



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การลดการสั่นสะเทือนในแขนกลชนิดแขนยืดหยุ่นสูงด้วยวิธีการปรับแต่งสัญญาณนำเข้า

Input Shaping to Reduce Vibration in Human-Operated Very-Flexible-Link Robot Manipulator

นามผู้วิจัย นางสาวจิตนภา สุนทรจารย์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิฑิต ฉัตรรัตนกุลชัย, Ph.D. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย ศิวะ โกศิษฐ, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การลดการสั่นสะเทือนในแขนกลชนิดแขนยืดหยุ่นสูง  
ด้วยวิธีการปรับแต่งสัญญาณนำเข้า

Input Shaping to Reduce Vibration in Human-Operated  
Very-Flexible-Link Robot Manipulator

โดย

นางสาวจิตนภา สุนทรอาจารย์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2555

จิตนภา สุนทรอาจารย์ 2555: การลดการสั่นสะเทือนในแขนกลชนิดแขนยึดหยุ่นสูง  
ด้วยวิธีการปรับแต่งสัญญาณนำเข้า ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
(วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่  
ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย, Ph.D. 60 หน้า

แขนกลที่สร้างมาจากวัสดุที่มีความยืดหยุ่น จะมีความถี่ธรรมชาติอยู่ในช่วงความถี่ต่ำทำให้  
ต้องเคลื่อนที่ไปช้าๆเพื่อหลีกเลี่ยงการกระตุ้นความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนอย่าง  
รุนแรงซึ่งเป็นเหตุให้สินค้าที่บรรจุและ โครงสร้างของแขนกลเสียหาย แต่การที่แขนกลเคลื่อนที่  
ได้ช้าก็จะทำให้อัตราการผลิตน้อยลงด้วย ในปัจจุบันมีการลดการสั่นสะเทือนของแขนกลชนิด  
ยึดหยุ่นหลายวิธี ทั้งการลดการสั่นสะเทือนด้วยการเพิ่มมวล การใช้วัสดุฉลาด และการปรับแต่ง  
สัญญาณอ้างอิงที่ให้กับระบบเพื่อหลีกเลี่ยงการกระตุ้นความถี่ธรรมชาติ ซึ่งการเพิ่มมวลและการใช้  
วัสดุฉลาดทำให้แขนกลต้องรับน้ำหนักมากขึ้น มีราคาสูง และใช้เวลาในการติดตั้งมาก

งานวิจัยนี้ใช้วิธีลดการสั่นสะเทือนด้วยการปรับรูปร่างสัญญาณนำเข้าของระบบแขนกล  
โดยใช้ค่าความถี่ธรรมชาติและค่าอัตราส่วนความหน่วงของแขนกลที่ได้จากการทดลองในการ  
ออกแบบตัวปรับรูปร่างสัญญาณ ผลการตอบสนองในการเคลื่อนที่ของแขนกลเมื่อใช้ตัวปรับ  
รูปร่างสัญญาณร่วมกับตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์ ถูกนำมาเปรียบเทียบกับการควบคุม  
เบื้องต้นที่ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์เพียงอย่างเดียว ชุดทดลองแขนกลถูกสร้างจากไม้  
บรรทัดเหล็กยาว 60 เซนติเมตร วัดระยะเบี่ยงเบนของปลายแขนเมื่อเกิดการสั่นด้วย Strain Gauge  
และหาความถี่ธรรมชาติจากสัญญาณความเร่งจาก Accelerometer แขนกลเคลื่อนที่ในแนวระดับ  
รอบจุดหมุน โดยปลายด้านหนึ่งถูกยึดบนฐานที่หมุนด้วยแรงบิดจากมอเตอร์ มี Encoder วัดมุมที่  
เปลี่ยนแปลง ผลจากการทดลองจะเปรียบเทียบการสั่นสะเทือนและลักษณะการตอบสนองของ  
แขนกลเมื่อใช้ตัวปรับรูปร่างสัญญาณกับการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์เพียงอย่างเดียว  
สรุปได้ว่าเมื่อใช้ตัวปรับรูปร่างสัญญาณนำเข้าทำให้การสั่นสะเทือนของแขนกลมีขนาดลดลงต่าง  
จากการควบคุม โดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์เพียงอย่างเดียวอย่างเห็นได้ชัด และยังช่วย  
ให้การเคลื่อนที่ของแขนกลเข้าสู่ค่าสุดท้ายได้เร็วขึ้น

---

ลายมือชื่อนิสิต

---

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Jitnapa Soontrajarn 2012: Input Shaping to Reduce Vibration in Human-Operated Very-Flexible-Link Robot Manipulator. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Mr. Withit Chatlatanagulchai, Ph.D. 60 pages.

Robot manipulator that is made from flexible material has natural frequencies in the low range. It must be moved slowly to avoid exciting the natural frequencies causing violent vibration that can damage the payload and the flexible structure of the manipulator. However, slow movement of the manipulator results in productivity reduction. Currently, there are many methods in reducing the vibration of the robot manipulator. Increasing mass, using smart materials, and reference input shaping to avoid exciting the natural frequencies can reduce vibration. However, increasing mass and using smart materials add more weight to the manipulator, are costly, and require longer installation time.

This research reduces vibration by shaping the reference input to the manipulator system. To design the input shaper, the natural frequencies and damping ratios are obtained from experiments. The manipulator movement, using the input shaper and a proportional-integral (PI) controller, is compared to that using the PI controller alone. The experimental manipulator is made from a sixty-centimeter steel ruler. The deflection of the tip under vibration is measured by strain gauges. The natural frequencies are obtained from an accelerometer. The robot manipulator moves in the horizontal plane about a fixed rotating point. The manipulator is moved by torque from a motor. An encoder measures the angular position. By comparing the manipulator movements with and without the input shaper, there is significantly less manipulator vibration when the input shaper is used comparing to when the PI controller is used alone without the input shaper. Less vibration also results in less settling time to the final position.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย ที่สละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำและให้การสนับสนุนอุปกรณ์การทดลองและห้องปฏิบัติการช่วยให้วิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ครูอาจารย์ทุกท่านที่สั่งสอนวิชาความรู้ต่างๆที่เป็นประโยชน์ในหลายๆด้าน ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

ขอขอบคุณ ทุกหน่วยงานในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่อำนวยความสะดวก และความปลอดภัย

ขอขอบคุณ เพื่อนพี่น้องที่ ให้กำลังใจ คอยช่วยเหลือ และคิดถึงกันเสมอ

ขอขอบคุณ บิดา มารดา ญาติมิตรทุกท่าน สั่งสอน สนับสนุน ให้กำลังใจ ความรู้ และปัจจัยดำรงชีวิตจนถึงทุกวันนี้

คุณประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพขอมอบให้แด่มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จิตนภา สุนทรอาจารย์

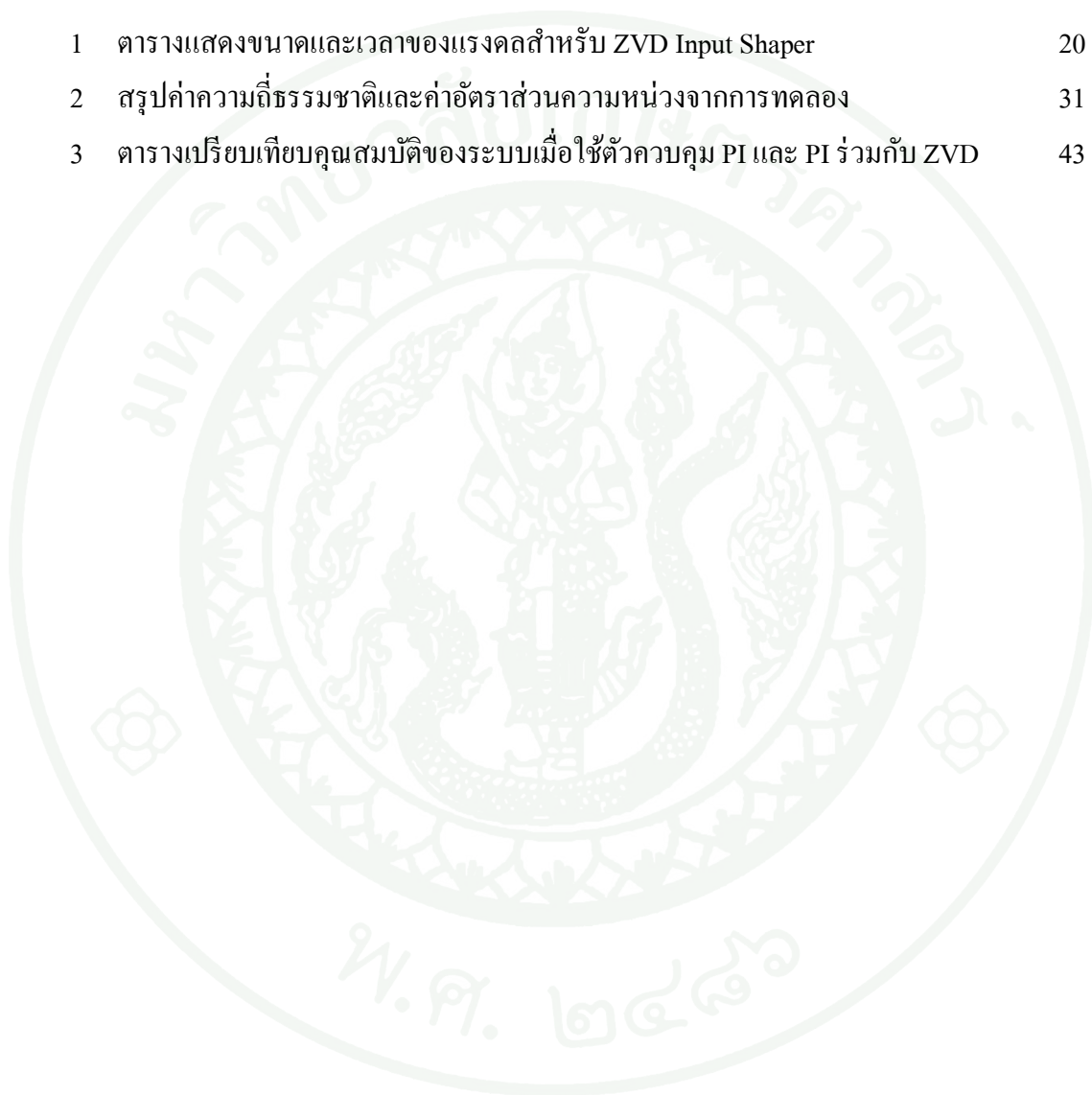
เมษายน 2555

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	23
อุปกรณ์	23
วิธีการ	26
ผลและวิจารณ์	29
ผล	29
วิจารณ์	49
สรุปและข้อเสนอแนะ	50
สรุป	50
ข้อเสนอแนะ	50
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	51
ภาคผนวก	54
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	60

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตารางแสดงขนาดและเวลาของแรงคลสำหรับ ZVD Input Shaper	20
2	สรุปค่าความถี่ธรรมชาติและค่าอัตราส่วนความหน่วงจากการทดลอง	31
3	ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบเมื่อใช้ตัวควบคุม PI และ PI ร่วมกับ ZVD	43



## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะการเคลื่อนที่ของแกนกลชนิดแกนยึดหยุ่นเมื่อมองจากด้านบน	6
2	แผนภาพของระบบมวล สปริง และตัวหน่วง และแผนภาพวัตถุอิสระของระบบ	7
3	ผลตอบสนองของระบบความหน่วงต่ำที่ถูกกระทำด้วยแรงคูล $\hat{F}_1$ และ $\hat{F}_2$	9
4	ผลตอบสนองของระบบเมื่อใส่แรง $\hat{F}_1$ ที่เวลา $t_1$ และ $\hat{F}_2$ ที่เวลา $t_2$	10
5	Convolution ระหว่าง ZV input shaper และสัญญาณอ้างอิง	14
6	Convolution ระหว่าง ZVD input shaper และสัญญาณอ้างอิง	20
7	Sensitivity curve ของ Input shaper แบบต่างๆ	21
8	Convolution ระหว่างชุดแรงคูล 3 แรง 2 ชุด	22
9	แผนภาพการใช้ Input Shaper ร่วมกับตัวควบคุมป้อนกลับแบบ PI	22
10	ไม้บรรทัดทำจากสแตนเลส	23
11	มอเตอร์กระแสตรงพร้อมชุดเฟืองทด	23
12	วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง	23
13	เอ็นโคเดอร์	24
14	สเตรนเกจ	24
15	วงจร Half bridge ร่วมกับวงจรขยายสัญญาณสเตรนเกจ	24
16	ตัววัดความเร่ง	25
17	แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์กระแสตรง	25
18	แกนกลที่ใช้ในการทดลอง	26
19	แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับควบคุมแกนกล	26
20	การหาค่าอัตราส่วนความหน่วงจากกราฟ FFT ที่ความถี่ 7 เรเดียนต่อวินาที	29
21	การหาค่าอัตราส่วนความหน่วงจากกราฟ FFT ที่ความถี่ 9.4 เรเดียนต่อวินาที	30
22	การหาค่าอัตราส่วนความหน่วงจากกราฟ FFT ที่ความถี่ 13.04 เรเดียนต่อวินาที	31
23	ชุดแรงคูลของ ZVD input shaper จากความถี่ธรรมชาติทั้ง 3 ค่าของแกนกล	35
24	สัญญาณอ้างอิงที่ใช้ Input shaper (เส้นทึบ) และไม่ใช่ Input shaper (เส้นประ)	36
25	ผลวิเคราะห์ FFT ของสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได	36
26	ผลวิเคราะห์ FFT ของสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดเมื่อใช้ Input shaper	37

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	ผลตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ	38
28	ขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ	38
29	สัญญาณควบคุมเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ	39
30	เปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงเริ่มต้นและสัญญาณอ้างอิงที่ถูกปรับรูปร่าง	40
31	ผลตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอและZVD	40
32	ขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอและZVD	41
33	ขนาดสัญญาณควบคุมเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอและZVD	41
34	เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อใช้และไม่ใช้ ZVD Input shaper	42
35	เปรียบเทียบการสั่นสะเทือนเมื่อใช้และไม่ใช้ ZVD Input shaper	42
36	ผลตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ	43
37	ขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ	44
38	ขนาดสัญญาณควบคุมเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ	44
39	ผลตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอและZVD	45
40	ขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอและZVD	46
41	ขนาดสัญญาณควบคุมเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอและZVD	46
42	เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบเมื่อสลับการใช้ควบคุมทั้งสองแบบ	47
43	เปรียบเทียบการสั่นสะเทือนของระบบเมื่อสลับการใช้ควบคุมทั้งสองแบบ	47
44	เปรียบเทียบขนาดสัญญาณควบคุมเมื่อสลับการใช้ควบคุมทั้งสองแบบ	48

## การลดการสั่นสะเทือนในแขนกลชนิดแขนยืดหยุ่นสูง ด้วยวิธีการปรับแต่งสัญญาณนำเข้า

### Input Shaping to Reduce Vibration in Human-Operated Very-Flexible-Link Robot Manipulator

#### คำนำ

เมื่อปี ค.ศ. 1945 ศูนย์วิจัยด้านพลังงานของสหรัฐอเมริกาได้โครงการที่จะผลิตไฟฟ้าจากนิวเคลียร์จึงว่าจ้างให้ห้องวิจัยที่เชี่ยวชาญด้านการผลิตอุปกรณ์ป้องกันการแผ่รังสีสร้างอุปกรณ์ที่สามารถหยิบจับก้อนนิวเคลียร์ในห้องนิรภัยที่มีความหนาของชั้นป้องกันรังสีมากและมีผู้ควบคุมอุปกรณ์อยู่ด้านนอกห้องนิรภัย และถือเป็นสัญลักษณ์ของแขนกลควบคุมระยะไกลที่ผู้คนกล่าวถึงมากในสมัยนั้น

หลังจากนั้นนักประดิษฐ์อีกหลายคนก็สร้างแขนกลลักษณะต่างๆขึ้นมา โดยมีจุดประสงค์หลักเดียวกันคือแขนกลนั้นต้องสามารถเคลื่อนย้ายวัตถุจากจุดหนึ่งไปจุดอีกจุดได้ตามความต้องการของผู้ควบคุม และเมื่อมีเทคโนโลยีใหม่ๆเข้ามาสนับสนุนทำให้ความสามารถของแขนกลจากในห้องวิจัยเป็นที่ต้องการขยายขอบเขตไปสู่อุตสาหกรรม การแพทย์ และอวกาศอย่างรวดเร็ว

ในยุคที่มนุษย์เริ่มส่งกระสวยอวกาศที่มีกล้องโทรทรรศน์สำหรับถ่ายภาพจากนอกโลกขึ้นไปในอวกาศปัญหาการสั่นสะเทือนในแขนกลก็เริ่มเป็นที่สนใจอย่างมากเนื่องจากการใช้แขนกลในการปรับทิศทางกล้องถ่ายภาพของกล้องโทรทรรศน์ในอวกาศนั้นจะไม่เกิดความสูญเสียดังที่เกิดบนพื้นโลกและลักษณะของแขนกลนั้นมีความยาวและน้ำหนักเบาเมื่อใช้ตัวควบคุมการเคลื่อนที่แบบที่ใช้บนพื้นโลกจึงเกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงจนทำให้โครงสร้างเกิดการแตกหักและสูญเสียอุปกรณ์ที่มีมูลค่ามหาศาลกลายเป็นขยะอวกาศไปในที่สุด

ปัจจุบันหุ่นยนต์ที่มีลักษณะการทำงานคล้ายแขนของมนุษย์หรือที่เรียกว่าแขนกลนั้นถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต งานก่อสร้าง อวกาศ การแพทย์ฯ และมีแนวโน้มความต้องการมากขึ้นเนื่องจากช่วยเพิ่มอัตราการผลิต ลดชิ้นงานเสีย และปรับเปลี่ยนการทำงานได้ตามต้องการ

รูปร่างของแกนกลอาจต่างกันไปตามการออกแบบเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะการทำงาน สำหรับงานที่ต้องเคลื่อนที่ในบริเวณกว้างแกนกลจะมีช่วงแกนที่ยาวสามารถทำงานครอบคลุมพื้นที่ได้ มีโครงสร้างแกนที่บางและเบาเพื่อให้เคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว แต่ลักษณะบาง เบา และมีความยาวมากทำให้แกนกลเกิดความยืดหยุ่นสูงประกอบกับต้องรับภาระขนาดใหญ่ที่อยู่บริเวณปลายด้านหนึ่งของแกนมีผลทำให้ค่าความถี่ธรรมชาติของแกนกลมีค่าต่ำลง หากควบคุมให้แกนกลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงทำให้ความถี่ที่ใช้ควบคุมมีค่าสูงด้วยจะทำให้ความถี่จากสัญญาณควบคุมการเคลื่อนที่ที่อยู่ในช่วงเดียวกับความถี่ธรรมชาติของแกนกลทำให้เกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง เนื่องจากการสั่นพ้องจนเกิดความเค้นที่มีค่าสูงหรือเกิดความล้าในวัสดุเป็นเหตุให้โครงสร้างของแกนกลเกิดการแตกหักอาจก่อให้เกิดอันตรายและต้องหยุดการทำงานเพื่อซ่อมแซม

งานวิจัยที่ศึกษาการลดการสั่นสะเทือนในแกนกลที่มีความยืดหยุ่นสูงนั้นได้ทำต่อเนื่องมานานมากกว่าสองทศวรรษ จนมีวิธีการเกิดขึ้นมากมาย ทั้งการติดตั้งอุปกรณ์ลดการสั่นสะเทือนแบบ Passive หรือแบบ Active การใช้วัสดุฉลาด ที่มีต้นทุนสูงและเนื่องจากต้องติดตั้งบนโครงสร้างโดยตรงส่งผลต่อน้ำหนักของแกนกลและทนต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบได้น้อยจึงไม่นิยมนำมาใช้ในการเคลื่อนที่แบบ Real Time ที่มักมีการเปลี่ยนแปลงของระบบเกิดขึ้นตลอดเวลาตามสัญญาณควบคุมจากคันบังคับ วิธีที่ได้ผลดีและมีประสิทธิภาพมากคือวิธีการปรับรูปร่างสัญญาณอ้างอิงหรือสัญญาณนำเข้าที่ป้อนให้กับระบบควบคุมทำให้พลังงานที่มีช่วงความถี่รอบๆค่าความถี่ธรรมชาติของแกนกลหายไปจึงไม่เกิดการกระตุ้นความถี่ธรรมชาติ ทำให้การสั่นสะเทือนของแกนกลมีค่าเป็นศูนย์

งานวิจัยชิ้นนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาทฤษฎีการลดการสั่นสะเทือนในแกนกลชนิดยืดหยุ่นสูงด้วยวิธีการปรับแต่งสัญญาณนำเข้าและประยุกต์ใช้เพื่อทดลองจริงกับแกนกลที่ใช้สร้างขึ้นเพื่อการทดลองโดยจำลองการทำงานจากแกนกลขนาดใหญ่ที่ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อน มีทิศทางการเคลื่อนที่ของแกนในแนวระดับขนานกับพื้นเป็นวงกลมและมีสัญญาณควบคุมแบบ Real Time โดยมนุษย์จะเป็นผู้ควบคุมคันบังคับบนแผงควบคุมเพื่อสั่งการให้แกนกลเคลื่อนที่ตามตำแหน่งที่ต้องการ โดยวิธีการที่ใช้สามารถนำไปประยุกต์เพื่อลดการสั่นสะเทือนในแกนกลขนาดใหญ่ได้และให้ผลการสั่นสะเทือนที่ลดลงอย่างชัดเจน

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการควบคุมแขนกลที่มีความยืดหยุ่นสูงแบบแขนเดียวไม่มีข้อต่อด้วยตัวควบคุม PID และศึกษาวิธีการลดการสั่นสะเทือนด้วยวิธี Input Shaping
2. เพื่อทดลองนำผลการตอบสนองและขนาดการสั่นสะเทือนของแขนกลเมื่อใช้ตัวควบคุม PID อย่างเดียวเปรียบเทียบกับผลการตอบสนองที่ใช้ Input Shaping ปรับสัญญาณอ้างอิงเพื่อลดการสั่นสะเทือน

## การตรวจเอกสาร

ในทางเศรษฐศาสตร์โครงสร้างของแขนกลต้องมีความยาวมากเพื่อให้ทำงานครอบคลุมพื้นที่ได้มาก มีน้ำหนักของแขนน้อยเพื่อให้ประหยัดกำลังที่ใช้ในการควบคุม สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว และรับน้ำหนักบรรทุกได้ครั้งละมากๆ เพื่อให้อัตราการผลิตมีค่าสูงซึ่งจะช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายอื่นๆ เช่น ค่าแรงคนงาน ค่าสาธารณูปโภค และช่วยลดความเมื่อยล้าของผู้ปฏิบัติงานทำให้มีทัศนคติที่ดีในการทำงาน

เมื่อพิจารณาจากความเป็นจริงหากแขนกลมีโครงสร้างที่เบาข้อมทำให้ความยืดหยุ่นของแขนมีค่ามาก ส่วน โครงสร้างที่ยาวและน้ำหนักบรรทุกที่มากทำให้ความถี่ธรรมชาติและมวลที่ปลายของแขนเพิ่มขึ้น ซึ่งความยืดหยุ่นและความถี่ธรรมชาติทำให้ความถี่ธรรมชาติมีค่าต่ำลง หากความยืดหยุ่นและความถี่ธรรมชาติมีค่ามากจนทำให้ความถี่ธรรมชาติต่ำลงจนเข้าสู่ช่วงความถี่ของตัวควบคุม เมื่อมีสัญญาณกระตุ้นจากตัวควบคุมก็จะทำให้เกิดการสั่นอย่างรุนแรง หรือเมื่อพูดในทางกลับกันก็คือ แขนกลที่มีความยืดหยุ่นสูงจะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ เพื่อให้ช่วงความถี่ของตัวควบคุมแคบที่สุดจนไม่คาบเกี่ยวกับความถี่ธรรมชาติของแขนกล

เพื่อให้แขนกลชนิดแขนยืดหยุ่นเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วโดยไม่เกิดการสั่นนั้นสามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่หนึ่งคือการแก้ไขโครงสร้างทางกายภาพเพื่อให้ความถี่ธรรมชาติ และ Damping ratio มีค่าสูงขึ้น วิธีที่สองคือการออกแบบตัวควบคุมชนิดขับเคลื่อนเพื่อหักล้างการสั่น ได้อย่างรวดเร็ว และวิธีที่สามคือหลีกเลี่ยงการกระตุ้นความถี่ธรรมชาติค่าต่ำๆ

การลดการสั่นสะเทือน โดยเปลี่ยน โครงสร้างทางกายภาพ (Wang and Russell, 1995) ศึกษา รูปร่างที่เหมาะสมของแขนกลเพื่อเพิ่มความถี่มูลฐาน โดยให้ระยะของมวลที่ปลายคงที่ (Pratiher and Dwivedy, 2008) ศึกษาพฤติกรรมไม่เชิงเส้นของแขนกลชนิดยืดหยุ่นแขนเดียวที่ทำจากวัสดุ Visco-elastic ซึ่งวัสดุชนิดนี้สามารถดูดซับการสั่นสะเทือนได้เป็นอย่างดี แม้ว่างานวิจัยที่กล่าวมาจะสามารถลดการสั่นสะเทือนได้ แต่การแก้ไขโครงสร้างทางกายภาพมีความยุ่งยากเนื่องจากต้องทำการออกแบบโครงสร้างใหม่ทั้งหมดซึ่งอาจไม่คุ้มค่าสำหรับแขนกลขนาดใหญ่และไม่สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักบรรทุกอีกด้วย

การใช้ตัวควบคุมชนิดขับเคลื่อนเพื่อลดการสั่นสะเทือนจำเป็นต้องนำพลังงานส่วนหนึ่งของหุ่นยนต์มาใช้เพื่อควบคุมการตอบสนอง โดยตัวควบคุมแบบพื้นฐานที่สุดคือวิธี computed-torque (Singh, 1988; Chapnik *et al.*, 1993; Jnifene and Fahim, 1997) วิธี gain scheduling (Moudgal *et al.*, 1994; Caswara and Unbehauen, 2002) ตัวควบคุมเหล่านี้สามารถลดการสั่นสะเทือนได้จริง แต่ก็ต้องใช้พลังงานจากภายนอกหรือต้องเพิ่มอุปกรณ์ตอบสนองอื่นๆ ให้กับระบบซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายต้นทุนสูงขึ้น

ทางเลือกในการลดการสั่นสะเทือนอีกวิธีหนึ่งคือ การหลีกเลี่ยงการกระตุ้นความถี่ธรรมชาติ โดยการแก้ไขสัญญาณอ้างอิงหรือสัญญาณควบคุมนำเข้า ซึ่งวิธีนี้ไม่ต้องเพิ่มอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่จึงสามารถประหยัดพลังงานและไม่ต้องเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแขนกล โดยสามารถสร้างสัญญาณนำเข้าจากฟังก์ชัน versine หรือ ramped sinusoidal (Meckl and Seering, 1988; Chatlatanagulchai *et al.*, 2006) หรือโดยการใช้ notch filter (Singer and Seering, 1990a) หรือโดยการประสานกันของสัญญาณนำเข้าและจังหวะการกระตุ้น (Smith, 1957; Singer and Seering, 1990b) วิธีเหล่านี้เรียกว่าวิธีปรับแต่งสัญญาณสั่งการหรือสัญญาณนำเข้าซึ่งใช้กันในกลุ่มของนักวิจัย

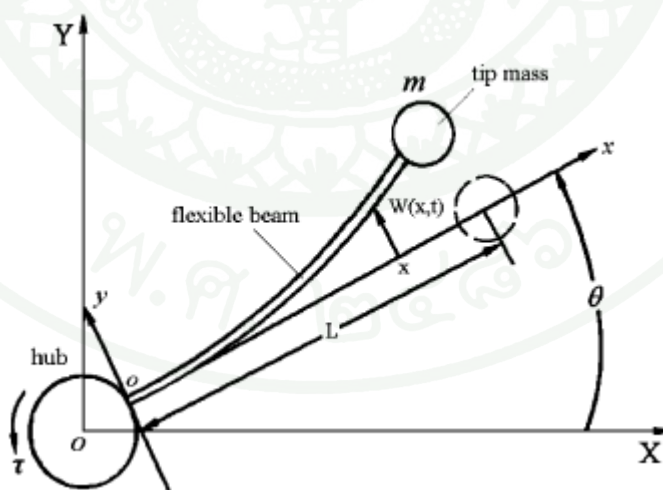
Singh and Singhose (2002) กล่าวถึง Input Shaping ว่าเป็นวิธีการลดการสั่นสะเทือนด้วยการปรับรูปร่างสัญญาณอ้างอิงหรือสัญญาณสั่งการวิธีหนึ่ง ถูกคิดค้นโดย Singer และ Seering ในช่วงปลายคริสต์ทศวรรษ 1950 โดยมีแนวคิดจากการหักล้างการสั่นสะเทือนของระบบอันดับสองที่มีความหน่วงต่ำ เมื่อแรงดลกระทำต่อระบบทำให้ระบบสั่นแบบอิสระหากใส่แรงดลอีกแรงหนึ่งให้กับระบบด้วยขนาดและเวลาที่เหมาะสมจะทำให้การสั่นสะเทือนมีค่าเป็นศูนย์ โดยชุดแรงดลที่ได้เมื่อนำไป convolution กับสัญญาณที่ใส่ให้กับระบบจะทำให้ระบบเคลื่อนที่ได้ตามสัญญาณอ้างอิงและไม่เกิดการสั่นสะเทือนขึ้น และวิธีการลดการสั่นสะเทือนโดยใช้ Input Shaping นี้ได้มีการนำไปทดลองกับระบบที่เกิดการแกว่งได้ง่าย เช่น แขนกลที่ใช้บนกระสวยอวกาศ เคน หุ่นยนต์ รวมถึงกระบวนการทางเคมี

Mohamed and Tokhi (2004) นำ Input Shaping ไปใช้กับแขนกลจริงจะมีตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบชุดแรงดลสองค่าคือค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงของแขนกล เมื่อหาค่าตัวแปรทั้งสองโดยการประมาณด้วยวิธี Finite Element ซึ่งสำหรับ Input Shaping ที่มีแรงดลสองแรงจะมีความไวต่อความผิดพลาดของค่าความถี่ธรรมชาติมากซึ่งส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือน

เหลืออยู่ สามารถลดความไวต่อความผิดพลาดของค่าความถี่ธรรมชาตินี้ได้ด้วยการใช้ Derivative ของสมการขนาดผลตอบสนองรวมและกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์เพื่อให้ขนาดการสั่นสะเทือนยังคงเป็นศูนย์เมื่อมีความผิดพลาดของค่าความถี่ธรรมชาติ

โครงสร้างของตัวแขนที่ไม่มีคามยืดหยุ่นแต่มีการเพิ่มสปริงที่ข้อต่อของแขนกล (Chatlatanagulchai and Saeheng, 2009) จะทำให้ระบบมีความยืดหยุ่นตามค่าความแข็งของสปริง และมีโหมดการสั่นเพียงโหมดเดียวจึงมีค่าความถี่ธรรมชาติเพียงค่าเดียวที่นำไปใช้สร้าง Input shaper สำหรับโครงสร้างแขนกลที่ใช้วัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูงนั้นจะมีโหมดการสั่นหลายโหมด แต่มักใช้ 3 โหมดแรกเท่านั้น (Chatlatanagulchai *et al.*, 2011) ในการหา Input shaper ที่ครอบคลุมการสั่นสะเทือนได้ทุกโหมดจะต้องนำชุดแรงดลที่สร้างจากความถี่ธรรมชาติของแต่ละโหมดมา convolution กันให้เหลือเพียงชุดแรงดลชุดเดียว

ในการทดลองจะใช้แขนกลที่สร้างขึ้นเองโดยตัวแขนทำจากไม้บรรทัดโลหะที่มีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งมีลักษณะการเคลื่อนที่ดังภาพที่ 1 คือเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์จะเกิดแรงบิดที่เพลาที่ยึดแน่นกับฐานของแขนทำให้แขนเคลื่อนที่ไปเป็นมุม  $\theta$  และมีระยะเบี่ยงเบนจากแกนอ้างอิงขนาด  $W(x,t)$  ที่ความยาวของแขนห่างจากจุดยึดเป็นระยะ  $x$



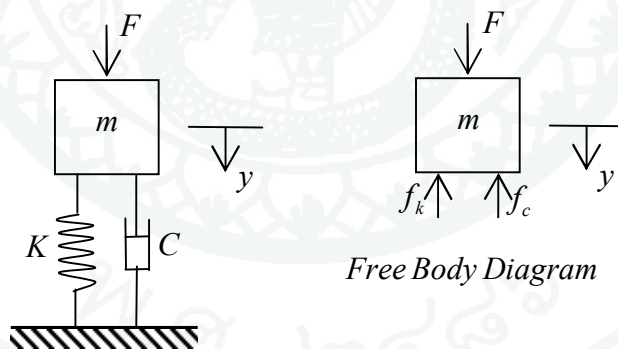
ภาพที่ 1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลชนิดแขนยืดหยุ่นเมื่อมองจากด้านบน

ที่มา: Shan *et al.* (2005)

การควบคุมมอเตอร์กระแสตรงที่ขับให้แขนกลเคลื่อนที่สามารถใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์หรือเรียกย่อๆว่า PID (Ho and Tu, 2005) ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบวงปิดและมีการป้อนค่ามุมที่เพลามอเตอร์หมุนไปด้วยการต่อเซ็นโคเดอร์เข้ากับเพลาด้านหนึ่งของมอเตอร์ เมื่อเพลลาของมอเตอร์หมุนเซ็นโคเดอร์จะส่งสัญญาณไฟฟ้าออกมาเมื่อนำไปแปลงตามความละเอียดและชนิดของเซ็นโคเดอร์ก็จะทราบมุมที่เพลามอเตอร์หมุนไป เมื่อนำมุมที่วัดได้จากเซ็นโคเดอร์ไปหักล้างกับมุมที่ป้อนให้ระบบจะได้สัญญาณค่าผิดพลาดซึ่งนำไปใช้ในการหาสัญญาณควบคุมของตัวควบคุมที่จะป้อนไปยังส่วนขับเคลื่อน

### หลักการเบื้องต้นของเทคนิค Input shaping

โดยปกติหากเราใส่แรงเพื่อให้กับระบบแขนกลเคลื่อนที่จะเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นกับระบบไม่มากนักน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของแรงและความถี่ คือขนาดของแรงแปรผันตรงกับขนาดการสั่นสะเทือนส่วนความถี่จะมีผลต่อความถี่ธรรมชาติของแขนกลหากความถี่ทั้งสองตรงกันก็จะเกิดการสั่นพ้องทำให้ค่าการสั่นสะเทือนของแขนกลมีค่าสูง อธิบายการสั่นสะเทือนของระบบอันดับสองแบบความหน่วงต่ำขั้นพื้นฐานได้ดังนี้



ภาพที่ 2 แผนภาพของระบบมวล สปริง และตัวหน่วง และแผนภาพวัตถุอิสระของระบบ

ที่มา: Coleman and Coleman (1999)

พิจารณาการเคลื่อนที่ของระบบที่ประกอบด้วยมวล สปริง และตัวหน่วง ซึ่งเป็นระบบพื้นฐานในการอธิบายการเคลื่อนที่ของระบบอันดับสอง (second order system) ที่มีองศาอิสระเท่ากับ 1 (มวลเคลื่อนไปตามทิศทาง  $y$ ) ดังภาพที่ 2

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน กล่าวว่า เมื่อมีแรงลัพธ์ที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์กระทำต่อวัตถุ จะทำให้วัตถุเกิดความเร่งในทิศทางเดียวกับแรงลัพธ์และขนาดของความเร่งนี้จะแปรผันตรงกับขนาดของแรงลัพธ์และแปรผกผันกับมวลของวัตถุ ดังนั้นจากแผนภาพวัตถุอิสระสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\downarrow \sum_+ F = ma \quad (1)$$

จากแผนภาพวัตถุอิสระในภาพที่ 2 มีแรงที่กระทำต่อมวล  $m$  ทั้งหมด 3 แรง จากสมการ (1) เขียนได้เป็น

$$F - f_c - f_k = ma \quad (2)$$

การเคลื่อนที่ของมวลมีระยะเท่ากับ  $y$  ดังนั้นสมการ (2) เขียนให้อยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ได้เป็น

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = f(t) \quad (3)$$

เมื่อ  $f$  คือ แรงที่กระทำต่อระบบที่เวลาใดๆ  
 $y$  คือ ระยะการเคลื่อนที่ของมวลที่เวลาใดๆ  
 $m$  คือ มวลในระบบ  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของสปริง  
 $c$  คือ สัมประสิทธิ์ความหนืดของตัวหน่วง  
 $t$  คือ เวลาใดๆ

จัดรูปสมการ (3) ให้สัมประสิทธิ์ของตัวแปรอนุพันธ์อันดับสูงสุดมีค่าเป็น 1

$$\ddot{y}(t) + \frac{c}{m} \dot{y}(t) + \frac{k}{m} y(t) = \frac{f(t)}{m} \quad (4)$$

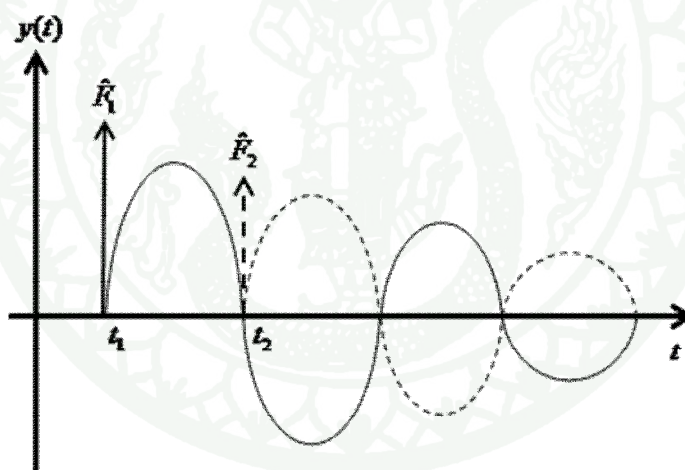
กำหนดให้  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$  และ  $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$  จะสามารถเขียนสมการ (4) ได้เป็น

$$\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{y}(t) + \omega_n^2 y(t) = \frac{f(t)}{m} \quad (5)$$

เมื่อ  $\omega_n$  คือ ค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ  
 $\zeta$  คือ ค่าอัตราส่วนความหน่วง

หากพิจารณาให้ระบบมีความหน่วงต่ำ (underdamped) นั่นคือ  $0 < \zeta < 1$  และมีแรงคดขนาด  $\hat{F}_1$  มากระทำต่อระบบที่เวลา  $t_1$  ดังแสดงในภาพที่ 3 จะได้ผลเฉลยของสมการ (5) ในรูปแบบตรีโกณมิติคือ

$$y(t) = \frac{\hat{F}_1 e^{-\zeta\omega_n(t-t_1)}}{m\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}} \sin\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n(t-t_1) \quad (6)$$

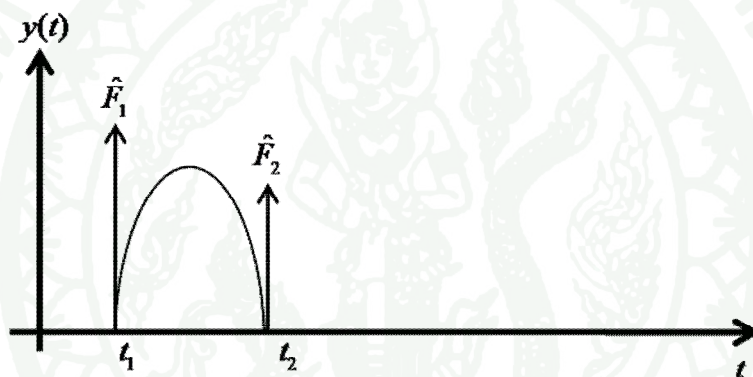


ภาพที่ 3 ผลตอบสนองของระบบความหน่วงต่ำที่ถูกกระทำด้วยแรงคด  $\hat{F}_1$  และ  $\hat{F}_2$

จากสมการ (6) อธิบายผลตอบสนองแรงคดของระบบที่มีความหน่วงต่ำ (underdamped) และมีองศาอิสระเป็นหนึ่ง โดย  $\hat{F}_1$  คือขนาดของแรงคดที่กระทำ  $y$  คือผลตอบสนอง  $\zeta$  คืออัตราส่วนความหน่วง  $\omega_n$  คือความถี่ธรรมชาติ  $m$  คือขนาดของมวล และ  $t_1$  คือเวลาที่เกิดแรงคด ซึ่งผลการตอบสนองนี้ก็คือการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนั่นเอง

Singer and Seering (1990a) ทดลองลดการสั่นสะเทือนในระบบควบคุมแกนกลระยะไกลที่จำลองขึ้นในคอมพิวเตอร์โดยใช้วิธีการปรับรูปร่างสัญญาณที่ใช้ควบคุมแกนกลให้ได้สัญญาณควบคุมใหม่ที่ไม่กระตุ้นความถี่ธรรมชาติของแกนกล โดยตัวปรับรูปร่างสัญญาณหรือ Input shaper คือชุดของแรงคที่มีขนาดและเวลาต่างกันซึ่งสามารถหาได้จากการคำนวณ

การคำนวณหา Input shaper เริ่มจากให้แรงค  $\hat{F}_1$  กระทำต่อระบบเกิดผลตอบสนองที่เวลา  $t_1$  เมื่อต้องการให้ผลตอบสนองนับจากเวลา  $t_2$  หายไป จะต้องใส่แรงคขนาด  $\hat{F}_2$  เพื่อให้เกิดผลตอบสนองที่หักล้างกันซึ่งผลตอบสนองเมื่อใส่แรง  $\hat{F}_1$  ที่เวลา  $t_1$  และ  $\hat{F}_2$  ที่เวลา  $t_2$  แสดงได้ไว้ในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ผลตอบสนองของระบบเมื่อใส่แรง  $\hat{F}_1$  ที่เวลา  $t_1$  และ  $\hat{F}_2$  ที่เวลา  $t_2$

หากแรงที่ใส่ให้ระบบมีจำนวน  $N$  แรง สามารถหาแอมพลิจูดของผลตอบสนองได้จาก

$$A = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N A_i \cos \beta_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N A_i \sin \beta_i\right)^2} \quad (7)$$

โดย  $A_i = \frac{\hat{F}_i e^{-\zeta \omega_n (t-t_i)}}{m \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$  และ  $\beta_i = \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_i$

เมื่อให้สมการ (7) มีค่า  $A = 0$  นั้นหมายถึงระบบจะมีค่าการสั่นสะเทือนเป็นศูนย์เช่นกัน โดยสมการ (7) จะมีค่าเป็นศูนย์ได้ก็ต่อเมื่อพจน์แรกและพจน์ที่สองมีค่าเป็นศูนย์จึงได้

$$\sum_{i=1}^N A_i \cos \beta_i = 0 \quad (8)$$

และ

$$\sum_{i=1}^N A_i \sin \beta_i = 0 \quad (9)$$

แทนค่า  $A_i = \frac{\hat{F}_i e^{-\zeta \omega_n (t-t_i)}}{m \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$  และ  $\beta_i = \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_i$  ลงในสมการ (8) และ (9) จะได้

$$\sum_{i=1}^N \frac{\hat{F}_i e^{-\zeta \omega_n (t-t_i)}}{m \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \cos \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_i = 0 \quad (10)$$

และ

$$\sum_{i=1}^N \frac{\hat{F}_i e^{-\zeta \omega_n (t-t_i)}}{m \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \sin \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_i = 0 \quad (11)$$

เนื่องจาก  $m \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$  ไม่ขึ้นกับค่า  $i$  และให้  $t = t_N$  ดังนั้นสมการ (10) และ (11) เขียนได้เป็น

$$\sum_{i=1}^N \hat{F}_i e^{-\zeta \omega_n (t_N-t_i)} \cos \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_i = 0 \quad (12)$$

และ

$$\sum_{i=1}^N \hat{F}_i e^{-\zeta \omega_n (t_N-t_i)} \sin \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_i = 0 \quad (13)$$

Input Shaper นั้นมีหลายแบบแบ่งตามจำนวนแรงคลซึ่งมีผลกับความไวต่อความผิดพลาดของค่าความถี่ธรรมชาติ ในที่นี้อธิบายการคำนวณ Input Shaper แบบ Zero Vibration (ZV) และ Zero Vibration Derivative (ZVD) เท่านั้น

สำหรับ ZV input shaper ซึ่งมีแรงคลสองแรงนั่นคือ  $N = 2$  และให้แรงคลแรกมีขนาดเป็น  $\hat{F}_1 = 1$  โดยเกิดขึ้นที่เวลา  $t_1 = 0$  แทนค่าลงในสมการ (12) จะได้เป็น

$$e^{-\zeta\omega_n t_2} + (\hat{F}_2 \cos \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_2) = 0 \quad (14)$$

และแทนค่าลงในสมการ (13) จะได้เป็น

$$\hat{F}_2 \sin \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_2 = 0 \quad (15)$$

จากสมการ (15) เมื่อจะมีค่าเป็นศูนย์ได้ก็ต่อเมื่อ  $\sin \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_2 = 0$  เนื่องจาก  $\hat{F}_2 \neq 0$  จึงเขียนได้เป็น

$$\sin \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_2 = 0 \quad (16)$$

จาก  $\sin n\pi = 0$  โดย  $n = 0, 1, 2, \dots$  และที่  $n = 0$  คือเวลาที่เกิด  $\hat{F}_1$  ดังนั้นสำหรับ  $\hat{F}_2$  ต้องใช้  $n = 1$  จึงจะทำให้การสั่นสะท้อนเป็นศูนย์

จากสมการ (16) จะได้

$$\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_2 = \pi \quad (17)$$

ดังนั้นจะได้ค่า  $t_2$  เป็น

$$t_2 = \frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n} \quad (18)$$

นำค่า  $t_2$  ในสมการ (18) แทนลงในสมการ (14) จะได้

$$e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + \hat{F}_2 \cos \pi = 0 \quad (19)$$

ดังนั้นจะได้  $\hat{F}_2$  เป็น

$$\hat{F}_2 = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (20)$$

เนื่องจากต้องการให้ชุดของแรงคลนนำไปใช้ได้จึงกำหนดให้  $\sum_{i=1}^N \hat{F}_i = 1$  (Normalized)  
 ดังนั้นสำหรับ ZV input shaper จะได้ว่า

$$\hat{F}_1 + \hat{F}_2 = 1 \quad (21)$$

จากสมการ (12) เมื่อ  $N=2$   $t_1=0$  และ  $\hat{F}_1 + \hat{F}_2 = 1$  จะได้ว่า

$$\left(\hat{F}_1 e^{-\zeta\omega_n t_2}\right) + \left(\hat{F}_2 \cos\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_2\right) = 0 \quad (22)$$

แทนค่า  $\hat{F}_2 = 1 - \hat{F}_1$  และ  $t_2 = \frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n}$  ลงในสมการ (22) จะได้เป็น

$$\hat{F}_1 \left( e^{-\zeta \frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + 1 \right) = 1 \quad (23)$$

ดังนั้นจะได้  $\hat{F}_1$  ภายใต้อเงื่อนไข  $\sum_{i=1}^N \hat{F}_i = 1$  มีค่าเป็น

$$\hat{F}_1 = \frac{1}{e^{-\zeta \frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + 1} \quad (24)$$

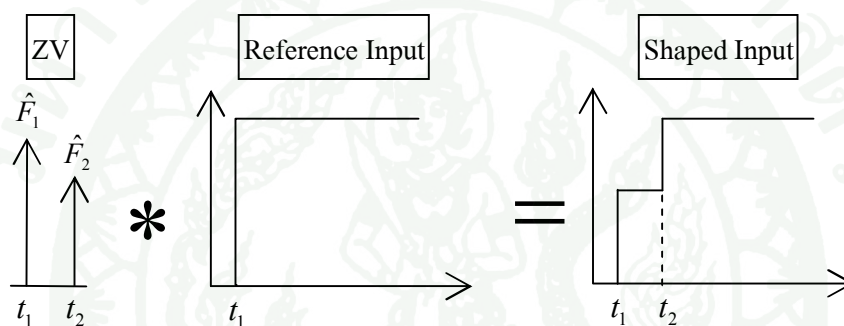
หากกำหนดให้  $e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} = K$  ดังนั้นจากสมการ (24) เขียนในรูปอย่างย่อได้เป็น

$$\hat{F}_1 = \frac{1}{K+1} \quad (25)$$

และนำ  $\hat{F}_1$  ในสมการ (25) แทนค่าลงในสมการ (21) จะได้ว่า

$$\hat{F}_2 = \frac{K}{K+1} \quad (26)$$

ชุดของแรงคที่มีแรงคขนาด  $\hat{F}_1$  ที่เวลา  $t_1$  และ แรงคขนาด  $\hat{F}_2$  ที่เวลา  $t_2$  เมื่อนำไป convolution กับสัญญาณอ้างอิงที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะได้สัญญาณอ้างอิงที่มีรูปร่างเปลี่ยนไปจากเดิม ดังภาพที่ 5 จึงเรียกวธีการนี้ว่า Input shaping



ภาพที่ 5 Convolution ระหว่าง ZV input shaper และสัญญาณอ้างอิง

ขนาดการสั่นสะเทือนของระบบจะมีค่าเป็นศูนย์หากค่าความถี่ธรรมชาติที่ใส่ในสมการทั้งสองตรงกับค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ แต่ในความเป็นจริงแล้วการหาค่าความถี่ธรรมชาติทั้งจากการวัดโดยตรงจากระบบหรือคำนวณจากสมการทางคณิตศาสตร์จะมีค่าความผิดพลาดอยู่เสมอ แต่หากนำสมการ (12) และ (13) ไปทำการหาค่าอนุพันธ์เทียบกับ  $\omega_n$  แล้วให้มีค่าเป็นศูนย์ จะทำให้ Shaper มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของ  $\omega_n$  ลดลง และจะได้แรงคเพิ่มขึ้นอีก 1 แรงรวมเป็น 3 แรง

สำหรับ ZVD input shaper ซึ่งมีสามแรงนั่นคือ  $N = 3$  และให้แรงคแรกมีขนาดเป็น  $\hat{F}_1 = 1$  โดยเกิดขึ้นที่เวลา  $t_1 = 0$  แทนค่าลงในสมการ (12) จะได้ว่า

$$e^{-\zeta\omega_n t_3} + (\hat{F}_2 e^{-\zeta\omega_n(t_3-t_2)} \cos \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_2) + (\hat{F}_3 \cos \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t_3) = 0 \quad (27)$$

และแทนค่าลงในสมการ (13) จะได้ว่า

$$\left(\hat{F}_2 e^{-\zeta\omega_n(t_3-t_2)} \sin\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_2\right) + \left(\hat{F}_3 \sin\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_3\right) = 0 \quad (28)$$

แต่เนื่องจากไม่ทราบค่าทั้งหมด 4 ตัว คือ  $\hat{F}_2$   $t_2$   $\hat{F}_3$  และ  $t_3$  จึงต้องอาศัยสมการอีก 2 สมการ ในการหาคำตอบ โดยหา Derivative ของสมการ (12) และ (13) แล้วให้มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจึงได้ สมการอีกสองสมการคือ

$$\sum_{i=1}^N \hat{F}_i t_i e^{-\zeta\omega_n(t_N-t_i)} \cos\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_i = 0 \quad (29)$$

และ

$$\sum_{i=1}^N \hat{F}_i t_i e^{-\zeta\omega_n(t_N-t_i)} \sin\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_i = 0 \quad (30)$$

แทนค่า  $N=3$   $\hat{F}_1=1$  และ  $t_1=0$  ลงในสมการ (29) จะได้ว่า

$$\hat{F}_2 t_2 e^{-\zeta\omega_n(t_3-t_2)} \cos\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_2 + \hat{F}_3 t_3 \cos\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_3 = 0 \quad (31)$$

และแทนค่าลงในสมการ (30) จะได้ว่า

$$\hat{F}_2 t_2 e^{-\zeta\omega_n(t_3-t_2)} \sin\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_2 + \hat{F}_3 t_3 \sin\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_3 = 0 \quad (32)$$

จากสมการ (27) (28) (31) และ (32) สามารถหาค่า  $\hat{F}_2$   $t_2$   $\hat{F}_3$  และ  $t_3$  ได้ดังนี้ จัดรูปสมการ (28) ใหม่ได้เป็น

$$\hat{F}_3 \sin\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_3 = -\hat{F}_2 e^{-\zeta\omega_n(t_3-t_2)} \sin\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_2 \quad (33)$$

นำค่าที่ได้จากสมการ (33) แทนลงในสมการ (32) จะได้ว่า

$$t_2 \hat{F}_2 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_2)} \sin \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2 - t_3 \hat{F}_2 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_2)} \sin \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2 = 0 \quad (34)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$(t_2 - t_3) \hat{F}_2 e^{-\zeta \omega_n (t_3 - t_2)} \sin \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2 = 0 \quad (35)$$

เนื่องจาก  $t_2 - t_3$  และ  $\hat{F}_2$  มีค่าไม่เป็นศูนย์ ดังนั้นสมการ (35) จะเป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อ

$$\sin \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2 = 0 \quad (36)$$

จาก  $\sin n\pi = 0$  โดย  $n = 0, 1, 2, \dots$  และที่  $n=0$  คือเวลาที่เกิด  $\hat{F}_1$  ดังนั้นสำหรับ  $\hat{F}_2$  จึงได้ว่า

$$\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_2 = \pi \quad (37)$$

จัดรูปสมการ (37) จะได้ค่า  $t_2$  เป็น

$$t_2 = \frac{\pi}{\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n} \quad (38)$$

จากนั้นแทนค่า  $t_2$  ลงในสมการ (28) ได้เป็น

$$\left( \hat{F}_2 e^{-\zeta \omega_n \left( t_3 - \frac{\pi}{\sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n} \right)} \sin \pi \right) + \left( \hat{F}_3 \sin \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_3 \right) = 0 \quad (39)$$

จัดรูปสมการ (39) ได้เป็น

$$\hat{F}_3 \sin \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n t_3 = 0 \quad (40)$$

จาก  $\sin n\pi = 0$  โดย  $n = 0, 1, 2, \dots$  และที่  $n = 0, 1$  คือเวลาที่เกิด  $\hat{F}_1$  และ  $\hat{F}_2$  ดังนั้นสำหรับ  $\hat{F}_3$  ต้องใช้  $n = 2$  จึงได้ว่า

$$\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_3 = 2\pi \quad (41)$$

จัดรูปสมการ (41) จะได้อ่า  $t_3$  เป็น

$$t_3 = \frac{2\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n} \quad (42)$$

นำ  $t_2$  จากสมการ (38) และ  $t_3$  จากสมการ (42) แทนลงในสมการ (31) จะได้ว่า

$$-\hat{F}_2 \left( \frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n} \right) e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + \hat{F}_3 \left( \frac{2\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n} \right) = 0 \quad (43)$$

จัดรูปสมการ (43) ใหม่ได้เป็น

$$\hat{F}_3 = \frac{\hat{F}_2}{2} e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (44)$$

นำ  $t_2$   $t_3$  และ  $\hat{F}_3$  แทนลงในสมการ (27) จะได้ว่า

$$e^{\frac{-2\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} - \hat{F}_2 e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + \frac{\hat{F}_2}{2} e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} = 0 \quad (45)$$

จัดรูปสมการ (45) ได้เป็น

$$\hat{F}_2 = 2e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (46)$$

นำ  $\hat{F}_2$  จากสมการ (46) ไปแทนในสมการ (44) จะได้ว่า

$$\hat{F}_3 = e^{\frac{-2\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (47)$$

เนื่องจากต้องการให้ชุดแรงคลนนำไปใช้ได้จึงกำหนดให้  $\sum_{i=1}^N \hat{F}_i = 1$  (Normalized) สำหรับ ZVD input shaper จึงได้ว่า

$$\hat{F}_1 + \hat{F}_2 + \hat{F}_3 = 1 \quad (48)$$

จากสมการ (12) เมื่อ  $N=3$  และ  $t_1=0$  จะได้ว่า

$$\hat{F}_1 e^{-\zeta\omega_n t_3} + \left( \hat{F}_2 e^{-\zeta\omega_n(t_3-t_2)} \cos\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_2 \right) + \left( \hat{F}_3 \cos\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_3 \right) = 0 \quad (49)$$

แทนค่า  $t_2$  และ  $t_3$  ลงในสมการ (49) ได้เป็น

$$\hat{F}_1 e^{\frac{-2\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} - \hat{F}_2 e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + \hat{F}_3 = 0 \quad (50)$$

จากสมการ (29) เมื่อ  $N=3$  และ  $t_1=0$  จะได้ว่า

$$\hat{F}_2 t_2 e^{-\zeta\omega_n(t_3-t_2)} \cos\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_2 + \hat{F}_3 t_3 \cos\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t_3 = 0 \quad (51)$$

แทนค่า  $t_2$  และ  $t_3$  ลงในสมการ (51) ได้เป็น

$$\hat{F}_3 = \frac{\hat{F}_2}{2} e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (52)$$

นำ  $\hat{F}_3$  จากสมการ (52) แทนลงในสมการ (50) ได้เป็น

$$\hat{F}_2 = 2e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \hat{F}_1 \quad (53)$$

นำ  $\hat{F}_2$  จากสมการ (53) แทนลงในสมการ (52) ได้เป็น

$$\hat{F}_3 = e^{\frac{-2\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \hat{F}_1 \quad (54)$$

นำ  $\hat{F}_2$  และ  $\hat{F}_3$  ไปแทนในสมการ (48) ได้เป็น

$$\hat{F}_1 = \frac{1}{1 + 2e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + e^{\frac{-2\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}} \quad (55)$$

กำหนดให้  $e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} = K$  แทนลงในสมการ (55) เพื่อให้อยู่ในรูปแบบย่อได้เป็น

$$\hat{F}_1 = \frac{1}{K^2 + 2K + 1} \quad (56)$$

และเมื่อนำ  $\hat{F}_1$  กลับไปแทนในสมการ (53) และ (54) จะได้  $\hat{F}_2$  และ  $\hat{F}_3$  คือ

$$\hat{F}_2 = \frac{2K}{K^2 + 2K + 1} \quad (57)$$

และ

$$\hat{F}_3 = \frac{K^2}{K^2 + 2K + 1} \quad (58)$$

เมื่อกำหนดให้  $K = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$  และ  $\Delta t = \frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n}$  จะได้ขนาดและเวลาของแรงดลทั้ง 3

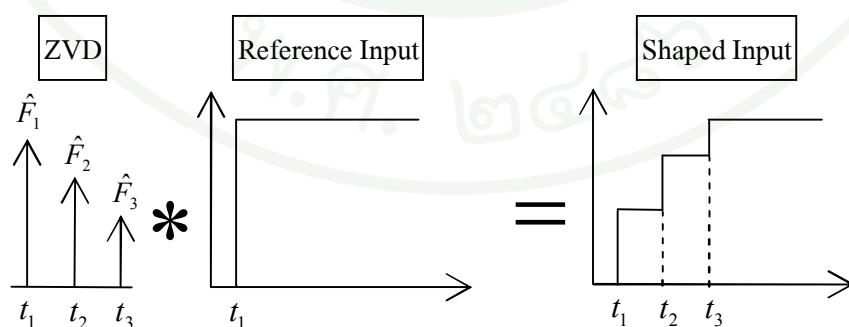
แรงสำหรับ ZVD Input Shaper ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางแสดงขนาดและเวลาของแรงดลสำหรับ ZVD Input Shaper

ลำดับแรงดล	ขนาดของแรงดล	เวลาที่เกิดแรงดล
1	$\hat{F}_1 = \frac{1}{K^2 + 2K + 1}$	$t_1 = 0$
2	$\hat{F}_2 = \frac{2K}{K^2 + 2K + 1}$	$t_2 = \Delta t$
3	$\hat{F}_3 = \frac{K^2}{K^2 + 2K + 1}$	$t_3 = 2\Delta t$

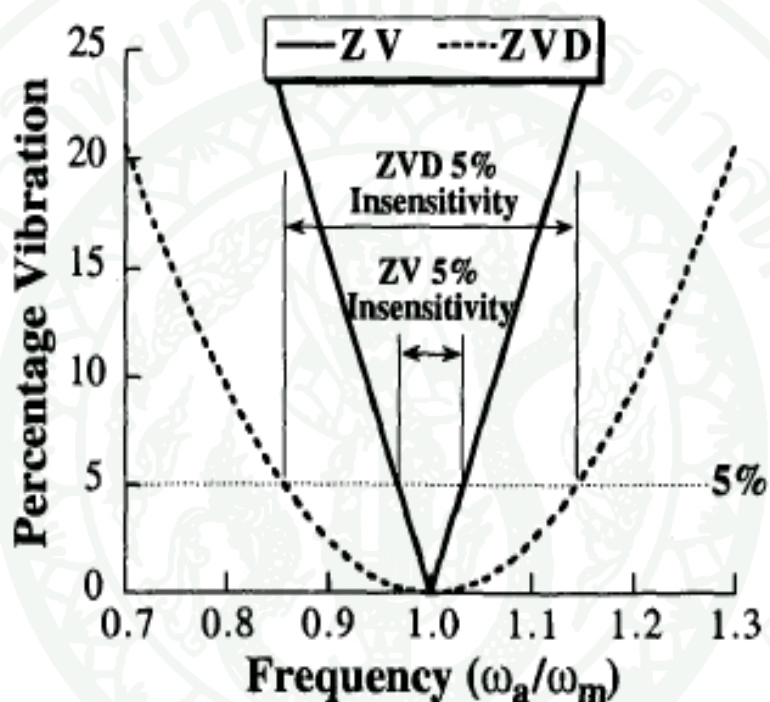
หมายเหตุ:  $K = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$  และ  $\Delta t = \frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n}$

ชุดของแรงดลที่มีแรงดลแรกขนาด  $\hat{F}_1$  ที่เวลา  $t_1$  แรงดลที่สองขนาด  $\hat{F}_2$  ที่เวลา  $t_2$  และแรงดลสุดท้ายขนาด  $\hat{F}_3$  ที่เวลา  $t_3$  เมื่อนำไป convolution กับสัญญาณอ้างอิงที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะได้สัญญาณอ้างอิงที่มีรูปร่างเปลี่ยนไปดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 6 Convolution ระหว่าง ZVD input shaper และสัญญาณอ้างอิง

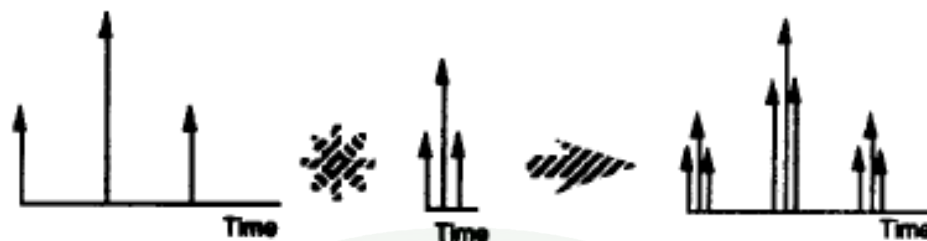
ภาพที่ 7 แสดงความไวต่อความผิดพลาดของค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อการลดการสั่นสะเทือนด้วย Input shaping แบบ ZV และ ZVD โดย ZV มีความไวมากกว่า ZVD ในขณะที่เดียวกันการเพิ่ม Derivative เพื่อเพิ่มความคงทนกลับทำให้เวลาที่เกิดแรงคลสุดท้ายมีค่ามาก ระบบจึงตอบสนองช้าลง ในการเลือกใช้ Input shaper แต่ละแบบจึงต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติด้านความคงทนและความเร็วในการตอบสนองของระบบด้วย



ภาพที่ 7 Sensitivity curve ของ Input shaper แบบต่างๆ

ที่มา: Singhose and Seering (1999)

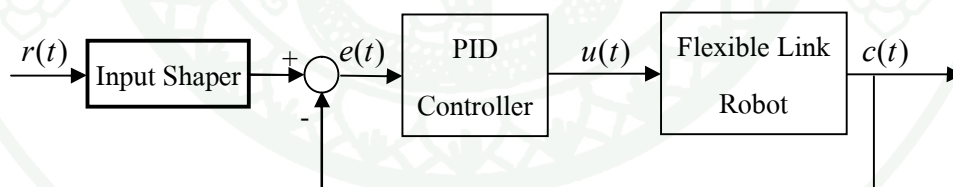
Singer and Seering (1990b) ทดลองใช้วิธีการปรับรูปร่างสัญญาณ โดยใช้ชุดแรงคลแบบ 3 แรง ลดการสั่นสะเทือนของระบบที่มีสองโหมดการสั่นซึ่งแต่ละโหมดจะมีความถี่ธรรมชาติหนึ่งค่า เพื่อให้ครอบคลุมทุกโหมดการสั่นจึงนำ Input Shaper ของทั้งสองความถี่มา convolution ให้เหลือแรงคลเพียงชุดเดียว ดังแสดงในภาพที่ 8 ซึ่งชุดแรงคลที่ได้สามารถลดการสั่นสะเทือนได้ทั้งสองโหมดการสั่นและมี 9 แรงคล



ภาพที่ 8 Convolution ระหว่างชุดแรงดล 3 แรง 2 ชุด

ที่มา: Singer and Seering (1990b)

สำหรับระบบที่มีโหมดการสั่น 3 โหมดก็จะใช้ชุดแรงดลของโหมดแรกกับโหมดที่สอง convolution กันก่อนได้เป็นชุดแรงดลที่มี 9 แรงดล จากนั้นนำไป convolution กับชุดแรงดลที่สาม จะได้เป็น 27 แรงดล เมื่อได้ Input Shaper ที่ต้องการแล้วจะต้องนำไป convolution กับสัญญาณอ้างอิงที่ใส่ให้กับระบบก่อน ซึ่งผลจากการ convolution ทำให้ได้สัญญาณอ้างอิงใหม่ที่รูปร่างเปลี่ยนไป จากนั้นนำสัญญาณอ้างอิงใหม่ไปใส่ให้ระบบควบคุมวงปิดดังแสดงในภาพที่ 9 จะทำให้ผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามสัญญาณอ้างอิงและไม่เกิดการสั่นสะเทือน



ภาพที่ 9 แผนภาพการใช้ Input Shaper ร่วมกับตัวควบคุมป้อนกลับแบบ PI

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

1. ไม้บรรทัดทำจากสแตนเลสมีความยืดหยุ่นสูง ยาว 60 ซม. กว้าง 3 เซนติเมตร และหนา 1 มิลลิเมตร จำนวน 1 อัน



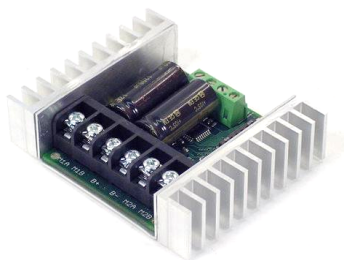
ภาพที่ 10 ไม้บรรทัดทำจากสแตนเลส

2. โครงสร้างทำจากอะลูมิเนียมสำหรับรองรับไม้บรรทัด มอเตอร์ และเอ็นโคเดอร์
3. มอเตอร์กระแสตรงของ FAULHABER รุ่น 2342L012CR พร้อมชุดเฟืองทดอัตราทด 64 ต่อ 1



ภาพที่ 11 มอเตอร์กระแสตรงพร้อมชุดเฟืองทด

4. วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงของ Dimension Engineering รุ่น Sabertooth 2x25 รับสัญญาณขาเข้าเป็นอนาล็อก 0 ถึง 5 โวลต์ ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 6 ถึง 24 โวลต์



ภาพที่ 12 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง

5. เอ็นโคเดอร์ของ Omron ความละเอียด 2,000 เส้น



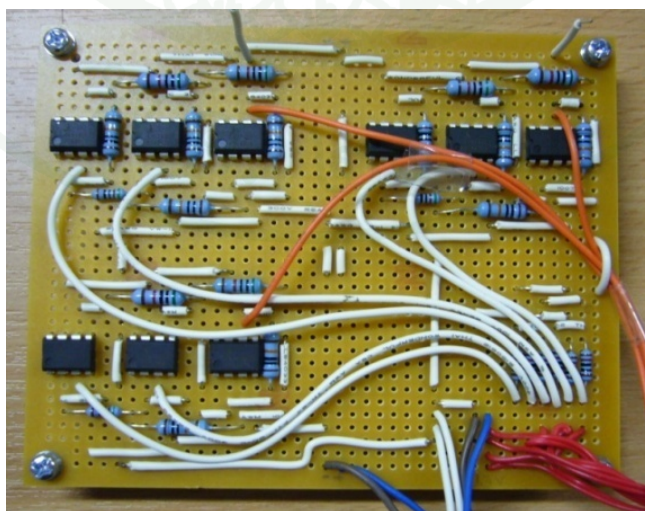
ภาพที่ 13 เอ็นโคเดอร์

6. สเตรนเกจของ Tokyo Sokki Kenkyujo รุ่น FLA-5-11 มีความต้านทาน 120 โอห์ม ขนาด 5 มิลลิเมตร มี Gauge Factor เท่ากับ 2.11 ต่อแบบ Half bridge จำนวน 3 ชุด



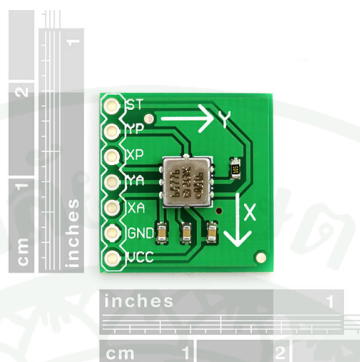
ภาพที่ 14 สเตรนเกจ

7. วงจรขยายสัญญาณสเตรนเกจ Instrumentation Amplifier อัตราขยาย 200 เท่า จำนวน 3 ชุด



ภาพที่ 15 วงจร Half bridge รวมกับวงจรขยายสัญญาณสเตรนเกจ

8. ตัววัดความเร่งของ Sparkfun รุ่น SEN-00843 ต่อกับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาด 5 โวลต์



ภาพที่ 16 ตัววัดความเร่ง

9. Battery MSB รุ่น MS6-1.2 ขนาด 6.3 โวลต์ จำนวนสองก้อนต่ออนุกรมกัน โดยทำหน้าที่เป็นไฟเลี้ยง Operational Amplifier

10. Power Supply GW INSTEK รุ่น GPS-3030D จ่ายไฟ +/-10 โวลต์ ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานสำหรับมอเตอร์กระแสตรง โดยต่อผ่านวงจรขับเคลื่อน

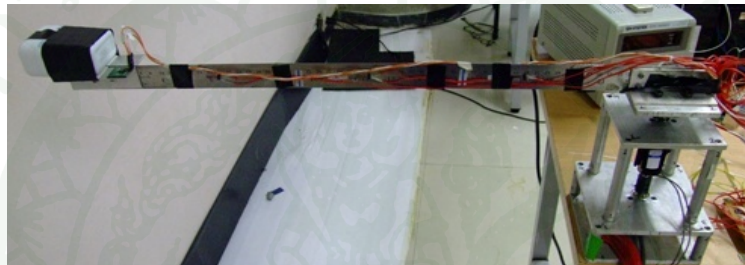


ภาพที่ 17 แหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับมอเตอร์กระแสตรง

11. คอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง โดยเครื่อง Target ติดตั้ง PCI6221 Data Acquisition และ Labview Realtime ส่วนเครื่อง Host ติดตั้งโปรแกรม Labview 8.2 เชื่อมต่อกันด้วยสายแลน

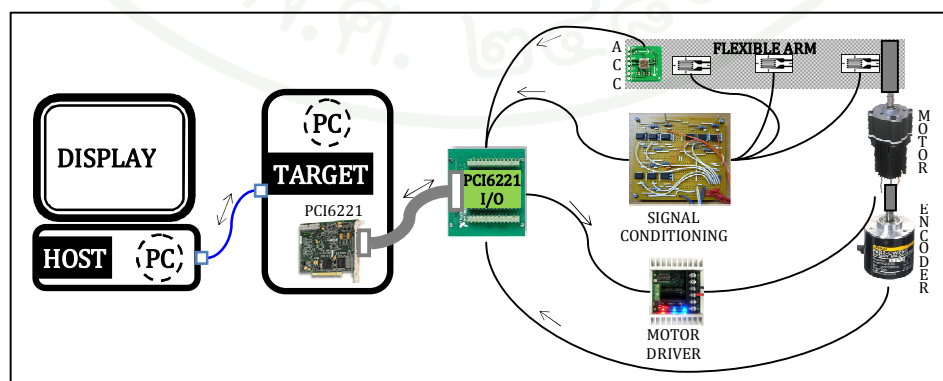
## วิธีการ

ก่อนทำการทดลองต้องติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกัน โดยในส่วนทำงานประกอบด้วยไม้บรรทัดสเตนเลสที่มีมวลขนาด 30 กรัม ติดอยู่ที่ปลายอิสระ และมีตัววัดความเร่งวัดขนาดการสั่นสะเทือน สเตรนเกจ 3 ชุด ติดตั้งบนไม้บรรทัดโดยยึดด้วยกาวที่ตำแหน่ง 15 30 และ 45 เซ็นติเมตร ปลายแขนอีกด้านหนึ่งจะถูกยึดกับเพลาคับของมอเตอร์กระแสตรงและมีเอ็นโคเดอร์วัดมุมที่มอเตอร์หมุนไป ชุดแขนกลถูกติดตั้งโดยยึดแน่นกับโต๊ะในห้องทดลอง Control of robot and vibration Laboratory (CRV Lab) ตึก RDiPt ชั้น 5



ภาพที่ 18 แขนกลที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อประกอบอุปกรณ์ขึ้นเป็นแขนกลแล้วจึงทำการเชื่อมต่อสายสัญญาณจากอุปกรณ์วัดและขับเคลื่อนเข้าสู่แหล่งจ่ายไฟฟ้าและแผงวงจรควบคุมดังภาพที่ 19 เมื่อทำการทดลองให้ใช้เวลาในการสุ่มสัญญาณมีค่าเป็น 0.01 วินาที ค่าคงที่ตัวควบคุมแบบสัดส่วนมีค่าเป็น 0.05 และค่าคงที่ตัวควบคุมแบบปริพันธ์มีค่าเป็น 0.01 ให้กับแผงควบคุมในโปรแกรม Labview บนหน้าจอเครื่อง Host จากนั้นเริ่มทำการทดลองและบันทึกผลดังนี้



ภาพที่ 19 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์สำหรับควบคุมแขนกล

## 1. การหาค่าความถี่ธรรมชาติและค่าอัตราส่วนความหน่วง

หาค่าความถี่ธรรมชาติโดยใช้โปรแกรม Labview เก็บค่าสัญญาณการสั่นสะเทือนจากตัววัดความเร่งที่ติดบนปลายแขนกล โดยให้สัญญาณรูปคลื่นไซน์ 0 ถึง 10 เฮิรซ์ แล้วใช้โปรแกรม Matlab วิเคราะห์ความถี่แบบ FFT (Fast Fourier Transform) จะได้ค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกล ในที่นี้ใช้ความถี่ 3 ค่าแรก จากนั้นหาค่าอัตราส่วนความหน่วงด้วยวิธี Half-power Bandwidth method ได้จากการวิเคราะห์ FFT สามารถหาค่าอัตราส่วนความหน่วงโดยลากเส้นตรงแนวนอนให้ต่ำกว่าจุดสูงสุดของความถี่ธรรมชาติที่สนใจลงมา 3 เดซิเบลตัดกราฟ FFT จะได้จุดตัด 2 จุด จากนั้นลากเส้นตรงจากจุดตัดลงมาที่แกนความถี่จะได้สองความถี่ที่มีค่าต่างกัน

กำหนดให้ความถี่ค่าน้อยเป็น  $\omega_1$  และความถี่ค่ามากเป็น  $\omega_2$  ส่วนความถี่ธรรมชาติซึ่งจะมีค่าสูงที่สุดให้เป็น  $\omega_n$  จะสามารถหาค่าอัตราส่วนความหน่วงได้จาก

$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_n}$$

## 2. การสร้าง ZVD input shaper

คำนวณ impulse sequence สำหรับ ZVD input shaper โดยโปรแกรม Matlab ป้อนค่าความถี่ธรรมชาติและค่าอัตราส่วนความหน่วงที่ได้ทั้งหมดลงในชุดคำสั่งคำนวณ ZVD input shaper ในโปรแกรม Matlab จะได้กราฟแสดงขนาดและเวลาของอิมพัลส์ทั้งหมด พร้อมกับบันทึกค่าในรูป text file เพื่อนำไปใช้ปรับรูปร่างสัญญาณอ้างอิงในโปรแกรม Labview

## 3. การหาผลตอบสนองของระบบสำหรับสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได

ปิดการทำงานของ Input shaping ในโปรแกรม Labview แล้วเริ่มทดลองจากการป้อนสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดขนาด 1 เรเดียนให้กับระบบโดยเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 0 ถึง 100 วินาที แล้วใช้ชุดคำสั่งพล็อตกราฟผลตอบสนองเทียบกับเวลา

#### 4. การหาผลตอบสนองของระบบสำหรับสัญญาณอ้างอิงแบบควบคุมด้วยมือ

เปิดการทำงานของ Input shaping ในโปรแกรม Labview แล้วเริ่มทดลองจากการป้อนสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดขนาด 1 เรเดียนให้กับระบบโดยเก็บข้อมูลตั้งแต่เวลา 0 ถึง 100 วินาที แล้วใช้ชุดคำสั่งพล็อตกราฟผลตอบสนองเทียบกับเวลา



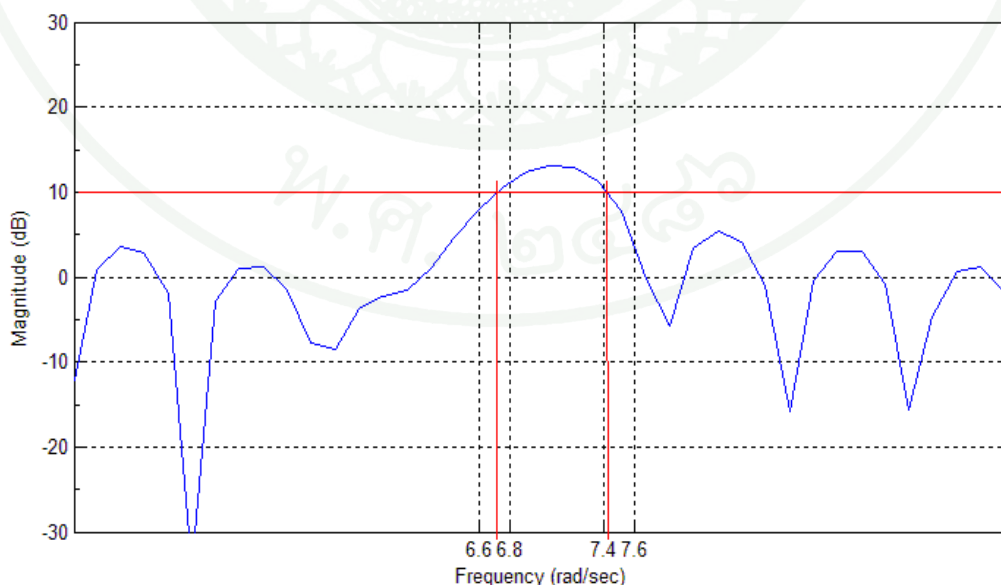
## ผลและวิจารณ์

### ผล

#### 1. การหาค่าความถี่ธรรมชาติและค่าอัตราส่วนความหน่วง

เมื่อให้สัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีความถี่จาก 0 ถึง 10 เฮิรซ์ และวัดขนาดการสั่นที่ปลายแขน ด้วยตัววัดความเร่ง พบว่าขนาดการสั่นของแขนกลมีการแปรเปลี่ยนไปไม่คงที่ เมื่อนำข้อมูลความเร่งที่บันทึกในแต่ละความถี่ซึ่งอยู่ในโดเมนเวลามาแปลงให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่โดยใช้ฟังก์ชันการแปลงฟูเรียร์อย่างรวดเร็ว (FFT) ในโปรแกรม Matlab ก็จะทราบขนาดการสั่นของแขนกลในทุกๆความถี่ และค่าความถี่ธรรมชาติก็จะเท่ากับความถี่ที่มี Magnitude มากกว่าความถี่ใกล้เคียง

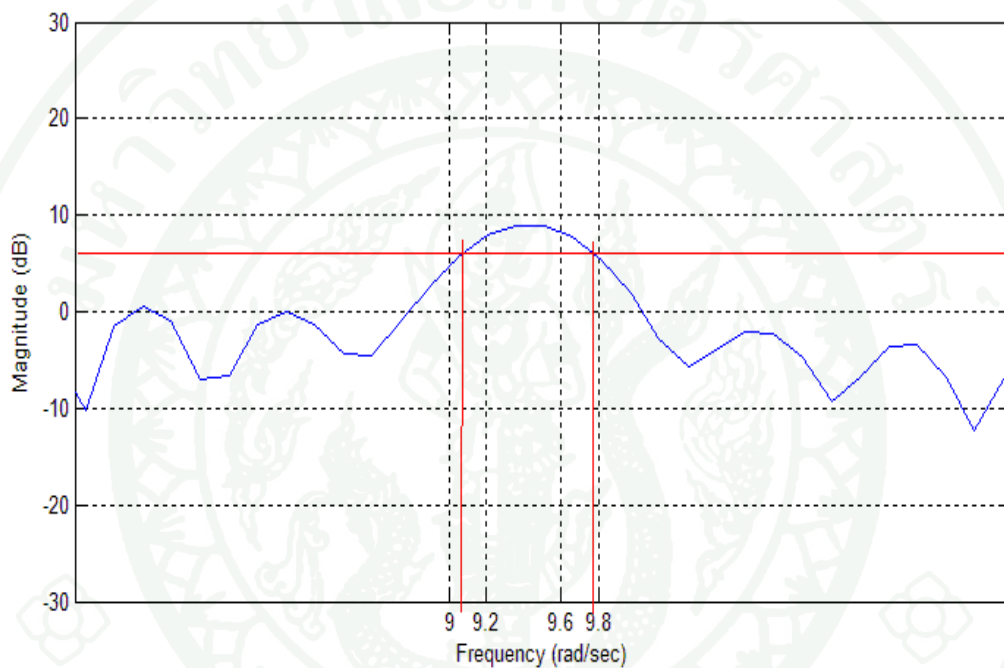
ผลจากการแปลง FFT ของผลตอบสนองที่ความถี่ตั้งแต่ 0.1 ถึง 10 เฮิรซ์ พบว่าความถี่ที่มี Magnitude สูงสุดสามความถี่แรกซึ่งก็คือค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลมีค่าประมาณ 1.1 1.5 และ 2.1 เฮิรซ์ หรือ 7.9.4 และ 13.04 เรเดียนต่อวินาที และคำนวณค่าอัตราส่วนความหน่วงในแต่ละความถี่ได้จากวิธี Half-power Bandwidth Method ได้เป็น 0.05 0.04 และ 0.021 ดังแสดงในภาพที่ 20 ภาพที่ 21 และ ภาพที่ 22



ภาพที่ 20 การหาค่าอัตราส่วนความหน่วงจากกราฟ FFT ที่ความถี่ 7 เรเดียนต่อวินาที

จากภาพที่ 20 พบว่า Magnitude สูงสุดมีค่า 13.1 เดซิเบล ลากเส้นจากค่า Magnitude ต่ำลง มา 3 เดซิเบลขนานแกนความถี่ตัดจะได้จุดตัดสองจุดที่ความถี่ 6.7 และ 7.4 เรเดียนต่อวินาที ดังนั้น คำนวณค่าอัตราส่วนความหน่วงที่ความถี่ 7 เรเดียนต่อวินาทีได้เป็น

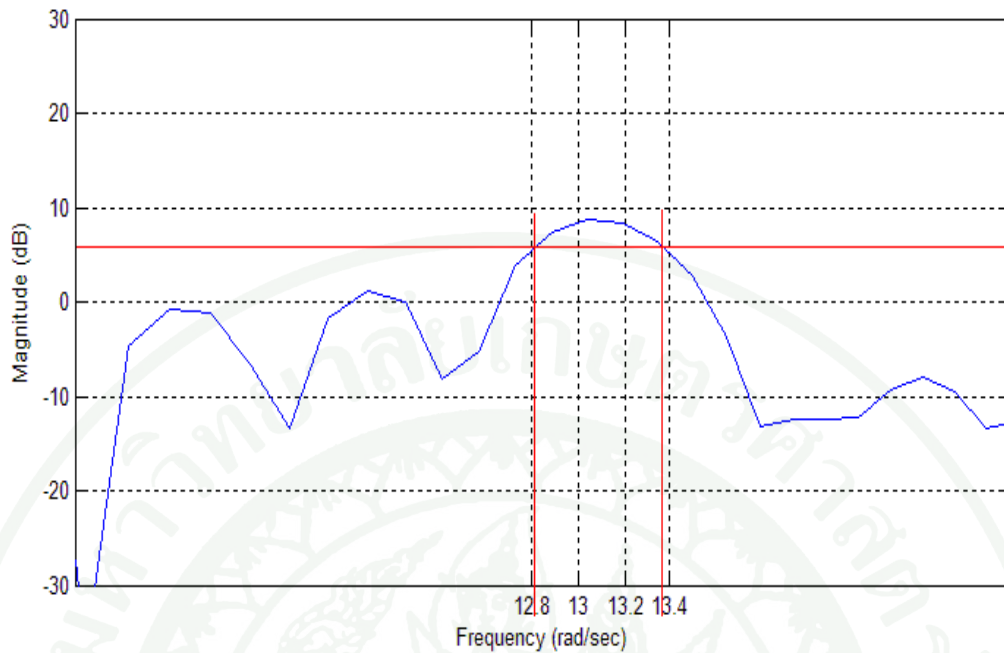
$$\zeta = \frac{7.4 - 6.7}{2(7)} = 0.05$$



ภาพที่ 21 การหาค่าอัตราส่วนความหน่วงจากกราฟ FFT ที่ความถี่ 9.4 เรเดียนต่อวินาที

จากภาพที่ 21 พบว่า Magnitude สูงสุดมีค่า 13.1 เดซิเบล ลากเส้นจากค่า Magnitude ต่ำลง มา 3 เดซิเบลขนานแกนความถี่ตัดจะได้จุดตัดสองจุดที่ความถี่ 9.05 และ 9.8 เรเดียนต่อวินาที ดังนั้น คำนวณค่าอัตราส่วนความหน่วงที่ความถี่ 9.4 เรเดียนต่อวินาทีได้เป็น

$$\zeta = \frac{9.8 - 9.05}{2(9.4)} = 0.04$$



ภาพที่ 22 การหาค่าอัตราส่วนความหน่วงจากกราฟ FFT ที่ความถี่ 13.04 เรเดียนต่อวินาที

จากภาพที่ 22 พบว่า Magnitude สูงสุดมีค่า 8.7 เดซิเบล ลากเส้นจากค่า Magnitude ต่ำลงมา 3 เดซิเบลขนานแกนความถี่ตัดจะได้จุดตัดสองจุดที่ความถี่ 12.8 และ 13.4 เรเดียนต่อวินาที ดังนั้น คำนวณค่าอัตราส่วนความหน่วงที่ความถี่ 13.04 เรเดียนต่อวินาทีได้เป็น

$$\zeta = \frac{13.4 - 12.8}{2(13.04)} = 0.023$$

ตารางที่ 2 สรุปค่าความถี่ธรรมชาติและค่าอัตราส่วนความหน่วงจากการทดลอง

ความถี่ธรรมชาติ, $\omega_n$ (rad/sec)	ความถี่ที่จุดตัด 1, $\omega_1$ (rad/sec)	ความถี่ที่จุดตัด 2, $\omega_2$ (rad/sec)	อัตราส่วน ความหน่วง, $\zeta$
7	6.7	7.4	0.05
9.4	9.05	9.8	0.04
13.04	12.8	13.4	0.023

ค่าความถี่ธรรมชาติ และค่าอัตราส่วนความหน่วงที่ได้ตามตารางที่ 2 จะถูกใช้ในการสร้าง ZVD input shaper ในหัวข้อถัดไป

## 2. การสร้าง ZVD input shaper

สำหรับ ZVD Input Shaper สามารถหาชุดแรงคลที่ประกอบด้วยแรงคล 3 แรงในแต่ละ โหมดการสั่นสะเทือนโดยแทนค่า  $\omega_n$  และ  $\zeta$  ของโหมดนั้นๆ ลงในตารางแสดงขนาดและเวลา ของแรงคลสำหรับ ZVD Input Shaper (ตารางที่ 1)

โหมดการสั่นที่ 1:  $\omega_n = 7$  และ  $\zeta = 0.05$

$$K = e^{\frac{-0.05\pi}{\sqrt{1-0.05^2}}} = 0.85$$

$$\Delta t = \frac{\pi}{7\sqrt{1-0.05^2}} = 0.45$$

แทนค่า  $K$  และ  $\Delta t$  ตามตารางที่ 1 ได้ชุดแรงคลที่มีขนาดและเวลาดังนี้

ขนาดของแรงคลสำหรับโหมดที่ 1

$$\hat{F}_1 = \frac{1}{0.85^2 + 2(0.85) + 1} = 0.29$$

$$\hat{F}_2 = \frac{2(0.85)}{0.85^2 + 2(0.85) + 1} = 0.50$$

$$\hat{F}_3 = \frac{0.85^2}{0.85^2 + 2(0.85) + 1} = 0.21$$

เวลาที่เกิดแรงคลสำหรับโหมดที่ 1

$$t_1 = 0$$

$$t_2 = 0.45$$

$$t_3 = 2(0.45) = 0.90$$

โหมดการสั่นที่ 2:  $\omega_n = 9.4$  และ  $\zeta = 0.04$

$$K = e^{\frac{-0.04\pi}{\sqrt{1-0.04^2}}} = 0.88$$

$$\Delta t = \frac{\pi}{9.4\sqrt{1-0.04^2}} = 0.33$$

แทนค่า  $K$  และ  $\Delta t$  ตามตารางที่ 1 ได้ชุดแรงคลที่มีขนาดและเวลาดังนี้

ขนาดของแรงคลสำหรับโหมดที่ 2

$$\hat{F}_1 = \frac{1}{0.88^2 + 2(0.88) + 1} = 0.28$$

$$\hat{F}_2 = \frac{2(0.88)}{0.88^2 + 2(0.88) + 1} = 0.50$$

$$\hat{F}_3 = \frac{0.88^2}{0.88^2 + 2(0.88) + 1} = 0.22$$

เวลาที่เกิดแรงคลสำหรับโหมดที่ 2

$$t_1 = 0$$

$$t_2 = 0.33$$

$$t_3 = 2(0.33) = 0.66$$

โหมดการสั่นที่ 3:  $\omega_n = 13.04$  และ  $\zeta = 0.023$

$$K = e^{\frac{-0.023\pi}{\sqrt{1-0.023^2}}} = 0.93$$

$$\Delta t = \frac{\pi}{13.04\sqrt{1-0.023^2}} = 0.24$$

แทนค่า  $K$  และ  $\Delta t$  ตามตารางที่ 1 ได้ชุดแรงคลที่มีขนาดและเวลาดังนี้

ขนาดของแรงคลสำหรับโหมดที่ 3

$$\hat{F}_1 = \frac{1}{0.93^2 + 2(0.93) + 1} = 0.27$$

$$\hat{F}_2 = \frac{2(0.93)}{0.93^2 + 2(0.93) + 1} = 0.50$$

$$\hat{F}_3 = \frac{0.93^2}{0.93^2 + 2(0.93) + 1} = 0.23$$

เวลาที่เกิดแรงคลสำหรับโหมดที่ 3

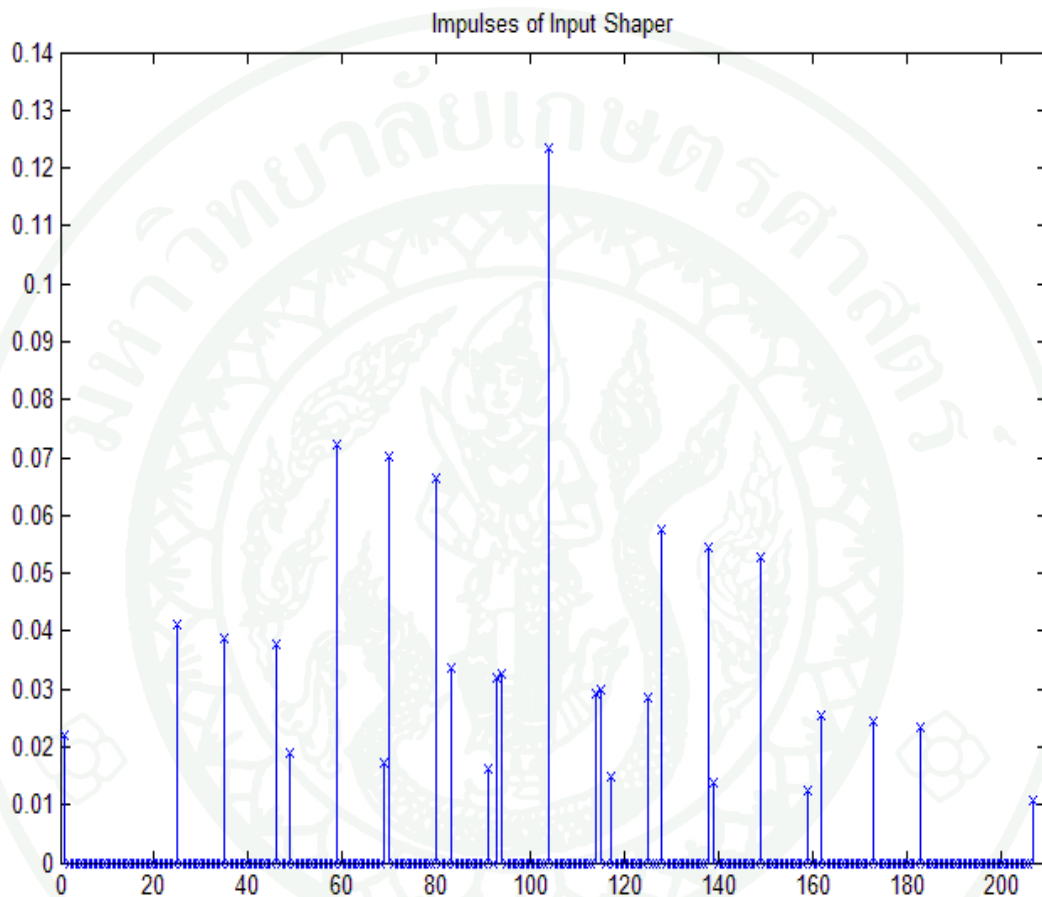
$$t_1 = 0$$

$$t_2 = 0.24$$

$$t_3 = 2(0.24) = 0.48$$

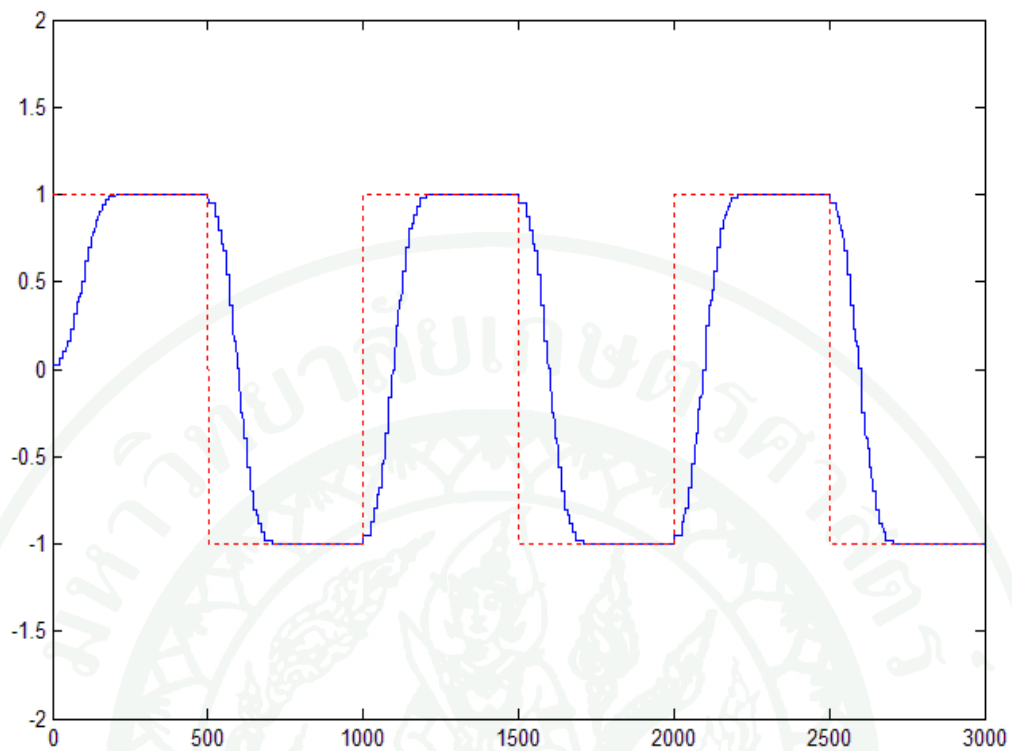
เมื่อใส่ค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนความหน่วงในคำสั่งคำนวณ ZVD input shaper ในโปรแกรม Matlab แล้วสั่งประมวลผลจะได้ชุดแรงคลที่มีขนาดและเวลาต่างๆกันดังแสดงในภาพที่ 23 โดยชุดแรงคลนี้เป็นสัญญาณอนาล็อกแบบไม่ต่อเนื่องที่มี 27 แรง โดยแรงคลแรกเริ่มต้นที่

เวลา 0 วินาทีและแรงคลดสุดท้ายสิ้นสุดที่เวลา 2.07 วินาที ตัวควบคุมที่สร้างจากคอมพิวเตอร์มีความเร็วในการสุ่มสัญญาณ 0.01 วินาที ดังนั้นจะมีข้อมูลทั้งหมด 207 ค่าที่จะนำไป convolution กับสัญญาณอ้างอิงที่สุ่มด้วยความเร็วเท่ากันในโปรแกรม Labview

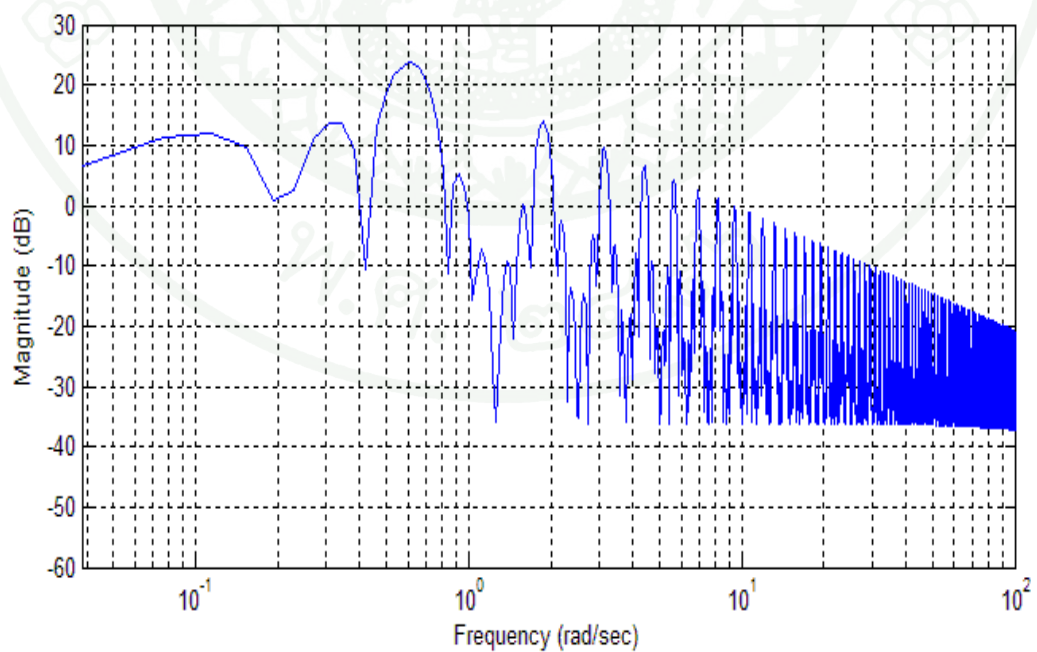


ภาพที่ 23 ชุดแรงคลดของ ZVD input shaper จากความถี่ธรรมชาติทั้ง 3 ค่าของแกนกล

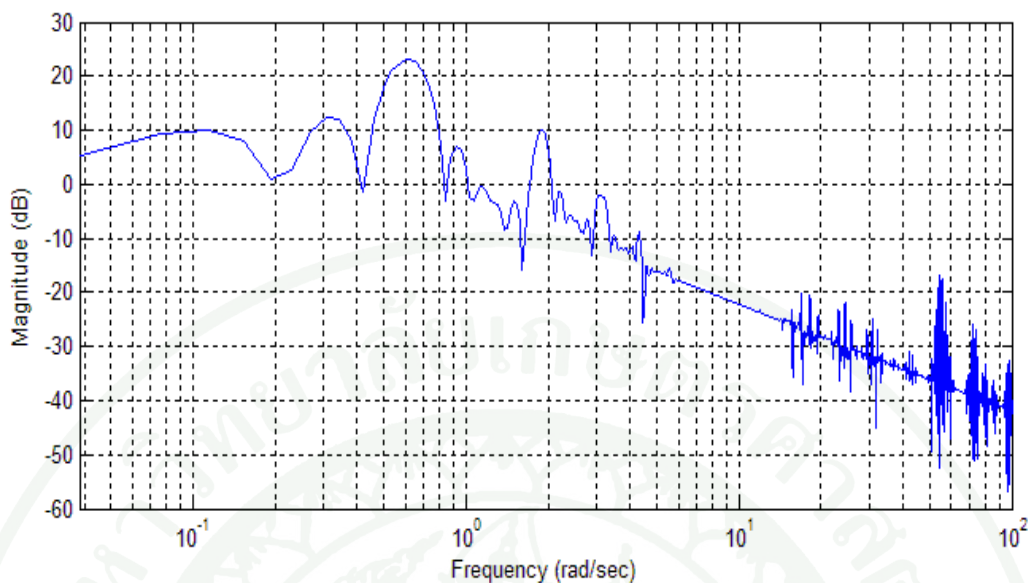
จากภาพที่ 24 สังเกตเส้นประคือสัญญาณอ้างอิงที่ Convolution กับ ZVD input shaper แล้ว ซึ่งจะเกิด delay จากสัญญาณอ้างอิงเริ่มต้นประมาณสองวินาทีเท่ากับเวลาของ Impulse ค่าสุดท้ายของ shaper ซึ่งหากสัญญาณอ้างอิงสิ้นสุดลงก่อนเวลาสุดท้ายนี้จะทำให้ผลตอบสนองเมื่อใช้ Input shaper ไม่สามารถเข้าสู่ค่าสุดท้ายได้ ถือเป็นข้อเสียหลักของ Input shaping



ภาพที่ 24 สัญญาณอ้างอิงที่ใช้ Input shaper (เส้นทึบ) และไม่ใช่ Input shaper (เส้นประ)



ภาพที่ 25 ผลวิเคราะห์ FFT ของสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได



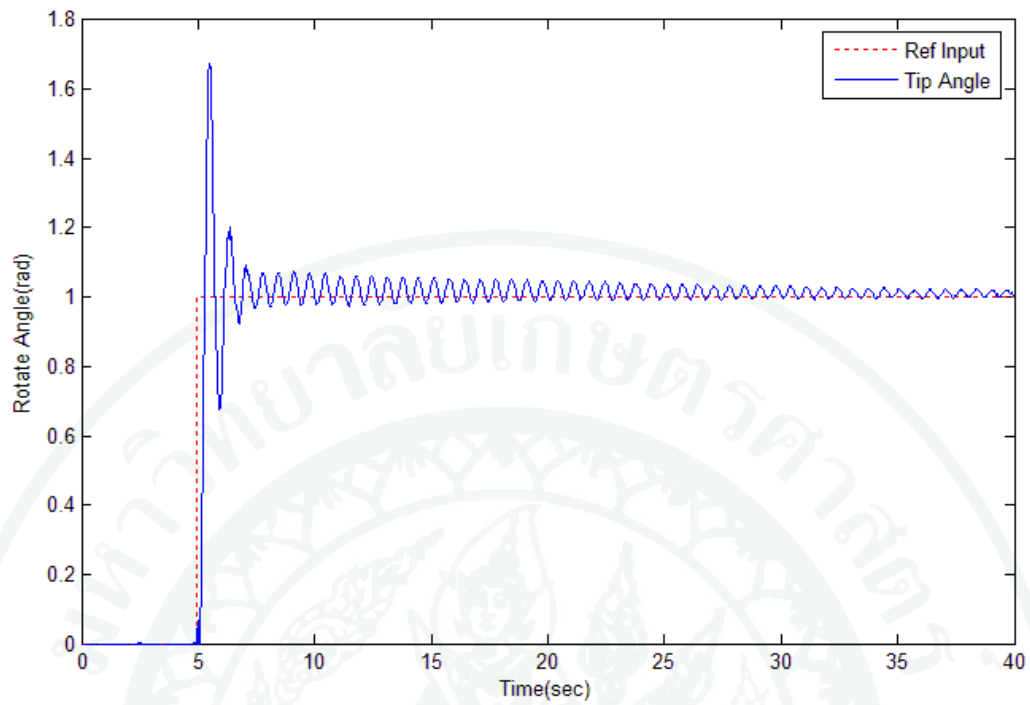
ภาพที่ 26 ผลวิเคราะห์ FFT ของสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดเมื่อใช้ Input shaper

จากภาพที่ 25 และภาพที่ 26 พบว่าสัญญาณอ้างอิงที่ผ่านการปรับรูปร่างแล้วจะไม่มีพลังงานเกิดขึ้นบริเวณความถี่ที่ใช้ช้ออกแบบ Input shaper ดังนั้นเมื่อจึงไม่เกิดการกระตุ้นความถี่ธรรมชาติของแขนกล

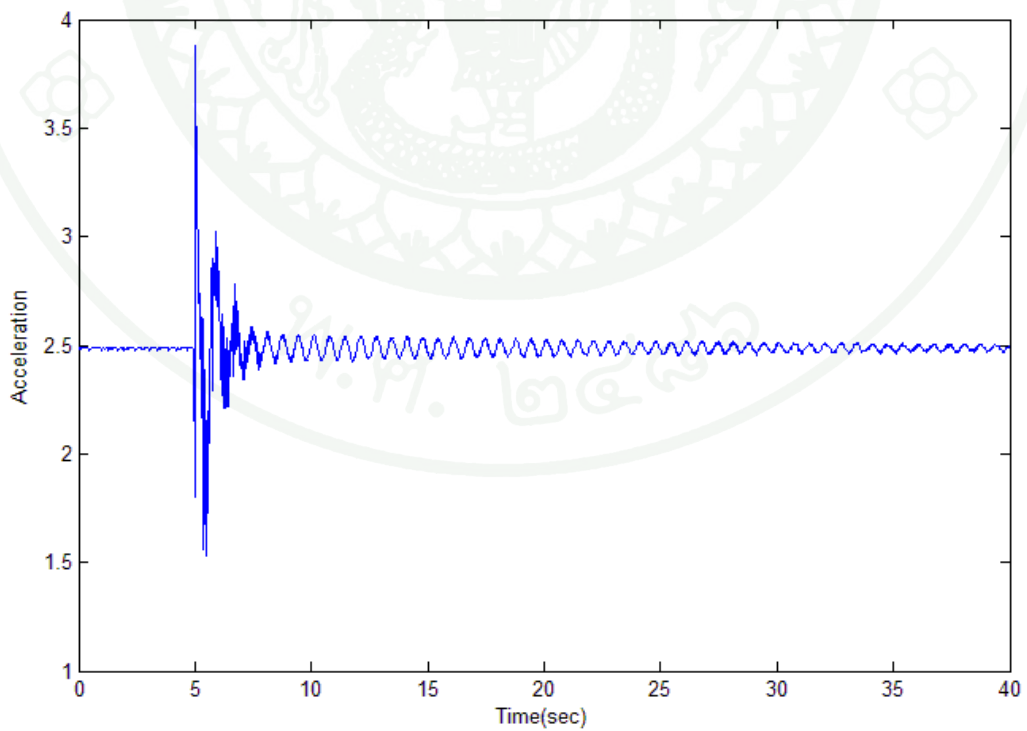
### 3. การหาผลตอบสนองของระบบสำหรับสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได

การทดลองนี้ทำการใส่สัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดให้กับระบบ โดยขนาดสัญญาณมีค่าเป็น 1 เรเดียน และเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลที่ได้จากสเตรนเกจ นำมาพล็อตเปรียบเทียบกันดังภาพที่ 27 โดยเส้นประเป็นสัญญาณอ้างอิงที่ป้อนเข้าและเส้นทึบเป็นผลตอบสนองของระบบ

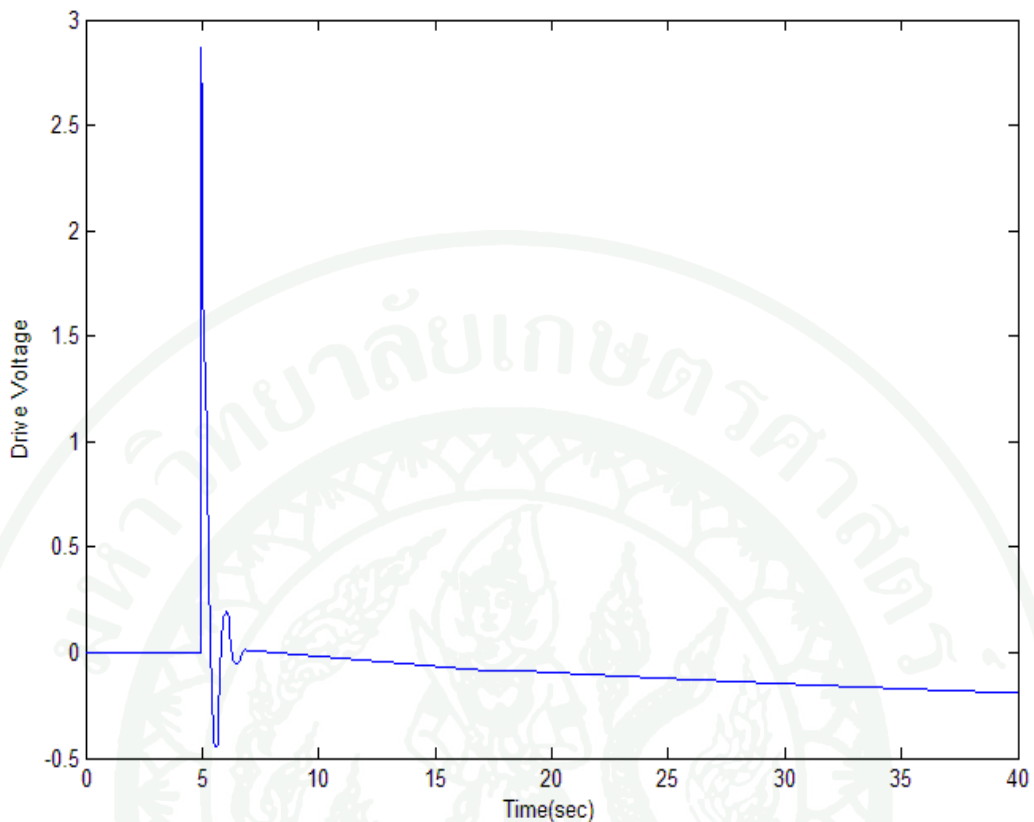
จากผลตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอในภาพที่ 27 ช่วงเวลาขึ้น (Rise Time,  $t_r$ ) ที่ 10-90% ของสัญญาณอ้างอิงมีค่า 0.14 วินาที ค่าพุ่งเกิน (Maximum Overshoot,  $M_p$ ) มีค่า 1.67 เรเดียนหรือคิดเป็น 67% และเวลาสู่สมดุล (Settling Time,  $t_s$ ) ที่ค่าผิดพลาดไม่เกิน +/-5% มีค่าเป็น 14.17 วินาที จากภาพที่ 28 ขนาดการสั่นสะเทือนสูงสุดที่ได้จากตัววัดความเร่งคือ 1.39 โวลต์ และจากภาพที่ 29 ขนาดสัญญาณควบคุมที่ต้องป้อนให้วงจรถับมอเตอร์คือ 2.88 โวลต์



ภาพที่ 27 ผลตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ



ภาพที่ 28 ขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

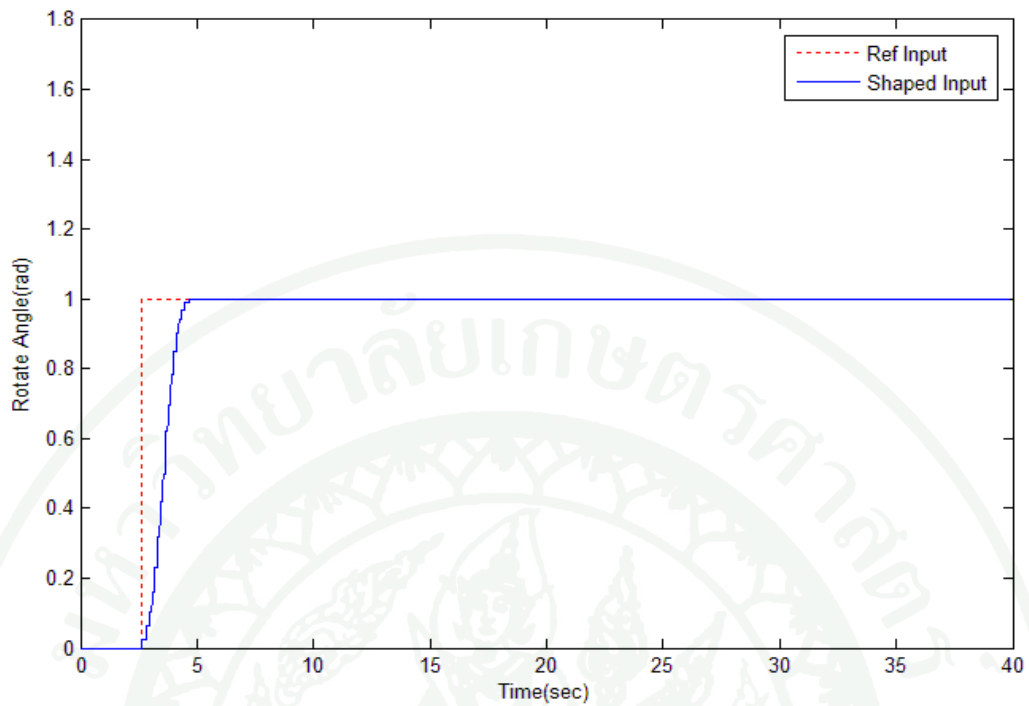


ภาพที่ 29 ขนาดสัญญาณควบคุมเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

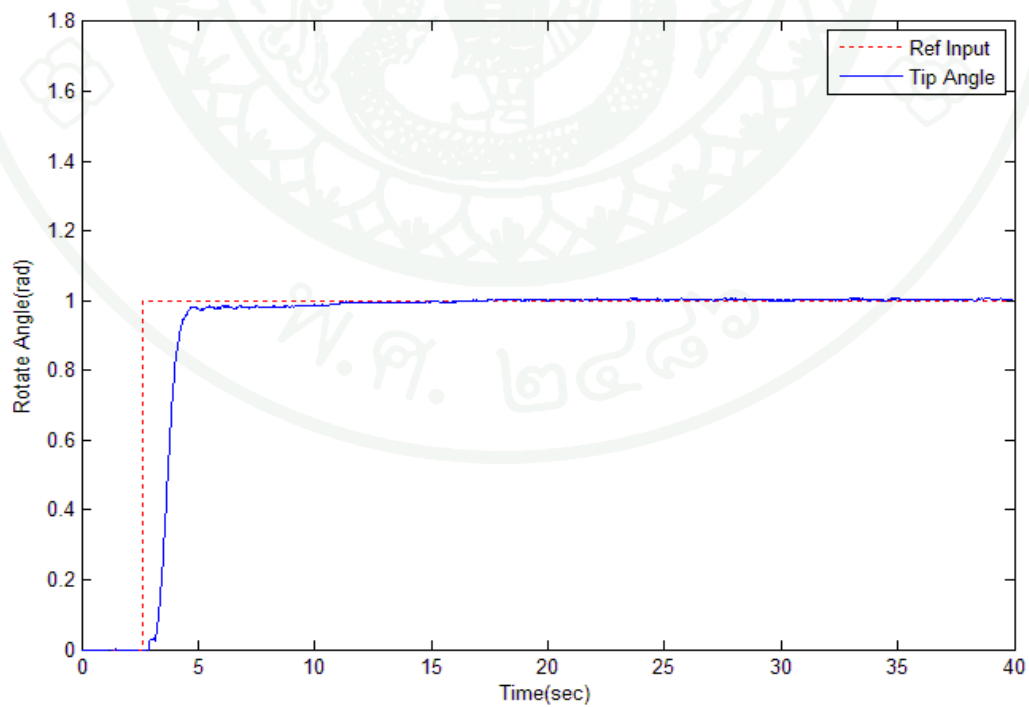
เมื่อใช้ Input Shaping เพื่อลดการสั่นสะเทือนสัญญาณอ้างอิงเริ่มต้นจะถูกแปลงรูปร่างโดยการ Convolution กับชุดแรงดลแบบ ZVD และได้เป็นสัญญาณอ้างอิงใหม่ดังแสดงในภาพที่ 30

จากผลตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอและZVD ในภาพที่ 31 ช่วงเวลาขึ้น (Rise Time,  $t_r$ ) ที่ 10-90% ของสัญญาณอ้างอิงมีค่าเป็น 0.88 วินาที ค่าพุ่งเกิน (Maximum Overshoot,  $M_p$ ) มีค่าเป็น 0 เรเดียนหรือคิดเป็น 0% และเวลาสู่สมดุลย์ (Settling Time,  $t_s$ ) ที่ค่าผิดพลาดไม่เกิน  $\pm 5\% = 1.81$  วินาที จากภาพที่ 32 ขนาดการสั่นสะเทือนที่ได้จากตัววัดความเร่งเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอร่วมกับZVD คือ 0.15 โวลต์ และจากภาพที่ 33 ขนาดสัญญาณควบคุมที่ต้องป้อนให้วงจรมอเตอร์คือ 0.6 โวลต์

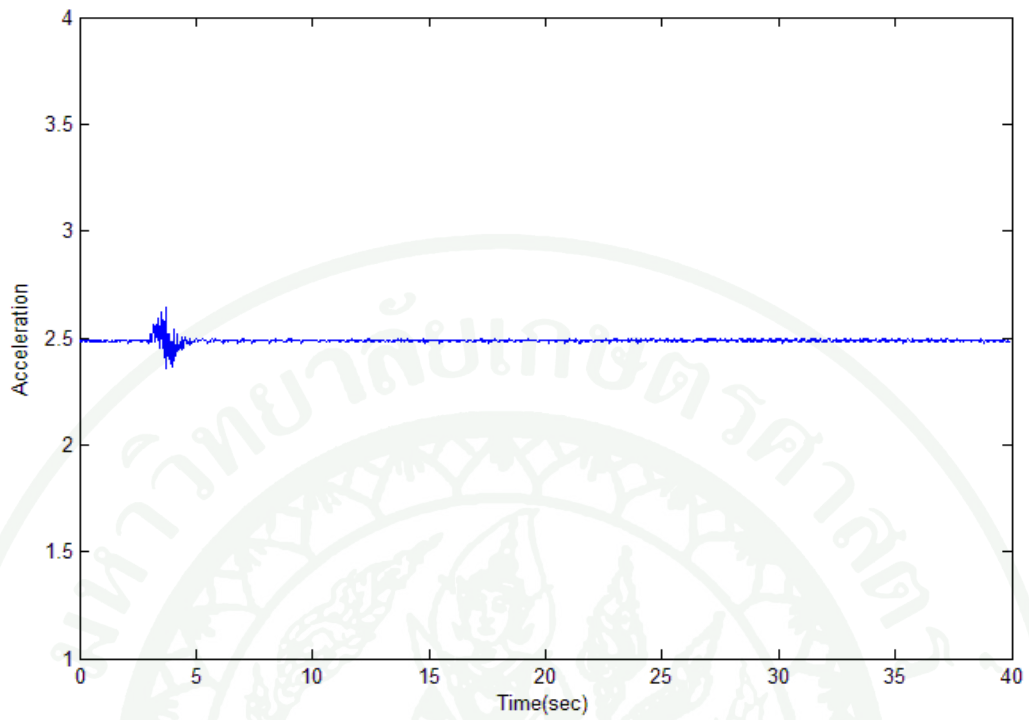
จากภาพที่ 34 และภาพที่ 35 พบว่าการใช้ ZVD Input Shaper ทำให้การสั่นสะเทือนมีค่าน้อยกว่าการใช้ตัวควบคุมเดิมอย่างเห็นได้ชัด



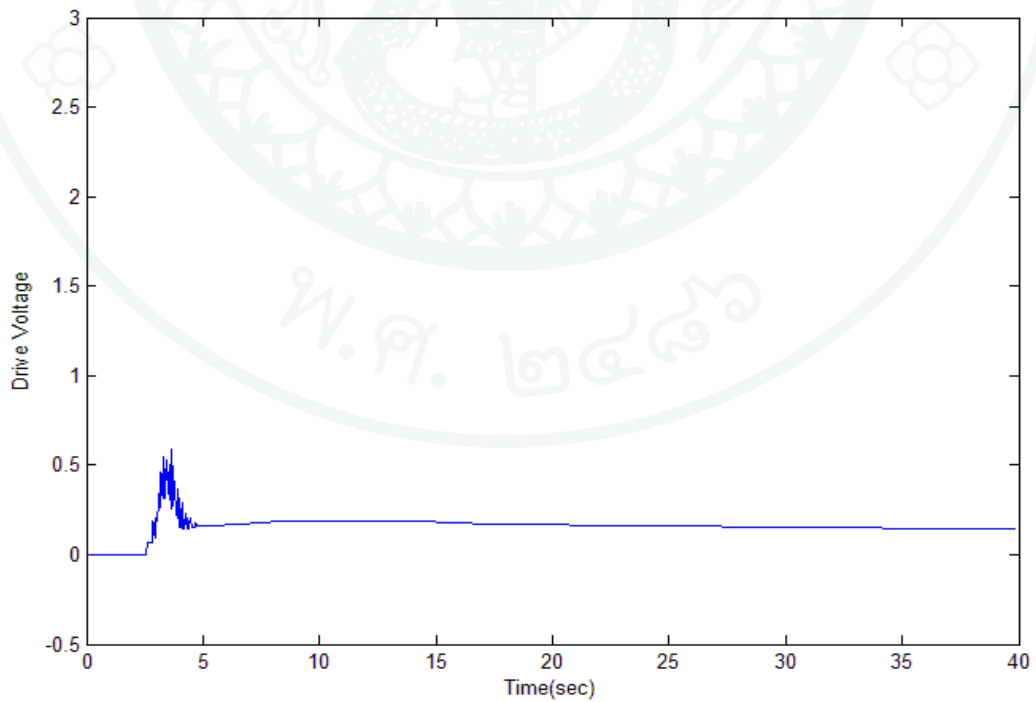
ภาพที่ 30 เปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงเริ่มต้นและสัญญาณอ้างอิงที่ถูกปรับรูปร่าง



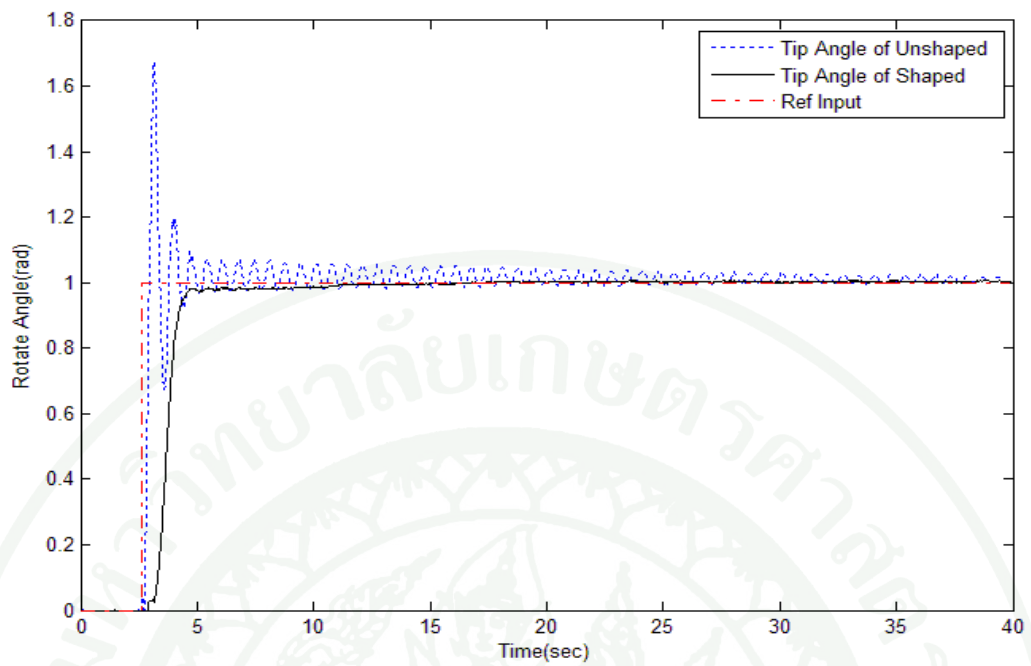
ภาพที่ 31 ผลตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอและZVD



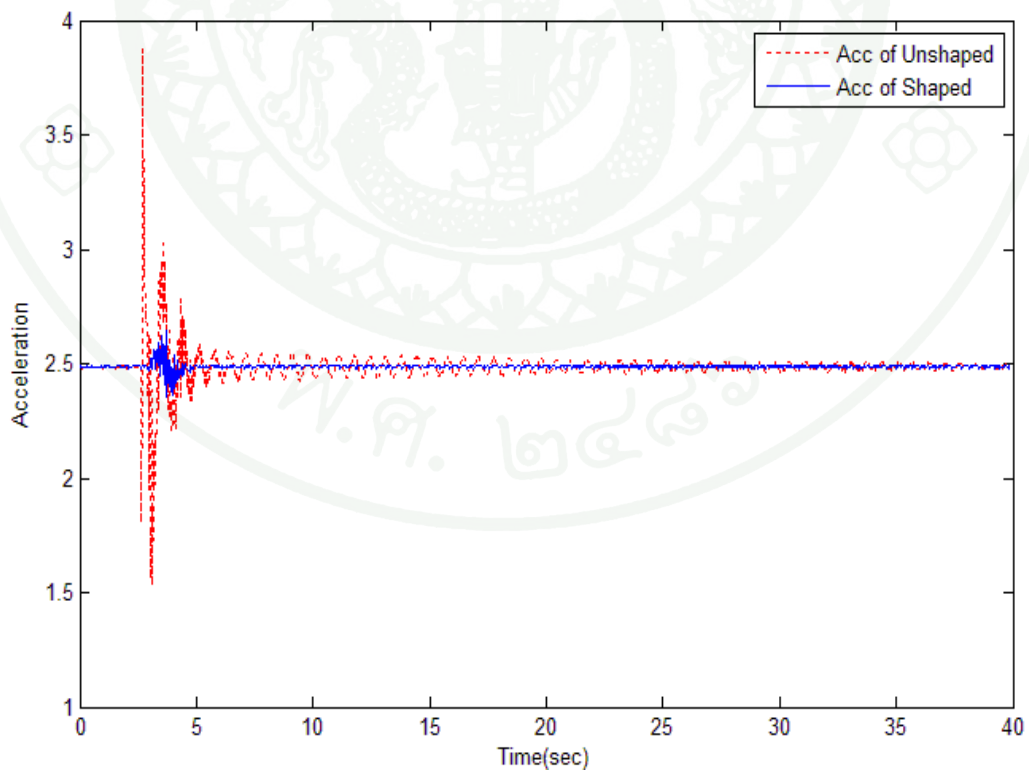
ภาพที่ 32 ขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอและZVD



ภาพที่ 33 ขนาดสัญญาณควบคุมเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอและZVD

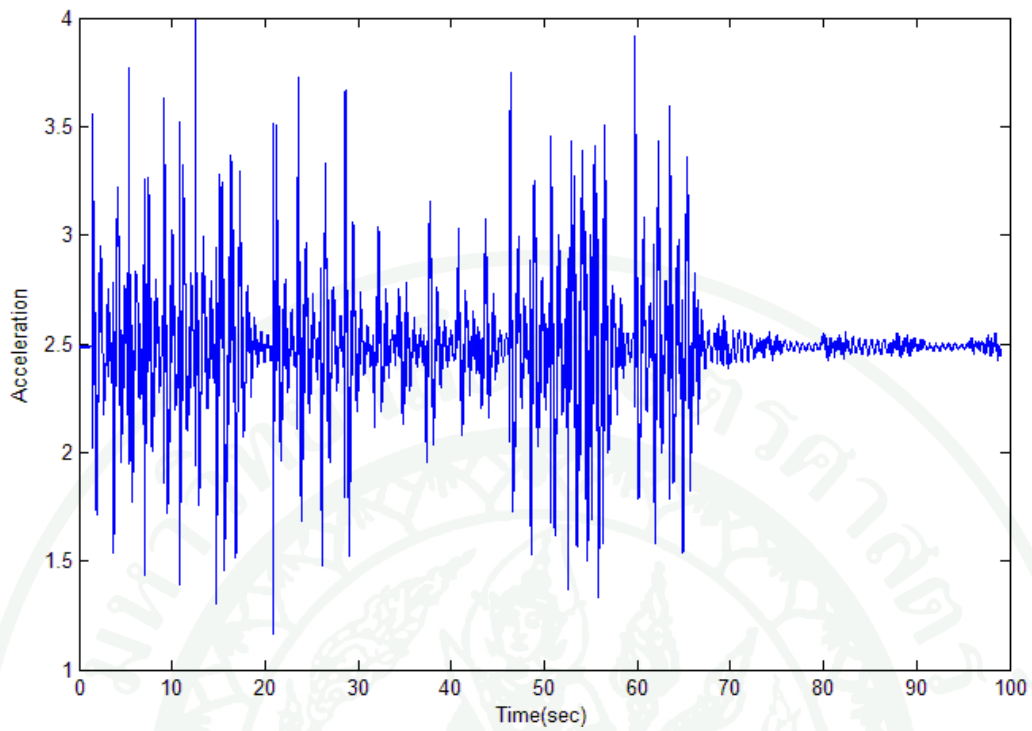


ภาพที่ 34 เปรียบเทียบผลการตอบสนองเมื่อใช้และไม่ใช้ ZVD Input shaper

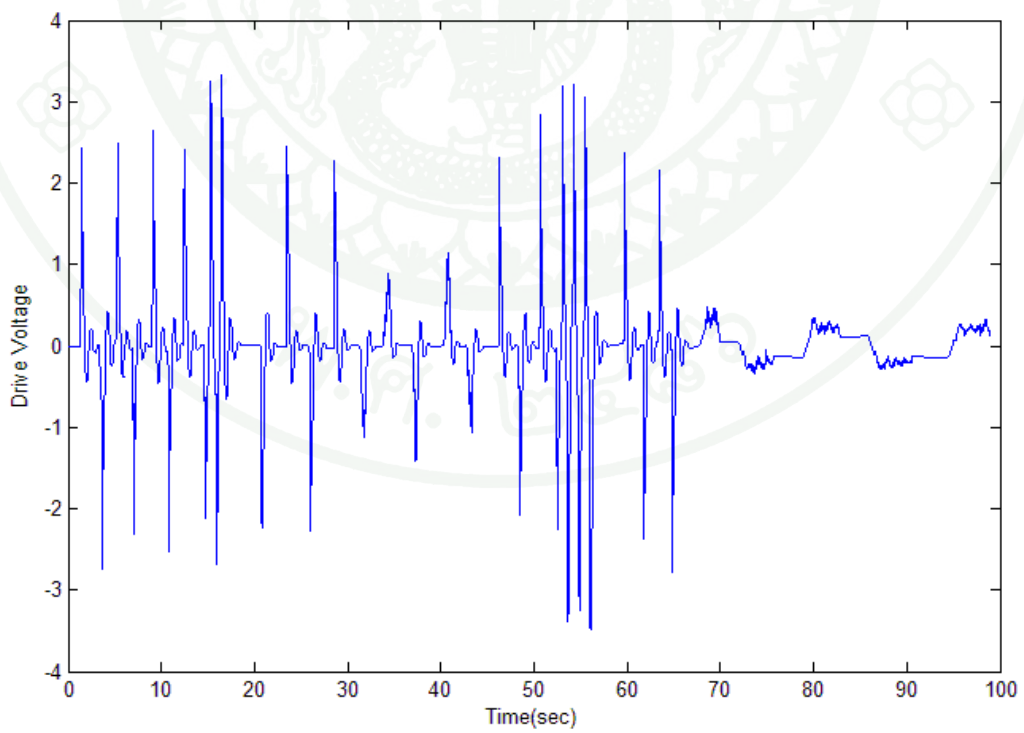


ภาพที่ 35 เปรียบเทียบการสั่นสะเทือนเมื่อใช้และไม่ใช้ ZVD Input shaper





ภาพที่ 37 ขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ



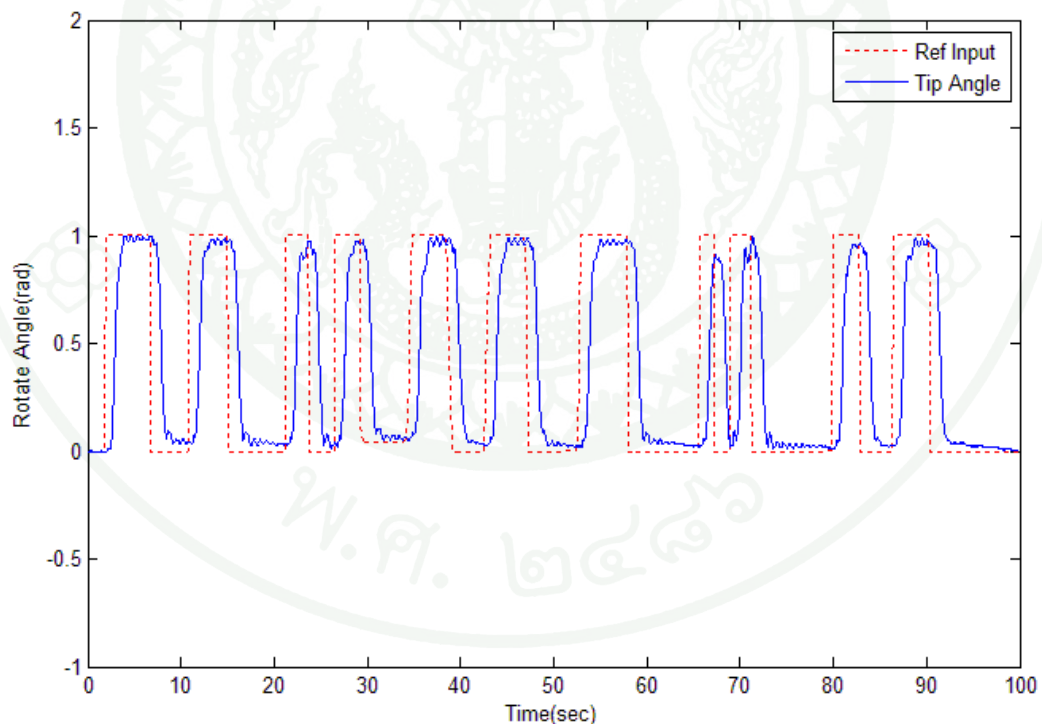
ภาพที่ 38 ขนาดสัญญาณควบคุมเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ

#### 4.2 ควบคุมด้วยมือเปิดการใช้งาน Input Shaping

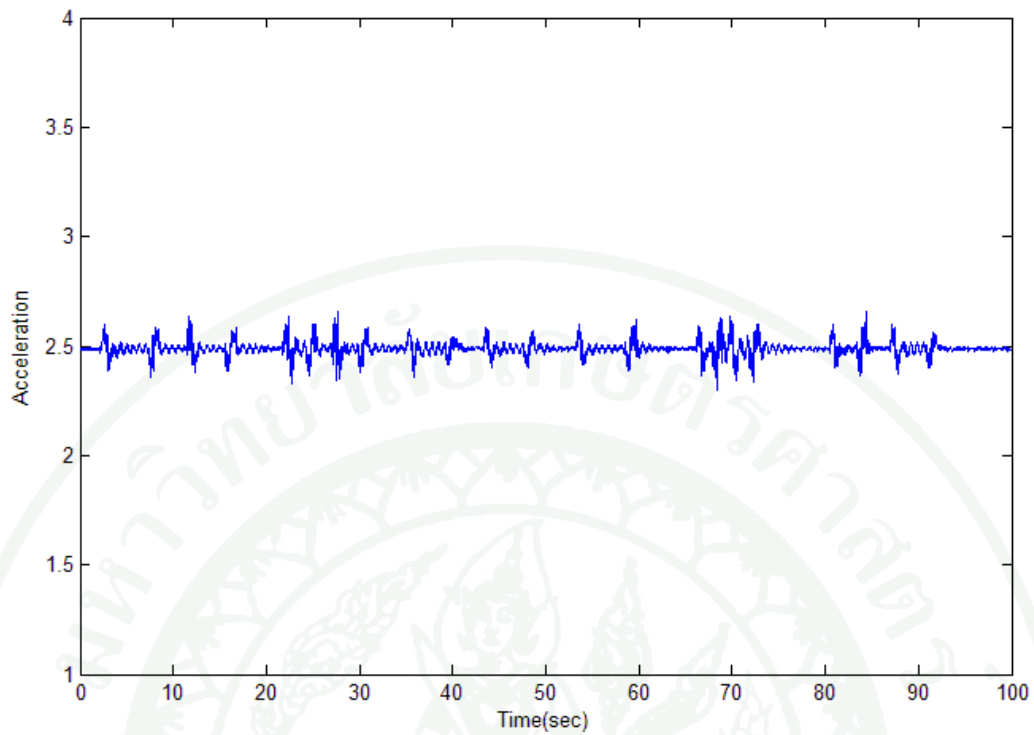
เมื่อใช้ ZVD Input Shaper กับการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยมือจะพบว่าไม่เกิดค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองตลอดเวลาในการควบคุมแต่ในช่วงที่ให้สัญญาณอ้างอิงความเร็วสูงผลตอบสนองของระบบไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ค่าที่ต้องการได้เนื่องจากความล่าช้าของสัญญาณที่ปรับรูปร่างนั่นเอง ซึ่งสังเกตได้ในภาพที่ 39

#### 4.3 ควบคุมด้วยมือปิดและเปิดการใช้งาน Input Shaping

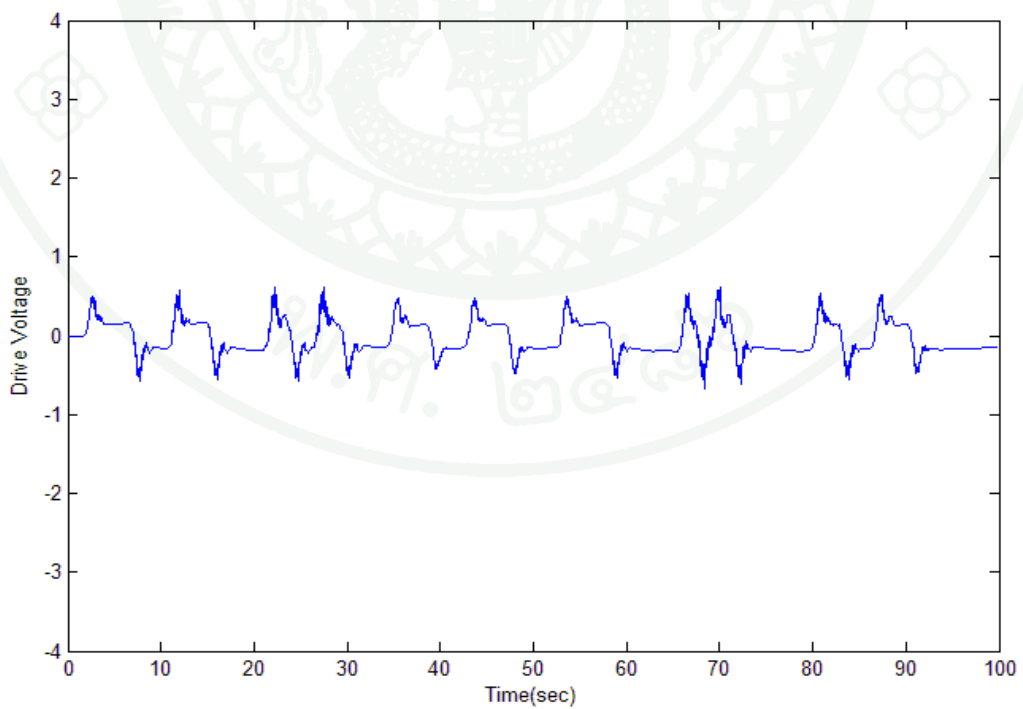
สำหรับการควบคุมที่มีการสลับระหว่างการปิด และเปิดการใช้งาน Input Shaping สังเกตจากภาพที่ 42 การสั่นสะเทือนในช่วงที่ใช้ Input Shaping ต่อจากช่วงที่ใช้ตัวควบคุมเดิมจะมีค่าพุ่งเกินเกิดขึ้นเล็กน้อย



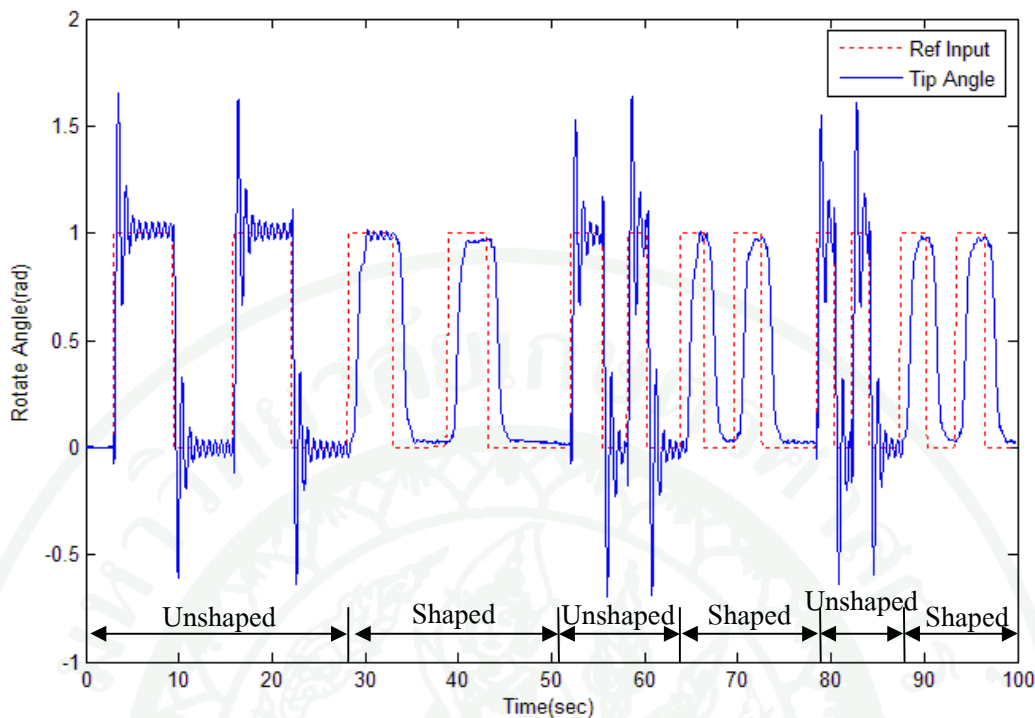
ภาพที่ 39 ผลตอบสนองของระบบเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอและZVD



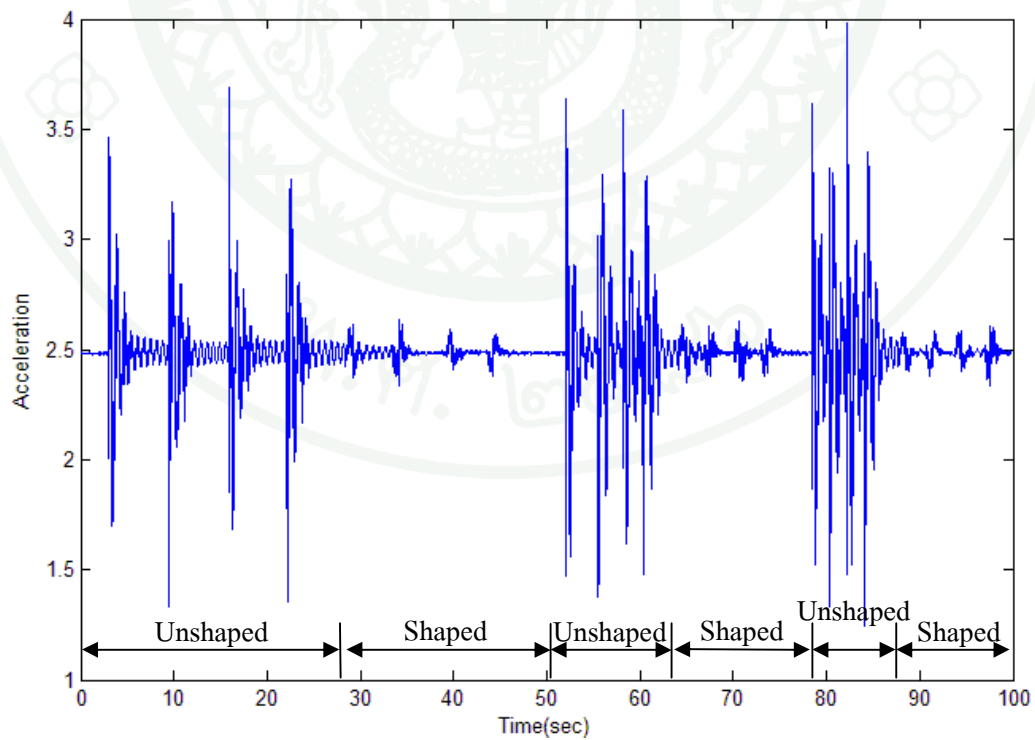
ภาพที่ 40 ขนาดการสั่นสะเทือนเมื่อควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอและZVD



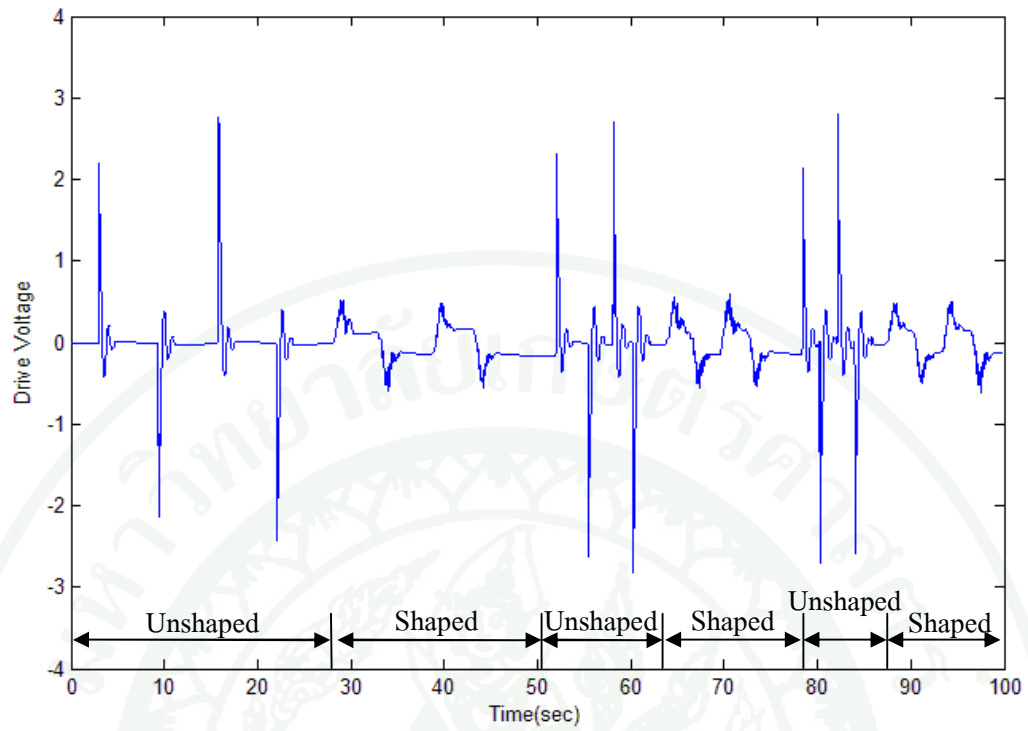
ภาพที่ 41 ขนาดสัญญาณควบคุมเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบพีไอและZVD



ภาพที่ 42 เปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบเมื่อสลับการใช้ควบคุมทั้งสองแบบ



ภาพที่ 43 เปรียบเทียบการสั่นสะเทือนของระบบเมื่อสลับการใช้ควบคุมทั้งสองแบบ



ภาพที่ 44 เปรียบเทียบขนาดสัญญาณควบคุมเมื่อสลับการใช้ควบคุมทั้งสองแบบ

## วิจารณ์

เมื่อเปิดใช้งาน Input shaping และให้สัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันไดระบบจะมีค่าการสั่นสะเทือนเริ่มต้นเป็นศูนย์ทำให้ไม่มีการพุ่งเกินของผลตอบสนอง แต่เมื่อมีการสั่นสะเทือนเริ่มต้นค่าสูง (สังเกตได้จากการสลับใช้ตัวควบคุมทั้งสองแบบ) จะพบว่าเกิดค่าพุ่งเกินเล็กน้อย เนื่องจากการลดการสั่นสะเทือนด้วย Input shaping นั้นจะได้ผลตามการออกแบบเมื่อผลตอบสนองเข้าสู่เวลาของแรงคลสุดท้ายคั้งนั้นผลตอบสนองในช่วงแรกจะมีขนาดการสั่นสะเทือนสูงกว่าช่วงต่อมา

หากใช้ Input shaping กับสัญญาณอ้างอิงที่มีความเร็วน้อยกว่าเวลาของแรงคลสุดท้ายผลตอบสนองของระบบก็จะไม่สามารถเข้าสู่ค่าสัญญาณอ้างอิงได้เนื่องจากพลังงานที่ต้องให้กับระบบถูกตัดออกเสียก่อน

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลที่มีความยืดหยุ่นสูง หากใช้ตัวควบคุมสัดส่วน-ปริพันธ์เพียงอย่างเดียวจะเกิดพลังงานจากสัญญาณควบคุมที่มีย่านความถี่เดียวกับความถี่ธรรมชาติของแขนกล ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่มีขนาดใหญ่ในชิ้นส่วนต่างๆของแขนกลผลกระทบจากการสั่นสะเทือนทำให้เกิดความผิดพลาดของตำแหน่งการเคลื่อนที่อย่างมากและทำให้โครงสร้างเกิดความล้าทำให้อายุการใช้งานต่ำและก่อให้เกิดอันตรายในพื้นที่ทำงาน

เมื่อทดลองใช้เทคนิค Input shaping เข้ามาช่วยลดการสั่นสะเทือนเมื่อเทียบกับการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์พบว่าขนาดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างมาก ไม่เกิดค่าพุ่งเกิน ผลตอบสนองเข้าสู่ค่าสุดท้ายด้วยเวลาน้อยกว่า ทำให้เคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ใช้พลังงานจากตัวควบคุมน้อยกว่า หากนำ Input shaping ไปใช้กับแขนกลที่มีการเคลื่อนที่แบบเดียวกันจะช่วยให้อายุการใช้งาน และอัตราการผลิตสูงขึ้น ทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำลง

### ข้อเสนอแนะ

1. การหาค่าความถี่ธรรมชาติด้วยวิธีกวาดคลื่นไซน์หรือที่เรียกว่า Sine sweep นั้นอาจไม่เหมาะสมกับแขนกลที่มีโครงสร้างเปราะบางเนื่องจากที่ความถี่เรโซแนนซ์ขนาดการสั่นสะเทือนจะมีค่าสูงมากอาจทำให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างได้ ควรใช้การหาค่าความถี่ธรรมชาติจากการคำนวณ
2. สัญญาณที่ได้จากเซนเซอร์ต้องได้รับการกรองความถี่รบกวนออกก่อนเพื่อให้ค่าที่นำมาคำนวณผิดพลาดน้อยที่สุด โดยเฉพาะเมื่อความละเอียดในการเคลื่อนที่สูง

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Coleman, R.E. and N. Coleman. 1999. **Dynamic Defect Detection Part 1: Theory of Vibrational Analysis**. Sensors. Available Source: <http://www.sensorsmag.com/dac-control/dynamic-defect-detection-part-1-theory-vibrational-analysis-824>.
- Singer, N.C. and W.P. Seering. 1990a. Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration. **ASME J. Dyn. Sys., Meas., Control**. 112(1): 76-82.
- Singer, N.C. and W.P. Seering. 1990b. Experimental Verification of Command Shaping Methods for Controlling Residual Vibration in Flexible Robots. **Amer. Contr. Conf.** 1990: 1738-1744.
- Singhose, W., B. Mills and W. Seering. 1999. Vibration Reduction with Specified-Swing Input Shapers. **Proc. IEEE Intl. Conf. Contr.** 1: 533-538.
- Singh, T. and W. Singhose. 2002. Tutorial on Input Shaping/Time Delay Control of Maneuvering Flexible Structures. **P. Amer. Contr. Conf.** 3: 1717 – 1731.
- Mohamed, Z. and M.O. Tokhi. 2004. Command Shaping Techniques for Vibration Control of a Flexible Robot Manipulator. **Mechatronics**. 14(1): 69-90
- Shan J., H.T. Liu and D. Sun. 2005. Modified Input Shaping for a Rotating Single-Link Flexible Manipulator. **J. Sound Vib.** 285: 187-207.
- Ho M.T. and Y.W. Tu. 2005. PID Controller Design for a Flexible-Link Manipulator. **IEEE Decis. Contr. P.** 2005: 6841-6846.

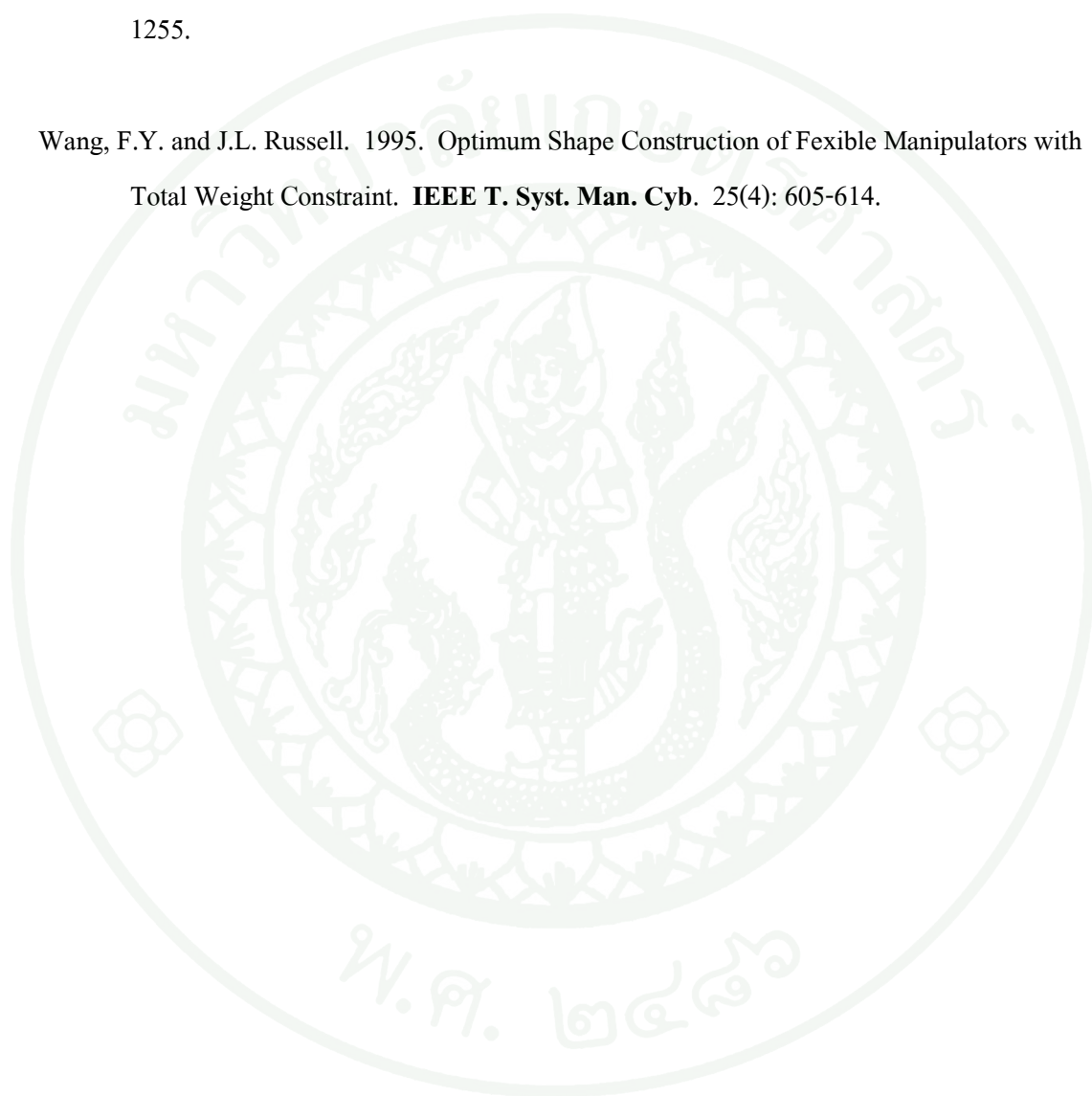
- Chatlatanagulchai W. and K. Saeheng. 2009. Real-Time Reference Position Shaping to Reduce Vibration in Slewing of a Very-Flexible-Joint Robot. **Int. J. Res. Mech. Eng. Tech.** 6(1): 51-56.
- Chatlatanagulchai W., K. Iemsamai, J. Soontrajarn and P.H. Meckl. 2011. Vibration Reduction in Slewing of a Very Flexible One-Link Manipulator Using Shaped Reference Inputs. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)**. 45: 1158-1170.
- Caswara F.M. and H. Unbehauen. 2002. A Neurofuzzy Approach to the Control of a Flexible-Link Manipulator. **IEEE T. Robot. Autom.** 18(6): 932-942.
- Chapnik B.V., G.R. Heppler, and J.D. Aplevich. 1993. Controlling the Impact Response of a Onelink Flexible Robotic Arm. **IEEE T. Robot. Autom.** 9(3): 346-351.
- Chatlatanagulchai W., V.M. Beazel, and P.H. Meckl. 2006. Command Shaping Applied to a Flexible Robot with Configuration-Dependent Resonance. **P. Amer. Contr. Conf.** Minneapolis. MN.
- Jnifene A. and A. Fahim. 1997. A Computed Torque/Time Delay Approach to the End-Point Control of a One-Link Flexible Manipulator. **Dynam. Control.** 7:171-189.
- Meckl P.H. and W.P. Seering. 1988. Reducing Residual Vibration in Systems with Uncertain Resonances. **Contr. Syst. Mag.** 8(2): 73-76.
- Moudgal V.G., K.M. Passino and S. Yurkovich. 1994. Rule-Based Control for a Flexible-Link Robot. **IEEE T. Contr. Syst. T.** 2(4): 392-405.
- Pratiher, B. and S.K. Dwivedy. 2008. Non-Linear Vibration of a Single Link Viscoelastic Cartesian Manipulator. **Int. J. Nonlin. Mech.** 43: 683-696.

Singh, S.N. 1988. Control and Stabilization of a Nonlinear Uncertain Elastic Robotic Arm.

**IEEE T. Aero. Elec. Sys.** 24(2): 148-155.

Smith, O.J.M. 1957. Posicast Control of Damped Oscillatory Systems. **Proc. IRE.** 45(9): 1249-1255.

Wang, F.Y. and J.L. Russell. 1995. Optimum Shape Construction of Flexible Manipulators with Total Weight Constraint. **IEEE T. Syst. Man. Cyb.** 25(4): 605-614.





## ชุดคำสั่งที่ใช้ในโปรแกรม Matlab

### 1. ชุดคำสั่งของโปรแกรม Matlab ในการหาชุดอิมพัลส์ของ ZVD Input Shaper

```
%-----%

clear
close all

%Time
ts = 0.01;
tend = 30;
t = 0:ts:tend-ts;

%Reference Trajectory
r = 1*square(2*pi*0.1*t);
%r2 = lsim(tf(5^2,[1 2*1*5 5^2]),r,t);
r2 = r;

%Impulse Sequences
w=[7.056,9.357,13.04];%manual sweep(207)
z=[0.05 0.04 0.023];%damping from Bandwidth Method

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);

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

```

%Convolution among impulse sequences
imp1 = [a1(1),zeros(1,delTi(1)-1),a2(1),zeros(1,delTi(1)-1),a3(1)];
imp2 = [a1(2),zeros(1,delTi(2)-1),a2(2),zeros(1,delTi(2)-1),a3(2)];
imp3 = [a1(3),zeros(1,delTi(3)-1),a2(3),zeros(1,delTi(3)-1),a3(3)];
imp = conv(imp1,imp2);
imp = conv(imp,imp3);
figure(1),plot(imp)%plot impulse sequences
title('Impulses of Input Shaper')

%Convolution of the final impulse sequence and the reference input
for i = 1:length(r2)
    if i<=length(imp)
        rs(i) = sum(fliplr(r2(1:i)).*imp(1:i));
    else
        rs(i) = sum(fliplr(r2(i-length(imp)+1:i)).*imp);
    end
end
figure(2),plot(rs), hold on, plot(r2,':r'),hold off %plot shaped ref. with unshaped ref.

figure(3),MyFFT(t,rs,[],'plot')%plot FFT of shaped ref.

figure(4),MyFFT(t,r2,[],'plot')%plot FFT of unshaped ref.

%write to files
fid=fopen('C:\Aon\Exp. Data\Theta FB+Alpha Check\NatFreq from manual
sweep_complete\SVD Shaper manual207.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',imp);
status=fclose(fid);

%-----%

```

## 2. ชุดคำสั่งของโปรแกรม Matlab สำหรับแสดงผลการทดลอง

```

%-----%

clear

close all

clc

%load raw data

ref=pi/180*load('C:\Documents and Settings\kwang\Desktop\IS207 complete\Step
response\Ref.txt');
ref2=pi/180*load('C:\Documents and Settings\kwang\Desktop\IS207 complete\Step
response\Ref2.txt');
acc=load('C:\Documents and Settings\kwang\Desktop\IS207 complete\Step response\Acc.txt');
v=load('C:\Documents and Settings\kwang\Desktop\IS207 complete\Step response\V.txt');
theta=pi/180*load('C:\Documents and Settings\kwang\Desktop\IS207 complete\Step
response\Theta.txt');% Tip Acc
alpha=pi/180*load('C:\Documents and Settings\kwang\Desktop\IS207 complete\Step
response\Alpha.txt');
%SG calibrated in radian
SG1=pi/180*load('C:\Documents and Settings\kwang\Desktop\IS207 complete\Step
response\SG1.txt');
SG2=pi/180*load('C:\Documents and Settings\kwang\Desktop\IS207 complete\Step
response\SG2.txt');
SG3=pi/180*load('C:\Documents and Settings\kwang\Desktop\IS207 complete\Step
response\SG3.txt');

ts=0.01;
t1=0.1;
t2=40;

```

```

ref=ref(t1/ts:t2/ts);
ref2=ref2(t1/ts:t2/ts);
acc=acc(t1/ts:t2/ts);
v=v(t1/ts:t2/ts);
theta=theta(t1/ts:t2/ts);
alpha=alpha(t1/ts:t2/ts);
SG1=SG1(t1/ts:t2/ts);
SG2=SG2(t1/ts:t2/ts);
SG3=SG3(t1/ts:t2/ts);

t=0:ts:(length(ref)-1)*ts;%time

figure(1),%compare reference of unshape(ref)& shaped(ref2)
plot(t,ref,'r')
hold on
plot(t,ref2,'b')
hold off
xlabel('Time(sec)')
ylabel('Rotate Angle(rad)')
ylim([0 1.8])
figure(2),%compare reference of unshape(ref)& alpha
plot(t,ref,'r')
hold on
plot(t,alpha,'b')
hold off
xlabel('Time(sec)')
ylabel('Rotate Angle(rad)')
ylim([0 1.8])
figure(3),%compare reference of shaped(ref2)& alpha
plot(t,ref2,'r')

```

```
hold on
plot(t,alpha,'b')
hold off
xlabel('Time(sec)')
ylabel('Rotate Angle(rad)')
```

```
ylim([0 1.8])
figure(4),
plot(t,v)
xlabel('Time(sec)')
ylabel('Drive Voltage')
```

```
ylim([-0.5 3])
figure(5),
plot(t,acc)
xlabel('Time(sec)')
ylabel('Acceleration')
```

```
ylim([1 4])
```

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

