลกับแขนกลจริง

ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ ดังแสดงในภาพที่ 11 เส้นสีแดงคือผลการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกล ส่วนแล้วสีน้ำเงินคือผลการเคลื่อนที่จริงของ แขนกล ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่นั้นมีความถูกต้อง 80.79% ซึ่งนับว่าเป็นค่าที่มีความถูกต้อง ในเกณฑ์ที่ดี แต่ยังมีความกลาดเคลื่อนอยู่บ้างซึ่งเป็นผลมาจากแบบจำลองสมการการเคลื่อนที่ของ แขนกลกับแขนกลจริงนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ ดังนั้นเราต้องมีตัวควบคุมซึ่งทำหน้าลดค่า ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นซึ่งได้กล่าวในส่วนที่ 3 เป็นการออกแบบระบบควบคุม

3. การออกแบบระบบควบคุม

การออกแบบระบบควบคุมซึ่งถือว่ามีส่วนสำคัญในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล เนื่องจาก ความไม่แน่นอนของระบบแล้วและอีกส่วนหนึ่งก็คือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เราหา ได้นั้นกับระบบจริงนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ดังนั้นเราต้องมีตัวควบคุมเพื่อช่วยลดค่าความความ เคลื่อนที่เกิดขึ้นกับระบบให้มีค่าน้อยที่สุดเพื่อให้ระบบของเราตอบสนองตามที่เราต้องการ

การออกแบบระบบควบมีอยู่ด้วยกับหลายวิธีอาทิเช่น PID Controller, Feedback Linearization, Adaptive Control, Intelligent System, Singular Perturbation, Integral Manifoid ฯลฯ แต่ระบบควบคุมระบบหนึ่งที่มีความสำคัญมากก็คือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Controller) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบหรือแขนกลที่ต้องการจะควบคุม โดยระบบควบคุมแบบอัต โนมัตินี้จะมีส่วนทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดของตัวแปรต่างๆจริง ของระบบด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้ (Sensor) แล้วนำค่าเหล่านั้นมาเปรียบเทียบกับค่าตัวแปรที่ต้องการ และเมื่อทำการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นแล้วความต่างนี้จะถูกใช้ในการสร้างสัญญาณ ควบคุมซึ่งสามารถลดการเปลี่ยนแปลงหรือความผิดพลาดที่เกิดขึ้นลงได้ เพื่อให้ความผิดพลาด เหล่านั้นมีก่าก่าน้อยที่สุดหรือเท่ากับศูนย์ ระบบควบคุมแบบอัต โนมัติที่สร้างสัญญาณควบคุม (Control Signal) ที่เกิดขึ้นนี้เราจะเรียกว่ากิริยาควบคุม (Control Action)



ภาพที่ 12 แสดงบล็อกระบบควบคุมแบบปิด

จากภาพที่ 12 เป็นบล็อกแสดงระบบควบคุมแบบปิด โดยที่ r คือ Command Reference, y คือ Output, d คือ ความ ไม่แน่นอน (Disturbance), R คือ Reference Sensor, G คือ ตัวควบคุม (Controller), P คือระบบ(Plant), S คือ Output Sensor, e คือ ความค่าผิดพลาด (Error) สัญญาณ คำสั่งอ้างอิง (Command Reference) จะถูกเปลี่ยนรูปแบบด้วยระบบตรวจรู้อ้างอิง (Reference Sensor) เพื่อเปลี่ยนแปลงสัญญาณกำสั่งอ้างอิงให้มีลักษณะเดียวกับสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้หรืออีก ในความหนึ่งก็คือต้องการให้กำสั่งอ้างอิงมีหน่วยเดียวกับสัญญาณที่ออกจากอุปกรณ์ตรวจรู้ขาออก (Output Sensor) เพื่อสามารถให้เปรียบเทียบกันได้ เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะส่งสัญญาณผิดพลาด (Error) สัญญาณผิดพลาดนี้จะถูกส่งไปยังตัวควบคุม (Controller) เพื่อที่จะสร้างสัญญาณควบคุม (Control Input) และสัญญาณจากตัวควบคุมนี้จะให้เป็นสัญญาณควบคุมที่ส่งเข้าไปยังระบบที่เรา ด้องการควบคุม (Plant) ตัวควบคุมหรือ Controller นี้จะมีบทบาทมากในการตอบสนองสัญญาณ เอาต์พุตที่ต้องการและตัวควบคุมนั้นจะมีมาตรฐานหรือรูปแบบด้วยกันหลายประเภท

3.1 พื้นฐานของระบบควบคุม

อุปการณ์ควบคุมจะถูกออกแบบไว้เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมไปควบคุมเมื่อมีสัญญาณ ความผิดพลาดเกิดขึ้น หลักหรือวิธีการควบคุมนั้นจะเรียกว่ากฎของการควบคุม หรือกฎการควบคุม เมื่อสัญญาณความผิดพลาดมีก่าไม่เป็นศูนย์ซึ่งอาจจะเป็นผลเนื่องมาจากเกิดการเปลี่ยนแปลงที่กำสั่ง หรือเกิดสัญญาณรบกวนได้ หน้าที่ของตัวควบคุมคือพยายามควบคุมตัวแปรของระบบให้มีก่า ใกล้เกียงกับก่าที่ต้องการซึ่งสามารถสรุปหน้าหน้าที่ของตัวกวบคุมได้คือ

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 ระบบจะไม่มีเสถียรภาพหรือไม่มีความสมคุล เราไม่สามารถรู้ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการ ควบคุมได้แน่ชัดหรือไม่สามารถรู้ค่าพารามิเตอร์ได้ถูกต้องแม่นยำ แต่ถ้าเราสามารถหาขอบเขตของ ความผิดพลาดหรือค่าเบี่ยงเบนของพารามิเตอร์ของระบบที่จะควบคุม เราก็สามารถเลือกออกแบบ ระบบควบคุมหรือตัวกวบคุม (Controller) ชนิดต่างๆ หรือตัวควบคุมที่มีรูปแบบแตกต่างกัน เช่น ตัวควบคุมแบบ พี, พีไอ, พีไอคี เป็นต้น โดยตัวควบคุมที่ออกแบบนี้จะมีความไว (Sensitivity) มาก น้อยต่อการเปลี่ยนแปลงหรือเบี่ยงเบนของค่าพารามิเตอร์แตกต่างกันออกไปคังนั้นการออกแบบ บางครั้งอาจจะต้องครอบคลุมถึงความไวของระบบควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของ ระบบด้วย เพื่อทำให้ระบบควบคุมโดยรวมมีความปลอดภัยต่อการใช้งานเมื่อค่าพารามิเตอร์ของ ระบบมีการเปลี่ยนแปลงขณะระบบกำลังทำงาน

ระบบควบคุมที่ใช้กันมากในการควบคุมสามารถแบ่งได้ดังนี้กือ

 ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือตัวควบคุมแบบเปิค-ปิด (two-position หรือ on-off controllers)

2. ตัวควบคุมเชิงสัคส่วน (Proportional controllers, P-control)

3. ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral controllers, P-control)

 ศัวควบคุมเชิงสัคส่วนบวกอินทิกรัล (Proportional-plus-Integral controllers, PI-control)

 ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอนุพันธ์ (Proportional-plus-Derivative controllers, PD-control)

6. ตัวควบคุมเชิงสัคส่วนบวกอนุพันธ์บวกอินทิกรัล (Proportional-plus-Integralplus-Derivative controllers, PID-control)

3.2 ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม

ในการออกแบบตัวควบคุมนั้นต้องเลือกรูปแบบของตัวควบคุมที่เหมาะสมกับระบบที่ ด้องการจะควบคุมการออกแบบตัวควบคุมจะสมบูรณ์ได้นั้นจำเป็นต้องเลือกค่าอัตราขยายต่างๆของ ตัวควบคุมนั้น การเลือกค่าอัตราขยายหรือการกำนวณหาค่าอัตราขยายนั้นก็ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติ เฉพาะของการตอบสนองในช่วงภาวะชั่วครู่ เช่น ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID-control) นั้นอาจจะ กำหนดค่าคุณสมบัติเฉพาะของการตอบสนองในช่วงภาวะชั่วครู่คือ ค่าอัตราการหน่วง ค่าคงตัว เวลาที่ช้าที่สุด (Dominant time constant) และค่าสัญญาณผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (Steady state error) ในทางปฏิบัตินั้นอาจมีรายละเอียดมากกว่านี้เช่น อาจจะต้องคำนึงถึง ช่วงเวลาขึ้น (Rise time), เวลาเข้าที่(Settling Time), และค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด(Maximum Overshoot) ด้วย นอกจาก สมรรถนะการทำงานนั้นอาจจะบอกอยู่ในรูปแบบของความถี่กีได้ เช่น ความถี่การทำงาน (Bandwidth), ความถี่เร โซแนนต์ (Resonant Frequency), และค่าแอมพลิจูดสูงสุด (Peak Amplitude) ลักษณะของคุณสมบัติเฉพาะต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบควบคุมที่จะต้องคำนึงถึงการ ออกแบบตัวควบคุมสามารถสรุปได้คือ

- 1. คุณสมบัติที่ตำแหน่งสมคุล (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 ความไวของระบบที่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ (sensitivity to parameter variations)

3.2 ความไวของระบบที่ขึ้นอยู่กับการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบไม่ละเอียด (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)

นอกเหนือจากการกำหนดคุณสมบัติของการตอบสนองช่วงภาวะชั่วครู่แล้วในบ่างครั้ง ก็ไม่สามารถโมเดลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ต้องการควบคุมให้มีความถูกต้อง แม่นยำได้ เพราะวิธีข้างต้นอาจจะมีความยากลำบากในการที่จะคำนวณออกแบบค่าอัตราขยายต่างๆ เพื่อให้ระบบควบคุมของเรามีการตอบสนองตามที่เราต้องการ เนื่องจากระบบควบคุมบางชนิคมี เกนอยู่หลายค่าที่เราต้องการปรับเพื่อให้การทำงานเป็นไปตามความต้องการ

3.3 ความสำคัญของการป้อนกลับ

การป้อนกลับสามารถปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของระบบ แต่ก็สามารถส่งผล กระทบให้คุณสมบัติอื่นแย่ลงไปด้วย นี่ก็เป็นเหตุผลสำคัญที่เราต้องมีความรู้ความเข้าใจเป็นอย่างดี ในระบบควบคุมแบบป้อนกลับซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างมากส่วนหนึ่งในการควบคุมแขนกลในงานวิจัย นี้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับสามารถที่จะปรับปรุงคุณสมบัติต่างเหล่านี้ได้คือ

1. ผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัว (steady state)

 ผลตอบสนองชั่วครู่ (transient), ช่วงเวลาขึ้น (rise time), การพุ่งเกิน (overshoot), ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time)

3. ความทนทาน, ส่วนเผื่ออัตราขยายและเฟส (gain and phase margins)

4. ผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวน

ความจริงแล้วการปรับปรุงค่าดังกล่าวอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อส่วนอื่นๆ ซึ่งใน บางครั้งอาจส่งผลดีหรืออาจส่งผลเสียต่อระบบควบคุมแบบป้อนกลับได้
3.4 ขั้นตอนการออกแบบระบบควบคุม

การออกแบบระบบควบคุมต่างๆนั้นสามารถสรุปความสำคัญขั้นตอนการออกแบบ ระบบควบคุมได้ดังนี้คือ

1. ศึกษาระบบที่ต้องการควบคุม ทำการรวบรวมข้อมูลต่างๆของการควบคุม

 หาโมเคลทางคณิตศาสตร์ของระบบและพิจารณาว่าสามารถทำให้โมเคลง่ายขั้น หรือไม่

 วิเคราะห์ โมเดลที่หาได้ พิจารณากุณสมบัติและเปรียบเทียบผลตอบสนองกับ ระบบจริง

4. เลือกตัวแปรที่ต้องการควบคุม

5. ตัดสินใจเกี่ยวกับการวัดค่า output และเกี่ยวกับตัวแปรควบคุม พิจารณาเลือกตัว ตรวจรู้ (sensor)

6. เถือกชนิดของตัวควบคุม

7. ทำการกำหนดความต้องการด้านสมรรถนะ

8. ออกแบบตัวควบคุม

9. ทำการวิเคราะห์ระบบการควบคุมและตรวจสอบว่าได้ตามความต้องการหรือไม่ ถ้าหากไม่ทำการเปลี่ยนรูปแบบของการควบคุม

10. ทำการจำลองการทำงานระบบรวม

11. เลือก Hardware และ Software แล้วทำการ Implement ตัวกวบคุม

12. ทคสอบระบบรวมทั้งหมด

3.5 การควบคุมแบบ Inverse Dynamics

งานวิจัยนี้เราได้ทำการเลือกการควบคุมแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นโดยใช้การควบคุม แบบ Inverse Dynamics ซึ่งก็เป็นการควบคุมแบบป้อนกลับอย่างหนึ่งและเรามีการทำ Inverse Model ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เราได้หามานั้นเพราะว่า

จากสมการของลากรานจ์คือ

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

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เราหามาใค้จากสมการ (2) คือ

$$J_{l}\ddot{\theta}_{1} + k\left(\theta_{1} - \theta_{2}\right) + c_{2}\left(\dot{\theta}_{1} - \dot{\theta}_{2}\right) = 0$$
$$J_{h}\ddot{\theta}_{2} - k\left(\theta_{1} - \theta_{2}\right) + c_{1}\dot{\theta}_{2} - c_{2}\left(\dot{\theta}_{1} - \dot{\theta}_{2}\right) = T$$

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



ภาพที่ 13 แสดงการควบคุมแบบ Inverse Dynamics

จากภาพที่ 13 เป็นบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) แสดงการควบคุมแบบ Inverse Dynamics เมื่อพิจารณาบล็อกไดอะแกรมนี้ ความต้องการที่เราจะทำการควบคุมระบบคือต้องการ ให้ θ ตาม θd เมื่อเรามาพิจารณาค่าของ $\stackrel{\sim}{p}$ คือ Inverse Model กับ *P* คือ ระบบหรือ Plant

ถ้ำเราสมมุติให้ก่าของ p^{-1} เท่ากับ P ก่าทั้งสองในระบบตัดกันโดยมีก่าเป็นศูนย์ สมมุติเมื่อ เราป้อนสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณ Sine Wave สัญญาณขาออกก็จะเป็นสัญญาณเดิมคือ Sine Wave นั้นหมายถึงระบบของเราที่ทำการควบคุมมีความถูกต้องและเป็นสิ่งที่เราต้องการ แต่ไม่ว่าจะเป็น ทางปฏิบัติหรือทางทฤษฎี ก่าทั้งสองคือ p^{-1} กับ P ไม่สามารถที่จะเท่ากันได้เพราะประการแรก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เราหามานั้นมีความคลาดเคลื่อน ประการที่สองระบบของเราที่ทำการ ควบคุมมีความไม่แน่นอน (Uncertainty)

ดังนั้นเราจึงต้องมีค่า *G* คือตัวควบคุม (Controller) จะทำหน้าที่ลดค่าความผิดพลาด *e* (Error) คือสัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้ เราสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการได้คือ *e* = *θd* – *θ* โดยที่ตัวควบคุมจะทำหน้าที่ในการลดค่า ความผิดพลาด *e* (Error) ให้มีค่าน้อยๆ หรือเท่ากับศูนย์เพื่อที่จะทำให้ระบบของเรามีการ ตอบสนองตามคำสั่งที่เราต้องการ

4. การหาความถี่ธรรมชาติของระบบ

ในส่วนนี้จะเป็นวิธีการหาความถี่ธรรมชาติของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้ ซึ่งทำการ ทดลองโดยใช้อุปกรณ์ Accelerometer เป็นเครื่องมือในการหาความถี่ธรรมชาติของแขนกล เพื่อที่ จะได้นำผลของความถี่ธรรมชาติไปทำการลดการสั่นสะเทือนของแขนกล โดยการ Shaped Input ของ Reference Signals โดยเป็นการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals เพื่อให้ผลของ ความถี่ที่เกิดขึ้นนั้นหลบความถี่ธรรมชาติของแขนกลในการลดการสั่นสะเทือน

4.1 พื้นฐานของการสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือน (Vibration) คือการเคลื่อนที่แบบกลับไป-มาของระบบที่มี่มวลและ สภาพยึดหยุ่นในช่วงเวลาที่กำหนดในช่วงเวลาหนึ่ง โดยการสั่นสะเทือนนั้นสามรถจำแนกได้สอง แบบคือ การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free Vibration) คือ ระบบเมื่อถูกแรงภายนอก กระทำระบบจะสามารถสั่นไป-มาอย่างต่อเนื่องได้เมื่อปลดแรงนั้นออก และภายใต้การเคลื่อนแบบ สั่นไป-มานี้ระบบจะสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ ซึ่งอาจเป็นความถี่เดียวหรือหลายความถี่ก็ได้

 การสั่นสะเทือนแบบบังคับ (Forced Vibration) คือระบบที่มีการเคลื่อนที่แบบสั่น ไป-มาภายใต้แรงภายนอกกระทำด้วยความถิ่งองแรงนั้น ถ้าความถิ่งองแรงภายนอกที่กระทำนั้น เท่ากับความถิ่ธรรมชาติของระบบ ระบบจะอยู่ในสภาวะสั่นพ้อง ทำให้ระบบสั่นอย่างรุนแรงและ ก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบได้

ในระบบของแขนกลแบบข้อต่อยึดหยุ่นนั้นจะมีระดับขั้นความเสรี (Degrees of Freedom; DOF) เท่ากับสองดังนั้นความถี่ธรรมชาติของแขนกลจะมีความถี่ธรรมชาติสองค่า (ω_1, ω_2) โดยความถี่ธรรมชาตินั้นจะขึ้นอยู่กับมวลและสภาพสปริงตัวได้จากสมการ

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{11}$$

โดยที่

k คือ ค่าคงที่ของสปริง m คือ มวล

ແລະ

$$\omega_n = 2\pi f_n \tag{12}$$

 ω_n คือความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) f_n คือความถี่ (frequency)

โดยในการทดลองนั้นเราจะใช้ความสัมพันธ์ของสมการที่ (12) โดยให้ความช่วงถึ่ (f_n) กับมอเตอร์เป็นสัญญาณ Sine Wave ในการกระตุ้นเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของแขนกล โดย ความถี่ธรรมชาติของแขนกลนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อช่วงของความถี่ (f_n) ไปตรงกับความถี่ธรรมชาติ ของแขนกล และจากการที่แขนกลของเรามี DOF = 2 ความถี่ธรรมชาติของระบบเราจะมีสองค่า 4.2 วิธีหาความถี่ธรรมชาติของแขนกลจากการทคลองโคยใช้ Accelerometer



1. ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งเชิงมุม (Accelerometer) ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 บนล่างแสดงการติดตั้ง Accelerometer กับแขนกล

ให้สัญญาณ Sine Wave กับมอเตอร์ โดยสร้างช่วงความถี่ 0.15-3 Hz แอมพลิจูดที่
 1.5 ค่าที่ Accelerometer รับเก็บค่าได้จะเป็นค่าความเร่งในแนวตั้งฉากกับ Link ของแขนกล และ
 เป็นสัญญาณแบบต่อเนื่อง (Analog signal)

 น้ำค่าที่เก็บได้จาก Accelerometer ในรูปของ Text file ไปหาความถี่ธรรมชาติของ แขนกลจากโปรแกรม Matlab โดยใช้วิธี Fast Fourier Transform (FFT) ดังแสดงในภาคผนวก ข



ภาพที่ 15 แสดงผลการค่าความถี่ธรรมชาติจาก FFT

ภาพที่ 15 แสดงผลของความถี่ธรรมชาติของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10 rad/s จริงๆแล้วเนื่องจากระบบของเรามี DOF = 2 ค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลจะด้องมีสอง ความถี่ธรรมชาติ แต่จากการทำการทดลองหลายครั้งโหมดความถี่ธรรมชาติที่ได้มีค่าเดียว เนื่องจาก ความถี่ธรรมชาติที่ได้นั้นเป็นค่าความถี่ธรรมชาติของสปริง และอีกค่าเป็นความถี่ธรรมชาติของ มอเตอร์ซึ่งจะมีค่าความถี่ธรรมชาติมากกว่าความถี่ธรรมชาติของสปริง ซึ่งสาเหตุที่เราไม่สามารถหา ค่าความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์ออกมาได้นั้น เนื่องมาจากสัญญาณ Sine Wave ที่ให้กับมอเตอร์ที่มี ช่วง ความถี่ 0.15-3 Hz นั้นมีช่วงความถิ่น้อยไปไม่สามารถไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์ เราจึงสรุปที่จะใช้ความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดลองที่มีค่าเท่ากับ 10 rad/s ในการทำการทดลอง ในขั้นตอนต่อไป

5. เทคนนิคคอมมานด์เชปปิ้ง (command shaping)

ในส่วนนี้ก็จะเป็นการอธิบายถึงเทคนิคคอมมานค์เชปปิ้ง ที่นำพื้นฐานของฟังก์ชันแร็ม ไซนูซอย ที่นำมาประยุกต์ใช้กับเทคนิคคอมมานค์เชปปิ้ง รวมถึงแสดงความสัมพันธ์ของสมการ Cost Function ที่จะอธิบายถึงแอมพลิจูดของการสั่นและความถี่ธรรมชาติของระบบ

พื้นฐานของฟังก์ชันแร็ม ไซนูซอยจากสมการคือ

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

ແລະ

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

แทนค่าสมการ (14) ใน (13) จะได้

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

เป็นพื้นฐานฟังก์ชันแร็ม ไซนูซอยที่ไม่หน่วย B_iเป็นสัมประสิทธ์ของพื้นฐานฟังก์ชันและ a_i เป็นจำนวนลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับพื้นฐานฟังก์ชัน

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

$$J = \frac{1}{T_f} \left\{ \int_{0}^{T_f/2} \left[1 - f(t) \right]^2 dt + \int_{T_f/2}^{T_f} \left[-1 - f(t) \right]^2 dt \right\} + \rho \sum_{i=1}^{11} \left(\omega_i T_s \right)^2 \left| F^*(\omega_i T_f) \right|^2$$
(16)

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

$$\left\{\int_{0}^{T_{f}/2} \left[1-f(t)\right]^{2} dt + \int_{T_{f}/2}^{T_{f}} \left[-1-f(t)\right]^{2} dt\right\}$$

เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง Bang-Bang command profile กับ Command shaped profile โดยเรา ต้องการให้ผลต่างของ Square คือค่า Command shaped profile มีก่าน้อยๆหรือเท่ากับศูนย์เพื่อที่จะ ให้ก่าเข้าใกล้ Bang-Bang เพราะว่า Bang-Bang จะมีการเกลื่อนที่เร็ว ส่วนก่ากวามถี่ธรรมชาติของ แขนกลสามรถอธิบายจาก Input Frequency Spectrum ซึ่งก็คือ

34

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

โดยพจน์สมการ Cost Function นี้จะบอกถึงความถี่ธรรมชาติของระบบ ω_i คือค่าความธรรมชาติ ของแขนกลที่มีความถี่ตั้งแต่ i=1 ถึง i=11ความถี่โดยจะมีช่วงของความถี่ ±10% เพราะฉะนั้น ขอบเขตความถี่ในระบบคือ $0.9\omega_n < \omega_i < 1.1\omega_n$

เราทำการ Minimize สมการที่ (16) คือ Objective Function (J) เพื่อที่ต้องการหา B_l และ เวลา T_f โดยการหาอนุพันธ์ย่อยของสมการที่ (16) เทียบกับ B_r เปลี่ยนตัวแปร 1 เป็น r แล้วจับ เท่ากับศูนย์

$$\partial J / \partial B_r = 0 \tag{17}$$

กำหนดให้

$$\sum_{l=1}^{L} B_l I_{rl} = I_r^*$$
(18)

จะได้

$$I_{rl} = I_{rl}^{*} + \rho \sum_{i=1}^{11} (\omega_{i}T_{r})^{2} \frac{\alpha_{l}}{\alpha_{l}^{2} - (\omega_{i}T_{f})^{2}} \frac{\alpha_{r}}{\alpha_{r}^{2} - (\omega_{i}T_{f})^{2}} \left(\frac{2\sin\frac{\omega_{i}T_{f}}{2} - \omega_{i}T_{f}\cos\frac{\omega_{i}T_{f}}{2}}{(\omega_{i}T_{f})^{2}} \right)$$
(19)

$$I_{rl}^{'} = \begin{cases} -\frac{1}{a_{l}^{2} - a_{r}^{2}} \left\{ \frac{a_{l}^{3}}{a_{l}^{2}} \left\{ \frac{a_{l}^{3}}{12} + \left(\frac{a_{l}^{2}}{2} - 1 \right) \sin a_{l} + a_{l} \cos a_{l} + \frac{a_{l}}{2} (\cos a_{l} - 1) \right] \\ -\frac{a_{l}}{a_{r}^{4}} \left\{ \frac{a_{r}^{3}}{12} + \left(\frac{a_{r}^{2}}{2} - 1 \right) \sin a_{r} + a_{l} \cos a_{l} + \frac{a_{l}}{2} (\cos a_{l} - 1) \right] \right\} \quad (r \neq l) \end{cases}$$

$$\left\{ \frac{1}{a_{l}^{5}} \left\{ \frac{a_{l}}{4} + \frac{5a_{l}^{3}}{24} + \frac{1}{4} \left[\left(\frac{a_{l}}{2} \right)^{2} - 1 \right] \sin 2a_{l} + \left(\frac{a_{l}^{2}}{2} - 2 \right) \sin a_{l} + \frac{a_{l}}{4} \cos 2a_{l} + 2a_{l} \cos a_{l} \right\} \quad (r = l) \end{cases}$$

$$(20)$$

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

ถ้า T_f และ $I_{rl}^{'}$ เรารู้ค่าเราสามารถหา $B_l^{'}$ ได้โดยจัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นใน เมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} I_{rl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r^* \end{bmatrix}$$
(22)

ถ้า $T_{_f}$ เราไม่รู้ค่า แต่ $B_{_l}$ เรารู้ค่าซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ได้จากสมการคือ

$$T_f = \Gamma T_r \tag{23}$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{3}{\frac{1}{SF}\sum_{l=1}^{L}\frac{B_l}{\alpha_l}}}$$
(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 ซึ่งจะ อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่าง Input function spectrum และแอมพลิจูดของการสั่นซึ่งความสัมพันธ์ ทั้งสองนี้จะสามารถอธิบายถึงสมการที่ (16) ได้เป็นอย่างดี จากสมการที่ (25) ซึ่งรายละเอียดการหา ความสัมพันธ์ได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก ค โดยจะบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างโดเมนสองโดเมน กือ แอมพลิจูดของการสั่นซึ่งจะอยู่บนโดเมนเวลา (Time Domain) และ Input function spectrum ซึ่ง ก็คือความถิ่ธรรมชาติของระบบจะอยู่บนโดเมนความถี่ (Frequency Domain)



ภาพที่ 16 แสดง Two-Mass System Model

ระบบ Two-Mass System Model ให้ m₁ และ m₂ คือมวลของระบบ, k คือค่าของสปริง และ f คือ แรงที่มากระทำกับระบบทำให้ระบบเกิดการสั่นสะเทือนค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเดียวโดยเราสามารถแสดงความสัมพันธ์นี้ได้จากสมการคือ

$$A^{*} = \frac{A}{F_{\max} / (m_{1} + m_{2})} = \omega_{n} T_{f} \left| F^{*}(\omega_{n} T_{f}) \right|$$
(25)

ແລະ

$$\left|F^{*}(\omega_{n}T_{f})\right| = \left|F(\omega_{n})\right|/F_{\max}T_{f}$$

โดยที่

A คือ แอมพลิจูดความเร่งของการสั่นสะเทือน

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

 $F\left(\omega_{n}
ight)$ คือ ฟูเรีย ทรามฟอร์ม ของ input function

5.2 เทคนิกคอมมานค์เชปปิ้งในการลดการสั่นสะเทือนของแขนกลแบบมีข้อต่อยึดหยุ่น

ในส่วนนี้จะเป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคกอมมานค์เชปปิ้งมาใช้ในการลดการสั่นสะเทือน ของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้ โดยจะได้อธิบายถึง Reference Trajectories (Square Wave) ซึ่ง เป็นโครงสร้างที่ทำการออกแบบขึ้นมาเพื่อให้แขนกลได้เคลื่อนที่ตามตำแหน่งที่เราต้องการ หลังจากนั้นทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบและทำการ Shaped Input เพื่อให้ความถี่ของ Reference Trajectories (Square Wave) ที่เราได้ออกแบบไว้นั้นหลบความถี่ธรรมชาติของแขนกล เพื่อลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น หลังจากการShaped Input แล้วโครงสร้างที่ได้ปรับเปลี่ยนแล้วก็จะ เป็น Reference Trajectories (Ramped Sine)

5.2.1 Reference Trajectories (Square Wave)

Reference Trajectories (Square Wave) เป็นโครงสร้างพื้นฐานของ Bang-Bang command profile ที่ยังไม่ได้ทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อลดค่าพลังงาน ซึ่งโครงสร้างของ Reference Trajectories (Square Wave) นั้นจะมี Power Spectrum สูงในทุกย่านความถี่มีผลไป กระตุ้นความถี่ธรรมชาติของระบบทำให้เกิดการสั่นสะเทือนจากภาพที่ 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/m² ในพื้นฐานโครงสร้างของ Reference Trajectories (Square Wave) เราต้องการที่จะลดค่า Power Spectrum ให้น้อยลงเพื่อให้แขนกลของไม่มีการสั่นสะเทือนใน ระหว่างการเคลื่อนที่ซึ่งแขนกลจะสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น

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

$$J = \frac{1}{T_f} \left\{ \int_{0}^{T_f/2} \left[1 - f(t) \right]^2 dt + \int_{T_f/2}^{T_f} \left[-1 - f(t) \right]^2 dt \right\} + \rho \sum_{i=1}^{11} \left(\omega_i T_s \right)^2 \left| F^*(\omega_i T_f) \right|^2 dt$$

ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่จะใช้ในการออกแบบคือ *L*, *ρ*, *ω_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, $\rho = 10$, $\omega_n = 10 \ rad/s$, $F_{max} = 40 \ ซึ่งผลของการ Shaped Input เพื่อทำการปรับเปลี่ยน$ โครงสร้างแล้วจะทำให้ Power Spectrum และค่าความถี่ต่างๆ ที่อยู่บริเวณ โดยรอบความถีธรรมชาติลดลงซึ่งโครงสร้างที่ทำการปรับเปลี่ยนแล้วจะเรียกกว่า Reference Trajectories (Ramped Sine)

5.2.2 Reference Trajectories (Ramped Sine)

Reference Trajectories (Ramped Sine) เป็นโครงสร้างที่ถูกออกแบบขึ้นในการ เกลื่อนที่ของแขนกลและได้ทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อลดค่า Power Spectrum ที่เพิ่มสูงขึ้น หลังจากนั้น ผลจากการ shaped input ของโครงสร้าง Reference Trajectories (Square Wave) จะทำ ให้แขนกลไม่เกิดการสั่นที่จุดปลาย (End Point) และมีการเคลื่อนที่เร็วขึ้น



ภาพที่ 19 แสดง reference trajectories (ramped sine)

ภาพที่ 19 แสดง Reference Trajectories (Ramped Sine) ซึ่งเป็นโครงสร้างการ เคลื่อนที่ของแขนกลและทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างแล้ว รูปบนซ้ายคือความเร่งเมื่อเราทำการ อินทิเกรตจะได้ รูปบนขวาคือความเร็ว และทำการอินทิเกรตอีกครั้งจะได้รูปล่างคือตำแหน่ง ในการ ออกแบบโครงสร้าง Reference Trajectories (Ramped Sine) นั้นได้ใช้โปรแกรม Matlab ในการ คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือ L = 10, $\rho = 10$, $\omega_n = 10 rad / s$, $F_{max} = 40$ ดังแสดงในภาคผนวก ง ซึ่งผลที่ได้จากการออกแบบและผลของก่าพารามิเตอร์ต่างๆ ก็จะนำไปใช้ทดลองการควบคุมแขนกล

ผลและวิจารณ์

ผล

ผลการทดลองของแขนกลแบบข้อต่อยึดหยุ่นได้จากการใช้เทคนิคคอมมานค์เชปปิ้งโดย การนำ Reference Trajectories (Ramped Sine) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ถูกออกแบบขึ้นในการเคลื่อนที่ ของแขนกลและได้ทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อลดค่า Power Spectrum ที่เพิ่มสูงขึ้น มาใช้ใน การทดลองควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล จากภาพที่ 20, 21และ 22 เป็นการเปรียบเทียบการใช้ เทคนิคกอมมานด์เชปปิ้งกับไม่ใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปิ้งซึ่งก็คือโครงสร้างของ Reference Trajectories (Square Wave) กับโครงสร้าง Reference Trajectories (Ramped Sine) และได้แสดง การผลการเปรียบเทียบผลการทดลองจากการใช้โปรแกรม Matlab ดังแสดงในภาคผนวก จ



ภาพที่ 20 แสดงการเปรียบเทียบการเคลื่อนของแขนกล จากการใช้เทคนิคกอมมานด์เชปปิ้ง

จากภาพที่ 20 แสดงผลการทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยเราต้องการให้แขนกล เกลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งมุมที่ใช้ในการเกลื่อนที่ของแขนกลคือ 4 เรเดียน เป็นตำแหน่ง ที่แขนกลเกลื่อนที่ไปและจะหยุดนิ่ง โดยเส้นที่แดงและเส้นสีน้ำเงินเป็น Desired Trajectory ก็คือ Square Wave และ Ramped Sine ตามลำดับ Square Wave เป็น Reference Signals ที่เรายังไม่ได้ทำ การ Shaped Input หรือว่ายังไม่ใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปิ้ง ส่วน Ramped Sine เป็น Reference Signals ที่เราได้ทำการ Shaped Input ซึ่งก็คือการใช้เทคนิคคอมมานค์เชปปิ้ง

ผลจากการทคลองเส้นสีน้ำเงิน (Ramped Sine) เป็นการใช้เทคนิคคอมมานค์เชปปิ้ง สามารถที่จะเข้าสู้ Setting Time ที่ ±3 ½ ได้เร็วกว่าเส้นสีแดง (Square Wave) ที่ 0.85 วินาทีและ 1.12 วินาที ตามลำคับ และผลจากการนำเทคนิคคอมานค์เชปปิ้งมาใช้กับแขนกลนั้นสามารถที่จะ ลคค่า Overshoot ที่เกิดขึ้นได้



ภาพที่ 21 แสดงผลของความเร่งทั้งสองกรณี



ภาพที่ 22 แสดงผลของ Input Voltages ทั้งสองกรณี

จากภาพที่ 21 แสดงผลของแอมพลิจูดความเร่งของการสั่นสะเทือนจะเห็นว่าค่า Amplitude และ Overshoot นั้นจะมีค่าที่ลดต่ำลงเมื่อเราได้นำเทคนิคคอมมานด์เชปปิ้งมาใช้ ในการควบคุมการ เคลื่อนที่ของแขนกล ในการออกแบบการเคลื่อนที่แขนกลนั้นเราใช้โปรแกรม Matlabในการสร้าง Reference Trajectories ซึ่งสามารถทำให้แขนกลนั้นมีการเคลื่อนที่ในลักษณะต่างๆตามความ ด้องการของผู้ควบคุม เช่นในการทดลองเราสามารถออกแบบการเคลื่อนที่แขนกลให้เคลื่อนที่แบบ กลับไปมาอย่างต่อเนื่องได้ดังแสดงใน ภาคผนวก ฉ

ภาพที่ 22 แสดง Input Voltages ของ Square Wave และ Ramped Sine ซึ่งก็คือเส้นสีแดง และเส้นสีน้ำเงินตามลำดับ เทคนิคกอมมานด์เชปปิ้งสามารถที่จะลดค่าพลังงานกระตุ้นจาก Square Wave ที่มี Power Spectrum สูงในทุกย่านความถี่ที่จะมีผลไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของ แขนกลทำให้เกิดการสั่นสะเทือน และผลของ Ramped Sine นั้นจะเห็นว่าการนำเทคนิคกอมมานด์ เชปปิ้งมาใช้ช่วยลดพลังงานกระตุ้นให้น้อยลง ทำให้แขนกลนั้นลดการสั่นพ้อง (Resonance) และ จากการใช้เทคนิคกอมมานด์เชปปิ้งนั้นทำให้แขนกลสามารถเกลื่อนที่ได้เร็วขึ้นและไม่มีการ สั่นสะเทือนที่จุดปลายแขนกล (End Point) ในการทดลองถ้ามีการใช้ Notch-filter แทนเทคนิคคอมมานเชปปิ้ง ซึ่งวิธี Notch-filter เป็น การสร้าง Filtered time function ขึ้นมาและทำการตัดช่วงของความถื่ออกจาก ฟูเรีย สเป็กตัม ของ Square Wave ซึ่งเราจะได้ Time Function ขึ้นมาใหม่ เป็น Filtered Spectrum จากการใช้วิธี Inverse Fourier Transform ผลจากการใช้ Notch-filter สามารถที่จะลดการสั่นสะเทือนได้ แต่ผลตอบสนอง ต่อเวลาจะนานกว่าเพราะไม่มี Input Energy ในช่วงความถี่ที่ต่ำกว่าความถิ่ธรรมชาติของการ สั่นสะเทือนของระบบ ถึงแม้วิธี Notch-filter จะช่วยลดการสั่นสะเทือนให้น้อยลงแต่ผลที่ได้ก็ดีไม่ เท่ากับการใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปิ้ง

วิจารณ์

 จากภาพที่ 11 แสดงผลการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นของแบบจำลอง แขนกลกับแขนกลงริง ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่นั้นมีความถูกต้อง 80.79% แต่ยังมีความ คลาดเคลื่อนอยู่บ้างซึ่งเป็นผลมาจากแบบจำลองสมการการการเคลื่อนของแขนกลกับแขนกลจริง นั้นยังมีความคลาดเคลื่อน

2. ค่าความถี่ธรรมชาติที่หาได้จากการทดลองนั้น จากภาพที่ 15 แสดงผลการค่าความถี่ ธรรมชาติจาก Fast Fourier Transform (FFT) จริงๆแล้วเนื่องจากระบบของเรามี DOF = 2 ความถี่ ธรรมชาติของระบบเราจะมีสองค่าแต่จากการทำการทดลองหลายครั้งโหมดความถี่ธรรมชาติที่เรา ทำการทดลองได้มีสองค่าจริงตามทฤษฎี แต่เนื่องจากโหมดของความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นจาก มอเตอร์นั้นมีค่าที่สูงเราจึงไม่สามารถที่จะให้ความถี่ไปกระดุ้นแขนกลให้เจอความถี่ธรรมชาติได้ ดังนั้นเราจึงใช้ความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดลองที่มีค่าเท่ากับ 10 rad/s

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในการทำการทคลองของงานวิจัยนี้จากการใช้เทคนิคคอมมานค์เชปปิ้งเราสามารถควบคุม การเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้เป็นอย่างดี รวมถึงสามารถหาแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ของแขนกลทำให้มีความรู้ความเข้าถึงพฤติกรรมของแขนกล และสมการการเคลื่อนที่ ของแขนกล (System ID) ที่มีความถูกต้องและมีความแม่นยำในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ในส่วนของผลการทคลองนั้นได้ทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อ ยืดหยุ่นได้จารการใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปิ้งและนำผลการทคลองมาเปรียบเทียบระหว่าง การใช้ Unshaped Command กับ Shaped Command ซึ่งผลของเทคนิคคอมมานด์เชปปิ้งจากการใช้พื้นฐาน ของฟังก์ชันแร็ม ไซนูซอยเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการลคการสั่นสะเทือนในระหว่างที่ เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งของแขนกลอีกทั้งยังสามารถลดค่า Overshoot ให้น้อยลงทำให้ แขนกลสามารถเข้าสู่ Settion Time ได้เร็วขึ้นซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ระบบเข้าสู่ Stable

เทคนิคคอมมานด์เชปปิ้งทำให้แขนกลมีการเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นจากการ Shaped Input ทำให้ Power Spectrum ของReference Signals ซึ่งก็คือ ความเร่ง ความเร็ว และการขจัค ที่มีค่าพลังงานสูง ในทุกย่านความถี่ที่มีผลไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของระบบลคลง และช่วยลดความเสียหายที่ขึ้น จากการสั่นพ้อง (Resonance) ได้

ข้อเสนอแนะ

 จากระบบของแขนกลแบบมีข้อต่อยึดหยุ่นได้ เราควรทำให้ระบบเป็น Non-Minimum-Phase ก่อน เพราะเมื่อผลจากการทำ Inverse Model แล้วระบบจะไม่เกิด Unstable

 ค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลที่เกิดจากมอเตอร์นั้น มีค่าความถี่ที่สูงกว่าช่วงความถี่ที่ ไปกระตุ้นแขนกล ดังนั้นเราควรใช้ช่วงความถี่ที่จะไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของแขนกลให้สูงขึ้น

 การนำคอมมานด์เชปปิ้งไปใช้สำหรับ Unstable System นั้นเราควรทำให้ระบบนั้น stable ก่อน โดยการทำ Close-Loop system ใหม่แล้วทำการ Shaped Input ของระบบทั้ง Loop

สิ่งที่จะทำต่อในอนาคต

 เนื่องจากเทคนิคคอมมานค์เชปปิ้งใช้ได้กับระบบแบบ Offline ซึ่งก็จะเกิดความลำบาก ในการนำไปใช้งานจริง ดังนั้นเราจะพัฒนาให้แขนกลสามารถใช้ได้กับระบบแบบ Online

2. นำเทคนิค Input Shaping มาใช้แทนเทคนิคกอมมานค์เชปปิ้ง เพราะเทคนิค Input Shaping นั้นสามารถใช้กับระบบแบบ Online

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

มนตรี พิรุณเกษตร. 2548. **การสั่นสะเทือนเชิงกล.** สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ.

- วโรคม ตู้จินคา. 2550. <mark>การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมทางวิศวกรรม.</mark> มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. 2548. <mark>การควบคุมระบบพลศ</mark>าสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- Aspinwall, D.M. 1980. Acceleration Profiles for Minimizing Residual Response. ASME Journal of Dynamics System, Messurement, 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 LaplaceTransform 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 MaterialsRobots. 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 approiatelyly 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 หาความถี่ธรรมชาติในการทคลองจริง

โปรแกรม Matlab สำหรับการใช้ Fast Fourier Transform หาความถี่ธรรมชาติในการทดลองจริง

```
function [w,X] = MyFFT(t,x,N,showplot)
if ~exist('N') | isempty(N) | N<length(x)</pre>
    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 และแอมพลิจูคของการสั่นซึ่งความสัมพันธ์ทั้งสองนี้จะสามารถอธิบายถึง สมการที่ (16) ได้เป็นอย่างคีในความสัมพันธ์ระหว่างโคเมนทั้งสองคือ แอมพลิจูคของการสั่นซึ่งจะ อยู่บนโคเมนเวลา (Time Domain) และ input function spectrum ซึ่งก็คือค่าความถิ่ของระบบจะอยู่ บนโคเมนความถี่ (Frequency Domain) จากภาพที่ 16 แสคง Two-mass undamped system คือ



จะได้ความสัมพันธ์ของระบบจากสมการคือ

$$\frac{\underline{y}_{e}^{*}}{f^{*}} = \frac{\left(\frac{\omega_{A}}{\omega_{N}}\right)^{2}}{s^{2}\left[s^{2} + \left(\frac{\omega_{A}}{\omega_{N}}\right)^{2}\right]}$$

เราให้

y_e เป็น ตำแหน่งการสิ้นสุดการเคลื่อนที่ (endpoint position)
 y_m เป็น ตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ (motor position)
 f เป็น แรง (force)

การลดแอมพลิจูดของการสั่นของระบบที่ไม่มีการหน่วง ค่าต่างๆของพารามิเตอร์สามารถ แสดงในตารางที่1

$$t^* = \omega_N t / 2\pi$$
$$y_e^* = \frac{y_e}{y_f}$$
$$\mathbb{I}_e^* = \frac{\frac{y_e}{w_N^2}}{\frac{y_e}{\omega_N^2} y_f}$$
$$F^* = \frac{F}{(m_1 + m_2) y_f \omega_N^2} = \left(\frac{2}{\omega_N T_s}\right)^2 \frac{F}{F_{\text{max}}}$$

โดยที่

 y_f เป็น ดำแหน่งสุดท้ายของการเคลื่อนที่ (final position) T_s เป็น เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของ y_f ที่เรียกว่า square wave input F เป็น แรงสูงสุด (peak force)

ความคลาดเคลื่อนของความถี่ธรรมชาติสามารถแสดงในรูปของอัตราส่วน คือ $\displaystyle rac{\omega_{\!_A}}{\omega_{\!_N}}$

โดยที่

 ω_{A} เป็น ความถี่ธรรมชาติจริงของระบบ (actual natural frequency) ω_{N} เป็น ความถี่ธรรมชาติประมาณ (nominal natural frequency)

จากระบบ Two-Mass System Model จะมีความถี่ธรรมชาติของระบบค่าเดียว ซึ่งสามารถ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Magnitude input spectrum ของความถี่ธรรมชาติกับแอมพลิจูดของการ สั่นสะเทือน จากสมการ

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

โดยที่

$$a_o = \frac{d^2 y}{dt^2} (T_f)$$
 เป็นความเร่งของมวล m_2 ที่เวลา T_f
 $J_o = \frac{d^3 y}{dt^3} (T_f)$ เป็นการเคลื่อนที่อย่างรวคเร็วที่เวลา 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) แสดงถึงแอมพลิจูดการสั่นที่ไม่มีการหน่วง เราสามารถแทนค่า a_o และ J_o ให้อยู่ใน Fourier transform ได้คือ

$$a_{o} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{Re} \left[F(\omega) H_{a}(\omega) \right] \cos \omega T_{f} d\omega$$
$$J_{o} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \operatorname{Re} \left[F(\omega) H_{J}(\omega) \right] \cos \omega T_{f} d\omega$$

โดยที่

 $F(\omega)$ เป็น ฟูเรีย ทรานฟอร์ม ของ input spectrum $H_a(\omega)$ เป็น ฟูเรีย อินทิกรัล ที่แสดงฟังก์ชันถ่าย โอนของ input force (f)ของ $\frac{d^2 y}{dt^2}$ $H_J(\omega)$ เป็น ฟูเรีย อินทิกรัล ของฟังก์ชันถ่าย โอนของ f และ $\frac{d^3 y}{dt^3}$

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

$$F(\omega) = \int_{0}^{T_{f}} f(t) e^{-j\omega t} dt = \left[F_{R}(\omega) + jF_{I}(\omega) \right] e^{-j\frac{\omega T_{f}}{2}}$$
(27)

โดยที่ $f_{R}(\omega)$ และ $f_{I}(\omega)$ เป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพตามลำคับ ที่ได้มาจากการแทน ฟูเรีย อินทิกรัล ของฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีความเหมาะสม จากการให้ฟังก์ชันเอกลักษณ์ คือ

$$H_{a}(\omega) = \frac{\omega_{n}^{2}}{m_{1} + m_{2}} \left\{ \frac{1}{\omega_{n}^{2} + \omega^{2}} + \frac{\pi}{2j\omega_{n}} \left[\delta(\omega - \omega_{n}) - \delta(\omega + \omega_{n}) \right] \right\}$$
(28)

$$H_{j}(\omega) = \frac{\omega_{n}^{2}}{m_{1} + m_{2}} \left\{ \frac{j\omega}{\omega_{n}^{2} + \omega^{2}} + \frac{\pi}{2} \left[\delta(\omega - \omega_{n}) - \delta(\omega + \omega_{n}) \right] \right\}$$
(29)

โดยที่ $\delta(\omega)$ เป็นฟังก์ชันเคลต้า ที่สามารถหาได้จากสมการคือ

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

โดยที่ arnothing(arnothing) เป็นฟังก์ชันที่กำหนดขึ้น

ทำการแทนฟูเรีย อินทิกรัลในการแสดงถึงค่า a_o และ J_o จะได้สมการคือ

$$a_{o} = \frac{\omega_{n}}{m_{1} + m_{2}} \left[F_{R}(\omega_{n}) \sin \frac{\omega_{n} T_{f}}{2} + F_{i}(\omega_{n}) \cos \frac{\omega_{n} T_{f}}{2} \right]$$
(31)

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

ทำการแทนค่าในสมการที่ (26) จะได้

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

โดยที่

$$\left|F\left(\omega_{n}\right)\right|=\sqrt{F_{R}^{2}\left(\omega_{n}\right)+F_{i}^{2}\left(\omega_{n}\right)}$$

สำหรับ Frequency Spectrum คือ

$$\left|F^{*}\left(\omega_{n}T_{f}\right)\right| = \frac{\left|F\left(\omega_{n}\right)\right|}{F_{\max}T_{f}}$$
(26)

โดยที่

F_{max} คือ แอมพลิจูคสูงสุด (peck force amplitude) T_f เป็นเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่แสดงถึงแอมพลิจูดการสั่น ซึ่งสามารถเขียนใหม่ ให้อยู่ในรูปสมการคือ

$$A^{*} = \frac{A}{F_{\max} / (m_{1} + m_{2})} = \omega_{n} T_{f} \left| F^{*}(\omega_{n} T_{f}) \right|$$
(26)

ແລະ

$$\left|F^{*}(\omega_{n}T_{f})\right| = \left|F(\omega_{n})\right|/F_{\max}T_{f}$$

โดยที่

A คือ แอมพลิจูดความเร่งของการสั่นสะเทือน $F\left(\omega_{n}
ight)$ คือ ฟูเรีย ทรามฟอร์ม ของ input function

ภาคผนวก ง โปรแกรม Matlab สำหรับเทคนิคคอมมานค์เชปปิ้งในการปรับเปลี่ยน โครงสร้างของ Reference Signals ์ โปรแกรม Matlab สำหรับเทคนิคคอมมานค์เชปปิ้งในการปรับเปลี่ยน โครงสร้างของ 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; alphar(1)=0;
for i=1:length(Fdim)
   alphar2d(i) = Fdim(i);
end
for i=1:length(Fdim)-1
   alphard(i+1) = alphard(i) + ts*alphar2d(i);
   alphar(i+1) = alphar(i) + ts*alphard(i);
end
for i=length(Fdim)+1:T/ts
   alphar2d(i)=0;
   alphard(i)=0;
   alphar(i)=alphar(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,alphar2d)
subplot(222),plot(tt,alphard)
subplot(223),plot(tt,alphar)
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,alphar2d,[],'plot');
figure(4)
MyFFT(tt,alphard,[],'plot');
figure(5)
MyFFT(tt,alphar,[],'plot');
figure(6)
MyFFT(tt,alphas2d,[],'plot');
figure(7)
MyFFT(tt,alphasd,[],'plot');
figure(8)
MyFFT(tt,alphas,[],'plot');
figure(9)
plot(tt,alphar-alphas)
%write to files
fid=fopen('alphar2d_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphar2d);
status=fclose(fid);
```

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

```
fid=fopen('alphar_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphar);
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

ผลจากจากทคลองการเปรียบเทียบการใช้คอมมานค์เชปปิ้งกับไม่ใช้คอมมานค์เชปปิ้ง

้ผลจากจากทคลองการเปรียบเทียบการใช้คอมมานด์เชปปิ้งกับไม่ใช้คอมมานด์เชปปิ้ง

```
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');
alphar = 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,alphar(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
```

<mark>ภาคผนวก ฉ</mark> ผลจากจากทคลองการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องของแขนกล ผลจากจากทคลองการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องของแขนกล

```
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; alphar(1)=0;
for i=1:length(Fdim)
   alphar2d(i) = Fdim(i);
end
for i=1:length(Fdim)-1
   alphard(i+1)= alphard(i) + ts*alphar2d(i);
   alphar(i+1) = alphar(i) + ts*alphard(i);
end
for i=length(Fdim)+1:T/ts
   alphar2d(i)=0;
   alphard(i)=0;
   alphar(i)=alphar(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
alphar2d = [alphar2d, -alphar2d, alphar2d, -alphar2d, alphar2d, -
alphar2d, alphar2d, -alphar2d, alphar2d, -alphar2d];
alphard = [alphard, -alphard, alphard, -alphard, alphard, -alphard,
alphard, -alphard, alphard, -alphard];
for i=1:length(alphard)-1
   alphar(i+1) = alphar(i)+ts*alphard(i);
end
&Plot.....
. . . . . . .
figure(1)
subplot(221),plot(tt,alphar2d)
subplot(222),plot(tt,alphard)
subplot(223),plot(tt,alphar)
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,alphar2d,[],'plot');
figure(4)
MyFFT(tt,alphard,[],'plot');
figure(5)
MyFFT(tt,alphar,[],'plot');
```

```
figure(6)
MyFFT(tt,alphas2d,[],'plot');
figure(7)
MyFFT(tt,alphasd,[],'plot');
figure(8)
MyFFT(tt,alphas,[],'plot');
```

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

```
%write to files
fid=fopen('alphar2d_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphar2d);
status=fclose(fid);
```

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

```
fid=fopen('alphar_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphar);
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);
```

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

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