



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การปรับลักษณะตำแหน่งอ้างอิงเพื่อลดการสั่นสะเทือนในการเคลื่อนที่ของ
แขนกลข้อต่อยืดหยุ่น

Real-Time Reference Position Shaping to Reduce Vibration in Slewing of
a Flexible-Joint

นามผู้วิจัย นางสาวกนกรัตน์ แซ่เฮ็ง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิฑิต นัตร์รัตนกุลชัย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย ศิระโกศิษฐ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, D.Phil.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับลักษณะตำแหน่งอ้างอิงเพื่อลดการสั่นสะเทือนในการเคลื่อนที่ของ แขนกลข้อต่อยืดหยุ่น

Real-Time Reference Position Shaping to Reduce Vibration in Slewing of a Flexible-Joint

โดย

นางสาวกนกรัตน์ แซ่เฮ็ง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กนกรัตน์ แซ่เฮ้ง 2554: การปรับลักษณะตำแหน่งอ้างอิงเพื่อลดการสั่นสะเทือนในการเคลื่อนที่ของแขนกลข้อต่อยืดหยุ่น ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย, Ph.D. 70 หน้า

แขนกลชนิดแบบข้อต่อยืดหยุ่น คือ แขนกลที่นำสปริงมาติดบริเวณข้อต่อ มีประโยชน์คือลดความเสียหายที่เกิดจากการเฉี่ยวชน อย่างไรก็ตามถึงแม้จะเป็นแขนกลทั่วไป การออกแบบภายในโดยมากจะทำให้ชิ้นส่วนภายในมีความยืดหยุ่นในการทำงาน ซึ่งปัญหาที่ตามมาของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น คือ ความแม่นยำในการทำงานลดลงเนื่องจากการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับแขนกล

การนำอนุกรมของแรงคดที่ได้รับการออกแบบมาใช้กับสัญญาณควบคุม โดยการนำอนุกรมแรงคดใส่เข้ากับสัญญาณควบคุมในช่วงเวลาที่เหมาะสม ผลที่ได้คือการสั่นสะเทือนที่เหลือจากการเคลื่อนที่ของแขนกลลดลง และการเคลื่อนที่ของแขนกลมีความนุ่มนวลมากขึ้น เทคนิคการออกแบบอนุกรมของแรงคดที่ใส่กับสัญญาณในช่วงเวลาที่เหมาะสม สามารถประยุกต์ใช้กับงานแบบ Real time ซึ่งเหมาะสมกับกับงานที่มีมนุษย์สั่งงานโดยตรง (Human operate) เช่น เกรนก่อสร้าง (Construction crane) และ tele-operated boom เป็นต้น

งานวิจัยนี้ ทำการประยุกต์เทคนิคนี้ กับแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลทั้งหมดกระทำโดยมนุษย์ ผลการทดลองที่ได้ คือ การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นลดลงอย่างมาก และการเคลื่อนที่ของแขนกลมีความนุ่มนวลขึ้น

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Kanokrat Sae-heng 2011: Real-Time Reference Position Shaping to Reduce Vibration in Slewing of a Flexible-Joint. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Withit Chatlatanagulchai, Ph.D. 70 pages.

A very-flexible-joint robot is a manipulator in which soft spring is intentionally placed at its joint to reduce damage if collision. Despite the benefit, slewing of this robot is less accurate because of the link vibration.

The convolution between the reference position and a properly designed impulse sequence produces an input that cancels residual vibration resulting in smoother robot moves. The convolution can be done in real time; the technique is then suitable for human-operated machine such as construction crane and tele-operated boom.

In this paper, we apply this technique to a laboratory-scale human-operated very-flexible-joint robot with great vibration-attenuated result

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทิต นัทรรัตนกุลชัย ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ช่วยเหลือให้วิชาความรู้ คำแนะนำต่างๆ รวมถึงการวางแผนการทำงานวิจัยทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิชัย ศิวะโกศิษฐ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะคิดในงานวิจัยรวมถึงข้อเสนอแนะในการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ตลอดจนการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ CRV Lab และ คุณภูวดล โพธิ์แดง ทุกคนที่ได้ให้กำลังใจ ความช่วยเหลือ และความรู้ดีๆ มาโดยตลอด

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณแต่ คุณพ่อ คุณแม่ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือให้กำลังใจ ชี้แนะและสนับสนุนจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ความสำเร็จ และหวังว่าคุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์

กนกรัตน์ แซ่เฮ้ง

มีนาคม 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	28
อุปกรณ์	28
วิธีการ	32
ผลและวิจารณ์	37
ผล	37
วิจารณ์	53
สรุปและข้อเสนอแนะ	54
สรุป	54
ข้อเสนอแนะ	54
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	55
ภาคผนวก	57
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	70

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดในการหาเอกลักษณ์ของระบบ	34



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ไดอะแกรมของแขนกลข้อต่อแบบยืดหยุ่น (One-link flexible joint robot)	5
2	แสดง Block diagram ของการควบคุมแบบ Fuzzy PI controller	7
3	ภาพการควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)	8
4	แสดงภาพการใช้งานของเทคนิค Input Shaping	10
5	แสดงการติดตั้ง Vibration absorber กับระบบหลัก	11
6	แสดงผลตอบสนองของ Vibration Absorber กับสัญญาณรบกวนรูปไซน์	12
7	แสดงภาพของระบบหลัก และ การติดตั้ง Vibration absorber	12
8	ชุดทดลองแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น (Flexible joint robot)	14
9	แสดงวงจรการควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed loop system)	15
10	ความสัมพันธ์ระหว่าง Impulse และ ผลตอบสนองของ Output แสดงในลักษณะการเคลื่อนที่	17
11	แสดงการประยุกต์ใช้งานเทคนิค Input shaping แบบ ZV กับสัญญาณแบบ Step	20
12	แสดงการประยุกต์ใช้งานเทคนิค Input shaping แบบ ZVD กับสัญญาณแบบ Step	24
13	แสดงการประยุกต์ใช้งานเทคนิค Input shaping แบบ ZVDD กับสัญญาณแบบ Step แสดงผลการค่าความถี่ธรรมชาติจาก FFT	25
14	แสดง Sensitivity curve ชนิดของ Input shaping กับเปอร์เซ็นต์การสั่นสะเทือน	26
15	แสดงการ Convolution ระหว่างสัญญาณ 2 สัญญาณ	27
16	แสดงแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้	28
17	แสดงวงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (Power amplifier)	29
18	แสดงเอนโคเดอร์ ของ Omron รุ่น E6B2-CW26C	29
19	แสดง Accelerometer	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	แสดงการรับส่งข้อมูล (Data acquisition) NI PCI 6221	30
21	แสดงโครงสร้างระบบทั้งหมดที่ใช้ทำการทดลอง	31
22	แสดงโครงสร้างของแกนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้	32
23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม θ_1 และ θ_2	33
24	แสดงการติดตั้งตัววัดความเร่งกับแกนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น	35
25	แสดงสัญญาณเข้าและสัญญาณขาออกของระบบ	37
26	แสดงตัวอย่างผลการเคลื่อนที่ของแกนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นจาก แบบจำลองแกนกลกับแกนกลจริง	38
27	แสดงผลการหาความถี่ธรรมชาติโดย FFT	39
28	แสดงภาพของ Impulse ที่กระทำ ณ เวลาต่างๆ	41
29	แสดงรูปของ Square wave ที่ใช้จำลองการเคลื่อนที่	41
30	แสดงการประยุกต์ใช้เทคนิค Input shaping กับ Square wave	42
31	สัญญาณควบคุมแบบ Step	43
32	แสดงภาพสัญญาณควบคุมแบบ Step ที่ใส่ Input shaping แบบ ZVD	43
33	แสดง Step response ของระบบ	44
34	แสดง Step response ของสัญญาณควบคุมแบบประยุกต์ใช้เทคนิค Input shaping	44
35	แสดงการเปรียบเทียบของ Step response ของระบบที่ใช้เทคนิค Input shaping กับไม่ใช้	45
36	แสดงผลการแปลง FFT ของ Input shaping กับตัวสัญญาณควบคุม	45
37	แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของแกนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น โดยมีมนุษย์คอย ควบคุม	46
38	แสดงผลการทดลองระหว่างการใช่ และไม่ใช้เทคนิค Input shaping	46
39	แสดงกราฟ Control input ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ	47
40	แสดงค่า Steady state error ของระบบแกนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
41	แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบในช่วงปิดการของเทคนิค Input shaping	49
42	แสดงการทำงานของระบบโดยปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping	49
43	แสดงค่าความผิดพลาดของระบบ ในช่วงปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping	50
44	แสดงค่า Control input ที่ป้อนเข้าในระบบในช่วงปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping	50
45	แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบในช่วงเปิดการของเทคนิค Input shaping	51
46	แสดงการทำงานของระบบโดยปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping	51
47	แสดงค่าความผิดพลาดของระบบในช่วงปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping	52
48	แสดงค่า Control input ที่ป้อนเข้าในระบบในช่วงปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping	52
49	แสดงการเปรียบเทียบการทำงานทั้งเปิดและปิด การทำงานของเทคนิค Input shaping	53

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

คำอธิบายสัญลักษณ์

$\theta_d(nT)$	คือ	ค่าตำแหน่ง
$\dot{\theta}_d(nT)$	คือ	ความเร็ว ที่ต้องการ
$\theta^*(nT)$	คือ	ค่าตำแหน่ง
$\dot{\theta}^*(nT)$	คือ	ความเร็วจริงของ Actuator
k_p^-	คือ	Proportional gain
k_i^-	คือ	Proportional Integral gain
k_a	คือ	Proportional Fuzzy logic gain
$\Delta u(nT)$	คือ	การเพิ่มขึ้นของตัวควบคุมแบบ Fuzzy PI controller
$u(nT)$	คือ	ตัวควบคุมของ Fuzzy PI controller
r	คือ	สัญญาณควบคุม (Command),
e	คือ	ค่าความผิดพลาด (Error),
y	คือ	สัญญาณที่ได้จากระบบ (Output)
G	คือ	ตัวควบคุม (Controller),
P	คือ	ระบบพลศาสตร์ (Plant)
M_A	คือ	มวล
K_A	คือ	ค่าคงที่ของสปริง
C_A	คือ	ค่าความหน่วงของสปริง ของตัว Vibration Absorber
M_P	คือ	มวล
K_P	คือ	ค่าคงที่ของสปริง
C_P	คือ	ค่าความหน่วงของสปริง ของตัวระบบหลัก
X_A	คือ	การเคลื่อนที่ของ Vibration absorber
X_P	คือ	ระบบหลัก
X_O	คือ	ค่าป้อนเข้าระบบ
A	คือ	แอมพลิจูด (Amplitude) ของ Impulse
ω_o	คือ	ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency)
t	คือ	เวลา
t_0	คือ	เวลาที่ใส่ Impulse เข้าไปในระบบ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

คำอธิบายสัญลักษณ์

ζ	คือ	Damping ratio ของระบบ ส่วนของ Impulse
$y(t)$	คือ	ตำแหน่งที่สนใจในระบบ
B_j	คือ	Coefficients ของไซน์
N	คือ	จำนวน Impulse
t_j	คือ	เวลาที่ทำการใส่ Impulse เข้าไปในระบบ

การปรับลักษณะตำแหน่งอ้างอิงเพื่อลดการสั่นสะเทือนในการเคลื่อนที่ของ แขนกลข้อต่อยืดหยุ่น

Real-Time Reference Position Shaping to Reduce Vibration in Slewing of a Flexible-Joint

คำนำ

ในปัจจุบันแขนกลมีบทบาทมากขึ้นในอุตสาหกรรม เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น ค่าแรงที่สูงขึ้น ความชำนาญของแรงงานที่มีไม่เพียงพอ ความสามารถในการทำงานอย่างต่อเนื่อง เป็นต้น การทำงานของแขนกลถูกนำมาทดแทนแรงงานคนเพื่อจุดประสงค์ในการเพิ่มผลการผลิต และการลดอัตราการเสียชีวิตในงานที่มีอันตรายสูง แต่ในการทำงานของแขนกลถ้าเกิดการทำงานที่ผิดพลาดในระหว่างการดำเนินงานอาจทำให้แขนกลเกิดความเสียหายขึ้นได้

จากปัจจัยดังกล่าวจึงมีการออกแบบแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น (Flexible joint robot) ด้วยเหตุผลที่ว่า แขนกลชนิดนี้จะช่วยลดความเสียหายจากการชนได้ เนื่องจากแขนกลลักษณะที่มีข้อต่อแบบข้อต่อยืดหยุ่น มีการนำส่วนของสปริง (Spring) เข้ามาประกอบกับแขนกล ดังนั้นปัญหาที่ตามมาคือความแม่นยำในการทำงานและการสั่นสะเทือนของแขนกล อย่างไรก็ตาม ถึงแม้จะเป็นแขนกลชนิดที่ไม่มีข้อต่อแบบข้อต่อยืดหยุ่น แต่ส่วนประกอบต่างๆ ของแขนกลนั้นมีส่วนของอุปกรณ์ที่มีความข้อต่อยืดหยุ่น ดังนั้นการทำงานของแขนกลจึงอาจมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้น การแก้ปัญหาที่ผ่านมาของการสั่นสะเทือนของแขนกลโดยใช้การออกแบบตัวควบคุมเข้ามาช่วย ทั้งแบบ Active control และ Passive control เป็นการนำแรงภายนอกเข้ามาควบคุมแขนกล ดังนั้นในการควบคุมจึงอาจต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ หรือ ทำการตัดแปลงแขนกล เพื่อให้สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ แต่การควบคุมโดยใช้ Passive control เป็นการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยเพื่อให้การเคลื่อนที่นั้นไม่ตรงกับการสั่นพ้อง (Resonance) ของแขนกล ข้อดีของการควบคุมแบบ Passive control คือไม่ต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์หรือทำการตัดแปลงแขนกลแต่อย่างใด ที่ผ่านมามีการควบคุมแบบ Passive control ยังไม่เป็นที่แพร่หลายในงานวิจัยมากนัก เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ยังค่อนข้างใหม่อยู่

งานวิจัยนี้มุ่งทำการศึกษา, ทำการควบคุม และ ลดการสั่นสะเทือนของแขนกลชนิดหนึ่ง แขนแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น โดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบ Input shaping ที่มีการเคลื่อนที่ตามสัญญาณควบคุมที่เป็นแบบ Real time ซึ่งมีความยืดหยุ่นในการนำไปใช้งานมาก เช่น การนำไปใช้บังคับ แขนขงที่มีความยืดหยุ่น โดยมีมนุษย์เป็นผู้บังคับ และมีการเคลื่อนที่ตามการสั่งการของมนุษย์ โดยตรง



วัตถุประสงค์

1. ทำการศึกษาและออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) แขนกลแบบมีข้อต่อ ยืดหยุ่นประกอบกับการสร้างสัญญาณควบคุม โดยใช้เทคนิค Input shaping ของการปรับตำแหน่งสัญญาณควบคุมในลักษณะการทำงานแบบ Real-time
2. ทดลองประสิทธิภาพของเทคนิค Input shaping ที่ออกแบบกับแขนกลแบบมีข้อต่อ ยืดหยุ่นเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการใช้เทคนิค Input shaping และในลักษณะที่ไม่ใช้เทคนิค Input shaping สุดท้ายนำผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบ

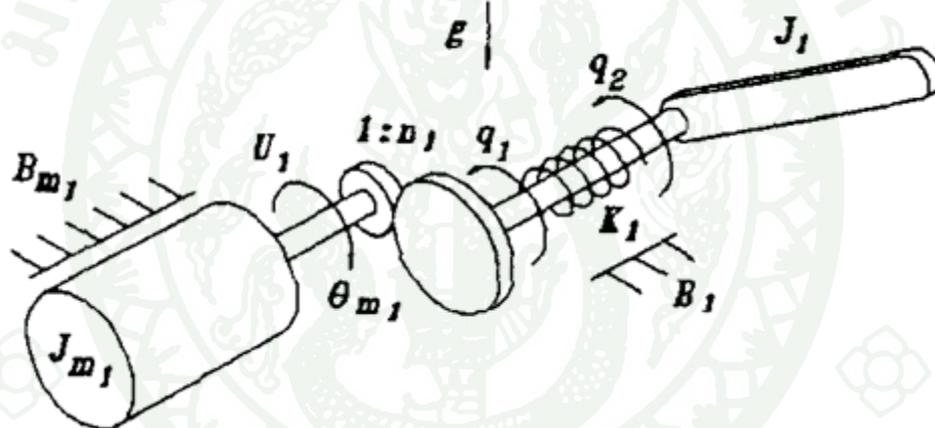
การตรวจเอกสาร

ปัจจุบันภายภาคอุตสาหกรรมได้นำแขนกลมาใช้แทนแรงงานคน เนื่องจากเป็นการลดต้นทุนในการผลิต และเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต มีความแม่นยำในการทำงานที่สูง แต่โดยมากแขนกลออกแบบในลักษณะที่ไม่คำนึงถึงความยืดหยุ่นบริเวณข้อต่อ เมื่อประสบอุบัติเหตุ จะทำให้แขนกลเกิดความเสียหายได้ง่าย จากปัจจัยดังกล่าว จึงเริ่มมีการนำแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น ปัญหาที่พบมากในแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น คือ การสั่นสะเทือน ความแม่นยำในการทำงาน และ ความซับซ้อนของระบบพลศาสตร์ในแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น ด้วยเหตุนี้การควบคุมแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นจำเป็นต้องใช้ทฤษฎีที่มีความซับซ้อน ในส่วนของงานวิจัยได้มีการควบคุมแขนกลชนิดนี้อย่างแพร่หลาย ทั้งในส่วนของารลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำงาน หรือศึกษาในส่วนของประสิทธิภาพในการทำงาน เช่นความแม่นยำในการทำงาน และ ลดระยะเวลาในการทำงานของแขนกลในลักษณะการเคลื่อนที่แบบต่างๆ

ถึงแม้ว่าแขนกลที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะเป็นแขนกลแบบไม่ยืดหยุ่น แต่เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการสร้างแขนกล ยกตัวอย่างเช่น เกียร์ (Gear) ชุดเพื่องขับ (Actuator) มอเตอร์ (Motor) สายพานส่งกำลัง (Belt) เป็นต้น ถูกออกแบบให้มีความยืดหยุ่น เพื่อลดความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการชนหรือ กระแทกภายใน ดังนั้นถ้าแขนกลทำงานที่ความถี่ตรงกับความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของอุปกรณ์นั้นๆ แขนกลดังกล่าวจะเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น เป็นผลมาจากที่มีพลังงานไปกระตุ้นแขนกลที่ความถี่ตรงกับความถี่ธรรมชาติ ซึ่งทำให้แขนกลเกิดการสั่นพ้องขึ้น (Resonance) และในส่วนของารสั่นสะเทือนดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำ และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ เนื่องจากระบบเกิดการแกว่ง จึงทำให้ระบบเข้าสู่สถานะ Steady state ได้ช้ากว่าปกติ

การลดการสั่นสะเทือนในแขนกล มีผลทำให้ระบบทำงานด้วยความแม่นยำที่เพิ่มมากขึ้นในระดับที่ยอมรับได้ และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยรวมจะลดลงเนื่องจากระบบเกิดการสั่นสะเทือนน้อยลงกว่าเดิม วิธีควบคุมแขนกลเพื่อลดการสั่นสะเทือนแบ่งได้ 2 ชนิดคือ Active control และ Passive control ในกรณีของ Active control มีลักษณะการทำงานคือใส่พลังงานภายนอก (External energy) เข้าสู่ระบบเพื่อนำพลังงานนี้ไปหักล้างกับแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น และอาจทำการติดตั้งอุปกรณ์เสริมต่างๆเข้าไปเพิ่มจากเดิม เพื่อใช้วัดค่าสัญญาณ หรือ เป็นตัวกำเนิดพลังงานที่ใช้ลดการสั่นสะเทือนของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น ผลเสียของการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆเพิ่มในระบบ ส่งผลให้ค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ของระบบพลศาสตร์เกิดการเปลี่ยนแปลงจากที่เป็นอยู่เดิม ดังนั้นการควบคุม และลดการสั่นสะเทือนนั้น จะต้องคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าว เข้า

ประกอบกับทฤษฎีที่ใช้ออกแบบตัวควบคุมด้วย งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมแบบ Active control มีการประยุกต์ใช้กับแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นสามารถพบได้มาก เช่น การควบคุมแบบ Black box ประกอบด้วย เทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network), กลศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy logic) และ Adaptive Control เป็นต้น การประยุกต์ใช้เทคนิค โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) ในการควบคุมแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น Kim *et al.* (1993) ใช้เทคนิค Neural network ประยุกต์ใช้ในแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นแสดงได้ตาม ภาพที่ 1 เมื่อ B_1, B_M คือ Viscous friction ของมอเตอร์และเพลลาแขนกล, J_M, J คือโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์และแขนกล, q_1, q_2 คือ มุมของมอเตอร์ลิง และ มุมของลิง, K คือค่าคงที่ของสปริง, U, n, θ_M คือ ค่าทอร์ก (Torque) ที่มอเตอร์สร้าง, อัตราการทดเกียร์ และ มุมของมอเตอร์, g คือค่าแรงโน้มถ่วงของโลก



ภาพที่ 1 ไต่อะแกรมของแขนกลข้อต่อแบบยืดหยุ่น (One-link flexible joint robot)

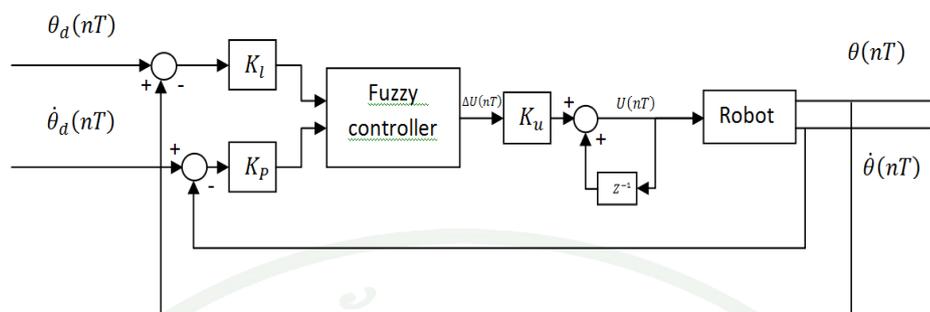
ที่มา: Kim *et al.* (1993)

การทำงานแบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการหาเอกลักษณ์ของระบบ (System identification) โดยจะทำการหาค่าพารามิเตอร์ (Parameter) เพื่อนำมาทำโมเดลของระบบพลศาสตร์ และในส่วนที่สอง จะเป็นการใช้ Neural network ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล (Tracking control) ซึ่งการทำงานในส่วนนี้ Neural network จะทำการประมาณค่าฟังก์ชัน (Function) ที่ไม่ทราบค่า หรือ ฟังก์ชันที่ไม่สามารถเขียนเป็นโมเดลได้ ไม่มีโครงสร้างที่แน่นอน ควบคุมการทำงานของระบบพลศาสตร์ในย่านความถี่สูง (High frequency dynamic) อีกทั้งยังช่วยลดสิ่งรบกวน (Disturbance) ต่างๆที่เกิดขึ้นทั้งในส่วนของสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นจากภายในระบบเอง เช่น สัญญาณไฟฟ้า สัญญาณ

รบกวนต่างๆ เป็นต้น หรือ อาจเกิดจากสิ่งรบกวนภายนอกระบบ เช่น อุณหภูมิของอากาศโดยรอบ ที่เปลี่ยนแปลง การสั่นสะเทือนของชิ้นงานเนื่องจากสิ่งแวดล้อมความชื้นในอากาศ และ แรงกระทำจากภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อระบบ เป็นต้น

Ge *et al.* (2003) เขียนหนังสือเกี่ยวกับการใช้เทคนิค Adaptive neural network แบบประยุกต์ ใช้กับแขนกล ในหนังสือดังกล่าวจะแสดงให้เห็นถึงการพัฒนาเทคนิค Adaptive neural network ในระยะเริ่มแรก ซึ่งในตอนนั้นเทคนิคนี้ยังไม่แพร่หลายและการประยุกต์ใช้ยังไม่สามารถทำได้ หลากหลาย เนื่องจากประสิทธิภาพของ Algorithm ภายในระบบยังประสิทธิภาพสูงชัน ดังนั้น Adaptive neural network ในปัจจุบันสามารถควบคุมระบบที่เป็นลักษณะไม่เชิงเส้น (Nonlinearity) อีกทั้งยังสามารถควบคุมระบบที่เป็นแบบ Multivariable แต่งานส่วนที่นิยมมากจะเป็นในส่วนของ การใช้ Adaptive neural network ในการประมาณค่าตัวแปรต่างๆที่ไม่ทราบค่า เช่น ความไม่เชิงเส้น (Nonlinearity), ความไม่แน่นอน (Uncertainly) และความซับซ้อน (Complexity) ของระบบ เป็นต้น เนื้อหาในหนังสือจะเน้นไปในการประยุกต์เทคนิคนี้กับแขนกลทั้งแบบแขนธรรมดา และแบบแขนกลที่มีข้อต่อยืดหยุ่น

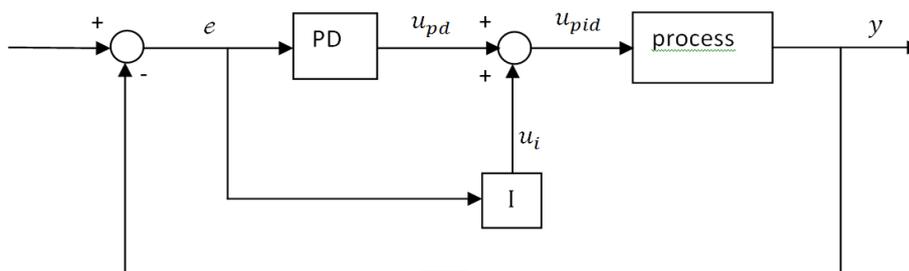
ในส่วนของการควบคุมแบบเครือข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network) ยังมีทางเลือกอีกช่องทาง ซึ่งลักษณะการทำงานคล้ายกับเทคนิคเครือข่ายประสาทเทียม คือ กลศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy logic) การทำงานของกลศาสตร์คลุมเครือสามารถนำไปควบคุมการทำงานของระบบต่างๆ ได้โดยตรง หรือ ใช้เป็นตัวชดเชยค่าฟังก์ชันที่ไม่ทราบค่า เช่น สิ่งรบกวน (Disturbance), ความไม่แน่นอนของระบบ (Uncertainly) และ ค่าฟังก์ชันที่ซับซ้อนมาก (Complexity) เป็นต้น ลักษณะการประยุกต์ใช้กับแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นที่แสดง เป็นการประยุกต์กลศาสตร์คลุมเครือ กับเทคนิคการควบคุมแบบพีไอ (PI controller) เรียกรวมได้ว่า Fuzzy PI Controller นำมาประยุกต์ใช้ โดย Tang and Chem (1994) การทำงานของเทคนิค Fuzzy PI Controller จะมีประสิทธิภาพมากกว่า การควบคุมแบบพีไอ (PI controller) ไม่เฉพาะควบคุมระบบให้มีความเสถียรภาพ (Stable) ในการทำงานเท่านั้น ตัวควบคุมสามารถควบคุมระบบที่มีความไม่เชิงเส้นสูงอย่างระบบแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น ในงานวิจัย แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบ Fuzzy PI Controller ที่สามารถควบคุมแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น ได้เป็นอย่างดี Block diagram สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2 เมื่อ $\theta_d(nT), \dot{\theta}_d(nT)$ คือ ค่าตำแหน่ง และ ความเร็วที่ต้องการ, $\theta(nT), \dot{\theta}(nT)$ คือ ค่าตำแหน่ง และ ความเร็วจริงของ Actuator, k_p^-, k_i^-, k_d^- คือ Proportional gain, Integral gain และ Fuzzy logic gain, $\Delta u(nT), u(nT)$ คือการเพิ่มขึ้นของตัวควบคุมแบบ Fuzzy PI controller และ ตัวควบคุมของ Fuzzy PI controller



ภาพที่ 2 แสดง Block diagram ของการควบคุมแบบ Fuzzy PI controller

ที่มา: Tang and Chem (1994)

จากนั้น Maki *et al.* (1997) ทำการทดลองเพิ่มเติม โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) แทนตัวควบคุมแบบพีไอ (PI controller) การออกแบบจะเริ่มจากการออกแบบตัวควบคุมแบบพีดี ต่อมาจึงออกแบบตัวไอ ซึ่งตัวไอดังกล่าวจะปรับเปลี่ยนตามความเหมาะสมของแต่ละระบบ Block diagram ของการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) สามารถแสดงได้ในภาพที่ 3 เมื่อ PD คือ ตัวควบคุมแบบพีดี, I คือตัวควบคุมแบบไอ, upd, ui, upid คือสัญญาณควบคุมแบบ พีดี, ไอ และ พีไอดี ทั้งนี้การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) จะสมมุติให้แขนกลแบบข้อต่อ ยึดหยุ่นเป็นระบบเชิงเส้น โดยการทำให้ Linearization แต่เป็นที่ทราบกันว่าถ้าสมการของระบบ พลศาสตร์มีความใกล้เคียงกับพลศาสตร์จริงของแขนกลแบบข้อต่อยึดหยุ่นตัวควบคุมที่ออกแบบ จากสมการนี้จะมีความแม่นยำ และ ประสิทธิภาพในการทำงานสูง แต่การหาสมการของระบบ พลศาสตร์ที่มีความใกล้เคียงกับระบบพลศาสตร์จริงทำได้ยากมาก หรืออาจจะทำไม่ได้เลย ถึงแม้ว่า หาสมการนั้นได้ แต่ตัวสมการจะมีความซับซ้อนอย่างมาก ยากต่อการออกแบบดังนั้นการทำให้ ระบบมีลักษณะเชิงเส้น (Linearization) การออกแบบตัวควบคุมจะมีความง่ายสะดวกกว่า แต่ความ แม่นยำ และ ประสิทธิภาพการทำงานลดลง เนื่องจากผลของความไม่เชิงเส้น (Nonlinearity) ใน ระบบ ซึ่งจากปัญหานี้จึงมีการชดเชยความไม่เชิงเส้นของระบบโดยนำเทคนิคศาสตร์คลุมเครือ มาช่วยประมาณค่าฟังก์ชัน ไม่เชิงเส้นของระบบ ผลที่ได้จากการพัฒนาตัวควบคุมแบบ Fuzzy PID controller มีความสามารถทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 3 ภาพการควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)

ที่มา: Maki *et al.* (1997)

นอกจากวิธีการควบคุมแบบ Black box ยังมีเทคนิคการควบคุมที่เป็นเครื่องมือในการออกแบบตัวควบคุมในระบบที่มีลักษณะไม่เชิงเส้น Oh and Lee (1997) ใช้เทคนิค Back stepping ในการออกแบบตัวควบคุมของแกนกลชนิดข้อต่อยืดหยุ่น เป็นที่ทราบกันดีว่าระบบในลักษณะที่มีความยืดหยุ่นนั้นมีความไม่เชิงเส้นสูง (Nonlinearity) เทคนิค Back stepping เป็นหนึ่งในหลายๆ เทคนิคที่มีประสิทธิภาพต่อระบบในลักษณะของแกนแบบข้อต่อยืดหยุ่น จากการทำการทดลอง เทคนิคที่มีประสิทธิภาพต่อระบบในลักษณะของแกนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น จากการทำการทดลอง เทคนิค Back stepping มีประสิทธิภาพมากขึ้น เมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของแกนกลเพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบประสิทธิภาพกับเทคนิคอื่นๆ และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบมีลักษณะกราฟเป็นแบบ Exponential มีค่าลู่อูเข้าหาศูนย์ และการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าลดลง ผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มเป็นลักษณะเดียวกันทั้งในส่วนของการจำลองการทำงาน (Simulation) และผลที่ได้จากการทดลองจริง (Experiment)

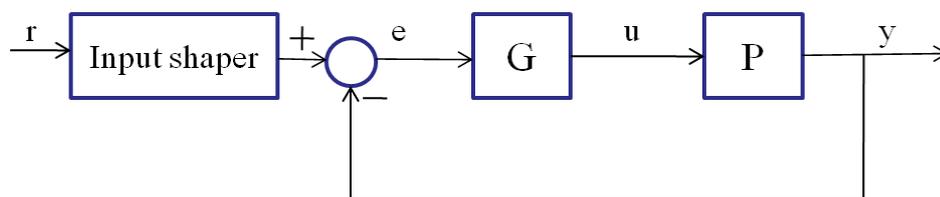
เนื่องจากการควบคุมแบบ Active control ในบางกรณีอาจจะต้องทำการเพิ่มอุปกรณ์อื่นๆ เข้าไปในระบบ ซึ่งการกระทำดังกล่าวจะส่งผลให้พลศาสตร์ของระบบเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้การลดการสั่นสะเทือน และการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานจำเป็นต้องนำค่าเหล่านี้ไปพิจารณาเพิ่ม ปัญหาที่กล่าวมาสามารถใช้การควบคุมแบบ Passive control ชดเชยได้ การควบคุมชนิดนี้เป็นการปรับเปลี่ยนสัญญาณควบคุมเพื่อลดการสั่นสะเทือน แต่เทคนิคยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนักจึงพบเห็นได้ไม่บ่อยนักในงานวิจัยต่างๆ ที่มีการตีพิมพ์ และการสัมมนาในระดับนานาชาติที่จัดกันที่ต่างๆ เทคนิคนี้เริ่มต้น Meckl and Seering (1988) สร้างโครงสร้างของสัญญาณควบคุม (Command shaping) ของความเร่ง (Acceleration) โดยให้สัญญาณมีลักษณะเป็นรูป Bang-bang การใช้เทคนิค Command

shaping นี้จะใช้ฟังก์ชัน Ramped sine function หรือ Versine basic function สร้าง Cost function เพื่อลดพลังงานกระตุ้นในช่วงที่ต้องการ ผลของโครงสร้างของสัญญาณควบคุมสามารถลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากตัวสัญญาณควบคุม (Command) โดยสัญญาณควบคุมดังกล่าว จะไปลดพลังงานกระตุ้น ณ บริเวณช่วงความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) เพื่อลดการสั่นพ้อง (Resonance) ซึ่งส่งผลให้ระบบเกิดการสั่นสะเทือน และ โครงสร้างดังกล่าวจะออกแบบให้เวลาที่เพิ่มเข้ามาสอดคล้องกับการลดการสั่นสะเทือน เพื่อให้เวลาที่ใช้ดำเนินการมีช่วงระยะที่สั้นที่สุด และ ระบบยังคงทำงานได้เต็มประสิทธิภาพเช่นเดิม

Chatlatanaguchai *et al.* (2006) ประยุกต์ใช้งานเทคนิค Command shaping กับแขนกลแบบยึดหุ่นชนิดสองข้อต่อ (Two-links flexible joint robot) งานวิจัยเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของฟังก์ชันที่นำมาสร้าง Cost function ซึ่งฟังก์ชันที่ใช้ได้แก่ Ramped sinusoidal basic function, Segment versine basic function และ Unshaped command การทดสอบประสิทธิภาพทั้งหมดจะเป็นการทดสอบการเคลื่อนที่แบบจุดไปจุด (Point to point) นำผลการทดลองของการเคลื่อนที่ตามสัญญาณ (Command) ที่สร้างจากฟังก์ชันทั้ง 3 ชนิดมาเปรียบเทียบ และ ทำการสรุปผล จากการทดลอง Segmented versine basic function มีประสิทธิภาพที่สูงที่สุดเมื่อประยุกต์ใช้กับแขนกลแบบสองข้อต่อยึดหุ่น

นอกจากการปรับโครงสร้างจากความเร่งของสัญญาณควบคุม ยังมีการพัฒนาให้ปรับโครงสร้างของการเคลื่อนที่โดยทำการปรับโดยตรงที่ตำแหน่ง (Position) ของการเคลื่อนที่ โครงสร้างนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Singer and Seering (1990) หลักการคือ นำ Impulse มาหักล้างกันเพื่อลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น Impulse ที่ใช้จะเป็นแบบอนุกรม ข้อดีของการปรับโครงสร้างของตำแหน่งการเคลื่อนที่ (Position shaping) คือสามารถทำงานแบบ Real-time สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับลักษณะงานที่มีมนุษย์สั่งงานได้โดยตรง (Human operate) หรือสามารถบังคับลักษณะการเคลื่อนที่ได้โดยตรง โดยไม่ต้องคำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่

หน้าที่หลักของ Input Shaping คือลดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากสัญญาณควบคุม ที่สั่งการทำงานของระบบ แต่มันไม่สามารถลดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากสิ่งรบกวน (Disturbance) ได้ เนื่องจากการทำงาน Input shaping จะเป็นการทำงานนอกวงรอบของระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback) สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4 เมื่อ r, e, y คือ สัญญาณควบคุม (Command), ค่าความผิดพลาด (Error), สัญญาณที่ได้จากระบบ (Output), G คือตัวควบคุม (Controller), และ P คือ ระบบพลศาสตร์ (Plant) ที่ต้องการควบคุม



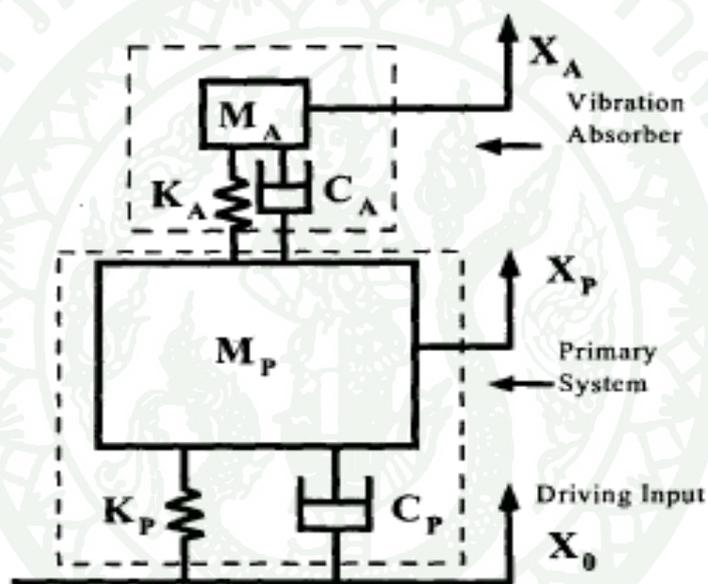
ภาพที่ 4 แสดงภาพการใช้งานของเทคนิค Input Shaping

ดังนั้นการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้จึงออกแบบทำงานรวมกันกับทฤษฎีการควบคุมอื่น ๆ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้งานมีดังตัวอย่างต่อไปนี้ Singhose *et al.* (1995) เนื่องจากลักษณะการทำงานของ Input Shaping มีลักษณะการทำงานคล้ายกับ Notch filter การทำการทดลองจะเปรียบเทียบฟิวส์เตอร์ชนิดต่างๆทั้งแบบ FIR และ IIR หลายๆชนิดกับ Input Shaping ที่มีค่าลักษณะการทำงานของ Input shaping ที่มีค่าขอบเขต (Constraint) หลายๆชนิด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน และการทดลองทั้งหมดเป็นการใช้ผลการตอบสนองเชิงเวลา (Step respond) เพื่อดูการสั่นสะเทือน และ ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเข้าสู่สถานะ Steady state error ผลการทดลองที่ได้ทำให้เห็นได้ว่า ประสิทธิภาพของ Input shaping มีมากกว่าฟิวส์เตอร์ (Filter) ทุกชนิดที่ใช้เข้าสู่สถานะ Steady state ถึงแม้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของโมเดลที่ใช้ออกแบบเทคนิค Input shaping จะมีค่ามากก็ตาม

Rappole *et al.* (1993) นำเสนอการใช้เทคนิค Input shaping กับ One-link-flexible beam การลดการสั่นสะเทือนในงานวิจัยนี้ได้แสดงการคำนวณขอบเขต (Constraint) ไว้ 5 วิธี ซึ่งวิธีที่ 1 และ 2 เป็นการกำหนดช่วงความถี่ที่ต้องการ แต่จุดประสงค์หลักเป็นการจำกัดเรื่อง Actuator limit ทั้งสองวิธีจะถูกทดสอบด้วยการวิเคราะห์ และ การ Optimizing โดยใช้โปรแกรมแบบ Nonlinear ต่อมาวิธีที่ 3 เป็นการแสดงให้เห็นถึง Optimization routine เพื่อเป็นการกำหนด Steady state actuator limited ขณะที่อยู่ในช่วง Peak actuator limit วิธีที่ 4 เป็นการเลือกขอบเขต (Constraint) ในชนิดที่ไม่อ่อนไหวต่อสิ่งแวดล้อม (Insentivity) ต่อระบบที่มีความถี่หลากหลาย สุดท้ายเป็นผลการทำงานของ Constraint ที่การทำงานในช่วงความถี่ สูง (High frequency)

Fortgang and Singhose (2002) ได้นำเทคนิค Input shaping ออกแบบร่วมกับตัว Vibration absorber เพื่อลดการสั่นสะเทือนของระบบพลศาสตร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงสาเหตุของการสั่นสะเทือน

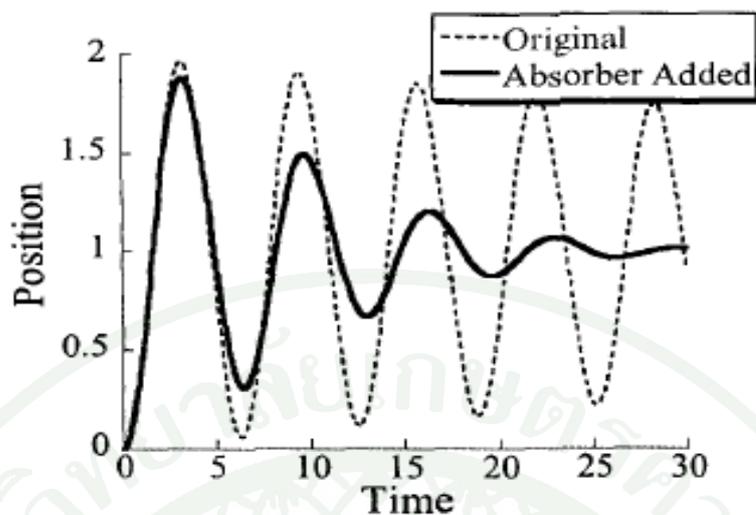
ที่เกิดขึ้นในระบบมีทั้งที่เกิดจากตัวสัญญาณควบคุม (Command) และเกิดจากสิ่งรบกวนจากภายนอก (Disturbance) งานวิจัยนี้ใช้เทคนิค Input shaping เพื่อลดการสั่นสะเทือนจากตัวสัญญาณควบคุม และ ในขณะเดียวกัน ก็ใช้ Vibration absorber ลดการสั่นสะเทือนจากสิ่งรบกวนภายนอก การใช้ตัว Vibration absorber ต้องทำการติดตั้งกับตัวระบบหลักที่เราต้องการลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ไดอะแกรมของระบบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 เมื่อ M_A, K_A, C_A คือ มวล, ค่าคงที่ของสปริง และ ค่าความหน่วงของสปริง ของตัว Vibration Absorber M_P, K_P, C_P คือ มวล, ค่าคงที่ของสปริง และ ค่าความหน่วงของสปริง ของตัวระบบหลัก และ X_A, X_P, X_O คือ การเคลื่อนที่ของ Vibration absorber, ระบบหลัก และค่าป้อนเข้าระบบ



ภาพที่ 5 แสดงการติดตั้ง Vibration absorber กับระบบหลัก

ที่มา: Fortgang and Singhose (2002)

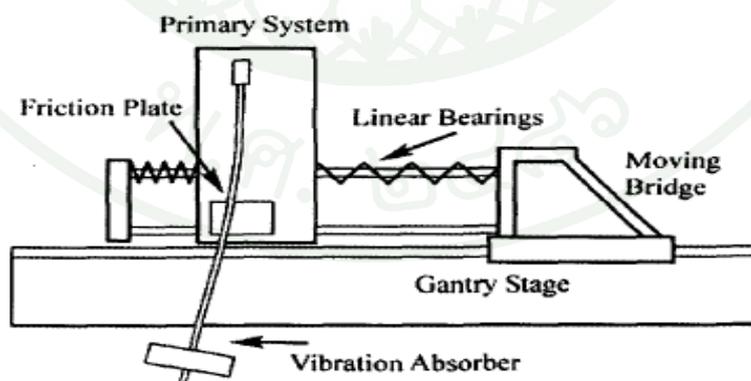
ตัวเทคนิค Input shaping ไม่สามารถลดการสั่นสะเทือนในส่วนนี้ได้ การทดลองจะใส่สิ่งรบกวนเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine) ให้กับระบบที่ใช้ทดลอง ลักษณะผลตอบสนองของ Vibration absorber ที่มีผลกับสัญญาณรบกวนรูปไซน์สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 6 การทำงานทั้งหมดจะเป็นการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์ (Simulation) ผลที่ได้จากการทำงานของการออกแบบระบบผสมของ Input shaping กับ Vibration absorber สามารถลดการสั่นสะเทือนได้ดีทั้งตัวสัญญาณควบคุม และ จากสิ่งรบกวนภายนอก ต่อมา



ภาพที่ 6 แสดงผลตอบสนองของ Vibration Absorber กับสัญญาณรบกวนรูปไซน์

ที่มา: Fortgang and Singhose (2002)

Brogan *et al.* (2003) ทำงานวิจัยต่อเนื่องเรื่องการออกแบบการลดการสั่นสะเทือนของระบบหลัก (Primary system) ซึ่งงานวิจัยนี้ระบบหลักที่ใช้จะเป็นคนละแบบ ทำการทดลอง โดยติดตั้ง Vibration absorber เข้าไปที่ระบบหลักเพื่อใช้ลดการสั่นสะเทือนจากภายนอก สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 7



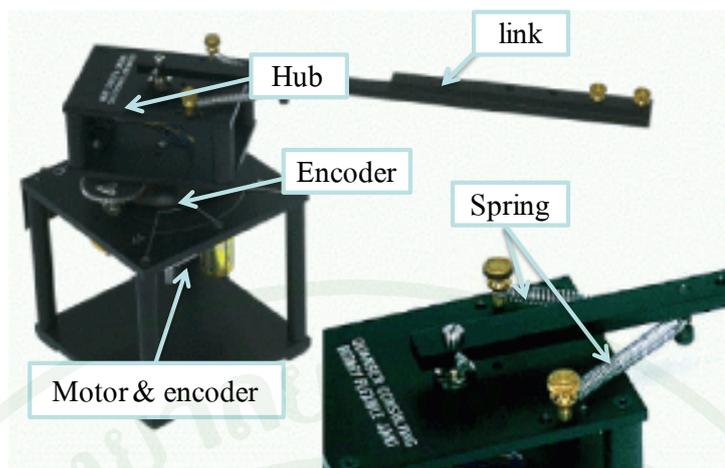
ภาพที่ 7 แสดงภาพของระบบหลัก และ การติดตั้ง Vibration absorber

ที่มา: Brogan *et al.* (2003)

และออกแบบสัญญาณควบคุมใหม่โดยใช้เทคนิค Input shaping เพื่อลดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากตัวสัญญาณไปกระตุ้นที่ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ในส่วนของสิ่งรบกวนจากภายนอกจะใช้สัญญาณคลื่นรูปไซน์ (Sine) ลักษณะผลตอบสนองของ Vibration absorber ที่มีผลกับสัญญาณรบกวนรูปไซน์สามารถแสดงได้ดังรูปภาพที่ 6 การทดลองจะทำทั้งการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์ (Simulation) และทำการทดลองจริงกับอุปกรณ์ เมื่อได้ผลจากการจำลองการทำงานนำผลที่ได้ไปทดลองกับชุดทดลองจริงที่จัดเตรียมไว้ ผลที่ได้ทั้งการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์ และการทดลองจริง มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และสามารถลดการสั่นสะเทือนได้ทั้งในส่วนของสัญญาณควบคุม และ จากสิ่งรบกวนภายนอกระบบ

การสร้างแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นชนิด 1 ข้อต่อ (One-link flexible joint robot) ทำการสร้างให้มีลักษณะคล้ายกับชุดทดลองแขนกลข้อต่อยืดหยุ่นที่มีขายตามท้องตลาด สาเหตุที่ต้องทำขึ้นมาใหม่ เนื่องจากชุดทดลองกับชุดขับเคลื่อนมีราคามีสูงมาก อีกทั้งเป็นการลดต้นทุนในการทำงานวิจัยลง และ ชุดทดลองนี้เมื่อสร้างเสร็จสามารถนำทฤษฎีการควบคุมชนิดอื่นมาประยุกต์ใช้งานได้อีกด้วย ภาพที่ 8 เป็นรูปของชุดทดลองแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นที่จะทำการสร้างขึ้นมาใหม่

การควบคุมและการลดการสั่นสะเทือนของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น สามารถแยกได้ 2 ส่วน คือ ส่วนของการควบคุม และ ส่วนของการลดการสั่นสะเทือน ส่วนของการควบคุมจะใช้เทคนิคการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) ภาพ Block diagram ของการควบคุมสามารถดูได้จากภาพที่ 4 จากรูปชุดทดลองของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นจะประกอบด้วย แขน (Link) ที่สามารถติดตั้งตัวตรวจรู้ (Sensor) และทำการติดตั้ง Play load เพื่อสร้างความท้าทายในการควบคุม และการลดการสั่นสะเทือน, ฮับ (Hub) เป็นอุปกรณ์ที่ข้อต่อยืดหยุ่น, มอเตอร์ (Motor) ใช้ขับเคลื่อนตัวฮับ (Hub) ทั้งสูงสุดท้าย คือ Encoder ความละเอียดสูง 2 ตัว เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้ที่วัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของฮับ (Hub) และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ การออกแบบจะทำการออกแบบให้แขนกลสามารถทำงาน โดยเทคนิค พีไอดี ต่อจากนั้นทำการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นในส่วนของการลดการสั่นสะเทือน โดยการนำเทคนิค Input shaping สาเหตุที่นำเทคนิคนี้มาใช้เนื่องจากผู้วิจัยต้องการแขนกลสามารถทำงานในลักษณะที่มีความยืดหยุ่นสูงได้ดี และสามารถปรับเปลี่ยนเส้นทางการเคลื่อนที่ตามที่ต้องการของผู้ใช้ได้โดยตรง (Human operate) ซึ่งเหมาะกับงานที่มีมนุษย์บังคับการทำงานเช่นเครน (Crane) ชนิดต่างๆ, แขนกลหยิบจับชิ้นงานในห้องทดลอง และ แขนกลที่ช่วยในการผ่าตัดทางการแพทย์ เป็นต้น



ภาพที่ 8 ชุดทดลองแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น (Flexible joint robot)

ที่มา: บริษัท เทคนิคคอมเมอนจิเนียริง จำกัด (2553)

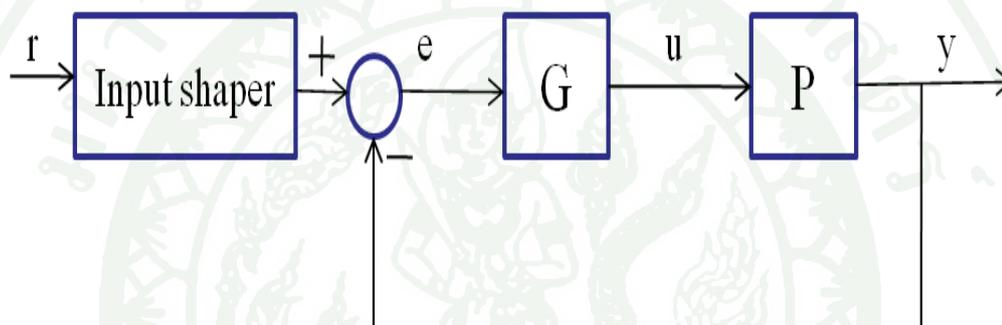
ทฤษฎี

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับเทคนิค Input shaping

ดังที่กล่าวมาเบื้องต้นว่าการควบคุมสามารถแบ่งได้สองลักษณะคือ Active control และ Passive control ซึ่งเทคนิค Input shaping ก็เป็นส่วนหนึ่งในระบบแบบ Passive control และการดำเนินการของเทคนิคนี้เป็นการคำนวณจากตำแหน่งการเคลื่อนที่ (Position shaping) โดยที่ระบบที่ประยุกต์ใช้งานกับเทคนิค Input shaping นั้น จะคำนวณจากระบบที่เป็นแบบเชิงเส้น (Linear) มีการสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free vibration) และเป็นระบบแบบ Underdamped เทคนิคนี้โดยทั่วไป เป็นการสร้างอนุกรมของ Impulse หรือเรียกย่อว่า Input shaper หลักการทำงานคือ นำอนุกรม Impulse ไปรวมกับสัญญาณควบคุม (Command) ซึ่งได้ Shaped command เทคนิค Input shaping นี้สามารถคำนวณเพื่อลดการสั่นสะเทือนของระบบ ณ จุดที่เราต้องการซึ่งจุดที่เราต้องการนี้คือช่วงความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของระบบ ถ้าระบบที่เราสนใจมีค่าความไม่แน่นอนของระบบ ณ ตำแหน่งที่เป็นความถี่ธรรมชาติ เช่นในระบบที่เป็นลักษณะแบบยืดหยุ่น (Flexible systems) เราสามารถเพิ่ม Constraint เข้าไปในระบบเพื่อทำให้ระบบเป็น Insensitivity

การอธิบายเกี่ยวกับเทคนิค Input shaping

เทคนิค Input shaping เป็นเทคนิคแบบ Feed forward ที่ทำการประยุกต์ใช้งานนอก Loop ของการควบคุมสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 9 เมื่อ r คือสัญญาณควบคุม (Command), e คือค่าความผิดพลาดของระบบ (Error), u คือ สัญญาณตัวควบคุม, y คือสัญญาณขาออกของระบบ (Output), G คือตัวควบคุม (controller), P คือระบบ (System) หรือ Plant จากภาพแสดงให้เห็นว่าสัญญาณควบคุมถูกรวมกับอนุกรม Impulse เป็น Shaped command ก่อนที่สัญญาณนี้ถูกส่งเข้าไปใน Loop ของการควบคุมแบบป้อนกลับ



ภาพที่ 9 แสดงวงจรการควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed loop system)

การคำนวณของเทคนิค Input shaping มีความเกี่ยวข้องกับผลตอบสนองของ Second order systems ที่สอดคล้องกับข้อจำกัดของตัวแปร (Constraints)

การคำนวณด้วยเทคนิค Input shaping ค่อนข้างจะเป็นเทคนิคที่ใหม่ โดยพื้นฐานการคำนวณเริ่มจากพื้นฐานจากทฤษฎีระบบเชิงเส้น (Linear system theory) โดยกรณีที่ใช้คำนวณพิจารณาการสร้างระบบอินพุตของระบบที่ผลของเอาพุต (Output) เป็นการสั่นแบบอิสระ (Free vibration system) และผลของค่าเอาพุต (Output) ที่ได้ เป็นตัวกำหนดค่า Impulse ของอินพุต (Input) ที่ใส่เข้าไปในระบบ ผลของการสั่นสะท้อนสามารถแสดงในเซตของ Second order poles ที่ลดลงตามสัญญาณ Sinusoidal ซึ่งอ้างอิงมาจากหนังสือของ Bolz and Tuve (1998)

$$y(t) = \left[A \frac{\omega_0}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_0(t-t_0)} \right] \sin\left(\omega_0\sqrt{1.0-\zeta^2}(t-t_0)\right) \quad (1)$$

เมื่อ A คือ แอมพลิจูด (Amplitude) ของ Impulse , ω_0 คือ ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) t คือ เวลา t_0 คือเวลาที่ใส่ Impulse เข้าไปในระบบ และ ζ คือ Damping ratio ของระบบ ส่วนของ Impulse โดยมากจะเป็นทอร์ก (Torque) หรือ การควบคุมความเร็ว (Velocity command) เพื่อไปควบคุม Actuator ของระบบพลศาสตร์ $y(t)$ คือ ตำแหน่งที่สนใจในระบบ การประยุกต์เทคนิคในส่วนนี้จะแสดงเฉพาะระบบที่เป็นแบบ Single mode เท่านั้น ซึ่งผลจากการใส่ Impulse เข้าไปในระบบแสดงได้ดังภาพที่ 10

จากภาพที่ 10 ภาพแสดงให้เห็นว่ามีการใส่ Impulse จำนวน 2 แรง เข้าไปในระบบ แสดงได้คือ A_1 และ A_2 ผลที่ได้คือเกิดการหักล้างระหว่างของการสั่นสะท้อนแบบอิสระ กับ Impulse ที่ป้อนเข้าไปในระบบ ซึ่งผลที่ได้จากกราฟแสดงได้ในเส้นจุดไข่ปลา ซึ่งหลังจากใส่ Impulse เข้าไปในระบบ เมื่อสิ้นสุด Impulse ในแรงที่ 2 แล้วการสั่นสะท้อนทั้งหมดจะถูกหักล้างทั้งหมด ดังนั้นเบื้องต้นกำหนดให้ Impulse มีทั้งหมด 2 แรง จากสมการที่ (1) ใช้หลักการของตรีโกณมิติ (Trigonometric relations) ในหนังสือของ Gieck (1983) เขียนความสัมพันธ์ใหม่ได้ตามสมการที่ (2)

$$B_1 \sin(\alpha t + \phi_1) + B_2 \sin(\alpha t + \phi_2) = A_{amp} \sin(\alpha t + \psi) \quad (2)$$

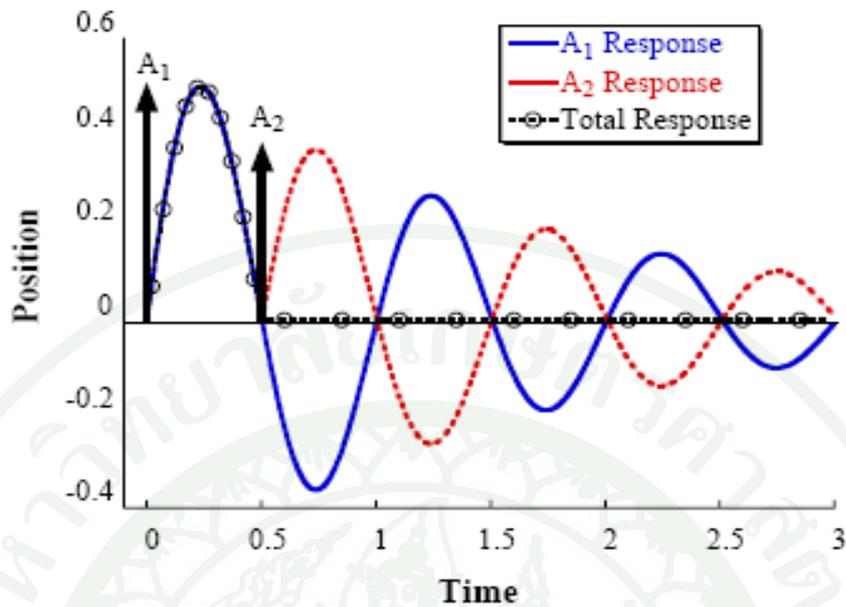
$$\text{เมื่อ } A_{amp} = \sqrt{(B_1 \cos \phi_1 + B_2 \cos \phi_2)^2 + (B_1 \sin \phi_1 + B_2 \sin \phi_2)^2}$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{B_1 \cos \phi_1 + B_2 \cos \phi_2}{B_1 \sin \phi_1 + B_2 \sin \phi_2} \right)$$

จากสมการที่ (2) ในส่วนของแอมพลิจูด (Amplitude) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (3)

$$Apm = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^N B_j \cos \phi_j \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^N B_j \sin \phi_j \right)^2} \quad (3)$$

$$\phi_j = \omega \sqrt{(1-\zeta^2)} t_j, \quad B_j = \frac{A_j \omega}{\sqrt{(1-\zeta^2)}} e^{-\zeta\omega(t_n-t_j)}$$



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Impulse และ ผลตอบสนองของ Output แสดงในลักษณะ การเคลื่อนที่

B_j คือ Coefficients ของไซน์ในสมการที่ (1), N คือ จำนวน Impulse t_j คือ เวลาที่ทำให้ การใส่ Impulse เข้าไปในระบบ และ ω คือค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ζ คือ Damping ratio ในการที่จะทำให้การสั่นสะเทือนของระบบมีค่าเป็นศูนย์ค่า Amp จากสมการที่ (3) ต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ ในเวลาที่สิ้นสุดการใส่อินพุตเข้าไปในระบบ แทนเวลานั้นด้วย t_N สมการที่ (3) เป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อทั้งสองเทอมในรากที่สองของสมการที่ (3) ต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ทั้งสองเทอม สามารถเขียนได้ใหม่เป็นสมการที่ (4) และ สมการที่ (5) ดังนี้

$$B_1 \cos \phi_1 + B_2 \cos \phi_2 + \dots + B_N \cos \phi_N = 0 \quad (4)$$

$$B_1 \sin \phi_1 + B_2 \sin \phi_2 + \dots + B_N \sin \phi_N = 0 \quad (5)$$

เมื่อ $B_j = \frac{A_j \omega}{\sqrt{(1-\zeta^2)}} e^{-\zeta \omega (t_n - t_j)}$, $\phi_j = \omega \sqrt{(1-\zeta^2)} t_j$, ω คือ ความถี่ธรรมชาติจาก

สมการที่ (4) และ (5)

สามารถนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของซิกม่าได้ดังสมการที่ (6) และ (7)

$$\sum_{j=1}^N A_j e^{-\zeta\omega(t_N-t_j)} \cos\left(\left(\omega\sqrt{1-\zeta^2}\right)t_j\right) = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^N A_j e^{-\zeta\omega(t_N-t_j)} \sin\left(\left(\omega\sqrt{1-\zeta^2}\right)t_j\right) = 0 \quad (7)$$

การแยกประเภทของเทคนิค Input shaping

Zero vibration (ZV) คือ เป็นการออกแบบ Input shaper ประกอบด้วย Impulse 2 แรง และ Input shaping ในแบบ ZV เหมาะกับการใช้ในกรณีที่ใช้ในกรณีที่แบบจำลองทางพลศาสตร์มีความแม่นยำสูง ซึ่งการทำงานกับสัญญาณควบคุมของ Input shaping แบบ ZV มีเวลาหน่วง (Delay) เกิดขึ้นในระบบไม่มาก แต่ ZV มีความอ่อนไหว (Sensitivity) กับความไม่แน่นอนของแบบจำลองทางพลศาสตร์สูง การคำนวณหาค่าแอมพลิจูด (Amplitude) และเวลาที่ Impulse แต่ละแรงกระทำต่อสัญญาณควบคุม (Command)

ขั้นตอนในการคำนวณ Input shaping แบบ ZV ใช้สมการที่ (6) และ สมการที่ (7) มีดังต่อไปนี้

1. กำหนดค่าเริ่มต้น (Initial condition) ของการคำนวณดังนี้
 $N = 2$ (จำนวน Impulse ที่กำหนดในการคำนวณ), $A_1 = 1$, $t_1 = 0$, $\sum_{i=1}^N A_i = 1$
 (ผลรวมของจำนวนแอมพลิจูด (Amplitude) ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1)
2. แทนค่าเริ่มต้นในสมการที่ (6) และ สมการที่ (7) ได้สมการที่ (8) และ (9)

$$A_1 e^{-\zeta\omega_n(t_2-t_1)} \cos(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_1) + A_2 e^{-\zeta\omega_n(t_2-t_2)} \cos(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_2) = 0 \quad (8)$$

$$A_1 e^{-\zeta\omega_n(t_2-t_1)} \sin(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_1) + A_2 e^{-\zeta\omega_n(t_2-t_2)} \sin(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_2) = 0 \quad (9)$$

แทนค่า $t_1 = 0$, $A_1 = 1$ ได้สมการที่ (10) และ (11)

$$e^{-\zeta\omega_n(t_2)} + A_2 \cos(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_2) = 0 \quad (10)$$

$$A_2 \sin(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_2) = 0 \quad (11)$$

จากสมการที่ (11) เมื่อ $A_2 \neq 0$ ดังนั้น $\sin(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_2) = 0$ ในกรณีที่ทำให้ไซน์มีค่าเท่ากับ 0 ก็ต่อเมื่อ $\sin(\theta) = n\pi$ เมื่อ $n = 0, 1, 2, \dots, n$ เนื่องจาก $t_1 = 0$ เขียนแทนด้วยสมการที่ (12)

$$\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_2 = \pi \quad (12)$$

จากสมการที่ (12) จะได้ $t_2 = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$ จากนั้นแทน t_2 ในสมการที่ (10) จะได้

$$A_2 = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$$

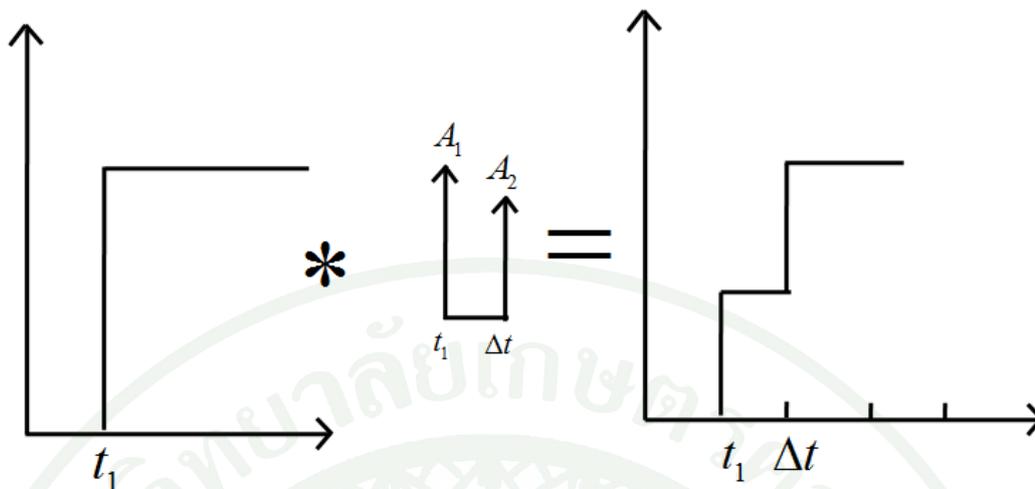
แทนค่าตัวแปร $K = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$ และ $\Delta t = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$

จาก $\sum_{i=1}^N A_i = 1$ จะได้ $A_1 + A_2 = 1$

จากทั้งหมดที่กล่าวมาได้ค่าแอมพลิจูด (Amplitude) และ เวลาดังต่อไปนี้

$$\left(\begin{array}{cc} A_1 = \frac{1}{K+1} & A_2 = \frac{K}{K+1} \\ t_1 = 0 & t_2 = \Delta t \end{array} \right) \quad (13)$$

ภาพที่ 11 แสดงการประยุกต์ใช้งาน Input shaping แบบ ZV กับสัญญาณควบคุมแบบ Step รูปทางด้านซ้ายมือแสดงสัญญาณควบคุมแบบ Step ทางด้านขวาเป็นรูปที่นำ Input shaping แบบ ZV กับสัญญาณควบคุม



ภาพที่ 11 แสดงการประยุกต์ใช้งานเทคนิค Input shaping แบบ ZV กับสัญญาณแบบ Step

Zero vibration and derivative (ZVD) คือเทคนิค Input shaping ที่ประกอบด้วยค่า Impulse 3 ซึ่ง Constraint ที่ใช้คำนวณแบบ ZVD ได้มีการหา Derivative จากสมการที่ (6) และ (7) เทียบกับ ความถี่ของระบบ (ω) สามารถได้ Constraint ที่เรียกว่า Robustness uncertainties in Natural frequency ตามสมการที่ (14) และ (15) ซึ่ง Constraint แบบ Derivative สามารถเพิ่ม Robustness ให้กับระบบที่ส่งผลกับ Sensitivity ของความผิดพลาดในแบบจำลองทางพลศาสตร์ (Model error) แต่สิ่งที่ต้องแลกมากับการลดกระสั่นสะเทือนคือค่าเวลาหน่วง (Delay) ที่เพิ่มมากขึ้น

$$\sum_{i=1}^N A_i t_i e^{-\zeta \omega_n (t_n - t_i)} \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_i) = 0 \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^N A_i t_i e^{-\zeta \omega_n (t_n - t_i)} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_i) = 0 \quad (15)$$

ขั้นตอนการคำนวณมีลักษณะคล้ายกับแบบ ZV

1. กำหนดค่าเริ่มต้นของการคำนวณคือ $N = 3$, $A_1 = 1, t_1 = 0$ และ $\sum_{i=1}^N A_i = 1$
2. แทนค่าตัวแปรทั้งหมดลงในสมการที่ (6), (7), (14) และ (15) แทนค่า $N = 3$

$$\begin{aligned}
& A_1 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_1)} \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_1) + A_2 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_2)} \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2) \\
& + A_3 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_3)} \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_3) = 0
\end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
& A_1 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_1)} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_1) + A_2 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_2)} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2) \\
& + A_3 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_3)} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_3) = 0
\end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
& A_1 t_1 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_1)} \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_1) + A_2 t_2 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_2)} \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2) \\
& + A_3 t_3 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_3)} \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_3) = 0
\end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
& A_1 t_1 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_1)} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_1) + A_2 t_2 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_2)} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2) \\
& + A_3 t_3 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_3)} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_3) = 0
\end{aligned} \tag{19}$$

จากสมการที่ (16) ถึงสมการที่ (19) แทนค่าเริ่มต้นโดยกำหนด $A_1 = 1$, $t_1 = 0$ สามารถเขียนสมการที่ (16) ถึงสมการที่ (19) ใหม่ได้ดังต่อไปนี้

$$e^{-\zeta \omega_n (t_3)} + A_2 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_2)} \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2) + A_3 \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_3) = 0 \tag{20}$$

$$A_2 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_2)} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2) + A_3 \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_3) = 0 \tag{21}$$

$$A_2 t_2 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_2)} \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2) + A_3 t_3 \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_3) = 0 \tag{22}$$

$$A_2 t_2 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_2)} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2) + A_3 t_3 \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_3) = 0 \tag{23}$$

จากสมการที่ (21) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$A_3 \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_3) = -A_2 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_2)} \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2) \tag{24}$$

เมื่อได้สมการที่ (24) แล้วแทนค่าลงในสมการที่ (23) เพื่อหาค่า t_2

$$A_2 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_2)} (t_2 - t_3) \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2) = 0 \quad (25)$$

จากสมการที่ (25) เมื่อ $A_2 \neq 0$, $t_2 - t_3 \neq 0$ ดังนั้นเทอมของไซน์ในสมการที่ (25) ต้องมีค่าเท่ากับ 0

$$\sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2) = 0 \text{ นั่นคือ } \sin \theta = 0 \text{ เมื่อ } \theta = n\pi; \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, n \text{ แต่ } t_1 = 0$$

$$(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2) = \pi \quad (26)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (26) สามารถหาค่า $t_2 = \frac{\pi}{(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n)}$ แทนค่า t_2 ในสมการที่ (21) ได้สมการที่ (27) และนำสมการนี้หาค่า t_3

$$A_3 \sin(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_3) = 0 \quad (27)$$

$$\text{จากสมการที่ (27) เมื่อ } A_3 \neq 0 \text{ ดังนั้นจะได้ } t_3 = \frac{2\pi}{(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n)}$$

นำ t_2, t_3 แทนลงในสมการที่ (22) และทำให้อยู่ในรูปอย่างง่ายในสมการที่ (28)

$$\begin{aligned} & A_2 \frac{\pi}{(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n)} e^{-\zeta \omega_n \left(\frac{2\pi}{(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n)} - \frac{\pi}{(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n)} \right)} \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2) \\ & + A_3 \frac{2\pi}{(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n)} \cos(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n \frac{2\pi}{(\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n)}) = 0 \end{aligned}$$

$$A_3 = \frac{A_2}{2} e^{-\zeta\omega_n \left(\frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n} \right)} \quad (28)$$

นำ t_2 , t_3 และ A_3 แทนลงในสมการที่ (21) เพื่อหาค่า A_2

$$\begin{aligned} & e^{-\zeta\omega_n \left(\frac{2\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n} \right)} + A_2 e^{-\zeta\omega_n \left(\frac{2\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n} - \frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n} \right)} \cos\left(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n \frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n}\right) \\ & + \frac{A_2}{2} e^{-\zeta\omega_n \left(\frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n} \right)} \cos\left(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n \frac{2\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n}\right) = 0 \end{aligned} \quad (29)$$

จากสมการที่ (29) ดังนั้น $A_2 = 2e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$ จากนั้นนำค่า A_2 ไปแทนในสมการที่ (28) ได้

$$\text{ค่า } A_3 = e^{-\frac{2\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$$

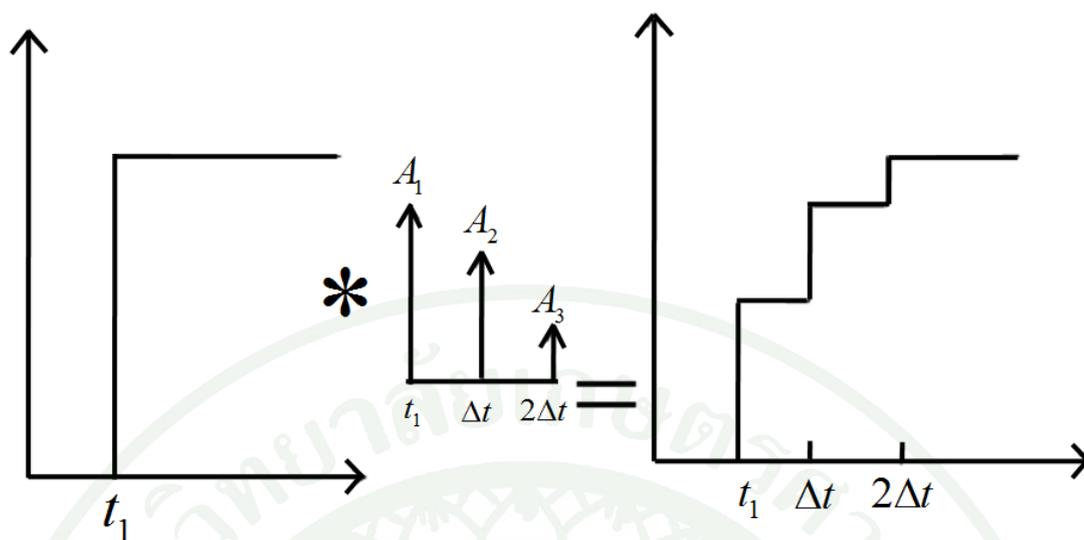
แทนค่าตัวแปร $K = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$ และ $\Delta t = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$ จาก $\sum_{i=1}^N A_i = 1$ จะได้

$$A_1 + A_2 + A_3 = 1$$

เขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ตามสมการที่ (30)

$$\left(\begin{array}{ccc} A_1 = \frac{1}{K^2 + 2K + 1} & A_2 = \frac{2K}{K^2 + 2K + 1} & A_3 = \frac{K^2}{K^2 + 2K + 1} \\ t_1 = 0 & t_2 = \Delta t & t_3 = 2\Delta t \end{array} \right) \quad (30)$$

จากภาพที่ 12 แสดงการประยุกต์ใช้งาน Input shaping แบบ ZVD กับสัญญาณควบคุมแบบ Step รูปทางด้านซ้ายมือแสดงสัญญาณควบคุมแบบ Step ทางด้านขวาเป็นรูปที่นำ Input shaping แบบ ZVD กับสัญญาณควบคุม

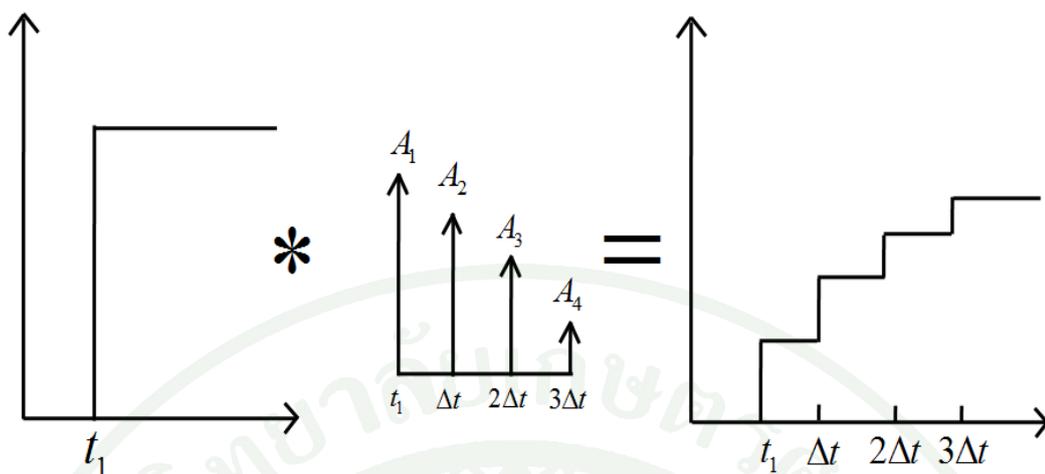


ภาพที่ 12 แสดงการประยุกต์ใช้งานเทคนิค Input shaping แบบ ZVD กับสัญญาณแบบ Step

Zero vibration and additional two derivative (ZVDD) คือเทคนิค Input shaping ที่ประกอบด้วยค่า Impulse 4 ซึ่ง Input shaping ในลักษณะนี้ได้ทำการเพิ่ม Constraint แบบ Double derivative การประยุกต์ใช้เทคนิคแบบนี้เหมาะกับระบบที่มี Sensitivity สูงมากแต่ค่าเวลาหน่วง (Delay) ก็มากขึ้นตาม ค่าแอมปริจูด (Amplitude) และเวลาของ Impulse แต่ละลูกสามารถแสดงได้ตามสมการที่ (31)

$$\begin{cases}
 A_1 = \frac{1}{K^3 + 3K^2 + 3K + 1} & t_1 = 0 \\
 A_2 = \frac{3K}{K^3 + 3K^2 + 3K + 1} & t_2 = \Delta t \\
 A_3 = \frac{3K^2}{K^3 + 3K^2 + 3K + 1} & t_3 = 2\Delta t \\
 A_4 = \frac{K^3}{K^3 + 3K^2 + 3K + 1} & t_4 = 3\Delta t
 \end{cases}
 \tag{31}$$

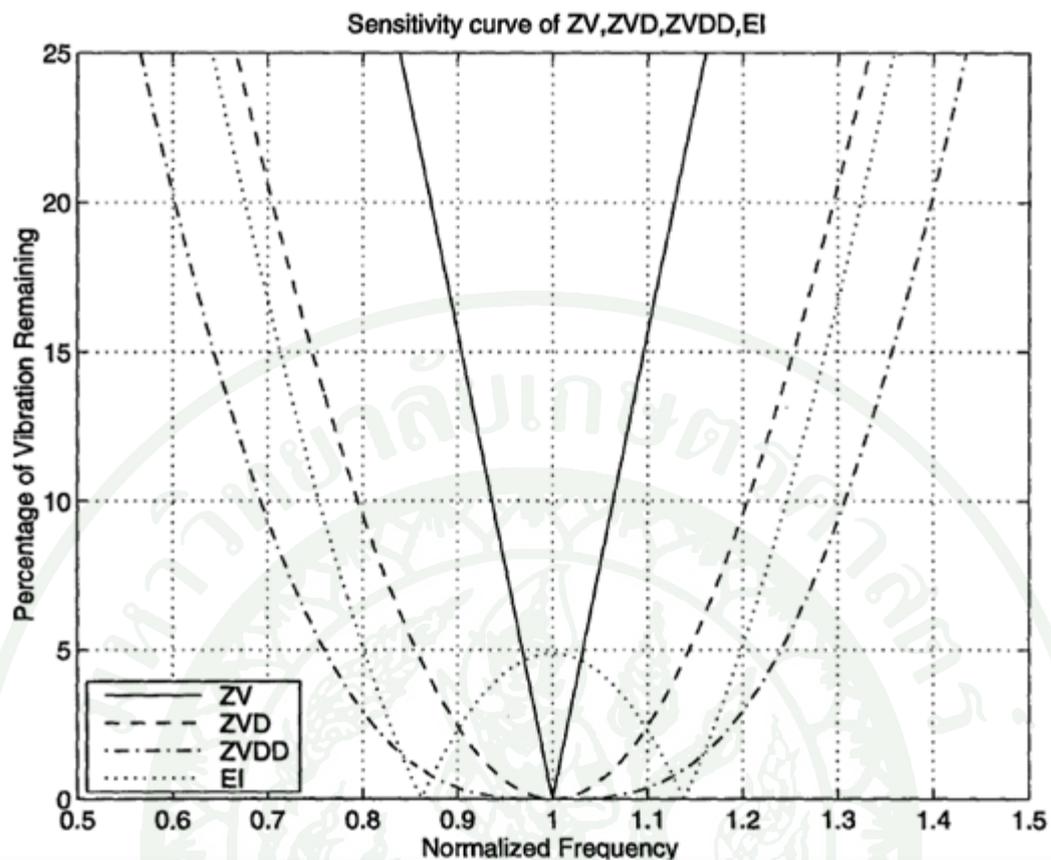
จากภาพที่ 13 แสดงการประยุกต์ใช้งาน Input shaping แบบ ZVDD กับสัญญาณควบคุมแบบ Step รูปทางด้านซ้ายมือแสดงสัญญาณควบคุมแบบ Step ทางด้านขวาเป็นรูปที่นำ Input shaping แบบ ZVDD กับสัญญาณควบคุม



ภาพที่ 13 แสดงการประยุกต์ใช้งานเทคนิค Input shaping แบบ ZVDD กับสัญญาณแบบ Step

Extra insensitive การคำนวณไม่เหมือนกับแบบ ZV, ZVD และ ZVDD แต่เป็นการกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์การการสั่นสะเทือนแทน ซึ่งการกำหนดเปอร์เซ็นต์ของการสั่นสะเทือนสามารถเลือกกำหนดตามความเหมาะสมหรือ ข้อกำหนดตามลักษณะการทำงานของระบบ

การหาค่า Sensitivity curve ของ ZV, ZVD, ZVDD และ แสดงได้ดังภาพที่ 14 ตัวกราฟ แกนแนว (Y axis) แสดงระดับของการสั่นสะเทือนเป็นเปอร์เซ็นต์ (Percentage of vibration) และ แกนเอ็กซ์ (X axis) แสดง Normalized frequency ในที่นี้คือ (frequency (ω)/natural frequency (ω_n)) เลขหนึ่งบนแกนเอ็กซ์คือจุดที่ความถี่เป็นความถี่เดียวกับความถี่ธรรมชาติ การได้มาซึ่งกราฟนี้เป็น การนำสมการที่ (3) หาค่าด้วยผลรวมของ A_j ซึ่งค่า Damping ratio คงที่จากกราฟพบว่าที่เปอร์เซ็นต์ การสั่นสะเทือนที่ 5% พบว่า Input shaping แบบ ZV ความผิดพลาดค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) อยู่ที่ประมาณ $\pm 4\%$ Input shaping แบบ ZVD ค่าผิดพลาดของความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) อยู่ที่ประมาณ $\pm 14\%$ Input shaping แบบ ZVDD ค่าผิดพลาดของความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) อยู่ที่ประมาณ $\pm 24\%$ ส่วน Input shaping แบบ EI ค่าผิดพลาดของความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) อยู่ที่ประมาณ $\pm 20\%$



ภาพที่ 14 แสดง Sensitivity curve ชนิดของ Input shaping กับเปอร์เซ็นต์การสั่นสะเทือน

ที่มา: Kristen Andrea Bohlke (1993)

ทฤษฎีบทคอนโวลูชัน (Convolution Theorem)

คอนโวลูชันสัญญาณนี้เป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบ โดยเฉพาะระบบการสื่อสาร นอกจากจะช่วยให้การทรานส์ฟอร์ม แล้วยังใช้ในทฤษฎีพหุคูณบิลิตีด้วย นิยามของคอนโวลูชันแสดงดังสมการ 31

$$x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t-\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} x(t-\tau)h(\tau)d\tau \quad (32)$$

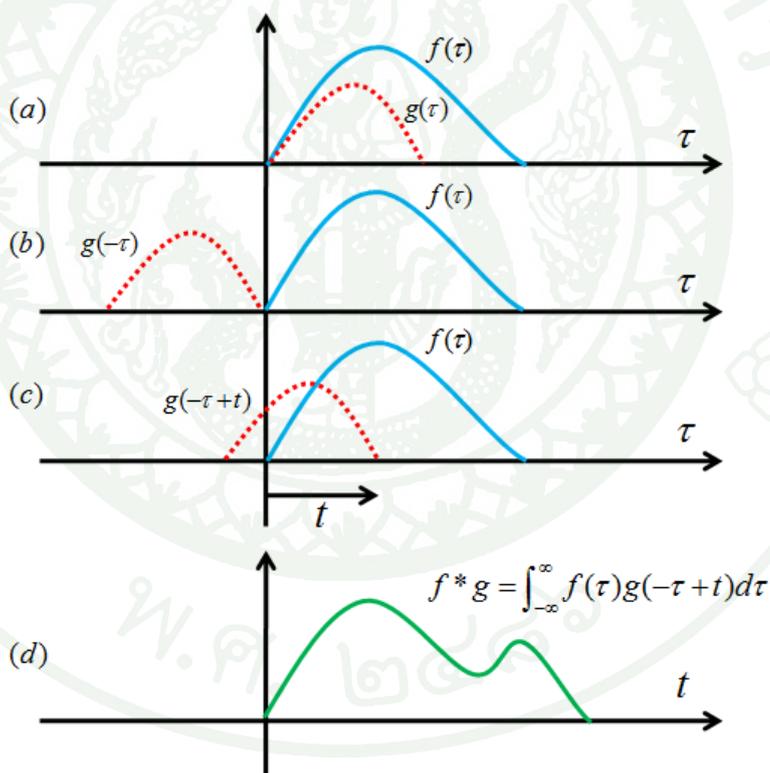
สัญลักษณ์ * แสดงคอนโวลูชันของสัญญาณทั้งสอง เป็นการอินทิเกรตสัญญาณทั้งสองดังสมการ 32 ทฤษฎีบทนี้ กล่าวไว้ว่าฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์มของสัญญาณที่คอนโวลูชันกันในทางเวลา จะได้เท่ากับผลคูณของฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์มของสัญญาณแต่ละตัว ดังสมการ 33

$$v * w(t) \leftrightarrow V(f)W(f) \quad (33)$$

ในทางกลับกันถ้าในอาณาจักรความถี่เป็นสัญญาณที่คอนโวลูชันกัน เมื่อหาฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์มกลับเพื่อให้เป็นสัญญาณทางเวลา จะได้เป็นผลคูณของค่าฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์มกลับของแต่ละสัญญาณดังสมการ 34

$$v(t)w(t) \leftrightarrow V * W(f) \quad (34)$$

จากความรู้ในคุณสมบัติของฟังก์ชันดังกล่าวเหล่านี้ สามารถนำไปช่วยในการวิเคราะห์สเปกตรัมโดยการหาฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์มสัญญาณ ในบางฟังก์ชันนั้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปผลรวมของฟังก์ชันที่ทราบค่าเหล่านี้ การหาฟูรีเยร์ทรานส์ฟอร์มจะทำได้ง่ายขึ้น



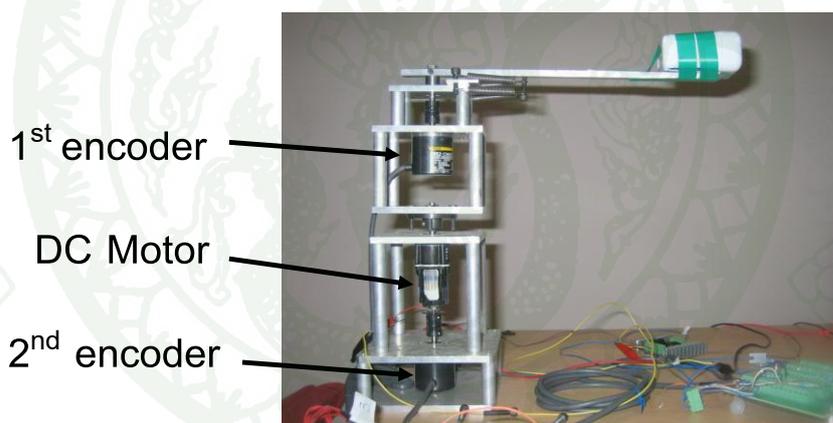
ภาพที่ 15 แสดงการ Convolution ระหว่างสัญญาณ 2 สัญญาณ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

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

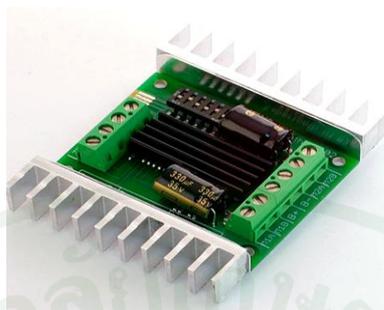
1. แขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้



ภาพที่ 16 แสดงแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้

แขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ที่ใช้ในการทดลองนี้ตั้งอยู่ที่ห้อง Control of robot and vibration Laboratory (CRV Lab) ตึก RDiPt ชั้น 5 โครงสร้างของแขนกลทำด้วยอลูมิเนียม แขนกลมีลักษณะการเคลื่อนที่ในแนวราบ ข้อต่อยืดหยุ่นโดยการติดสปริงทั้งสองข้างระหว่างแขนกลกับ Link ของแขนกล มี Encoder ตัวที่ 1 ที่ติดตั้งอยู่ส่วนบนของแขนกลทำหน้าที่ในการวัดมุมการเคลื่อนที่ของ Link และ Encoder ทั้งสองเป็นของ Omron รุ่น E6B2-CW26C ความละเอียด 2000 และ 360 P/R ตามลำดับ แขนกลจะถูกขับโดยมอเตอร์กระแสตรงมีอัตราทด 64:1 แสดงในภาพที่ 16

2. วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (Power amplifier)



ภาพที่ 17 แสดงวงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (Power amplifier)

วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงทำหน้าที่ขยายกระแสไฟฟ้าโดยอุปกรณ์นี้จะรับสัญญาณป้อนเข้าคือกระแสไฟฟ้าที่มีขนาด และ ปริมาณต่ำ และ จ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดและแรงดันสูงกว่า โดยใช้ศักย์ไฟฟ้า 0-18 Volt ทนกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องได้ 10 แอมแปร์ ทนกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ 15 แอมแปร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์ รุ่น Sabertooth2x10

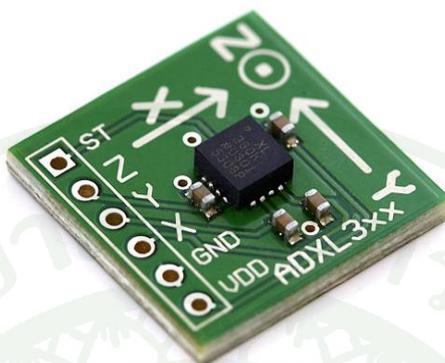
3. เอนโคดเดอร์ (Encoder)



ภาพที่ 18 แสดงเอนโคดเดอร์ ของ Omron รุ่น E6B2-CW26C

เอนโคดเดอร์ (Encoder) คือ เป็นอุปกรณ์วัดตำแหน่งที่อาศัยการยิงลำแสงผ่านแถบมีด-สว่างและส่งสัญญาณเป็นดิจิทัล แขนกลแบบมีข้อต่อยึดหุ่นจะมี 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

4. Accelerometer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับค่าความเร่งเชิงมุม ค่าที่ได้จะเป็นค่าสัญญาณต่อเนื่อง (Analog) อุปกรณ์นี้ใช้สำหรับค่าความถี่ธรรมชาติ



ภาพที่ 19 แสดง Accelerometer

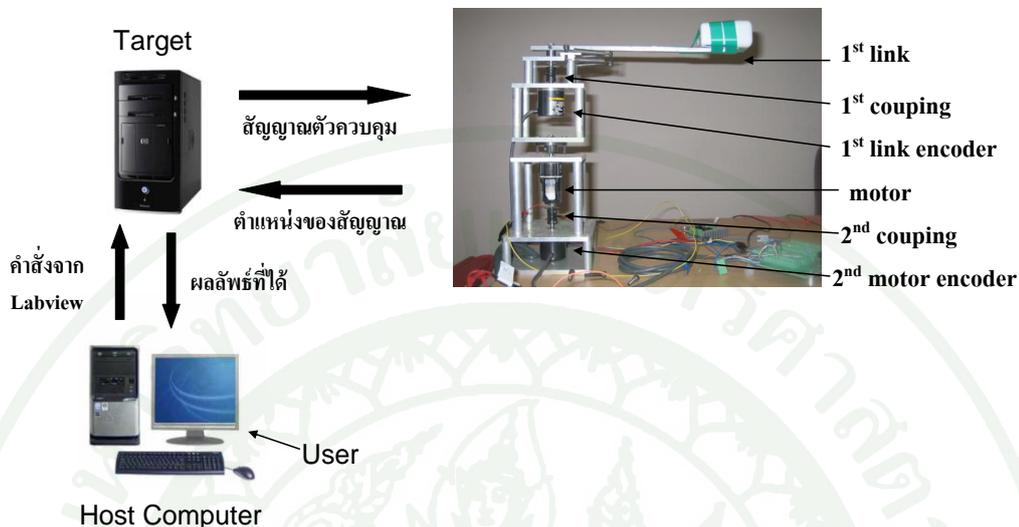
5. Target computer คือคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมของระบบการทำงานของแขนกล ใน Target computer จะถูกติดตั้งการ์ดรับส่งข้อมูล (Data acquisition) NI PCI 6221 ทำหน้าที่รับส่งสัญญาณอนาล็อก และ ดิจิตอล Target Computer นี้ติดตั้งโปรแกรม Labview realtime OS และ Labview ETS



ภาพที่ 20 แสดงการ์ดรับส่งข้อมูล (Data acquisition) NI PCI 6221

4. Host computer คือคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างแอปพลิเคชัน และ Host computer ได้ติดตั้งโปรแกรม Labview realtime โปรแกรม Labview control โปรแกรม Labview simulation และโปรแกรม Matlab

5. แหล่งจ่ายไฟได้ใช้ Power supply GW INSTEK รุ่น GPS-3030D



ภาพที่ 21 แสดงโครงสร้างระบบทั้งหมดที่ใช้ทำการทดลอง

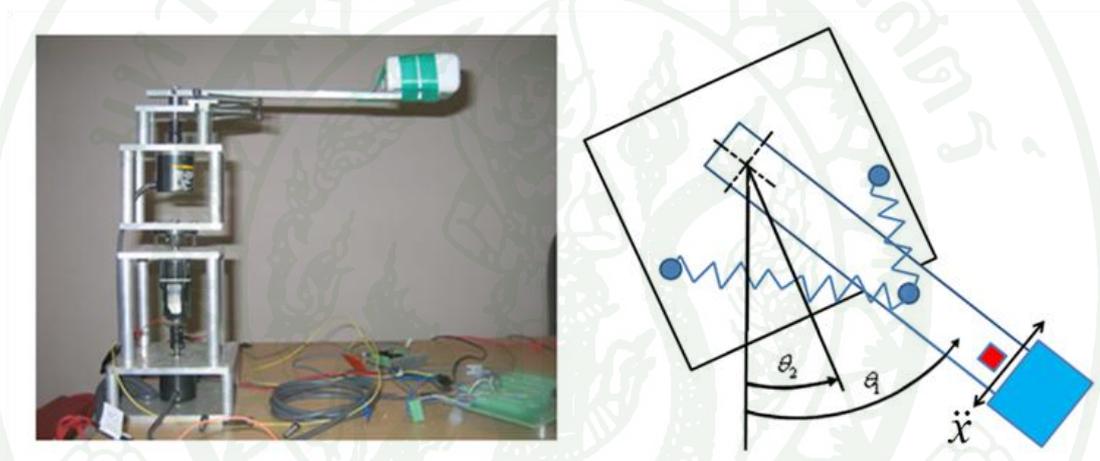
ภาพที่ 16 ได้แสดงโครงสร้างทั้งหมดที่ใช้ทำการทดลองประกอบด้วยแขนกลแบบมีข้อต่อ ยึดหุ่นยนต์ทำมาจากอลูมิเนียม ตัวของแขนกลก็มีส่วนประกอบต่างๆ คือ Link ของแขนกลทำจาก แท่งอลูมิเนียมและติดมวลไว้ด้านบน คัปปลิงทำหน้าที่ลดความเสียหายเมื่อเกิดอุบัติเหตุจากการชน เอนโคเดอร์ คือ อุปกรณ์วัดตำแหน่งของแขนกลที่ส่งสัญญาณเป็นดิจิทัล แขนกลจะมี Encoder ตัวที่ 1 ที่ติดตั้งอยู่ส่วนบนของแขนกลทำหน้าที่ในการวัดมุมการเคลื่อนที่ของ Link และ Encoder ตัวที่ 2 ที่ติดตั้งอยู่ส่วนล่างของฐานแขนกลทำหน้าที่ในการวัดมุมการเคลื่อนที่ของ Hub แขนกลจะ ถูกขับโดยมอเตอร์กระแสตรง

การประมวลผล และการควบคุมแขนกลนั้นจะมีคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็น Host computer และ Target computer โดยคอมพิวเตอร์ทั้งสองจะเชื่อมต่อกันผ่านทางสาย LAN ภายใน Target computer จะถูกติดตั้งการ์ดรับส่งข้อมูลซึ่งจะทำหน้าที่รับตำแหน่งต่างๆ จากอุปกรณ์ตรวจรู้ที่ได้ จากแขนกล และ ในทางกลับกัน Target Computer ก็จะทำการส่งสัญญาณการควบคุม ไปยังแขนกล ในส่วนของผู้ใช้นั้นก็จะเป็น Host computer ซึ่งจะทำหน้าที่แสดงผลที่ได้จาก Target computer และ ทำการอัปเดตคำสั่งต่างๆ ของผู้ใช้งานผ่านทาง Host computer

วิธีการ

1. การสร้างแบบจำลองของแขนกลข้อต่อยืดหยุ่น

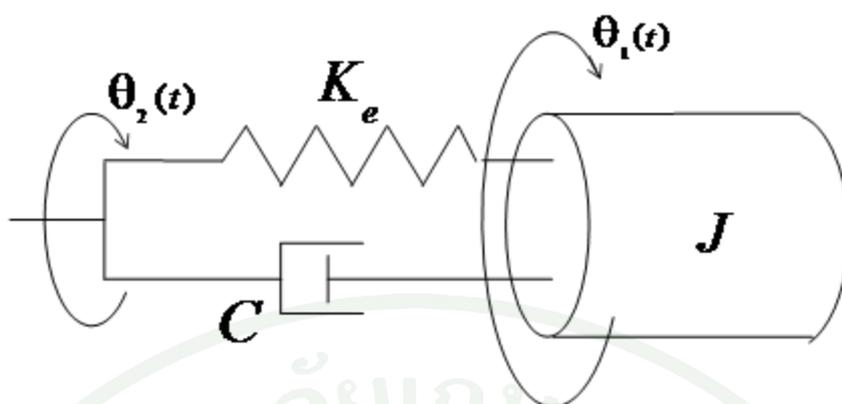
แขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้จะมีการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ เมื่อแขนกลเกิดการเคลื่อนที่มุมของ Link แขนกลที่หมุนไปจะถูกวัดโดย Encoder ตัวที่ 1 ที่ทำการติดตั้งอยู่บริเวณส่วนบนของแขนกล และมุมของ Hub แขนกลที่หมุนไปจะถูกวัดโดย Encoder ตัวที่ 2 ที่ติดตั้งอยู่บริเวณด้านล่างของล่างฐานดังแสดงในภาพที่ 17 เป็นโครงสร้างของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ที่ใช้ในการทดลองซึ่งตั้งอยู่ที่ห้อง Control of robot and vibration laboratory (CRV Lab) ตึก RDiPT ชั้นที่ 5



ภาพที่ 22 แสดงโครงสร้างของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นได้

2. การหาค่าเอกลักษณ์ของระบบ (System identification)

จากภาพที่ 22 สามารถเขียนไดอะแกรม (Diagram) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมของตัว Hub (θ_1) และ มุมของ Link (θ_2) ของการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นแสดงได้ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม θ_1 และ θ_2

จากภาพที่ 23 สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ (Equation of motion) โดยใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton second law) ได้ดังนี้

$$J\ddot{\theta}_1(t) + C(\dot{\theta}_1(t) - \dot{\theta}_2(t)) + K_e(\theta_1(t) - \theta_2(t)) = 0 \quad (35)$$

ทำการแปลงลาปลาซแล้วเขียนในรูปฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ระหว่างมุม θ_1 และ θ_2

$$Js^2\theta_1(s) + Cs\theta_1(s) + K_e\theta_1(s) = Cs\theta_2(s) + K_e\theta_2(s) \quad (36)$$

$$\frac{\theta_1(s)}{\theta_2(s)} = \frac{Cs + K_e}{Js^2 + Cs + K_e} \quad (37)$$

จัดรูปสมการที่ 37

$$P = \frac{\Theta_1(s)}{\Theta_2(s)} = \frac{\frac{1}{C} \left(s + \frac{K_e}{C} \right)}{\frac{1}{J} \left(s^2 + \frac{C}{J} s + \frac{K_e}{J} \right)}$$

$$P = \frac{\Theta_1(s)}{\Theta_2(s)} = \frac{K(s+A)}{(s^2 + Bs + D)} \quad (38)$$

$$\text{กำหนด } K = \frac{J}{C}, A = \frac{K_e}{C}, B = \frac{C}{J} \text{ และ } D = \frac{K_e}{J}.$$

ในส่วนนี้จะเป็นการทดลองทำการเก็บค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ระหว่างมุม θ_1 และ θ_2 ของแกนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่น เช่น เซอร์ที่ใช้วัดค่ามุมของการเคลื่อนที่ในการทดลองนี้ใช้เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) ขนาดความละเอียด 2000 เส้นต่อ 1 รอบ ในส่วนของการขับเคลื่อนและการวัดสัญญาณในการทดลองนี้ทั้งในส่วนของสัญญาณอินพุต (Input signal) และ สัญญาณขาออก (Output signal) ของระบบแกนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น ใช้โปรแกรม LabView การทดลองใช้เป็นการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) โดยใช้ ตัวควบคุมแบบ PID อย่างง่าย ทำการป้อนสัญญาณไซน์ (Sinusoidal wave) ซึ่งมีค่าแอมพลิจูด (Amplitude) คงที่เท่ากับ 30 องศา แต่มีการปรับค่าความถี่ของสัญญาณไซน์ ซึ่งลักษณะของสัญญาณไซน์ที่ใช้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดในการหาเอกลักษณ์ของระบบ

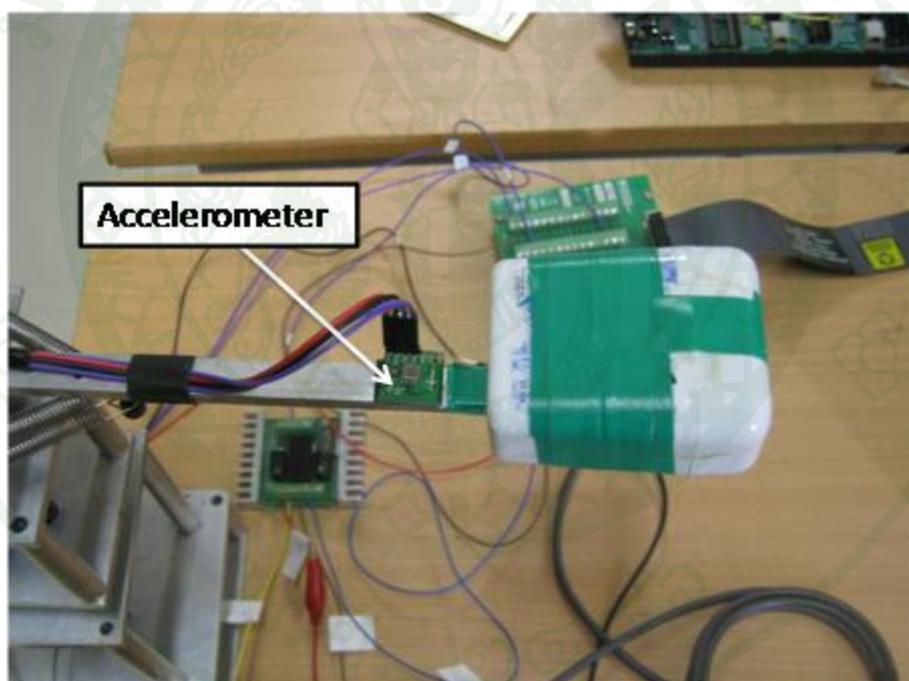
ตัวแปร	เท่ากับ
Amplitude	30
Frequency	เริ่มต้นจาก 0.01 จนถึง 0.5 Hz
Sampling Time	0.05 sec
Time	50 sec
Proportional Control (Kp)	0.05
bias	2.5

3. การหาความถี่ธรรมชาติของระบบ ในการทดลองนี้ใช้ตัววัดความเร่ง (Accelerometer) สามารถกำหนดขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

3.1 ทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งเชิงมุม (Accelerometer) ดังแสดงในภาพที่ 23

3.2 ให้สัญญาณ Sine Wave กับมอเตอร์ โดยสร้างช่วงความถี่ 0.01-0.5 Hz แอมพลิจูดที่ 30 องศา สัญญาณที่ Accelerometer วัดได้จะเป็นค่าความเร่งในแนวตั้งจากกับ Link ของแกนกล และเป็นสัญญาณแบบต่อเนื่อง (Analog signal)

3.3 นำค่าที่เก็บได้จาก Accelerometer ในรูปของ Text file ไปหาความถี่ธรรมชาติของแกนกลจากโปรแกรม Matlab โดยใช้วิธี Fast Fourier Transform (FFT) แสดงได้ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 24 แสดงการติดตั้งตัววัดความเร่งกับแกนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น

4. การออกแบบเทคนิค Input shaping แบบ ZVD

เทคนิค Input shaping เป็นเทคนิคที่ใช้ลดการสั่นสะเทือน โดยการจัดรูปแบบของสัญญาณการเคลื่อนที่ โดยการใส่อนุกรมของ Impulse เข้าไปในระบบเพื่อให้หักล้างกับ Free vibration ที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของแกนกล การใช้งานเทคนิค Input shaping อยู่นอก Loop ของการควบคุม ดังนั้นเทคนิคนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้กับเทคนิคการควบคุมแบบอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจุดแข็งของเทคนิคนี้คือมีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานในลักษณะที่เป็นแบบ Real time หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคืองานที่มีมนุษย์คอยควบคุมสั่งการโดยตรง

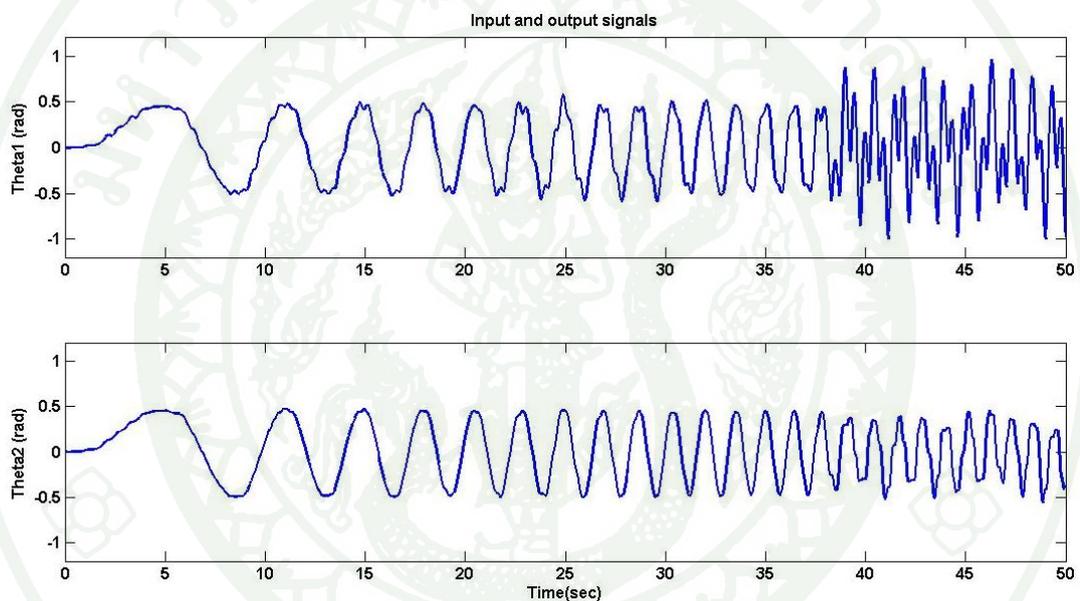
ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เทคนิค Input shaping แบบ ZVD ที่มี 3 Impulse เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ที่หามาได้ในส่วนของการหาเอกลักษณ์ของระบบ (System identification) มีการกระจายตัวไม่มาก ในกรณี que เลือก Input shaping แบบ ZVDD จะทำให้ระบบเกิดเวลาหน่วง (Delay) มาก หรือถ้าใส่ Input shaping แบบ ZV การลดการสั่นสะเทือนอาจจะให้ผลที่ไม่ดีนักเนื่องจากระบบมี Sensibility เกินกว่า $\pm 4\%$ เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 14 พบว่าค่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเกิน 5 %

5. ในส่วนของการทดลองเป็นการทดลองให้มนุษย์ควบคุมแกนกลแบบข้อต่อยึดหุ่นด้วยมือ ในระหว่างการทดลองมีการปิด และ เปิดใช้เทคนิค Input shaping

ผลและวิจารณ์

ผล

1. จากตารางที่ 1 ช่วงของการเปลี่ยนความถี่ที่ใช้ทำการทดลองตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.5 Hz ค่าแอมพลิจูดที่ใช้ คือ 30 ใช้เวลาในการทดลอง 50 วินาที และผลที่ได้การทำ System ID แสดงในภาพที่ 25 โดยที่ภาพบนแสดงการเคลื่อนที่ของ Link ของแขนกล (θ_1) และภาพล่างแสดงการเคลื่อนที่ของ Hub ของแขนกล (θ_2)



ภาพที่ 25 แสดงสัญญาณเข้าและสัญญาณขาออกของระบบ

การหาค่าพารามิเตอร์ของระบบในการทดลองนี้ใช้ Tools box ของโปรแกรม Matlab เลือกการวิเคราะห์ข้อมูล ใช้วิธี Process model จากสมการที่ 38 จากการหาเอกลักษณ์ของระบบ สามารถกำหนดช่วงความไม่แน่นอนของตัวแปรต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

$$P = \frac{\Theta_1(s)}{\Theta_2(s)} = \frac{K(s+A)}{(s^2 + Bs + D)}$$

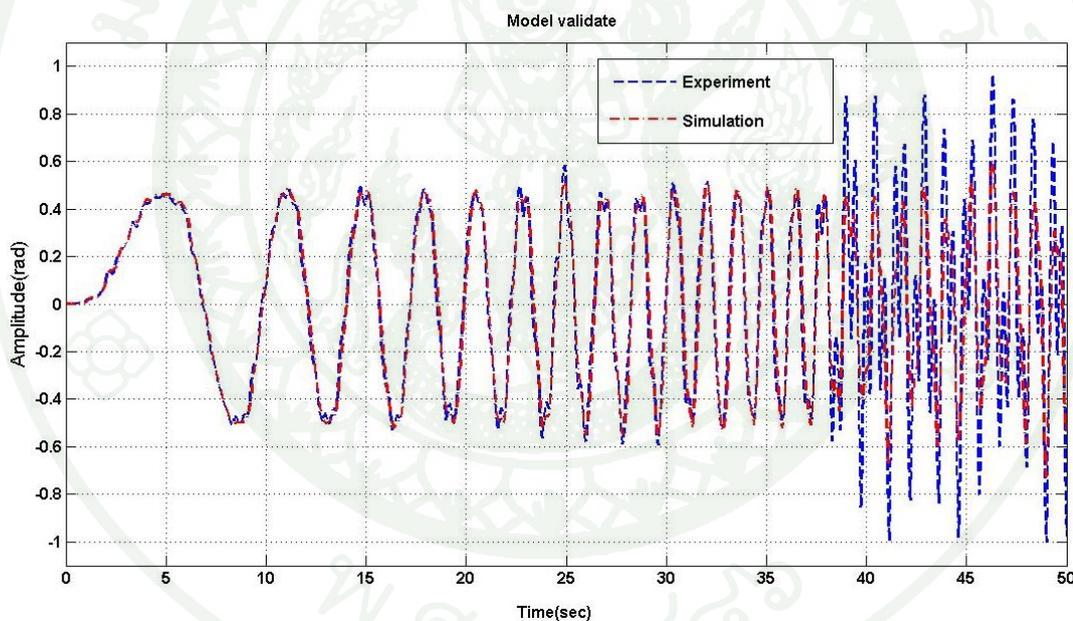
$$K = \begin{bmatrix} 5.634 & 6.25 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 24.75 & 26.72 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 3.25 & 4.143 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 154.78 & 162.31 \end{bmatrix}$$

เลือกค่าที่เป็นค่ากลาง ซึ่งจะได้ Damping ratio เท่ากับ 0.14

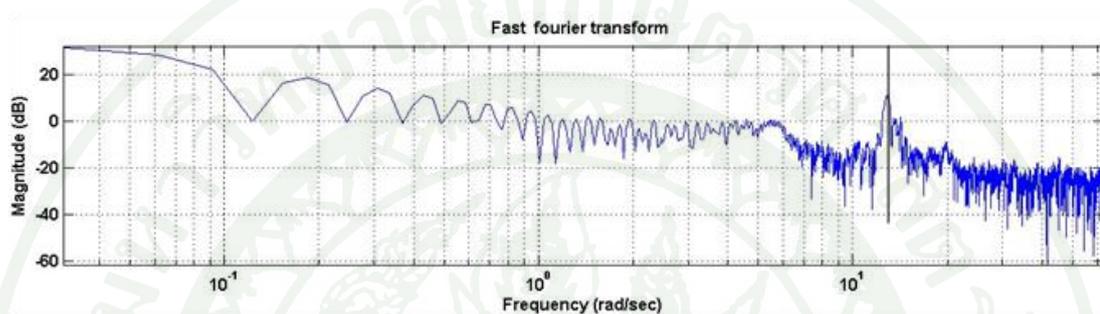


ภาพที่ 26 แสดงตัวอย่างผลการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นจากแบบจำลองแขนกลกับแขนกลจริง

ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบมีข้อต่อยืดหยุ่นได้ ดังแสดงในภาพที่ 26 เส้นจุดไข่ปลาสีแดงคือผลการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกล ส่วนเส้นปะสีน้ำเงินคือผลการเคลื่อนที่จริงของแขนกล ผลจากการจำลองการเคลื่อนที่นั้นมีความถูกต้อง โดยเฉลี่ย 85.12% ซึ่ง

นับว่าเป็นค่าที่มีความถูกต้องในเกณฑ์ที่ดี แต่ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ผลที่คลาดเคลื่อนไปอันเนื่องมาจาก Uncertain payload ที่ติดไว้ปลายแขนกล

2. จากภาพที่ 24 นำค่าที่เก็บได้จาก Accelerometer ในรูปของ Text file ไปหาความถี่ธรรมชาติของ แขนกลจากโปรแกรม Matlab โดยใช้วิธี Fast Fourier Transform (FFT) แสดงได้ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 แสดงผลการหาความถี่ธรรมชาติโดย FFT

ภาพที่ 27 แสดงผลของความถี่ธรรมชาติของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น มีค่าอยู่ที่ประมาณ 10.3 rad/sec เนื่องจากระบบของเรามี DOF เท่ากับ 2 ค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลจะต้องมีสองความถี่ธรรมชาติ แต่จากการทำการทดลองหลายครั้ง โหมดความถี่ธรรมชาติที่ได้มีค่าเดียว เนื่องจากความถี่ธรรมชาติที่ได้นั้นเป็นค่าความถี่ธรรมชาติของสปริงที่ยึดติดกับ Link และอีกค่าเป็นความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์ ซึ่งค่าความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์มีค่ามากกว่าความถี่ธรรมชาติของสปริง ซึ่งเป็นสาเหตุที่เราไม่สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติของมอเตอร์ออกมาได้

3. การคำนวณเทคนิค Input shaping แบบ ZVD สามารถหาคำนวณได้จากสมการที่ (30) โดยที่ค่า Damping ratio มีค่าเท่ากับ 0.14 และความถี่ธรรมชาติที่ใช้มีค่าเท่ากับ 10.3 rad ,

$$K = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \text{ และ } \Delta t = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$$

$$A_1 = \frac{1}{K^2 + 2K + 1} = \frac{1}{e^{-\frac{2\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + 2e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + 1} = 0.3471$$

$$A_2 = \frac{2K}{K^2 + 2K + 1} = \frac{2e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}}{e^{-\frac{2\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + 2e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + 1} = 0.4841 \quad (39)$$

$$A_3 = \frac{K^2}{K^2 + 2K + 1} = \frac{e^{-\frac{2\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}}{e^{-\frac{2\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + 2e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + 1} = 0.1688$$

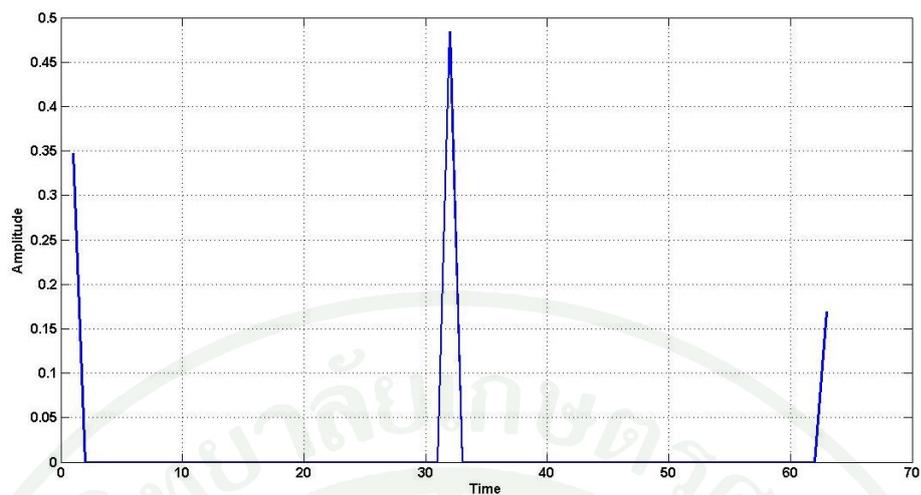
เวลาของ Impulse แต่ละลูกมีดังต่อไปนี้

$$t_1 = 0$$

$$t_2 = \Delta t = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} = 0.3079 \quad (40)$$

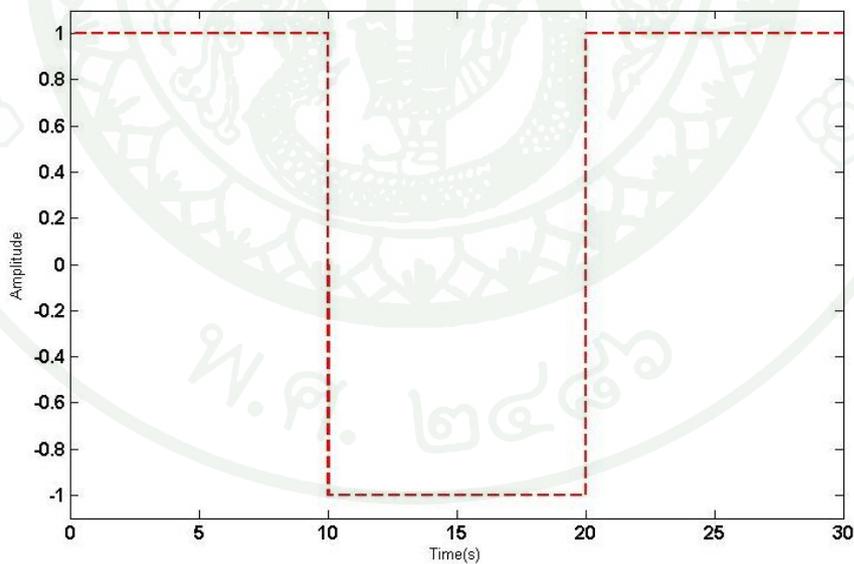
$$t_3 = 2\Delta t = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} = 0.6158$$

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง Impulse แต่ละลูกกับเวลาที่กระทำในแต่ละช่วงสามารถ
แสดงได้ดังภาพที่ 29

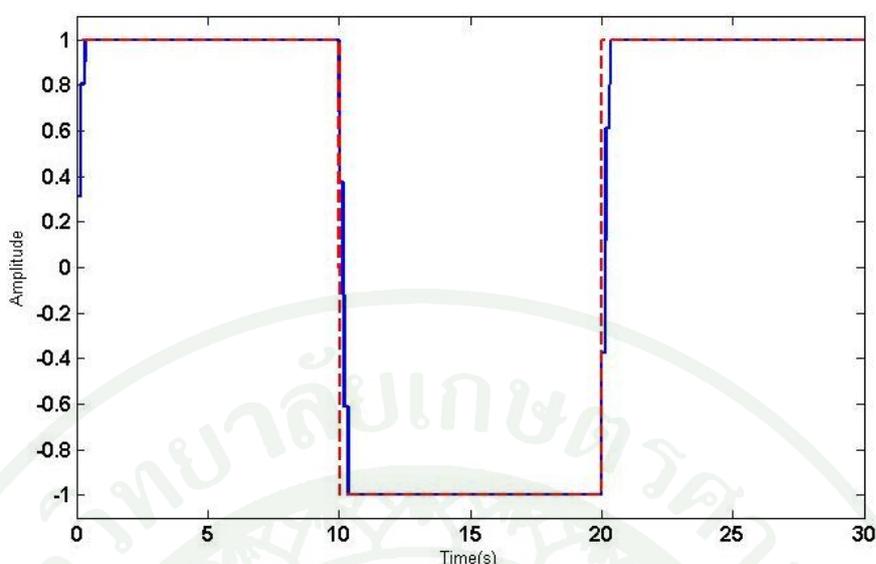


ภาพที่ 28 แสดงภาพของ Impulse ที่กระทำ ณ เวลาต่างๆ

ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานของเทคนิค Input shaping กับ Square wave ภาพที่ 29 แสดงภาพของ Square wave ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน (Simulation) การจำลองนี้ใช้ Square wave ที่มีแอมพลิจูด (Amplitude) เท่ากับ 1 rad และความถี่ที่ใช้เท่ากับ 0.05 Hz



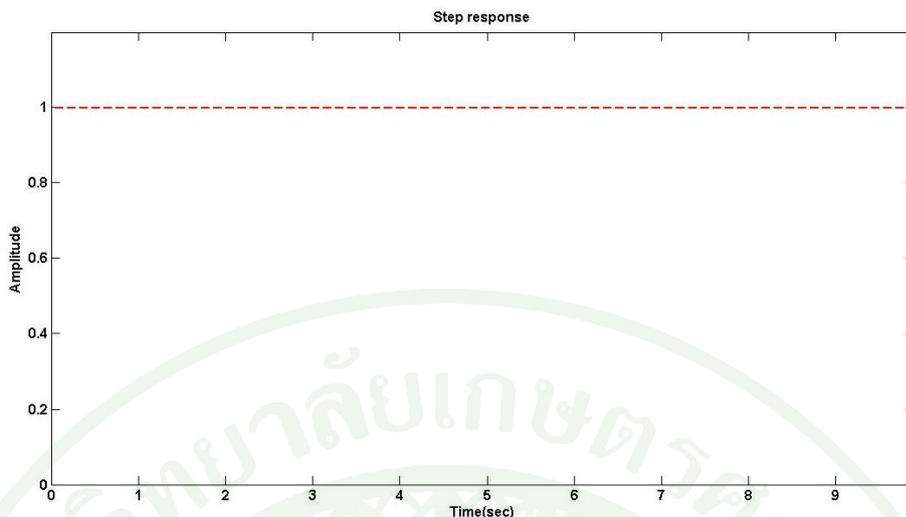
ภาพที่ 29 แสดงรูปของ Square wave ที่ใช้จำลองการเคลื่อนที่



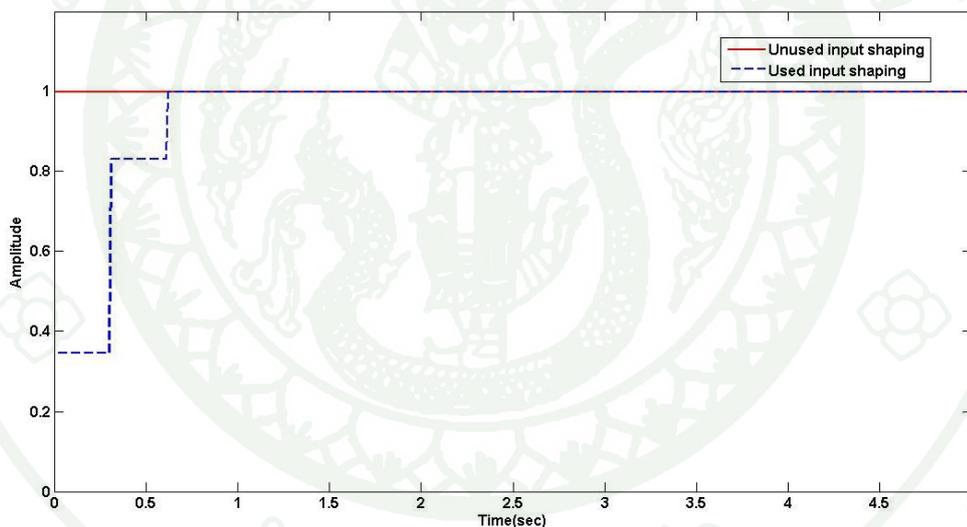
ภาพที่ 30 แสดงการประยุกต์ใช้เทคนิค Input shaping กับ Square wave

จากภาพที่ 30 แสดงการใช้เทคนิค Input shaping แสดงในภาพด้วยเส้นทึบสีน้ำเงิน กับการเคลื่อนที่แบบ Square wave แสดงในภาพด้วยเส้นประสีแดง จากภาพแสดงให้เห็นว่ามีจำนวน Impulse และช่วงเวลาที่กระตุ้นต่างกัน 3 ช่วงเวลา ทุกการเคลื่อนของ Square wave

เมื่อทำการจำลองการทำงานด้วย Step response ที่แสดงได้ดังภาพที่ 31 ค่า Amplitude ที่ใช้มีหน่วยเป็น rad เมื่อทำการประยุกต์ใช้เทคนิค Input shaping กับสัญญาณควบคุม สัญญาณควบคุมใหม่ที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับตัวสัญญาณเดิมสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 32 จากภาพ เส้นประสีน้ำเงิน แสดงให้เห็นเส้นทางการเคลื่อนใหม่ที่มีการประยุกต์ตัว Input shaping เข้าไปในสัญญาณควบคุม ส่วนเส้นทึบสีแดงคือตัวสัญญาณดั้งเดิม

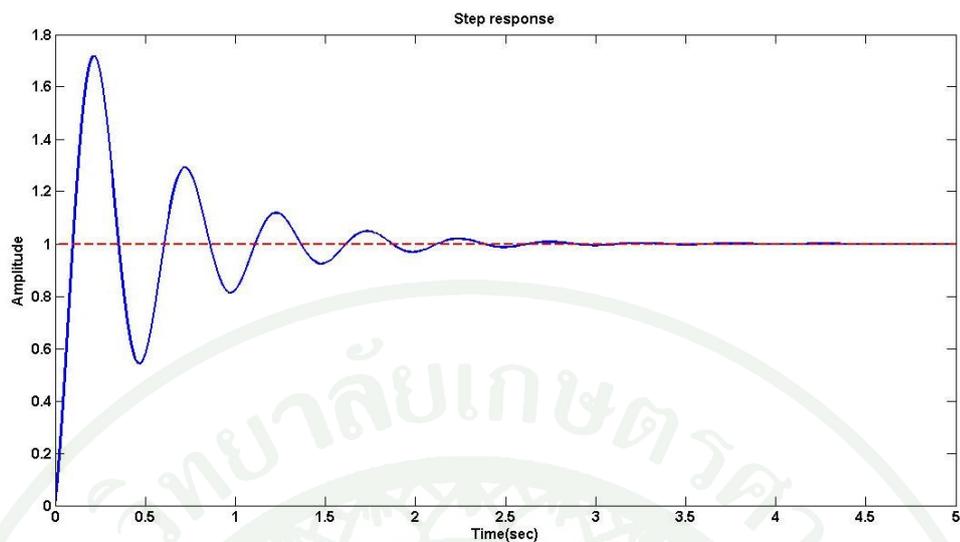


ภาพที่ 31 สัญญาณควบคุมแบบ Step

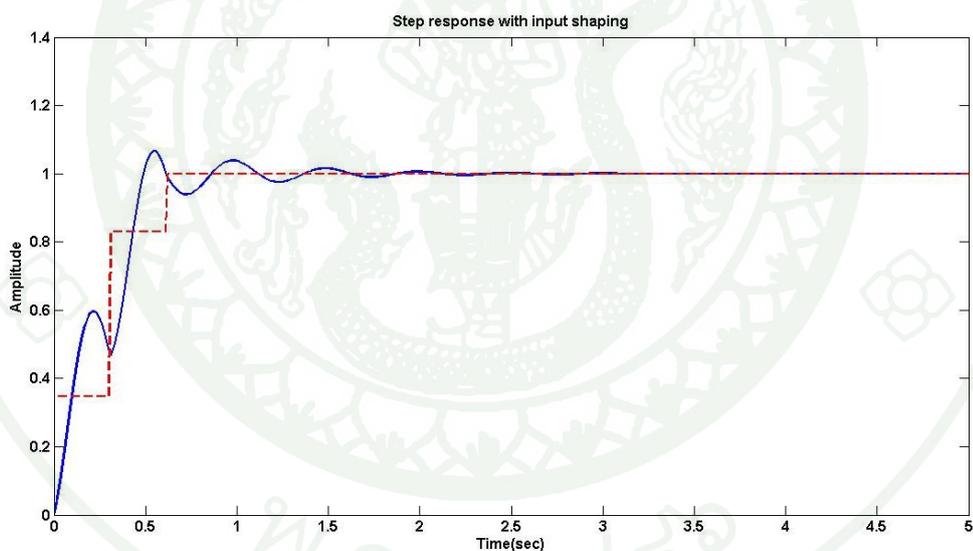


ภาพที่ 32 แสดงภาพสัญญาณควบคุมแบบ Step ที่ได้ Input shaping แบบ ZVD

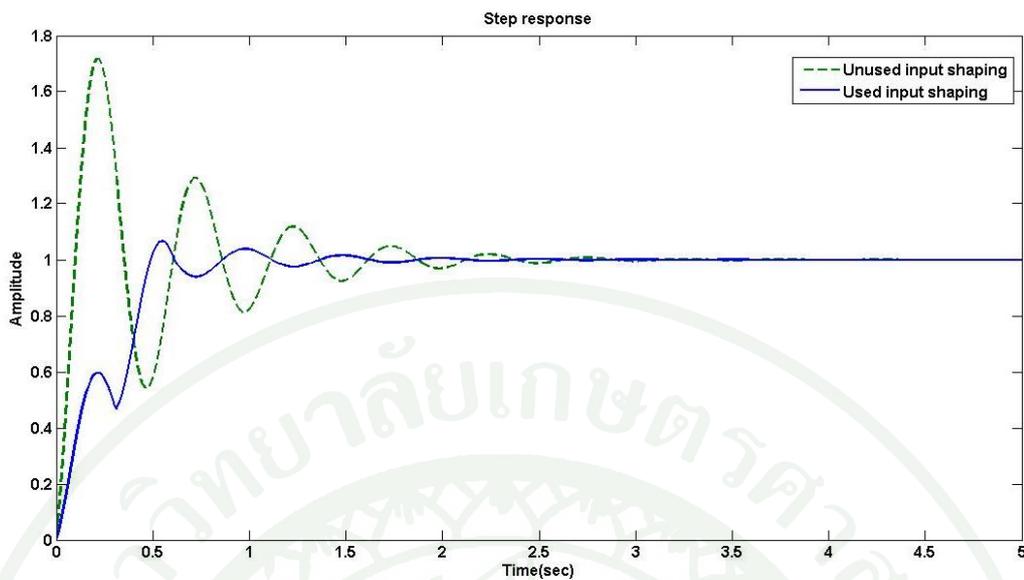
จากนั้นทำการดูผลตอบสนองของระบบเมื่อไม่ใช้เทคนิค Input shaping สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 33 จากภาพพบว่าระบบเกิดการสั่นสะเทือนในการทำงานมาก มีค่า Over shoot ที่ 71.1% เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 34พบว่าเมื่อทำการใส่เทคนิค Input shaping เข้าไปในสัญญาณควบคุมการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระบบลดน้อยลงอย่างมากสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 34 ซึ่งค่า Over shoot ที่เกิดขึ้นในการทำงานของสัญญาณควบคุมนี้อยู่ที่ประมาณ 6.6% เมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการทำงานสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 35



ภาพที่ 33 แสดง Step response ของระบบ

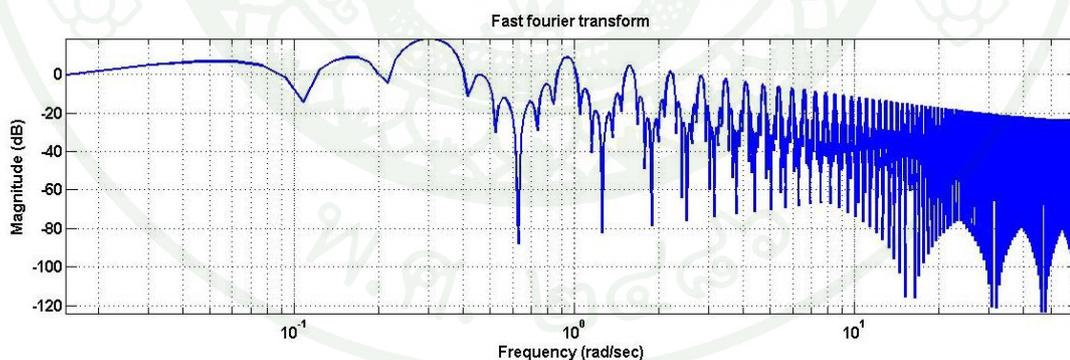


ภาพที่ 34 แสดง Step response ของสัญญาณควบคุมแบบประยุกต์ใช้เทคนิค Input shaping



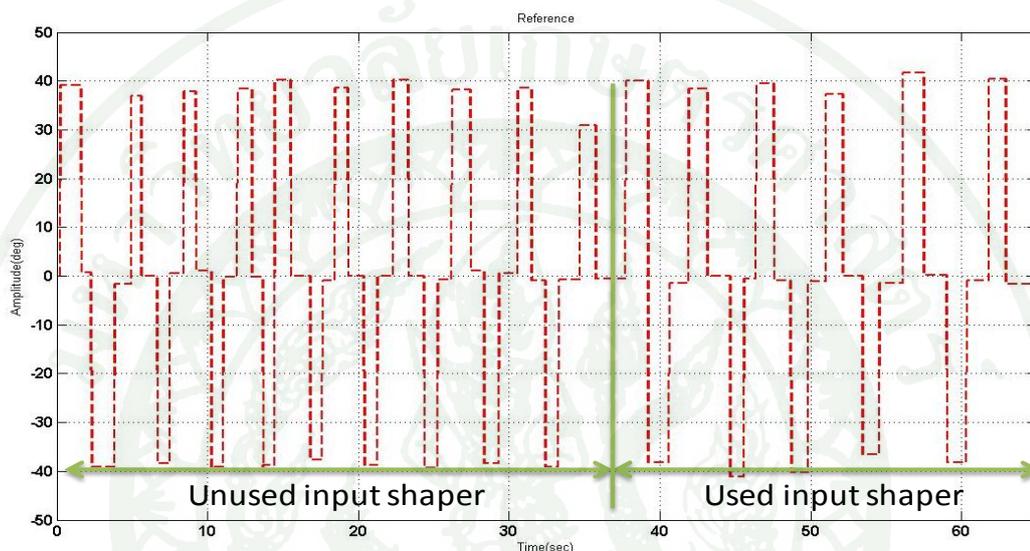
ภาพที่ 35 แสดงการเปรียบเทียบของ Step response ของระบบที่ใช้เทคนิค Input shaping กับไม่ใช่

เมื่อจำลองการทำงานโดยใช้ Fast fourier transform (FFT) เพื่อดูการกระจายตัวของความถี่สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 36 จากภาพพบว่าความถี่ ณ จุด 10.3 rad พลังงานกระตุ้นถูกนำออกไปทำให้ระบบไม่เกิดการสั่นสะเทือน

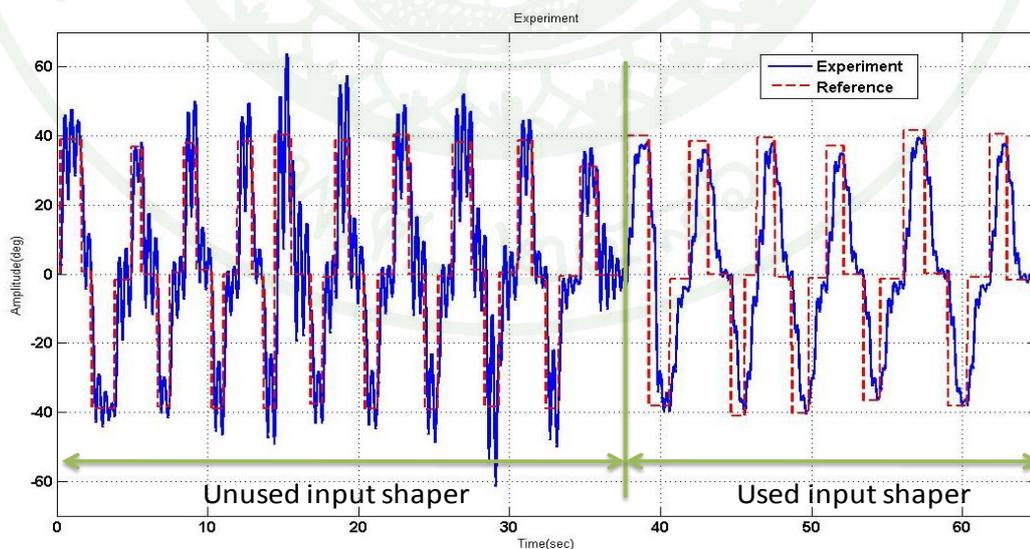


ภาพที่ 36 แสดงผลการแปลง FFT ของ Input shaping กับตัวสัญญาณควบคุม

4. ในส่วนของการทดลองเป็นการทดลองให้มนุษย์ควบคุมแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่นด้วยมือ ในระหว่างการทดลองมีการปิด และ เปิดใช้เทคนิค Input shaping ในระบบควบคุม ในภาพที่ 37 กราฟทางด้านซ้ายมือ เป็นกราฟเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบควบคุม ที่ยังไม่นำเทคนิค Input shaping เข้ามาประยุกต์ใช้ ส่วนกราฟทางด้านขวามือ ตั้งแต่เวลาประมาณ 37 วินาที เป็นการเปิดใช้เทคนิค Input shaping กับระบบควบคุม

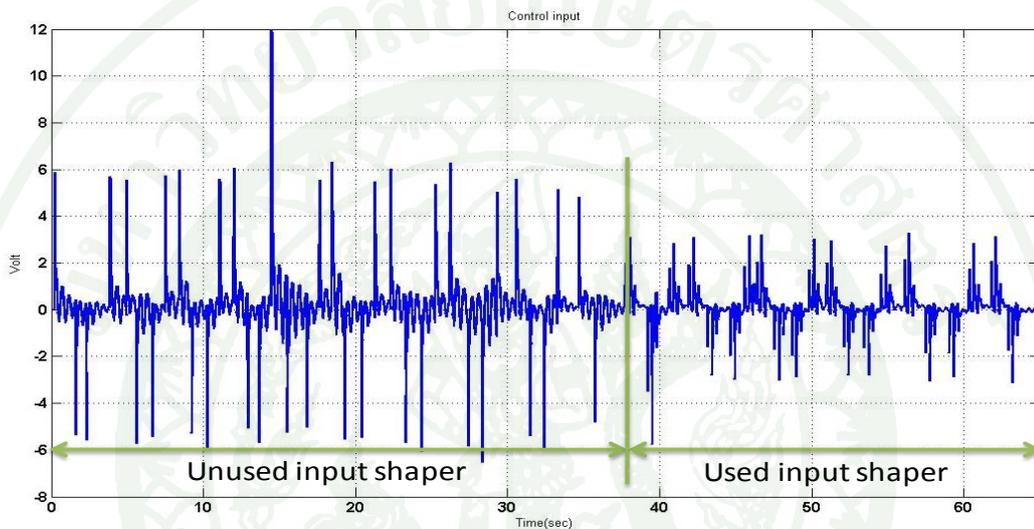


ภาพที่ 37 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น โดยมีมนุษย์คอยควบคุม



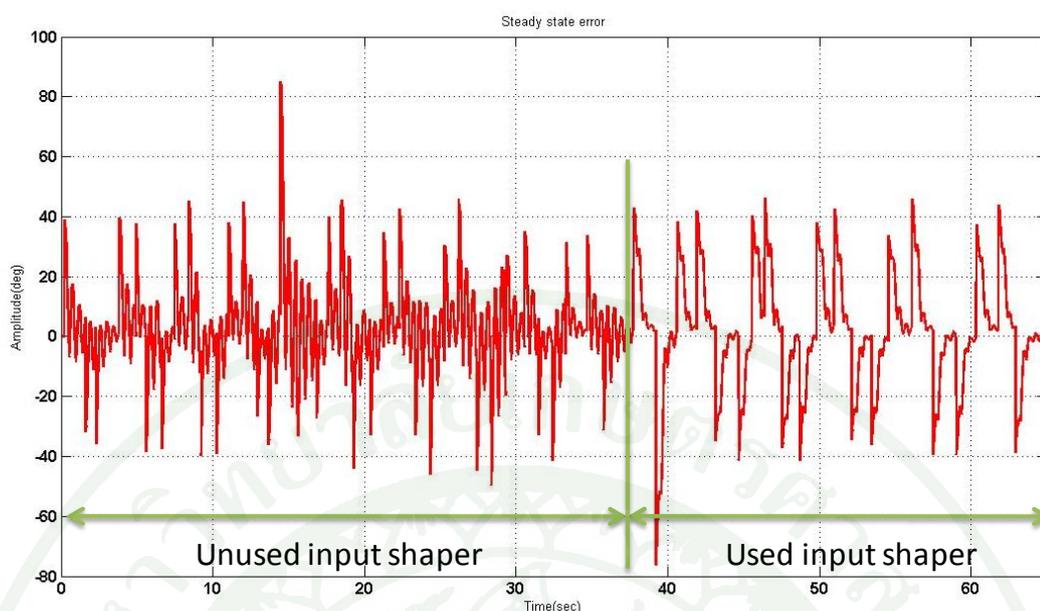
ภาพที่ 38 แสดงผลการทดลองระหว่างการใช่ และไม่ใช่เทคนิค Input shaping

ภาพที่ 38 แสดงผลการทดลองการทดลอง ทั้งในส่วนของการปิดใช้งานเทคนิค Input shaping และการเปิดใช้งานเทคนิค Input shaping จากกราฟเส้นที่บ่งชี้ว่าเงินกราฟที่ได้จากการทดลอง ส่วนของเส้นประสีแดงเป็นกราฟของสัญญาณควบคุมที่บังคับกับแกนกลโดยมนุษย์ พบว่า ในส่วนของระบบที่ปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping ระบบเกิดการสั่นมาก เมื่อทำการเปิดใช้เทคนิค Input shaping การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นลดน้อยลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับการปิดการใช้งาน แต่เมื่อเปิดใช้เทคนิค Input shaping การทำงานของระบบจะเกิด Delay ขึ้น



ภาพที่ 39 แสดงกราฟ Control input ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ

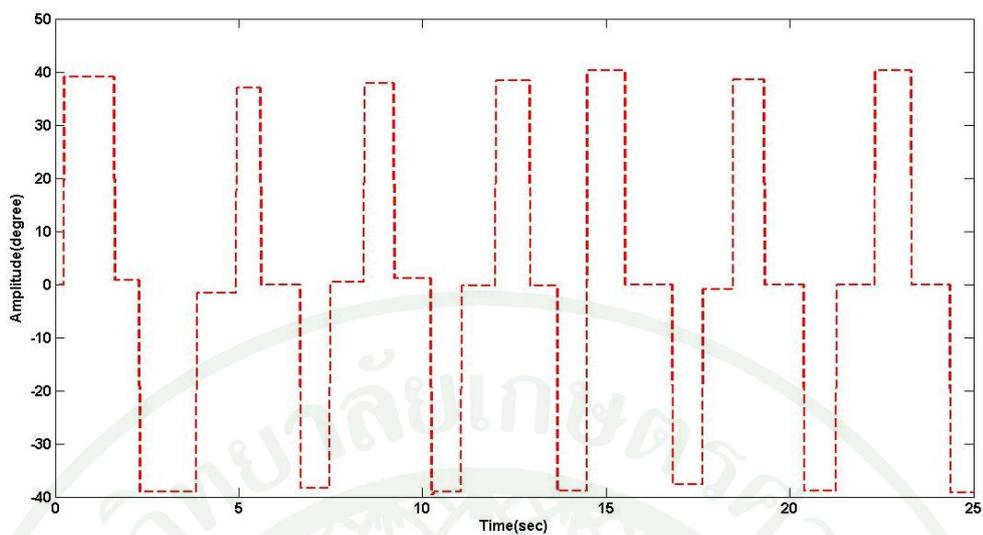
ภาพที่ 39 แสดงกราฟของ Control input หรือกราฟแสดงพลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบ แยกกันเป็นสองส่วนทั้งในส่วนของการเปิด/ปิด การทำงานของเทคนิค Input shaping เมื่อวิเคราะห์ จากกราฟพบว่า พลังงานในส่วนของการปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping มีการใช้พลังงานค่อนข้างมาก เมื่อเทียบกับการเปิดใช้งานของเทคนิค Input shaping ผลกระทบเมื่อมีพลังงานที่ป้อนให้ระบบมากเกินไป อาจส่งผลให้ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเกิดความเสียหายได้



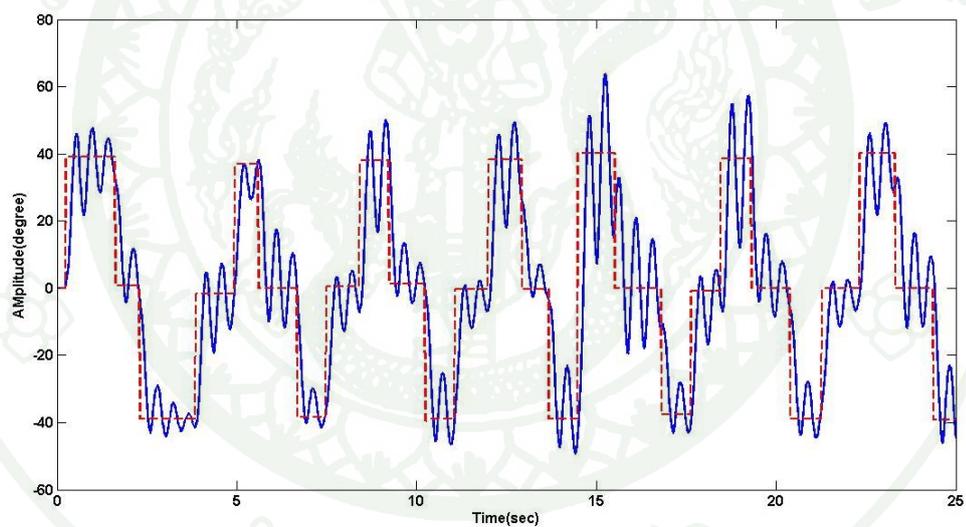
ภาพที่ 40 แสดงค่า Steady state error ของระบบแกนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น

ภาพที่ 40 ค่าความผิดพลาดของระบบเมื่อเข้าสู่สถานะ Steady state error เช่นเดียวกับกราฟที่ผ่านมาการทดลองจะแบ่งเป็นสองช่วง คือช่วงที่ เปิด/ปิด การทำงานของเทคนิค Input shaping จากกราฟในส่วนของการปิดการใช้เทคนิค Input shaping ค่าความผิดพลาดที่เกิดเนื่องจากการสั่นสะเทือนมีค่ามาก เมื่อเทียบกับการเปิดใช้เทคนิค Input shaping

การทดลองทั้งหมดของงานวิจัยนี้เป็นการทดลองแบบ Real time ในลักษณะการเปิด และปิดการใช้งาน เทคนิค Input shaping โดยที่มีมนุษย์คอยสั่งงาน โดยตรง ดังนั้นเพื่อความสะดวกผู้จัดทำจึงนำเสนอผลการทดลองออกมาเป็นช่วง เพื่อแยกกันทั้งในส่วนของการเปิดใช้งานเทคนิค Input shaping และการปิดการใช้งาน จากภาพที่ 37 เลือกช่วง 1-25 วินาทีเป็นช่วงที่ปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 41 ค่าแอมปริจูดที่ใช้มีหน่วยเป็นองศา เมื่อพิจารณาการทำงานของระบบจากภาพที่ 42 พบว่าขณะทำการควบคุมแกนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น แกนกลเกิดการสั่นสะเทือนมากขณะทำการเคลื่อนที่

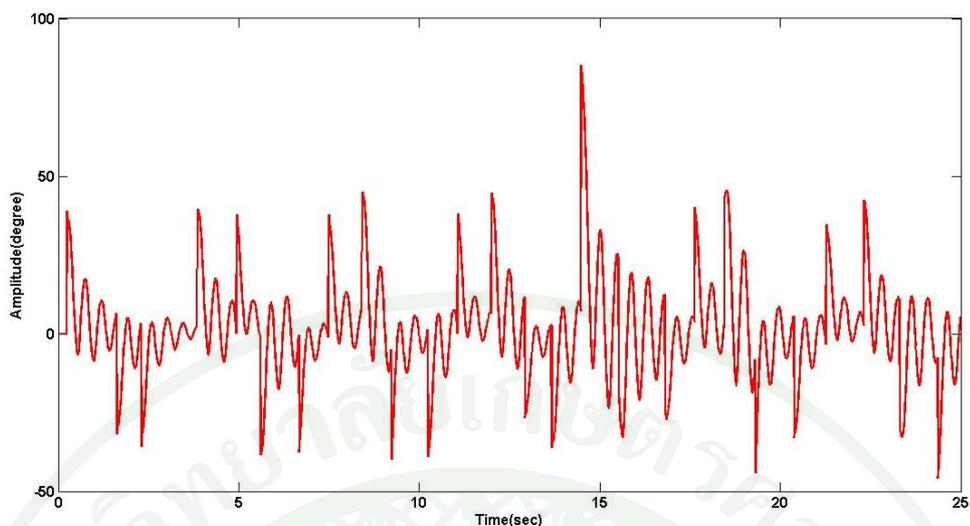


ภาพที่ 41 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบในช่วงปิดการของเทคนิค Input shaping



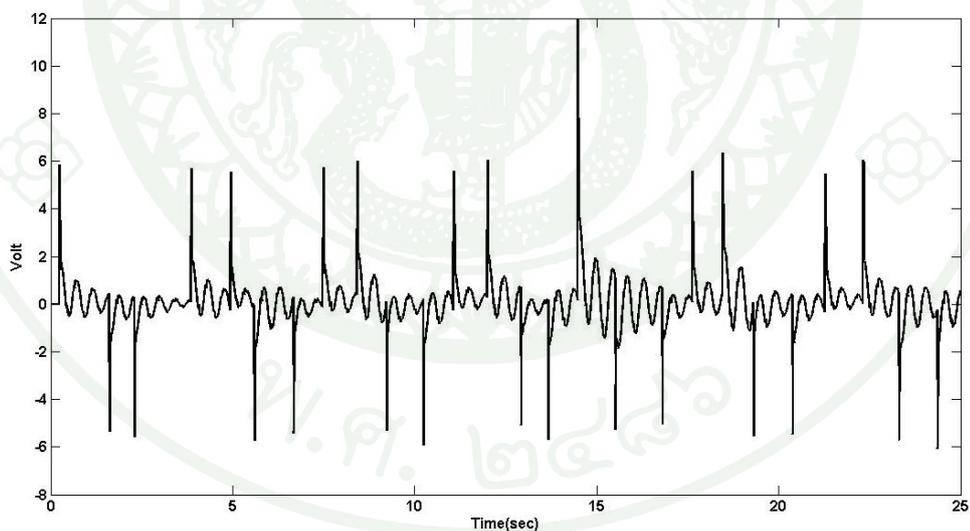
ภาพที่ 42 แสดงการทำงานของระบบโดยปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping

เมื่อพิจารณาความผิดพลาดของระบบที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 43 เนื่องจากแกนกลมีการสั่นสะเทือนมากทำให้ค่าความผิดพลาดในการทำงานส่วนใหญ่เกิดจากการสั่นสะเทือน



ภาพที่ 43 แสดงค่าความผิดพลาดของระบบ ในช่วงปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping

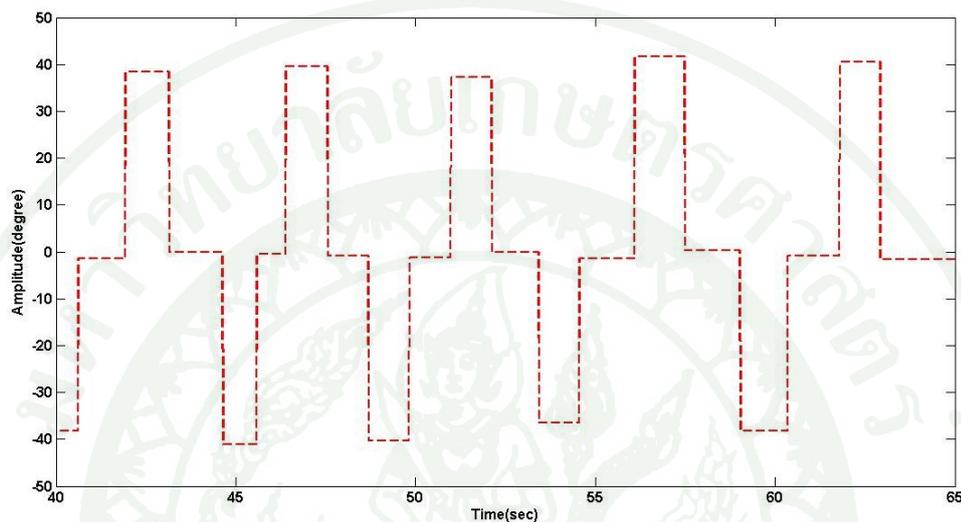
เมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่ป้อนให้กับระบบพบว่าช่วงของการปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 44



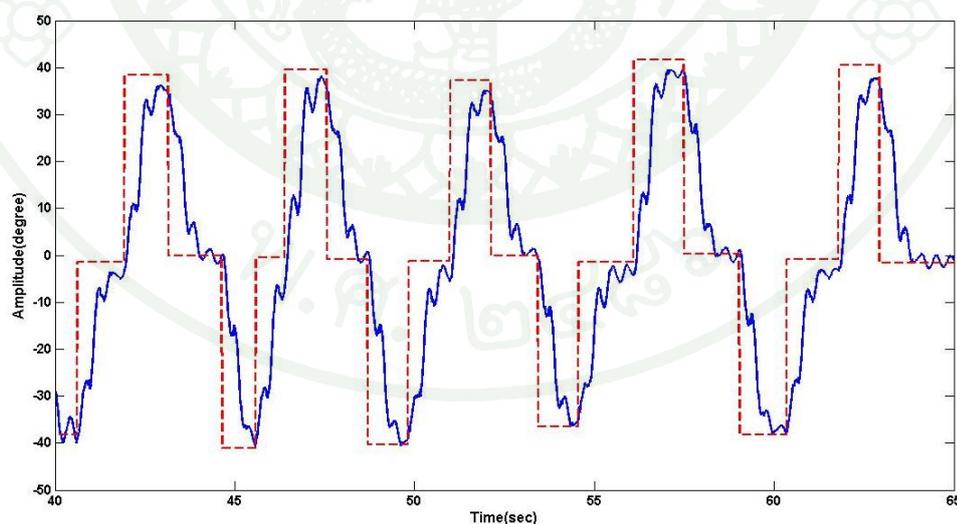
ภาพที่ 44 แสดงค่า Control input ที่ป้อนเข้าไปในระบบในช่วงปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping

เมื่อพิจารณาช่วงเปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping จากผลการทดลอง เลือกช่วงการทำงานระหว่างช่วงเวลา 40-65 วินาที ภาพที่ 45 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ในช่วงเปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping เมื่อพิจารณาการทำงานของระบบเมื่อเปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping

สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 46 เส้นปะสีแดงแสดงเส้นทางการเคลื่อน และเส้นทึบสีน้ำเงิน แสดงการทำงานของระบบ พิจารณาจากภาพเมื่อทำการเปิดใช้งานเทคนิค Input shaping การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยลง แต่ระบบเกิดการทำงานที่ช้ามากขึ้นเนื่องจาก delay ที่เกิดขึ้นเมื่อเปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping

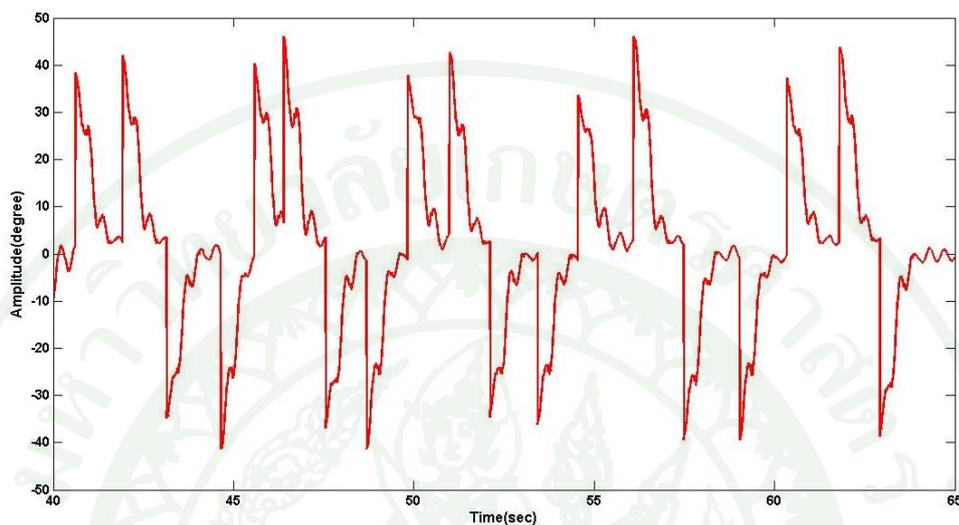


ภาพที่ 45 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบในช่วงเปิดการของเทคนิค Input shaping



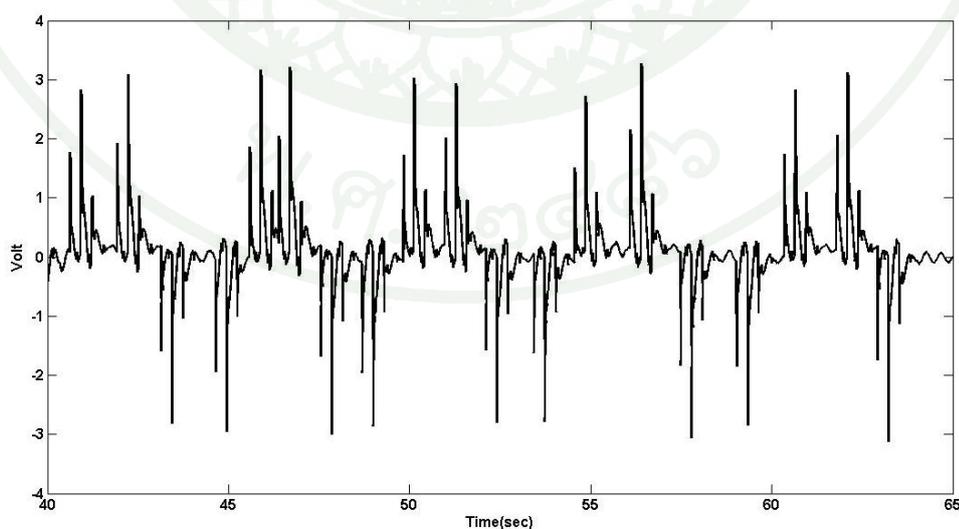
ภาพที่ 46 แสดงการทำงานของระบบโดยเปิดการทำงานเทคนิค Input shaping

เมื่อพิจารณาความผิดพลาดของระบบที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 47 ถึงแม้แกนกลมีการสั่นสะเทือนที่ลดน้อยลง แต่ค่าความผิดพลาดที่เกิดในการทำงานส่วนใหญ่เกิดจาก Delay ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping



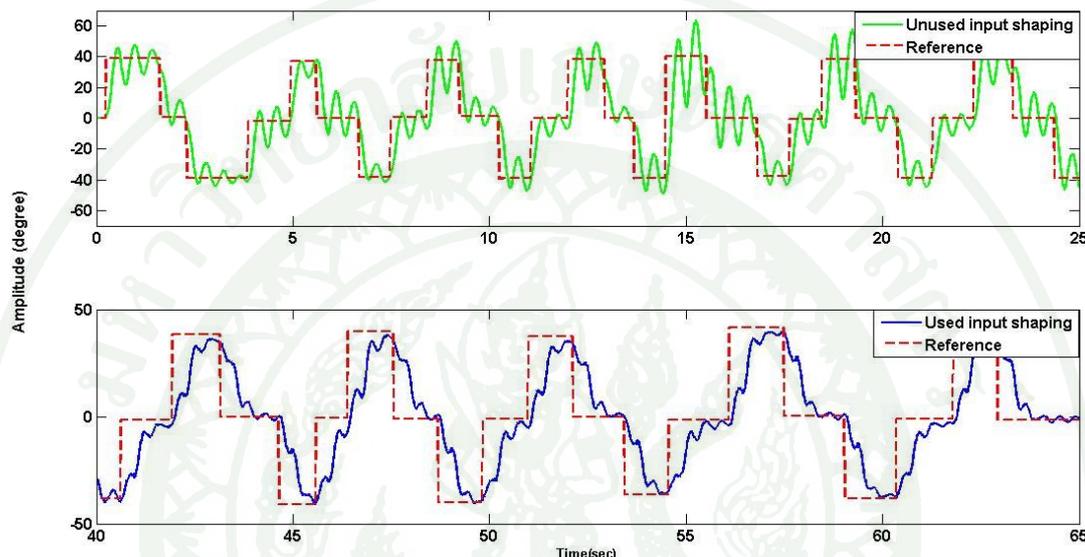
ภาพที่ 47 แสดงค่าความผิดพลาดของระบบในช่วงเปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping

เมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่ป้อนให้กับระบบพบว่าช่วงของการเปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 48



ภาพที่ 48 แสดงค่า Control input ที่ป้อนเข้าในระบบในช่วงเปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทำงานของทั้งสองช่วงสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 49 เมื่อทำการวิเคราะห์หาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง (Root mean square: RMS) พบว่า ในช่วงปิดการทำงานของเทคนิคค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 15.4961 และในส่วนของการเปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสองอยู่ที่ 16.3997



ภาพที่ 49 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานทั้งเปิดและปิด การทำงานของเทคนิค Input shaping

วิจารณ์

จากการทดลองพบว่าเทคนิค Input shaping สามารถลดการสั่นสะเทือนได้ดี และข้อดีอีกอย่างของเทคนิค Input shaping ก็เป็นเทคนิคที่กระทำในรูปแบบของ Positions shaping ดังนั้นเทคนิคนี้จึงเหมาะสมกับการทำงานแบบ Real time หรือในแบบที่มีมนุษย์คอยควบคุมโดยตรง (Human operate)

เนื่องจากการทำงานของเทคนิค Input shaping มีการใส่ค่า Impulse เข้าในระบบควบคุมปกติที่เวลาต่างกัน ดังนั้นถ้าทำการใส่จำนวน Impulse มากเกินความจำเป็นจะเกิดค่าดีเลย์กับระบบมาก ดังนั้นการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ด้วยเทคนิค Input shaping ควรดูความเหมาะสมในการเลือกใส่จำนวน Impulse

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การออกแบบตัวควบคุมแบบ PD controller กับแกนกลแบบข้อต่อยืดหยุ่น แกนกลสามารถทำงานได้ดี แต่การทำงานของระบบยังเกิดการสั่นสะเทือน ผลของการสั่นสะเทือนทำให้ระบบเข้าสู่สถานะ Steady state error ได้ช้า

เมื่อออกแบบเทคนิค Input shaping ให้ทำงานร่วมกับตัวควบคุมแบบ PD controller การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในระบบลดลงอย่างมาก สามารถทดสอบด้วยสัญญาณแบบ Step พบว่าเมื่อเปิดใช้งานเทคนิค Input shaping ค่า Over shoot ของระบบลดลงถึง 65% ในส่วนการทดลองแบบ Human operate ผลที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกับการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์ คือ เมื่อเปิดใช้เทคนิค Input shaping การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นลดลงอย่างมาก เมื่อพิจารณาค่า Root mean square (rms) ของ Steady state error เมื่อเปรียบเทียบช่วงการใช้เทคนิค Input shaping และไม่ใช่ พบว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกัน เพราะเมื่อเปิดการทำงานของเทคนิค Input shaping ระบบมี Delay เกิดขึ้นเนื่องจากตัวของเทคนิค Input shaping เอง

ข้อเสนอแนะ

1. ค่าความถี่ธรรมชาติของแกนกลที่เกิดจากมอเตอร์นั้น มีค่าความถี่ที่สูงกว่าช่วงความถี่ที่ไปกระตุ้นแกนกล ดังนั้นเราควรใช้ช่วงความถี่ที่จะไปกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของแกนกลให้สูงขึ้น
2. ควรมีการหาเอกลักษณ์ของระบบแบบ Online เพื่อไปปรับปรุงในเทคนิค Input shaping ในแต่ละช่วงการทำงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิค Input shaping ให้ดีขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

Bolz, R.E. and T. George. 1973. **Handbook of Tables for Applied Engineering Science**.
CRC Press Inc, Florida.

Ge, S. S., T.H. Lee and C.J. Harris. 1997. **Adaptive Neural Network Control for Robotic Manipulators**. 3rd ed. London: U.K, World Scientific.

Gieck, K. 1983. **Engineering Formula**. McGraw-Hill, New York.

Heidar, A.M., D. Misir, D. Feigenspan, and G. Chen. 1997. Fuzzy PID control of a flexible-joint robot arm with uncertainties from time-varying loads. **IEEE Transactions on Control Systems Technology** 5(3): 371-378.

Hunmo, K. and J.K. Parker. 1993. Artificial neural network for identification and tracking control of a flexible joint single-link robot. **IEEE** 233-237.

Joel, F. and W. Singhose. 2002. Concurrent design of input shaping and vibration absorbers. **The American Control Conference** 5: 1491-1496.

Jong, H.O. and J.S. Leet. 1997. Control of flexible joint robot system by backstepping design approach. **IEEE International Conference on Robotics and Automation** 4: 3435-3440.

Justis, B., J. Fortgang and W. Singhose. 2003. Experimental verification of vibration absorbers combined with input shaping for oscillatory systems. **IEEE** 6: 3160-3165.

Meckl, P.H. and W.P. Seering. 1988. Controlling velocity-limited systems to reduce residual vibration. **IEEE Int'l Confront Robotics and Automation** 1428-1433.

- Rappole, B.W., and N.C. Singer. 1993. Input shaping with negative sequences for reducing vibrations in flexible structures. **The American Control Conference** 6: 2695-2699.
- Singer, N. and W. Seering. 1990. Preshaping command inputs to reduce system vibration. **ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control** 112(1): 76482.
- Weiming, T. and G. Chen. 1994. A robust fuzzy pi controller for a flexible-joint robot arm with uncertainties. **IEEE Transactions on Control Systems Technology** 3: 1554-1559.
- William, S., N. Singer and W. Seering. 1995. Comparison of command shaping methods for reducing residual vibration. **European Control Conference** 2: 1126-1131.
- Withit, C., V.M. Beazel and P.H. Meckl. 2006. Command shaping applied to a flexible robot with configuration-dependent resonance. **American Control Conference** 6: 1766-1771.



โปรแกรม Matlab สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบในการทำ System identification

```

clear
close all
%load data
v = load('C:\Data\store\contro_linput_010.txt');
acc = load('C:\Data\store\Acc_010.txt');
theta = (pi/180)*load('C:\Data\store\hub_link_011.txt');
h = (pi/180)*load('C:\Data\store\thate_hub_011.txt');
l = (pi/180)*load('C:\Data\store\theta_link_011.txt');
%sampling period
ts = 0.05;
t = 0:ts:(length(v)-1)*ts;
thetad = diff(theta)/ts;
thetadd = diff(thetad)/ts;
%plot FFT
figure(1), MyFFT(t,acc,[],'plot')
%plot all component
figure(2),
subplot(221),plot(t,theta)
subplot(222),plot(thetad)
subplot(223),plot(t,acc)
subplot(224),plot(t,v)

```

Function ของโปรแกรม Matlab สำหรับการใช้ Fast Fourier Transform

```
%
% _____
% [w,X] = MyFFT(t,x,N,showplot) computes a simple FFT of
% the signal x with the proper frequency scaling. If the
% parameter N>length(x), will zero-pad the time history
% by that amount. If fourth argument = 'plot', plots the
% result.
%
% Written by Victor Beazel on April 18, 2000
%
% _____
```

```
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
%_____End MyFFT.m
```

โปรแกรม Matlab สำหรับการใช้ แสดงกราฟของค่า Amplitude และ เวลา ในเทคนิค Input Shaping

```

clear

close all

%Time
ts = 0.05;
tend = 60;
t = 0:ts:tend-ts;

%Reference Trajectory
r = 1*sqrt(2*pi*0.05*t);
r2 = r;

%Impulse Sequence
%z = 0.3; %zeta
%w = 10; %wn
z = 0.14; %from Khun Tor
w = 10.3;
%z = 0.15; %from my paper
%w = 10;
K = exp(-z*pi/sqrt(1-z^2));
delT = pi/w/sqrt(1-z^2); %impulse interval
a1 = 1/(1+2*K+K^2); %impulse amplitude
a2 = 2*K/(1+2*K+K^2);
a3 = K^2/(1+2*K+K^2);

%Convolution
delTi = round(delT/ts);
for i = 1:length(r2)
    if i<=delTi
        rs(i) = a1*r2(i);
    elseif i<=2*delTi
        rs(i) = a1*r2(i)+a2*r2(i-delTi);
    else

```

```
rs(i) = a1*r2(i)+a2*r2(i-delTi)+a3*r2(i-2*delTi);  
end  
end  
figure(1),plot(t,rs),hold on,plot(t,r2,'r')  
figure(2),MyFFT(t,rs,[],'plot')  
figure(3),MyFFT(t,r2,[],'plot')  
delTi  
a1  
a2  
a3
```



โปรแกรม Matlab สำหรับการใช้ในการหาผลการทดลอง

```

clear

close all

%load data
ref = load('C:\Data\Exp\input\ref_21.txt');
V = load('C:\Data\Exp\input\control_input_21.txt');
l = load('C:\Data\Exp\input\theta_link_21.txt');
hb = load('C:\Data\Exp\input\hub_link_21.txt');
h = load('C:\Data\Exp\input\theta_hub_21.txt');

b = (ref-hb);

a = length(V)-1 ;
ts = 0.01; %sampling period
t = 0:ts:(a)*ts;

%plot control input

figure(1),plot(t,V,'b')

%plot referencet

figure(2),plot(t,ref,'g')

%plot ref vs experiment

figure(3),plot(t,hb,'r'),hold on, plot(t,ref),hold off

%plot sse (steady state error)

figure(4),plot(t,b)

```

```
%choice unused input shaping
```

```
tc=t(1:2500);
```

```
hbun=hb(1:2500);
```

```
refun=ref(1:2500);
```

```
%choice unused input shaping
```

```
tcc=t(4000:6500);
```

```
hbu=hb(4000:6500);
```

```
refu=ref(4000:6500);
```

```
%parameter for steady state error
```

```
bc=b(1:2500);
```

```
bcc=b(4000:6500);
```

```
%parameter for control input of any part
```

```
vc=V(1:2500);
```

```
vcc=V(4000:6500);
```

```
%plot ref of unused input shaping
```

```
figure(5),plot(tc,refun)
```

```
%plot ref of used input shaping
```

```
figure(6),plot(tcc,refu)
```

```
%plot ref vs experiment of unused input shaping
```

```
figure(7),plot(tc,hbun,'g'),hold on ...  
,plot(tc,refun),hold off
```

```
%plot ref vs experiment of used input shaping
```

```
figure(8),plot(tcc,hbu,'r'),hold on ...  
,plot(tcc,refu),hold off
```

```
%plot time vs sse of unused input shaping
```

```
figure(9),plot(tc,bc)
```

```
%plot time vs of used input shaping
```

```
figure(10),plot(tcc,bcc)
```

```
%plot time vs control input of unused input shaping
```

```
figure(11),plot(tc,vc)
```

```
%plot time vs control input of used input shaping
```

```
figure(12),plot(tcc,vcc)
```

```
%-----
```

```
%find root mean square of unused input shaping
```

```
seun=abs(refun-hbun);
```

```
nun=norm(seun);
```

```
nn=length(seun);
```

```
%rms = norm(seun)/sqrt(nn)
```

```
rmsun=nun/sqrt(nn)
```

```
%find root mean square of used input shaping
```

```
seu=abs(refu-hbu);
```

```
nuu=norm(seu);
```

```
n=length(seu);
```

```
%rms = norm(seu)/sqrt(n)
```

```
rmsu=nuu/sqrt(n)
```

```
%-----
```



โปรแกรม Matlab สำหรับจำลองการเคลื่อนที่

```

clear

close all

%Time

ts = 0.01;

tend = 20;

t = 0:ts:tend-ts;

%Reference Trajectory

r = 1*square(2*pi*0.05*t);

%r2 = lsim(tf(5^2,[1 2*1*5 5^2]),r,t);

r2 = r;

%Impulse Sequence

%z = 0.3; %zeta

%w = 10; %wn

z = 0.114; %from Khun Tor

w = 10.3;

%z = 0.15; %from my paper

%w = 10;

K = exp(-z*pi/sqrt(1-z^2));

delT = pi/w/sqrt(1-z^2); %impulse interval

a1 = 1/(1+2*K+K^2); %impulse amplitude

a2 = 2*K/(1+2*K+K^2);

a3 = K^2/(1+2*K+K^2);

%calculate delta time of input shaping

```

```
delTi = round(delT/ts);

%show impulse and time of impulse

imp1 = [a1,zeros(1,delTi-1),a2,zeros(1,delTi-1),a3(1)];
```

```
%plot input shaping with delta time
```

```
figure(1),plot(imp1)
```

```
%Convolution
```

```
delTi = round(delT/ts);
for i = 1:length(r2)
    if i<=delTi
        rs(i) = a1*r2(i);
    elseif i<=2*delTi
        rs(i) = a1*r2(i)+a2*r2(i-delTi);
    else
        rs(i) = a1*r2(i)+a2*r2(i-delTi)+a3*r2(i-2*delTi);
    end
end
end
```

```
%plot square wave and time
```

```
figure(2),plot(t,r2)
```

```
%plot square wave with input shaper and time
```

```
figure(3),plot(t,rs)
```

```

%step response of input shaping and unused

figure(4),plot(t,r2),hold on ,plot(t,rs),hold off

%use linear simulation
%transfer functions of systems  $G(s)=K(s+a)$   $K=5.634,6.25$   $a=24.75,26.72$ 
% -----  $b=3.25, 4.13$   $d=154.78,162.31$ 
%  $s^2+bs+d$ 
g=tf(6.175*[1 25.5],[1 3.55 157.5]);

%use lsim with square wave noninput shaping

r3=lsim(g,r2,t);

%plot lsim with reference and systems

figure(5),plot(t,r3),hold on,plot(t,r2),hold off

%use lsim with square wave input shaping

r4=lsim(g,rs,t);

%plot lsim with reference and systems

figure(6),plot(t,r4),hold on,plot(t,rs),hold off

%plot step response compare between input shaping and noninput shaping

figure(7),plot(t,r3),hold on,plot(t,r4),hold off

```

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวกนกรัตน์ แซ่เฮ้ง
เกิดวันที่	24 กุมภาพันธ์ 2529
สถานที่เกิด	จังหวัดชลบุรี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมศาสตร์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-