



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตราขยายและการแสวงหาค่าสุดขีดประยุกต์ใช้กับแขนกลเชื่อม โยงยึดหมุนได้

Extremum-Seeking Gain-Scheduled Adaptive Input Shaping Applied to Flexible-Link Robot

นามผู้วิจัย นายสัจจา ตะเวทิพงษ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รongศาสตราจารย์วิทิต นัตรรัตนกุลชัย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รongศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รongศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

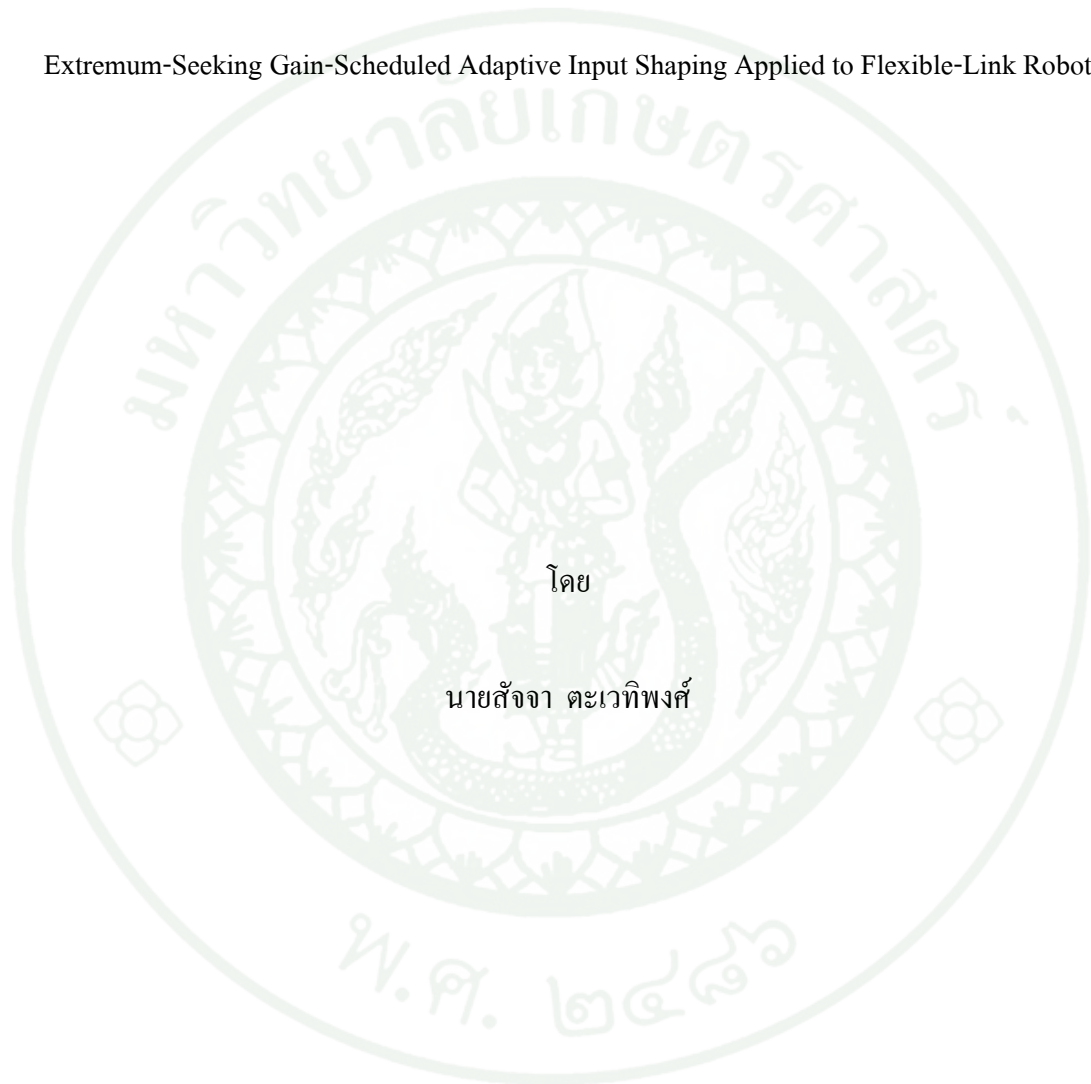
วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตราขยายและการแสวงหาค่าสุดขีด
ประยุกต์ใช้กับแขนกลเชื่อมโยงยืดหยุ่นได้

Extremum-Seeking Gain-Scheduled Adaptive Input Shaping Applied to Flexible-Link Robot



โดย

นายสัจจา ตะเวทิงค์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สัจจา ตะเวทิงศ์ 2557: การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตรา
การขยายและการแสวงหาค่าสุดขีดประยุกต์ใช้กับแกนกลเชื่อมโยงยึดหุ่นได้ ปรินญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชา
วิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
รองศาสตราจารย์วิทิต นัตรรัตนกุลชัย, Ph.D. 50 หน้า

ศึกษาการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าออกแบบตัวกรองก่อนแบบเอฟไออาร์ ตัวกรองนี้เมื่อ
ประสานกับสัญญาณนำเข้าอ้างอิงก่อให้เกิดสัญญาณนำเข้าอ้างอิงปรับเปลี่ยน ซึ่งหลีกเลี่ยงการสั้นพ้อง
ส่งผลให้การสั้นตกค้างลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ระบบยึดหุ่นได้เมื่อติดตามสัญญาณนำเข้าอ้างอิง
ปรับเปลี่ยนนี้จะสามารถเคลื่อนตัวจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งเร็วขึ้นเนื่องจากเวลาดังรกรากน้อยลง
ปัญหาเกี่ยวกับการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบดั้งเดิมคือ ตัวกรองต้องรู้ความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วน
การหน่วงของระบบดังนั้นประสิทธิภาพของมันจะเสื่อมลงเมื่อระบบเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา งานนี้
ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ที่ไม่เคยมีมาก่อน ความถี่ธรรม-
ชาติและอัตราส่วนความหน่วงของระบบจะถูกกำหนดอัตราขยายโดยอ้างอิงถึงสถานะที่ถูกวัดของ
ระบบและในเวลาเดียวกันจะถูกปรับ โดยการแสวงหาค่าขีดสุดเพื่อให้การสั้นตกค้างมีค่าน้อยที่สุด
ขั้นตอนวิธีของเราประยุกต์ใช้กับการเคลื่อนตัวจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งของแกนกลหุ่นยนต์เชื่อม โยง
ยึดหุ่นได้ที่มีน้ำหนักบรรทุกทุกแปรเปลี่ยนไปตามเวลา ผลการทดลองยืนยันประสิทธิภาพของขั้นตอน
วิธีที่เสนอเปรียบเทียบกับกรณีไม่ปรับตัว

Sajcha Tawaytibhong 2014: Extremum-Seeking Gain-Scheduled Adaptive Input Shaping Applied to Flexible-Link Robot. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Withit Chatlatanagulchai, Ph.D. 50 pages.

Input shaping designs an FIR prefilter. This filter, when convoluted with reference input, produces shaped reference input that avoids resonance, resulting in significantly less residual vibration. A flexible system, when follows this shaped reference input, is able to move from point to point faster due to less settling time. Problem with traditional input shaping is that the filter requires knowledge of system's natural frequencies and damping ratios and hence its performance deteriorates when the system is time varying. This propose a novel adaptive input shaping algorithm. System's natural frequencies and damping ratio are gain-scheduled based on system measured state and are simultaneously adjusted by extremum-seeking for minimum residual vibration. Our algorithm was applied to point to point movement of a flexible-link robot manipulator whose payload varies with time. Experimental results confirm the effectiveness of the proposed algorithm, compared with the unadaptive case.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

สืบสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ฉัตรรัตนกุลชัย ประธานกรรมการ
ที่ปรึกษา ที่ถ่ายทอดวิชาความรู้ ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้พร้อมทั้งให้
คำแนะนำช่วยเหลือและตรวจสอบข้อบกพร่องจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ กรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำและแนวคิดในงานวิจัยรวมถึงข้อเสนอแนะในการเขียนรูปเล่ม
วิทยานิพนธ์ตลอดจนการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน
(Control of Robot and Vibration Laboratory, CRVlab) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์การทำวิจัย
รวมทั้งคุณภูวดล โพธิ์แดงผู้ที่คอยแนะนำและคำปรึกษา รวมถึงสมาชิกห้องปฏิบัติการควบคุม
หุ่นยนต์และการสั่นสะเทือนทุกท่าน

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ที่ได้
อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

ความสำเร็จหวังว่าคุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สัจจา ตะเวทิพงษ์
พฤษภาคม 2557

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	22
อุปกรณ์	22
วิธีการ	22
ผลและวิจารณ์	34
ผล	34
วิจารณ์	39
สรุปและข้อเสนอแนะ	41
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	42
ภาคผนวก	46
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	50

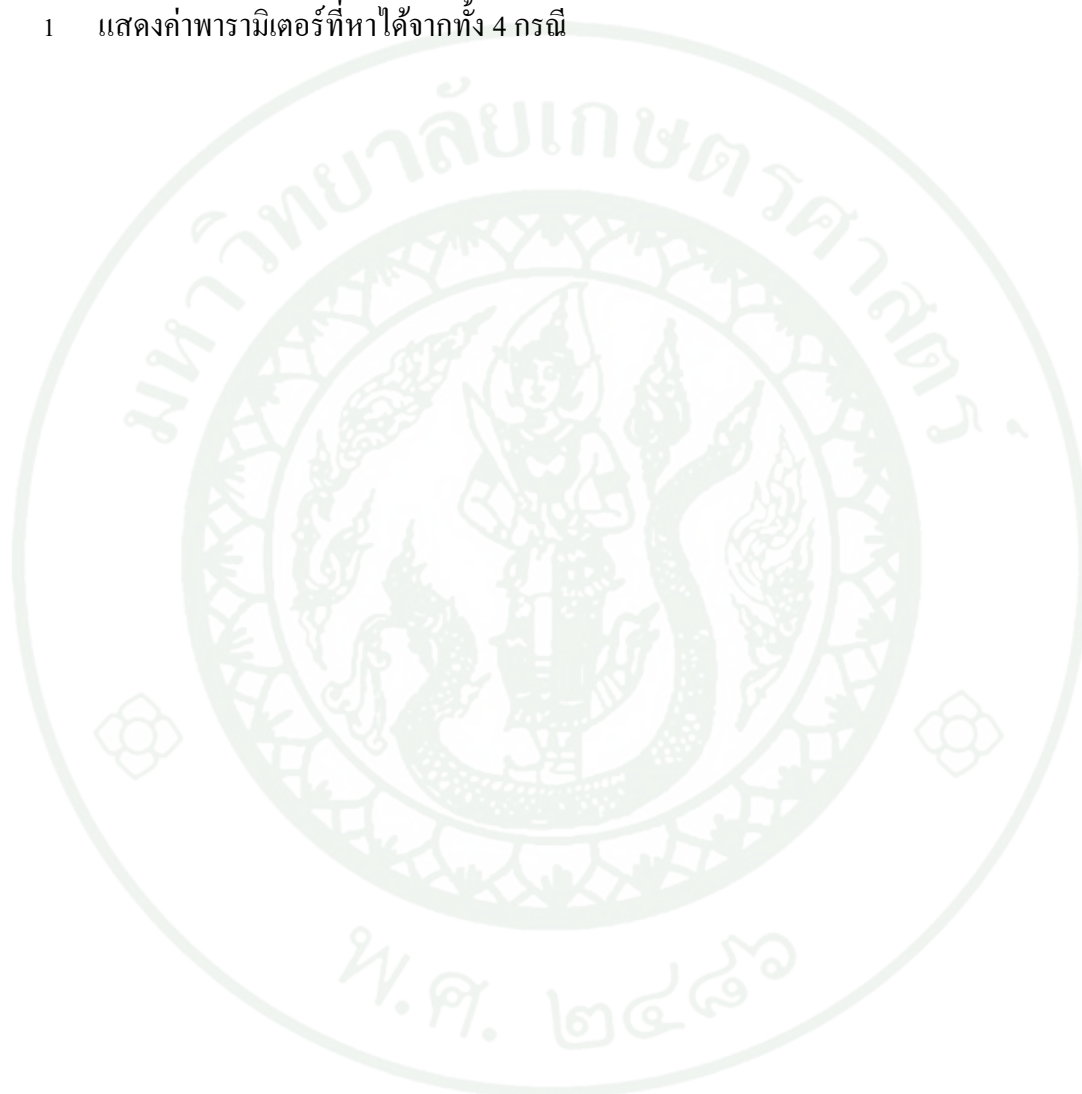
สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากทั้ง 4 กรณี

33



สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แขนกลจำลองของ Robert L. Wells	4
2	แขนกลจำลองชนิดเคลื่อนที่แนวขนาน	5
3	(a) Unshaped, (b) ZV-shaped, (c) ZVD-shaped, (d) Machines	6
4	แผนภาพระบบควบคุมของ Telescopic Handler	7
5	ภาพแขนกลโรงงานที่ใช้ในการทำงานจริง	8
6	ภาพการปรับความเร็วของสะพานเครนด้วยมือมนุษย์	10
7	ภาพการปรับความเร็วหลังจากการใช้ Command input shaping สั่งงาน	10
8	แสดงวงจรการควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed loop system)	12
9	แสดงการใส่สัญญาณลูกคลื่น (Impulse) เพื่อเกิดการหลักล้า้งจนเป็นศูนย์	13
10	แสดงการประยุกต์ใช้งานการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (Input shaping) แบบ ZV	17
11	แสดงการประยุกต์ใช้งานเทคนิค Input shaping แบบ ZVD กับสัญญาณแบบ Step	21
12	แสดง Sensitivity curve แต่ละชนิดของ Input shaping กับเปอร์เซ็นต์การสั่นสะเทือน	21
13	แสดงการใส่สัญญาณลูกคลื่น (Impulse) เพื่อเกิดการหลักล้า้งจนเป็นศูนย์	23
14	การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าสำหรับระบบแขนกลยึดหุ่นได้	23
15	แผนภาพการแสวงหาค่าสุดขีด	24
16	กราฟแสดงสถานะที่ $a < 0$ และ $a > 0$	26
17	แขนกลเชื่อมโยงยึดหุ่นได้ที่ใช้ทดลอง	27
18	แผนภาพไดอะแกรมของแขนกลเชื่อมโยงยึดหุ่นได้	27
19	แผนภาพระบบเชื่อมต่อแขนกลเชื่อมโยงยึดหุ่นได้	28
20	แผนภาพวงจรถ (Periodogram) ของโหมดแรกและโหมดที่สอง	28
21	กราฟแสดงสัญญาณที่วัดออกมาจากตัววัดแรงดึงเครียด (Strain gauge)	29
22	แผนภาพของการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าไม่ประยุกต์ (Unadaptive input shaping)	30
23	แผนภาพระบบที่ใช้กับแขนกลเชื่อมโยงยึดหุ่นได้	32
24	(1) แสดงถึงระบบที่ไม่ได้ใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (2) แสดงถึงระบบที่ใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตราการขยายและการแสวงหาค่าสุดขีด เปรียบเทียบมุมที่เปลี่ยนแปลงไปรวมถึงตัวควบคุมมอเตอร์ที่ทดลองกับแขนกลยึดหุ่นได้	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
25 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระบบควบคุมในกรณีต่างๆ	36
26 กราฟขยายของระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้และ การแสวงหาค่าสุดขีด	37
27 กราฟเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงของระบบควบคุม ทั้งสองแบบ	38
ภาพผนวกที่	
1 แผนภาพระบบควบคุมส่วน PI Controller ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LABVIEW	47
2 แผนภาพระบบควบคุมส่วน Extremum-seeking ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LABVIEW	48
3 แผนภาพระบบควบคุมส่วน Input shaping ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LABVIEW	49

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

คำอธิบายสัญลักษณ์

e	=	ค่าความผิดพลาดของระบบ (Error)
r	=	สัญญาณตัวควบคุม
G	=	ตัวควบคุม (Controller)
S	=	ระบบ (System)
A	=	แอมพลิจูด (Amplitude) ของ Impulse
ω_0	=	ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency)
t	=	เวลา
t_0	=	ช่วงเวลาที่เริ่มต้นที่ใส่ Impulse เข้าไปในระบบ
t_N	=	เวลาที่ทำการใส่ Impulse เข้าไปในระบบ
ζ	=	อัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio)
B_j	=	Coefficients ของไซน์
$y(t)$	=	ตำแหน่งที่สนใจ
N	=	จำนวนของ Impulse
K	=	ค่าคงที่
m	=	มวล
\bar{F}_1, \bar{F}_2	=	ขนาดของสัญญาณคลื่นแต่ละลูก
\hat{x}	=	ค่าเหมาะสมที่เราประมาณ
x^*	=	จุดเหมาะสมของระบบ
\tilde{x}	=	ค่าความผิดพลาดประมาณ
\mathcal{Y}	=	ตัวขยาย
θ	=	มุมของมอเตอร์
θ_s	=	มุมที่ถูกเพิ่มขึ้นมาเมื่อเทียบตัววัตถุถึงแกนกับตัววัดแรงดึงเครีียด
θ_p	=	มุมของวัตถุเมื่อเทียบกับแกน X
θ_r	=	มุมอ้างอิงของมอเตอร์
a_p	=	ความเร่งของน้ำหนักบรรทุก
u	=	สัญญาณที่เข้าไปสั่งค่าให้มอเตอร์ทำงาน

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ

ZV	=	Zero vibration
ZVD	=	Zero vibration and derivative
WI	=	Without input shaping
UI	=	Unadaptive input shaping
EI	=	Extremum-seeking with input shaping
EGI	=	Extremum-seeking with gain-scheduled and input shaping

การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตราการขยายและ การแสวงหาค่าสุดขีดประยุกต์ใช้กับแขนกลเชื่อมโยงยืดหยุ่นได้

Extremum-Seeking Gain-Scheduled Adaptive Input Shaping Applied to Flexible-Link Robot

คำนำ

ในปัจจุบันแขนกลมีบทบาทมากทางอุตสาหกรรมทั้งแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อต้องการลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้แขนกลยังสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องกว่าแรงงานจากมนุษย์ ด้วยปัจจัยในการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านการผลิตที่ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว ทำให้เห็นว่าแขนกลที่ใช้มีอยู่มากมายหลากหลายแบบไม่ว่าจะเป็นแขนกลสำหรับเชื่อมเหล็ก แขนกลในการหยิบจับแผ่นกระจก และอื่นๆ อีกมากมาย

หากมีการเปลี่ยนน้ำหนักบรรทุกในขณะปฏิบัติงานของแขนกลจะก่อให้เกิดการสั่น - สะเทือนขึ้นดังนั้นปัญหาที่ตามมาคือความแม่นยำในการทำงาน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการออกแบบแขนกลเชื่อมโยงยืดหยุ่นได้ (Flexible-link robot) การแก้ไขปัญหาการสั่นที่ผ่านมาสามารถทำได้หลายวิธีรวมถึงการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (Input shaping) แต่ก็ยังมีปัจจัยหรือข้อจำกัดในการใช้งานอยู่จึงจำเป็นต้องใช้การกำหนดอัตราการขยายและการแสวงหาค่าสุดขีดเข้าร่วมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดการสั่นตกค้างภายในแขนกล

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นทำการศึกษาภายใต้สภาวะที่เปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ปลายแขนกล จึงได้นำเทคนิคการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking) เข้ามาผนวกรวมกับการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (Input shaping) แบบปรับตัวได้โดยตรง ที่มีการเคลื่อนที่ตามสัญญาณควบคุมแบบเวลาจริง (Real time) ซึ่งมีความยืดหยุ่นในการนำไปใช้งานมาก นอกจากนั้นเพื่อให้ระบบสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นได้นำการกำหนดอัตราการขยาย (Gain-scheduled) ทำให้ระบบทำงานได้เหมาะสมยิ่งขึ้น

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและออกแบบอัตราขยาย (Gain-scheduled) ของแกนกลเชื่อมโยงยึดหุ่นยนต์ให้เหมาะสมประกอบกับการสร้างสัญญาณควบคุมโดยใช้เทคนิคการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (Input shaping) ปรับตำแหน่งสัญญาณควบคุมในลักษณะเวลาจริง (Real time)

2. ทดลองประสิทธิภาพของเทคนิคการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (Input shaping) ที่ออกแบบมาให้ใช้งานร่วมกับการกำหนดอัตราขยาย (Gain-scheduled) และเทคนิคการแสวงหาสุดขีด (Extremum-seeking) ในผลสุดท้ายจะนำมาเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่ใช้เทคนิคเข้ามาช่วยเหลือ

การตรวจเอกสาร

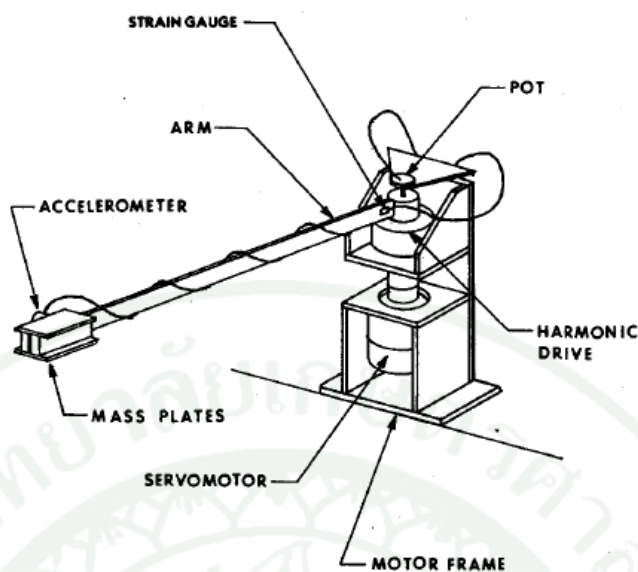
การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าได้ถูกนำเสนอโดย Singer และ Seering ในปี ค.ศ. 1990 บนพื้นฐานแนวคิดการควบคุมของ Smith ในปี ค.ศ. 1957 เป็นการลดการสั่นที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งของวัตถุ เทคนิคนี้มีแนวคิดให้สัญญาณสองสัญญาณหักล้างกันเพื่อกำจัดการสั่นที่เกิดขึ้น ถ้าเกิดสัญญาณคลื่นลูกที่ 1 ที่เวลา 0 วินาที จะมีการสั่นพ้องเกิดขึ้นในเวลาถัดมา หากเราต้องการกำจัดการสั่นพ้องนั้น สิ่งที่เราต้องการทราบคือขนาดของลูกคลื่นและเวลาในการเกิดคลื่นลูกที่ 2 เพื่อที่จะหักล้างกับสัญญาณคลื่นลูกที่ 1 ค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงของระบบจึงเป็นตัวแปรสำคัญในการหาขนาดของลูกคลื่นและเวลาในการเกิดคลื่นลูกที่ 2

อย่างไรก็ตามความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงยังขาดความแม่นยำในระบบที่ค่าเปลี่ยนไปตามช่วงเวลา หรือเมื่อมีปัจจัยภายนอกมากระทำกับระบบนั้นประสิทธิภาพของการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าจะลดลง ทางหนึ่งที่ถูกนำเสนอคือการเพิ่มจำนวนสัญญาณนำเข้าให้มากกว่า 2 ลูกคลื่น (Vanghan *et al.*, 2008) แต่ผลที่จะตามมาคือเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งก็จะมากขึ้นตามไปด้วย

สำหรับระบบการปรับเปลี่ยนสามารถจำแนกออกเป็นการปรับเปลี่ยนโดยทางอ้อม ค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงจะถูกหาออกมาในช่วงเวลานั้นๆ และนำไปใช้เพื่อออกแบบสัญญาณนำเข้า อีกระบบหนึ่งคือการปรับเปลี่ยนเชื่อมตรงเป็นการนำสัญญาณควบคุมกระทำกับตัวควบคุมโดยตรง

การตรวจเอกสารการปรับเปลี่ยนโดยทางอ้อม

Wells *et al.* (1990) กล่าวถึงการสั่นสะเทือนอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของแขนกลในทิศทางเชิงมุม และพิจารณาถึงการแก้ปัญหาการสั่นที่ปลายแขนวัตถุด้วยการนำเสนอวิธี Feedforward Control และ Feedback Control และตรวจสอบผลผ่าน accelerometer หลังจากทำการทดลองแล้ว การออกแบบในลักษณะ Feedback Control มีประสิทธิภาพในการลดการสั่นที่ปลายแขนได้ดีกว่า เนื่องด้วยการออกคำสั่งในครั้งถัดๆ ไปจะต้องมีการตรวจเช็คผลที่เกิดที่ปลายแขนและปรับเปลี่ยนค่าทุกๆ ครั้งก่อนดำเนินงานในครั้งต่อไป



ภาพที่ 1 แขนกลจำลองของ Robert L. Wells

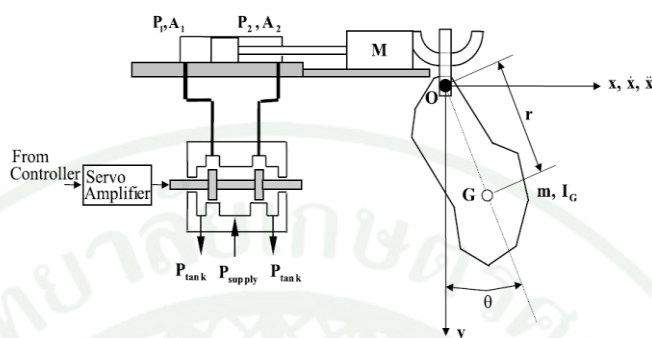
ที่มา: Wells *et al.* (1990)

Tzes and Yurkovich (1993) เปลี่ยนระบบให้อยู่ในช่วงขอบข่ายความถี่ที่เรียกว่า Empirical transfer function estimation ที่อ้างอิงมาจาก Ljung (1987) ประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของระบบออกมาอยู่บนพื้นฐานระบบเชิงเส้นและมีความถี่แน่นอน เพียงแค่ทราบความถี่ธรรมชาติ แต่ไม่จำเป็นต้องทราบค่าอัตราส่วนการหน่วงก็สามารถที่จะใช้กับระบบได้

Bodson (1998) ความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงของระบบหาได้จากอนุพันธ์ลำดับที่สองของฟังก์ชันการถ่ายโอน จากนั้นใช้วิธีการปรับเปลี่ยนพหุนามค่าที่ต้องการในช่วงเวลาทำงาน อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ค่อนข้างจำกัดกับระบบที่ใช้และยังไม่แม่นยำเพียงพอ

Kapucu *et al.* (2000) ประยุกต์เทคนิค Input shaping ใช้ในระบบแขนกลที่เคลื่อนที่ในแนวราบโดยติดวัตถุไว้ที่ปลายแขนกล พิจารณาทดลองการลดการสั่นในแขนกลที่มีลักษณะเคลื่อนที่ในแนวแกน x โดยออกแบบอุปกรณ์ที่มีลักษณะเหมือนกับแขนกลที่ใช้ในงาน เทโลหะเหลวลงในแม่พิมพ์ โดยเทคนิค Hybrid input shaping จะพิจารณาในแบบ Cycloid และ Ramp function แล้วนำพารามิเตอร์มากำหนดค่าคำสั่งงานเพื่อลดการสั่นสะเทือน จากงานวิจัยพบว่าลด

การสั่นสะเทือนของปลายแขนได้ด้วยเทคนิคดังกล่าว ทำให้วัตถุที่แขวนไว้ที่ปลายแขนกลมีการแกว่งลดลง



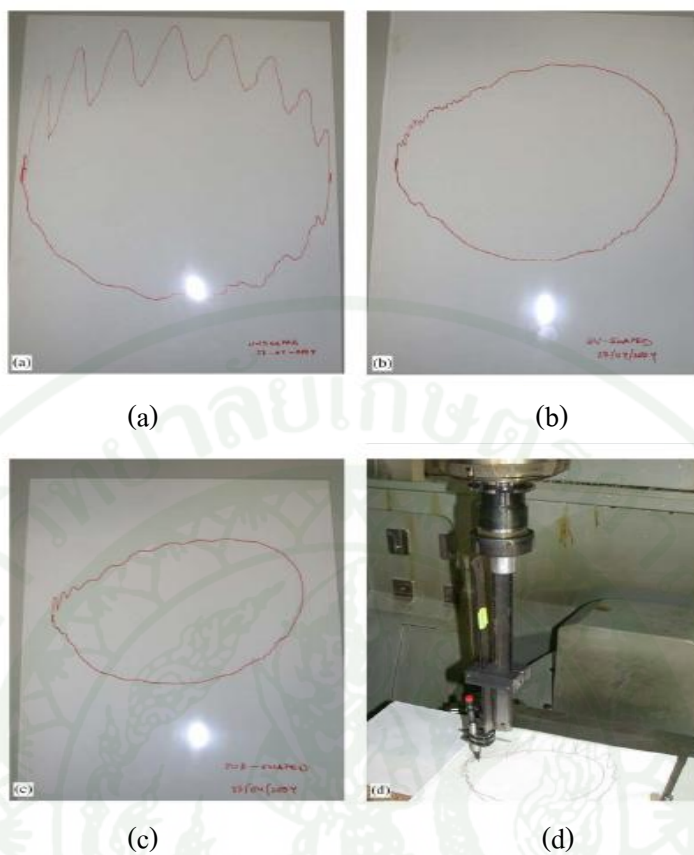
ภาพที่ 2 แขนกลจำลองชนิดเคลื่อนที่แนวขนาน

ที่มา: Kapucu *et al.* (2000)

Lau and Pao (2003) พิจารณาปัญหาด้วยเวลาที่น้อยที่สุดที่ใช้ใน Input Shaping โดยอธิบายผ่านทางสมการทางคณิตศาสตร์ ใช้ช่วง ZV (Zero Vibration) เป็นเงื่อนไขของการคำนวณและคำนวณบนพื้นฐานของ Karush-Kuhn-Tucker จากการ Simulation ทำให้กราฟแสดงการสั่นสะเทือนออกมาค่อนข้างสมบูรณ์ แต่ยังคงปรับปรุงเรื่องระยะเวลาของการเข้าสู่สภาวะสมดุล

Kozak *et al.* (2004) ใช้วิธีเชิงเส้นจัดการกับระบบไม่เชิงเส้นที่จุดทำงาน จะได้ค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงเพื่อใช้กำหนดค่าลูกคลื่น แต่ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับความแน่นอนของระบบซึ่งเป็นของจำกัคอย่างหนึ่ง

Pelaez *et al.* (2005) เป็นการพัฒนาต่อเนื่องจาก Input Shaping ที่ใช้ในการส่งสัญญาณสั่งงานในรูปแบบ One-dimensional อย่างเดียวมาเป็นการสั่งงานในแบบ Two-dimensional ใช้ Cartesian Machines ในการทดลองวาดรูปในลักษณะ Real-time Filtering ที่สภาวะ Unshaped, ZV-shaped, ZVD-shaped หลังจากออกแบบแล้วใช้การเปรียบเทียบแต่ละสภาวะโดยการวาดรูปวงกลมและสี่เหลี่ยมของเครื่องจักร ผลจากการทดลองเห็นว่ากรออกแบบที่สภาวะ ZV-shaped มีประสิทธิภาพเหมาะกับการใช้งานกว่าแบบอื่นๆ



ภาพที่ 3 (a) Unshaped, (b) ZV-shaped, (c) ZVD-shaped, (d) Machines

ที่มา: Pelaez *et al.* (2005)

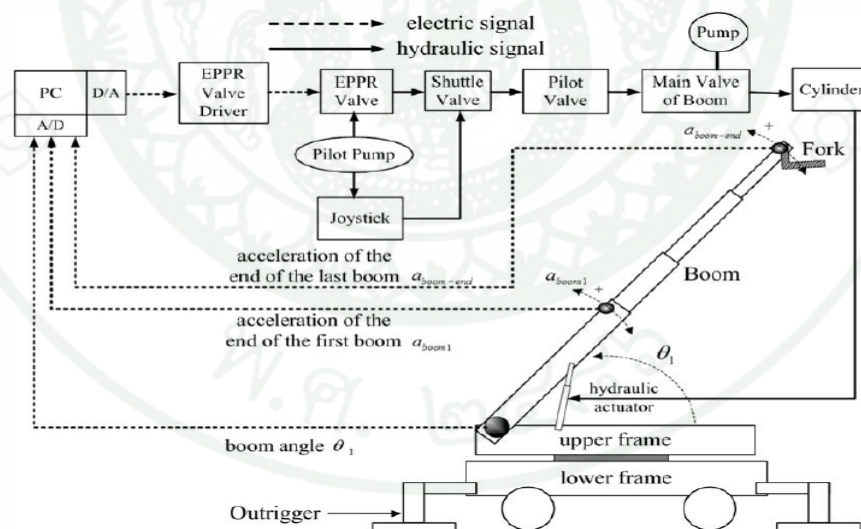
Stergiopoulos and Tazes (2007) ศึกษาการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าของระบบควบคุมไม่เชิงเส้นกับลูกตุ้มนาฬิกา สมการการเคลื่อนที่แบบไม่เชิงเส้นสามารถนำมาหาค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงเพื่อสร้างสัญญาณลูกคลื่นได้ ประสิทธิภาพความแม่นยำขึ้นอยู่กับความแน่นอนของแบบจำลอง

Kapucu *et al.* (2008) ใช้เทคนิค Command Shaping สั่งงานมอเตอร์ในระบบที่มี Pendulum ติดที่ปลายของวัตถุซึ่งติดสปริงอยู่ โดยมองระบบในลักษณะ 1 อินพุต 2 เอาต์พุต วัตถุประสงค์ภาพจากมุมที่เปลี่ยนไปของ Pendulum และเปรียบเทียบการแกว่งที่เกิดขึ้นโดยการทดลองความถี่ธรรมชาติที่แตกต่างกันเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของระบบ นอกจากนั้นยังใช้เทคนิค Input Shaping เข้ามาช่วยลดการแกว่งของ Pendulum

การตรวจเอกสารการปรับเปลี่ยนเชิงตรง

Mimmi and Pennacchi (2001) งานวิจัยอุปกรณ์ที่มีน้ำหนักเบาเพื่อใช้ในอวกาศ โดยลักษณะการทำงานของระบบเป็นแบบ Open-loop และใช้การสั่งงานแบบ Command input ซึ่งต้องทำการทดลองหาค่าความถี่ธรรมชาติและค่า Damping ของระบบเพื่อใช้ในการออกแบบคำสั่งของระบบเสียก่อน นอกจากนั้นแล้วต้องกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่และค่าแรงเสียก่อน การออกแบบในลักษณะนี้มีข้อดีเราสามารถที่จะใส่พารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองและคำนวณลงไปในระบบได้เลย

Park and Chang (2004) Telescopic Handler เป็นเครื่องจักรชนิดหนึ่งที่ใช้ในงานก่อสร้างและการขนย้ายของ เมื่อแขนกลทำงานภายใต้สภาวะ High-speed mode สิ่งที่พบคือปัญหาจากการสั่นที่ปลายแขน ซึ่งแบ่งออกเป็นในช่วงการเคลื่อนที่ในมุมแคบและการสั่นที่เกิดจากน้ำหนักที่เปลี่ยนไปเมื่อยกของออกจากปลายแขน ผู้ทดลองได้ใช้ Time Delay และ Input Shaping เข้ามาช่วยลดการสั่นที่เกิดขึ้นที่ปลายแขน

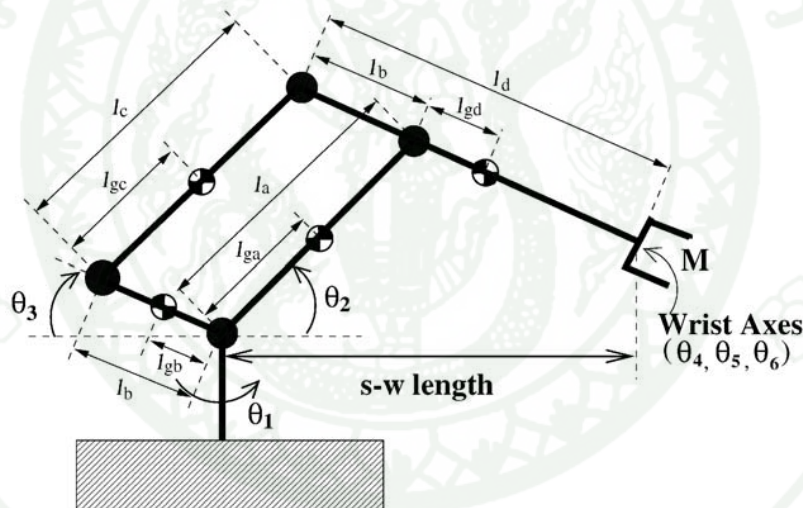


ภาพที่ 4 แผนภาพระบบควบคุมของ Telescopic Handler

ที่มา: Park and Chang (2004)

Cutforth and Pao (2004) ใช้วิธีการหาค่าขนาดของลูกคลื่นในขณะที่การสั่นมีค่าน้อยที่สุด โดยเพิ่มเติมอัลกอริทึมที่ไม่ต้องเก็บผลของความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงซ้ำตลอดเวลา แต่ใช้ได้กับระบบที่เป็นระบบเชิงเส้นเท่านั้น

Chang and Park (2005) ได้รับทุนงานวิจัยจากบริษัท Hyundai Heavy Industries Co.,Ltd. เนื่องจากปัญหาทางด้านการควบคุมแขนกลที่ทำงานในการเชื่อมส่วนประกอบรถยนต์ แขนกลที่เคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่งทำงานแล้วแต่ไม่สามารถทำงานได้ทันทีเนื่องจากการสั่นที่เกิดจากการเคลื่อนที่ จึงได้นำเทคนิค Time-varying input shaping technique ซึ่งมีการทำงานในลักษณะส่งค่ากลับมาในลักษณะ Real time เพื่อปรับกับการทำงานของมอเตอร์ ในส่วนข้อต่อของแขนกล ซึ่งจากการทดลองและเปรียบเทียบกับวิธีแบบที่ผ่านมามีประสิทธิภาพมากกว่า การสั่นสะเทือนได้มีประสิทธิภาพมากกว่า



ภาพที่ 5 ภาพแขนกลโรงงานที่ใช้ในการทำงานจริง

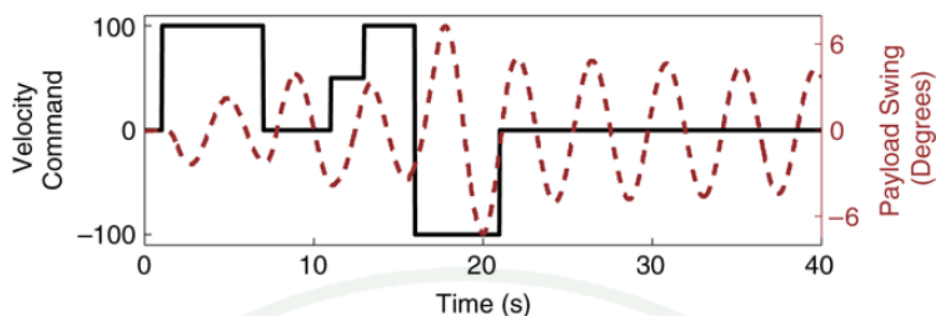
ที่มา: Chang and Park (2005)

Park *et al.* (2006) ใช้วิธีที่เรียกว่า Golden section search และ Secant เป็นการหาค่าขนาดลูกคลื่นและช่วงเวลาของสัญญาณคลื่นที่ทำให้เกิดการสั่นน้อยที่สุดจากการทำซ้ำๆ เหมาะกับหุ่นยนต์ในโรงงานที่มีการเคลื่อนที่ในแบบเดิมตลอดเวลา

Chatlatanaguchai *et al.*, (2006) ประยุกต์ใช้งานเทคนิค Command shaping กับแขนกลแบบ ยึดหุ่นชนิดสองข้อต่อ (Two-link flexible joint robot) งานวิจัยดังกล่าวเป็นการเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพของฟังก์ชันที่นำมาสร้าง Cost function ซึ่งฟังก์ชันที่ใช้ ได้แก่ Ramped sinusoidal basic function, Segment versine basic function และ Unshaped command การ ทดสอบประสิทธิภาพทั้งหมดเป็นการทดลองการเคลื่อนที่แบบจุดหนึ่ง ไปอีกจุดหนึ่ง นำผลการ ทดลองของการเคลื่อนที่ตามสัญญาณคำสั่ง (Command) ที่สร้างจากฟังก์ชันทั้ง 3 ชนิดมา เปรียบเทียบ และทำการสรุปผล จากการทดลอง Segment versine basic function มีประสิทธิภาพที่ สูงที่สุดเมื่อประยุกต์ใช้กับแขนกลแบบสองข้อต่อยึดหุ่น

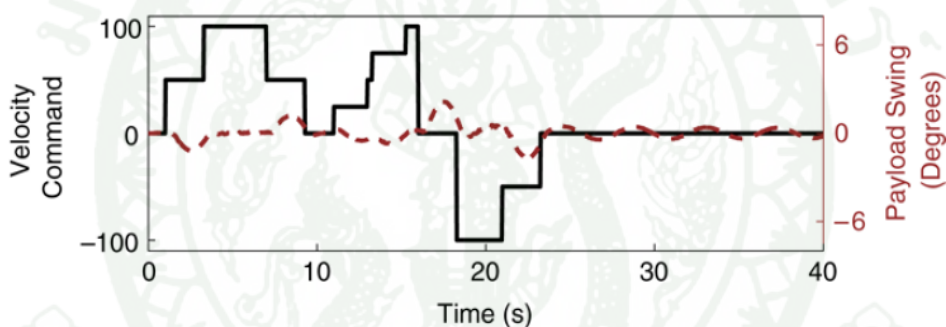
Ernesto (2007) นักวิจัยชาวอาร์เจนตินาได้พบปัญหาสารเคมีปนเปื้อนในน้ำทิ้งของโรงงาน เหมือง จึงได้ทำงานวิจัยโดยใช้แผนภาพของ Forton ซึ่งเป็นรูปแบบในการกำจัดสารเคมีด้วยวิธีเพิ่มสาร ประเภทไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ให้ไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันภายในถังบำบัด Extremum-Seeking จึงถูกนำมาใช้เพื่อที่จะรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์ภายในถัง ตรวจสอบและส่งค่าการสั่งงานใหม่ให้กับ บั้มที่เติมสารเคมีลงไปในถังบำบัด

Sorensen *et al.* (2008) ศึกษาการแกว่งของวัตถุที่ผูกติดกับสะพานเครน (Bridge crane) ผู้วิจัยได้เห็นถึงผลกระทบที่เกิดจากการปรับลดความเร็วด้วยมือบังคับดังภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ความเร็วในการเปลี่ยนตำแหน่งมีผลต่อการแกว่ง จึงได้หยิบยกเทคนิคการปรับเปลี่ยนสัญญาณ นำเข้ามาทำการหาค่าความเร็วที่เหมาะสม โดยใช้ความความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วง พิสูจน์ออกมาทางสมการก่อนที่จะทำการทดลอง โดยได้ค่าอัตราส่วนความเร็วอินพุตมา เปรียบเทียบกับความเร็วในส่วนเอาต์พุตตามสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นของสะพานเครน (Sorensen *et al.*, 2007) ผลจากการทดลองดังภาพที่ 7 เห็นได้ว่าการแกว่งของสะพานเครน (Bridge crane) ลดลง



ภาพที่ 6 ภาพการปรับความเร็วของสะพานเครนด้วยมือมนุษย์

ที่มา: Sorensen (2008)



ภาพที่ 7 ภาพการปรับความเร็วหลังจากการใช้ Command input shaping สั่งงาน

ที่มา: Sorensen (2008)

Cole and Wongratanaphisan (2013) ออกแบบตัวกรองแบบเอพไออาร์ที่ได้ค่า สัมประสิทธิ์มาจากช่วงที่ไม่มีกรรสน ตัวกรองแบบเอพไออาร์จะเปลี่ยนค่าตามเวลาจริงเมื่อมีการ วัดค่าใหม่ ออกมา ค่านั้นได้จากรูปทรงการอ้างอิงของอินพุตและสัญญาณกรรสนที่เกิดขึ้น ในการแก้ไขระบบวิธีนี้ถือว่ามีกรรสนที่ยุ่งยากเกินไป

Modi and Saha (2013) ได้นำเสนอการประยุกต์ Extremum-Seeking ในการปรับเปลี่ยนแรงดันทางไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทางตอนใต้ของประเทศออสเตรเลีย เมื่อเครื่องกำเนิดผลิตไฟฟ้าจะเกิดความไม่แน่นอนของไฟฟ้า จึงต้องมีการปรับแต่งเพื่อให้เกิดความเหมาะสม Extremum-

seeking จึงถูกนำเข้ามาให้ร่วมในกระบวนการรับข้อมูลของไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และเปลี่ยนค่าภายในระบบให้เหมาะสมเพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพพร้อมนำไปเก็บในส่วนต่อไป

สำหรับการออกแบบสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวจะใช้อัตราการขยายที่ได้มาจากการวัดค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงที่ได้มาจากการวัดที่สถานะมีน้ำหนักบรรทุกเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และใช้การแสวงหาค่าจุดขีดที่มีการสั่นน้อยที่สุด ข้อได้เปรียบของอัลกอริทึมแบบนี้ได้แก่

1. ไม่ต้องการสมการทางคณิตศาสตร์ ค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงพิจารณาได้จากการทดลองหรือจากผู้ทดลองกำหนด การแสวงหาค่าขีดสุดสามารถปรับหาค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงที่ทำให้ระบบมีการสั่นน้อยที่สุดได้ และยังสามารถใช้ได้กับระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้นหรือระบบไม่เชิงเส้นได้
2. สามารถปรับหาค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงได้มากกว่าหนึ่ง
3. ไม่จำเป็นต้องมีการใส่ค่าเริ่มต้นใหม่ทุกครั้งค่าถัดไปจัดหาได้ด้วยการแสวงหาค่าขีดสุด
4. การคำนวณระบบน้อยกว่าวิธีการแบบอื่นๆ
5. ไม่จำเป็นต้องทำซ้ำๆ เพื่อเก็บค่าไว้ใช้อ้างอิงสามารถทำงานต่อเนื่องได้ทันที

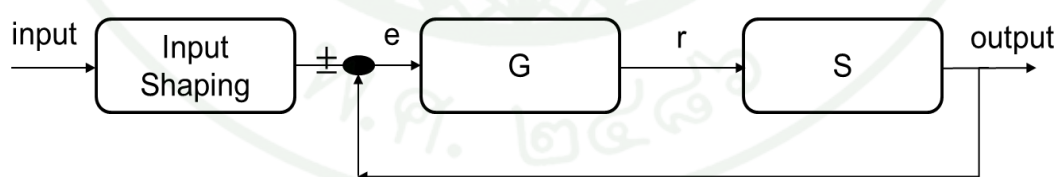
สำหรับอัลกอริทึมจะประยุกต์ใช้จากการเปลี่ยนตำแหน่งจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งของแกนกลเชื่อมโยงยึดหยุ่นโดยเปลี่ยนแปลงน้ำหนักบรรทุกไปตามเวลา ผลการทดลองจะแสดงผลการลดการสั่นในสถานะมีน้ำหนักด้วยวิธีการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตราการขยายและการแสวงหาค่าขีดสุด เทียบกับการไม่ใช้วิธีที่กล่าวมา

ทฤษฎี

เบื้องต้นเกี่ยวกับเทคนิคการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า

การควบคุมแบ่งออกเป็นสองลักษณะคือ Active control และ Passive control ซึ่งเทคนิคปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (Input shaping) ก็เป็นส่วนหนึ่งในระบบแบบ Passive control และเทคนิคนี้เป็นการคำนวณจากตำแหน่งการเคลื่อนที่ (Position shaping) โดยที่ระบบจะคำนวณจากระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear) มีการสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free vibration) และเป็นระบบแบบ Underdamped เทคนิคนี้โดยทั่วไปเป็นการสร้างอนุกรมของ Impulse เพื่อไปรวมกับสัญญาณควบคุม (Command) ซึ่งจะได้ Shaped command ใหม่ออกมา เทคนิคนี้สามารถที่คำนวณเพื่อลดการสั่นสะเทือนของระบบ ณ จุดที่เราต้องการซึ่งจุดที่เราต้องการนี้คือช่วงของค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของระบบ

เทคนิคปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (Input shaping) จะมีการทำงานแบบ Feed forward ซึ่งนั่นหมายความว่า จะเป็นการทำงานภายนอก Loop ของการควบคุมสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 8 เมื่ออินพุต คือ สัญญาณควบคุม (Command), e คือ ค่าความผิดพลาดของระบบ (Error), r คือ สัญญาณตัวควบคุม, output คือ สัญญาณขาออกของระบบ (Output), G คือ ตัวควบคุม (Controller), S คือ ระบบ (System) จากภาพจะเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุมถูกรวมกับอนุกรมลูกคลื่น (Impulse) เป็น Shaped command ก่อนที่สัญญาณนี้จะถูกส่งเข้าไปในวงรอบของการควบคุมแบบป้อนกลับ



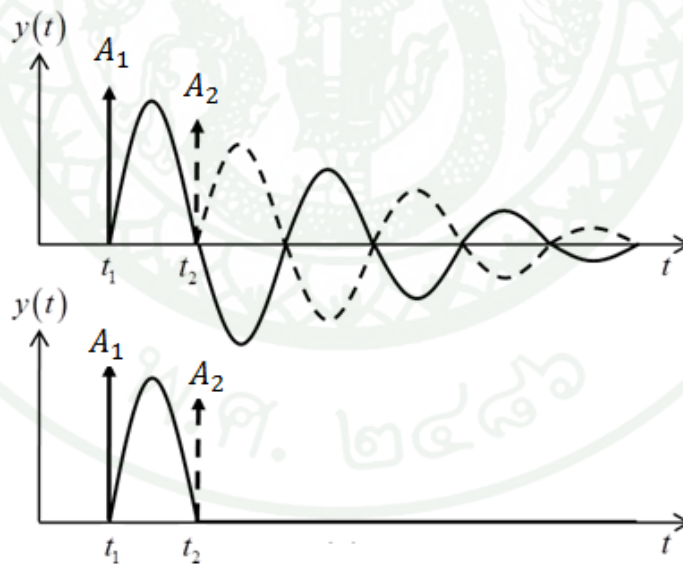
ภาพที่ 8 แสดงวงจรการควบคุมแบบป้อนกลับ (Closed loop system)

การคำนวณของเทคนิคปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (Input shaping) มีความเกี่ยวข้องกับผลตอบสนองของ Second order systems ที่สอดคล้องกับข้อจำกัดของตัวแปร (Constraints) โดย

กรณีที่ใช้คำนวณจะพิจารณาการสร้างระบบอินพุทของระบบจากผลของเอาต์พุทที่เป็นการสั่นแบบอิสระ และผลของค่าเอาต์พุทที่ได้จะเป็นตัวกำหนดค่า Impulse ของอินพุทใหม่ที่ใส่เข้ามาในระบบ ผลของการสั่นสะท้อนสามารถแสดงในเซตของ Second order poles ที่ลดลงตามสัญญาณ Sinusoidal อ้างอิงมาจากหนังสือของ Bolz and Tuve (1998) ได้พิสูจน์สมการเอาไว้

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

เมื่อ A คือ แอมพลิจูด (Amplitude) ของ Impulse, ω_0 คือ ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency), t คือ เวลา, t_0 คือ ช่วงเวลาที่ใส่ Impulse เข้าไปในระบบ, ζ คือ อัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio) ของระบบ ส่วนของ Impulse โดยมากจะเป็นทอร์ก (Torque) หรือการควบคุมความเร็ว (Velocity command) เพื่อไปควบคุม Actuator ของระบบพลศาสตร์, $y(t)$ คือตำแหน่งที่สนใจในระบบ การประยุกต์เทคนิคในส่วนนี้จะแสดงเฉพาะระบบที่เป็นแบบ Single mode เท่านั้น ซึ่งผลจากการใส่ Impulse เข้าไปในระบบซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 แสดงการใส่สัญญาณลูกคลื่น (Impulse) เพื่อเกิดการหลักข้างจนเป็นศูนย์

จากภาพที่ 9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการใส่ Impulse เข้าไปในระบบจำนวน 2 แรง จะเกิดการหักล้างระหว่างการสั่นสะท้อนแบบอิสระของแรง A_1 และ A_2 ซึ่งผลจากกราฟที่แสดงเส้นกราฟที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา t_1 หลังจากที่ได้รับ Impulse เข้าไปในระบบจะถูกหักล้างเมื่อได้รับ Impulse เข้าไปในช่วงเวลา t_2 ทำให้การสั่นสะท้อนทั้งหมดโดนหักล้างออก เริ่มทำการพิจารณาจากสมการที่ (1) โดยใช้หลักการตรีโกณมิติ (Trigonometric relations) ในหนังสือของ Gieck (1983) จะเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2)

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

เมื่อ

$$A_{amp} = \sqrt{(B_1 \cos \phi_1 + B_2 \cos \phi_2)^2 + (B_1 \sin \phi_1 + B_2 \sin \phi_2)^2} \quad (3)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{B_1 \cos \phi_1 + B_2 \cos \phi_2}{B_1 \sin \phi_1 + B_2 \sin \phi_2} \right) \quad (4)$$

จากสมการที่ (2) ในส่วนของแอมพลิจูด (Amplitude) สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ

$$A_{amp} = \sqrt{(\sum_{j=1}^N B_j \cos \phi_j)^2 + (\sum_{j=1}^N B_j \sin \phi_j)^2} \quad (5)$$

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

B_j คือ Coefficients ของไซน์ในสมการที่ (1), N คือ จำนวน Impulse, t_N คือ เวลาที่ทำการใส่ Impulse เข้าไปในระบบ, ω คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) และ ζ คือ ค่าอัตราส่วนการหน่วง (Damping ratio) ในการที่จะทำการสั่นสะท้อนของระบบมีค่าเป็นศูนย์ค่า A_{amp} จากสมการที่ (5) ต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ในเวลาที่สุดการใส่อินพุตเข้าไปในระบบแทนเวลานั้นด้วย t_N สมการที่ (5) เป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อทั้งสองเทอมในรากที่สองของสมการที่ (5) ต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ทั้งสองเทอม สามารถเขียนได้ใหม่ได้ดังนี้

$$B_1 \cos \phi_1 + B_2 \cos \phi_2 + \dots + B_N \cos \phi_N = 0 \quad (6)$$

$$B_1 \sin \phi_1 + B_2 \sin \phi_2 + \dots + B_N \sin \phi_N = 0 \quad (7)$$

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 ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้

จากสมการที่ (6) และ (7) สามารถนำทั้งสองสมการมาเขียนใหม่ได้เป็น

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

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

Zero vibration (ZV) คือ การออกแบบ Input shaper ประกอบด้วยลูกคลื่น 2 แรงและ Input shaping ในแบบ ZV เหมาะกับการใช้ในกรณีที่เป็นแบบจำลองทางพลศาสตร์มีความแม่นยำสูง ซึ่งการทำงานกับสัญญาณควบคุมของ Input shaping แบบ ZV มีเวลาหน่วง (Time delay) เกิดขึ้นในระบบไม่มากเท่ากับ Zero vibration and derivative (ZVD) ความแตกต่างของสัญญาณควบคุมทั้งสองคือจำนวนของแอมพลิจูด (Amplitude) หรือจะอธิบายง่ายว่ายิ่งสร้างสัญญาณที่มีแอมพลิจูด (Amplitude) มากเท่าไรก็จะเกิดเวลาหน่วง (Time delay) มากขึ้นเท่านั้น การคำนวณหาค่าแอมพลิจูด (Amplitude) และเวลาที่เกิด Impulse ของแต่ละแรงกระทำต่อสัญญาณการควบคุม (Command) เราสามารถจะคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

กำหนดค่าเริ่มต้น (Initial condition) ของการคำนวณดังนี้

$N=2$ (จำนวน Impulse ที่กำหนดในการคำนวณ), $A_1 = 1, t_1 = 0, \sum_{i=1}^N A_i = 1$ ผลรวมของแอมพลิจูด (Amplitude) ทั้งหมดเท่ากับ 1

แทนค่าเริ่มต้นลงในสมการจะได้สมการที่ (8) และ (9) ออกมา

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

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

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

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

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

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 $t_1 = 0$ สามารถเขียนแทนด้วยสมการที่ (12)

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

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

$$e^{(-\zeta \omega_n t_2)} + A_2 \cos(\pi) = 0$$

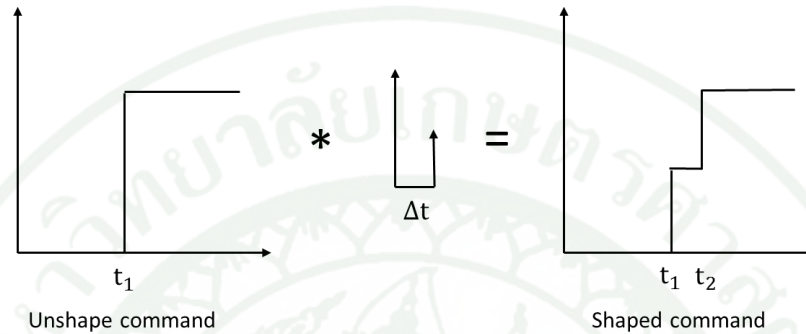
$$A_2 = e^{-\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1 - \zeta^2}}}$$

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 $A_1 + A_2 = 1$

ทั้งหมดที่กล่าวมาได้ค่าแอมพลิจูด (Amplitude) และเวลาดังต่อไปนี้

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

ภาพที่ 10 แสดงการประยุกต์ใช้งานการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (Input shaping) แบบ ZV กับสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันได รูปทางด้านซ้ายมือแสดงสัญญาณควบคุมแบบขั้นบันได ทางด้านขวาเป็นรูปที่นำการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (Input shaping) แบบ ZV ปรับสัญญาณควบคุม เพื่อให้ได้สัญญาณนำเข้าใหม่



ภาพที่ 10 แสดงการประยุกต์ใช้งานการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (Input shaping) แบบ ZV

Zero vibration and derivative (ZVD) คือเทคนิค Input shaping ที่ประกอบด้วยค่า 3 Impulse ซึ่ง Constraint ที่ใช้คำนวณแบบ ZVD ได้มีการหา Derivative จากสมการผลรวม แอมป์ริจูด (Amplitude) เทียบกับความถี่ของระบบ (ω) สามารถได้ Constraint ที่เรียกว่า Robustness uncertainties in Natural frequency ตามสมการที่ (14) และ (15) ซึ่ง Constraint แบบ Derivative สามารถเพิ่ม Robustness ให้กับระบบที่ส่งผลกับ Sensitivity ของความผิดพลาดในแบบจำลองทางพลศาสตร์ (Model error) แต่สิ่งที่จะต้องแลกมากับการลดการสั่นสะเทือนคือค่าเวลาหน่วง (Delay) ที่เพิ่มมากขึ้น

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

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

ขั้นตอนการคำนวณมีลักษณะคล้ายกับแบบ ZV แต่ $N = 3$ (จำนวน Impulse ที่กำหนดในการคำนวณ), $A_1 = 1, t_1 = 0, \sum_{i=1}^N A_i = 1$

แทนค่าตัวแปรทั้งหมดในสมการ (14) และ (15) แทนค่า $N = 3$

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

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

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

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

จากสมการที่ (16) ถึง (19) แทนค่าเริ่มต้นโดยกำหนด $A_1 = 1, t_1 = 0$ สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังต่อไปนี้

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

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

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

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

จากสมการที่ (21) จัดรูปใหม่ได้เป็น

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

เมื่อได้สมการที่ (24) แล้วแทนค่าลงในสมการที่ (23) เพื่อหาค่า t_2

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

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

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

$t_1 = 0$

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

ดังนั้นจากสมการที่ (26) สามารถหาค่า $t_2 = \frac{\pi}{\left(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n\right)}$ แทนค่า t_2 ในสมการที่ (21) ได้สมการที่ (27) และนำสมการนี้ไปหาค่า t_3

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

จากสมการที่ (27) เมื่อ $A_3 \neq 0$ ดังนั้นจะได้ $t_3 = \frac{\pi}{\left(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n\right)}$ นำ t_2, t_3 แทนลงในสมการที่ (22) และทำให้อยู่ในรูปอย่างง่ายในสมการที่ (28)

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

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

นำ t_2, t_3 และ A_3 แทนลงในสมการที่ (20) เพื่อหาค่า A_3

$$e^{\frac{2\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} + A_2 e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \cos(\pi) + \frac{A_2}{2} e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \cos(2\pi) = 0 \quad (29)$$

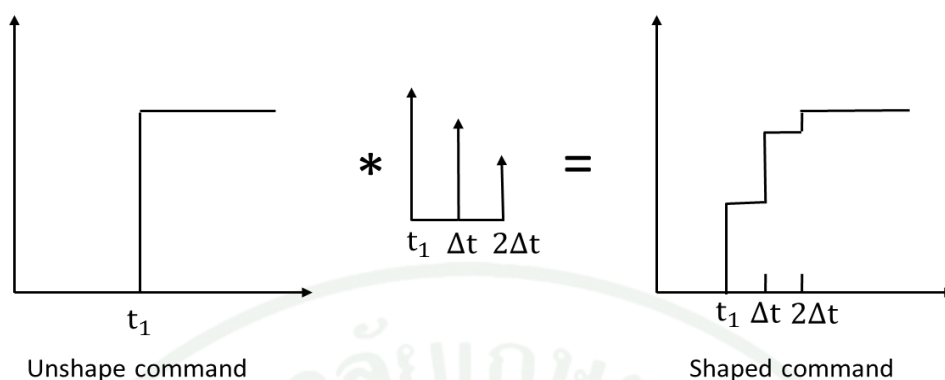
จากสมการที่ (29) ดังนั้น $A_2 = 2e^{\frac{2\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$ จากนั้นนำค่า A_2 ไปแทนในสมการที่ (28) ได้

ค่า $A_3 = 2e^{\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$ แทนค่าตัวแปร $K = 2e^{\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$ และ $\Delta t = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$ จาก $\sum_{i=1}^N A_i = 1$ จะได้

$A_1 + A_2 + A_3 = 1$ เขียนให้อยู่ในรูปสมการอย่างง่ายได้ตามสมการที่ (30)

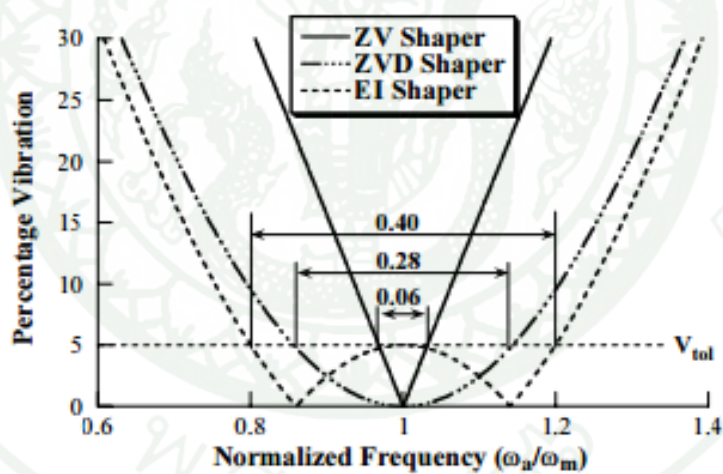
$$\left(\begin{array}{ccc} A_1 = \frac{1}{K^2 + 2K + 1} & A_2 = \frac{2K}{K^2 + 2K + 1} & A_3 = \frac{K^2}{K^2 + 2K + 1} \\ t_1 = 0 & t_2 = \Delta t & t_3 = 2\Delta t \end{array} \right) \quad (30)$$

จากภาพที่ 11 แสดงการประยุกต์ใช้งาน Input shaping แบบ ZVD กับสัญญาณควบคุมแบบ Step รูปทางซ้ายมือแสดงสัญญาณควบคุมแบบ Step ทางด้านขวาเป็นรูปที่นำ Input shaping แบบ ZVD มาใช้กับสัญญาณควบคุม จะเห็นได้ว่าเวลาที่ใช้จะมากกว่า Input shaping แบบ ZV



ภาพที่ 11 แสดงการประยุกต์ใช้งานเทคนิค Input shaping แบบ ZVD กับสัญญาณแบบ Step

ด้วยประสิทธิภาพที่แสดงดังภาพที่ 12 จะมีขอบข่ายความถี่ ZVD สูงกว่าในแบบ ZV จึงได้เลือกใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าที่เป็นแบบ ZVD



ภาพที่ 12 แสดง Sensitivity curve แต่ละชนิดของ Input shaping กับเปอร์เซ็นต์การสั่นสะเทือน

ที่มา: Singhose (2009)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

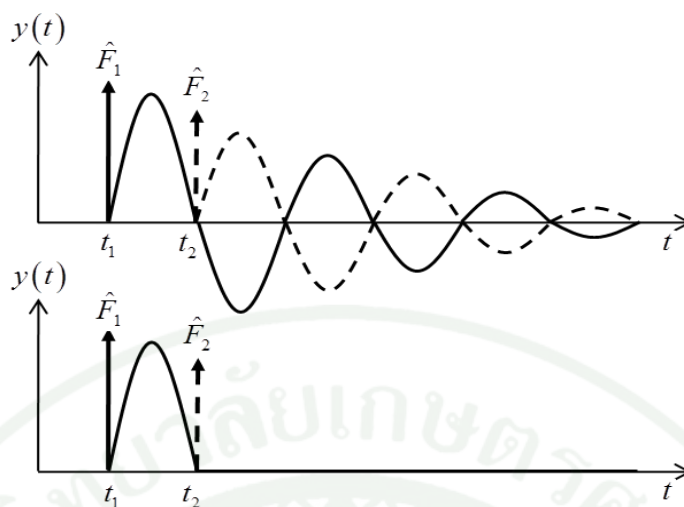
1. แขนกลเชื่อมโยงยึดหมุนได้
2. อุปกรณ์ตรวจจับความเร่งเชิงมุม (Accelerometer)
3. อุปกรณ์วัดตำแหน่ง (Encoder)
4. วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (Power amplifier)
5. คอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบ (Target computer)
6. คอมพิวเตอร์ที่ใช้เขียนการสั่งงาน (Host computer)
7. การ์ดควบคุมรุ่น NI PCI 6221
8. แหล่งจ่ายไฟ (Power supply) รุ่น GPS-3030D
9. ตัววัดแรงดึงเครียด (Strain gauge)

วิธีการ

การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (Input shaping)

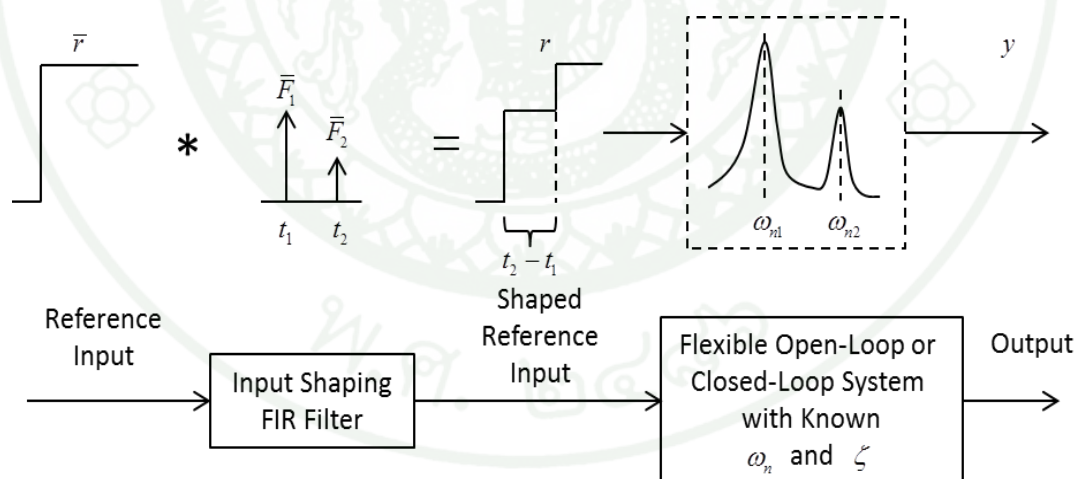
พิจารณาจากผลตอบสนองของสองลูกคลื่นดังภาพที่ 22 เป็นระบบเชิงเส้นที่ความหน่วงต่ำของระบบหนึ่งองศาอิสระ ผลจากขนาดของ \hat{F}_1 สามารถเขียนในรูปสมการที่ (14)

$$y(t) = \frac{\hat{F}_1 e^{-\zeta \omega_n (t-t_1)}}{m \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \sin \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n (t-t_1) \quad (31)$$



ภาพที่ 13 แสดงการใส่สัญญาณลูกคลื่น (Impulse) เพื่อเกิดการหักล้างจนเป็นศูนย์

โดยที่ y คือ ค่าผลตอบสนอง, ζ คือ ค่าอัตราส่วนการหน่วง, ω_n คือ ค่าความถี่ธรรมชาติ, m คือ มวล, t_1 คือ ค่าช่วงเวลาที่เกิดลูกคลื่น จากภาพจะเป็นได้ว่าถ้าหากเราใส่สัญญาณขนาด \hat{F}_2 ที่มีเฟสตรงกันข้ามกับ \hat{F}_1 ณ ช่วงเวลาเดียวกัน จะส่งผลให้เกิดการหักล้างกันของสองลูกคลื่น



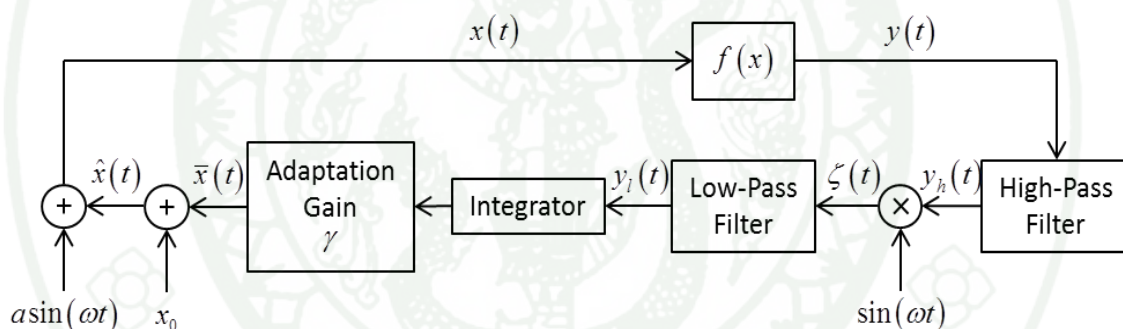
ภาพที่ 14 การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าสำหรับระบบแกนกลยืดหยุ่นได้

ที่มา: Singer and Seering (1990)

ภาพที่ 15 เป็นการแสดงระบบการปรับเปลี่ยนสัญญาณ โดยที่ r เป็นสัญญาณอ้างอิงของระบบ เมื่อผ่านเข้าตัวปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าจะถูกผสมรวมกับค่า \bar{F}_1 และ \bar{F}_2 ในช่วงเวลาที่ t_1 และ t_2 ตามลำดับ ซึ่งเปรียบได้กับตัวกรองแบบเฟอไออาร์ จากนั้นจะได้ r เป็นเป็นค่าสัญญาณใหม่ที่ถูกแก้ไขเพื่อเป็นสัญญาณอ้างอิงของระบบ ส่วนของ y จะเป็นสัญญาณออกของระบบที่เป็นระบบเปิดหรือระบบปิดที่ทราบค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงก็ตามแต่

การแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking)

รูปแบบการจัดวางของการแสวงหาค่าสุดขีดแสดงดังภาพที่ 24 ค่าที่เราต้องการทราบ x สามารถหาได้จาก $y = f(x)$ วิธีการหาต่างๆไป เราจะป็นต้องทราบฟังก์ชันของ f เพื่อจะหาค่าเกรเดียนต์ แต่สำหรับวิธีการแสวงหาค่าสุดขีดเราจะให้วิธีการประมาณค่าเกรเดียนต์ของ f โดยการติดตามค่าการเปลี่ยนแปลงจากฟังก์ชันผลตอบสนองในขอบเขตแคบๆ



ภาพที่ 15 แผนภาพการแสวงหาค่าสุดขีด

ถ้า \hat{x} เป็นค่าที่เราประมาณ และ x^* เป็นจุดเหมาะสมของระบบ f ค่าความผิดพลาดประมาณที่เกิดขึ้นจะหาได้จาก $\tilde{x} = \hat{x} - x^*$ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ จากภาพที่ 24 เราจะได้

$$y = f(x) = f(\hat{x} + a \sin(\omega t)) \approx f(\hat{x}) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} a \sin(\omega t) \quad (32)$$

โดยค่าประมาณสุดท้ายหามาได้จากกฎ The first-order Taylor's series ของ f รอบ \hat{x} ตัวกรองสัญญาณความถี่สูงโดยกำหนดค่าการตัดความถี่ที่น้อยกว่าค่าความถี่ธรรมชาติเล็กน้อย กำจัดเทอมของ $f(\hat{x})$ จะได้

$$y_h \approx \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} a \sin(\omega t) \quad (33)$$

จากนั้นคูณค่า $\sin(\omega t)$ เข้าไปเพื่อที่เราจะสามารถแยกตัวประกอบออกมาดังสมการที่ (34)

$$\zeta = y_h \sin(\omega t) \approx \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} a \sin^2(\omega t) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} \frac{a}{2} \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} a \cos(2\omega t) \quad (34)$$

จากสมการที่ (34) เมื่อค่า ζ ผ่านตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำเทอมของ $\cos(2\omega t)$ จะถูกกำจัดออกไปจะได้

$$y_l = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} \frac{a}{2} \quad (35)$$

Updating law จะได้ว่า $\dot{\hat{x}} = \dot{x} = \gamma y_l$ โดยที่ x_0 เป็นค่าคงที่และเป็นค่าเริ่มต้นของค่า x , γ เป็นค่าคงที่ลบใช้ออกแบบพารามิเตอร์ใช้กับค่าขยาย (Gain) พิจารณาตามกฎ second-order Taylor's series ของ f

$$f(x) \approx f(x^*) + f'(x^*)(x-x^*) + \frac{1}{2} f''(x^*)(x-x^*)^2 = f(x^*) + \frac{1}{2} f''(x^*)(x-x^*)^2 \quad (36)$$

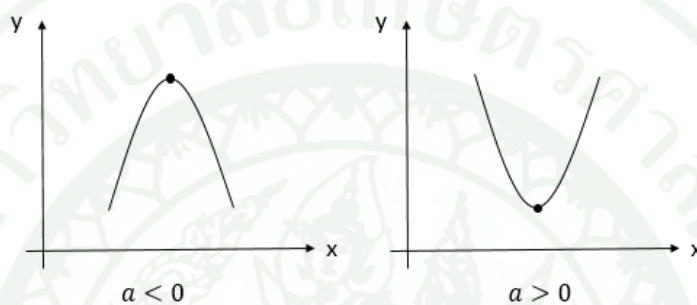
โดยที่ $f'(x^*) = 0$ เพราะ x^* เป็นจุดที่เราต้องการ

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} \approx f''(x^*)(x-x^*) \quad (37)$$

เนื่องจาก $\dot{\hat{x}} = \dot{x}$ แทนลงไปในสมการที่ (35)-(37) เราจะได้

$$\ddot{x} \approx \frac{ayf''(x)^*}{2} \tilde{x} \quad (38)$$

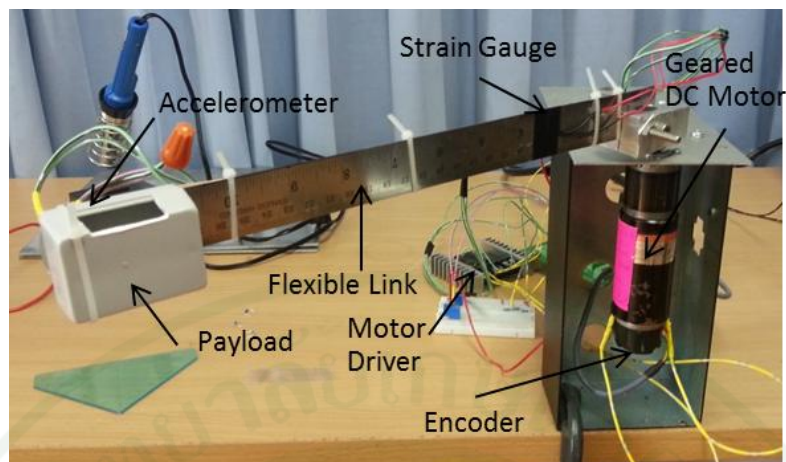
จากสมการค่า \tilde{x} จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ถ้าหากว่า $a < 0$ จะเป็นปัญหาของการหาค่ามากที่สุด ($f''(x)^* < 0$) และ $a > 0$ เป็นปัญหาของการหาค่าน้อยที่สุด ($f''(x)^* > 0$)



ภาพที่ 16 กราฟแสดงสภาวะที่ $a < 0$ และ $a > 0$

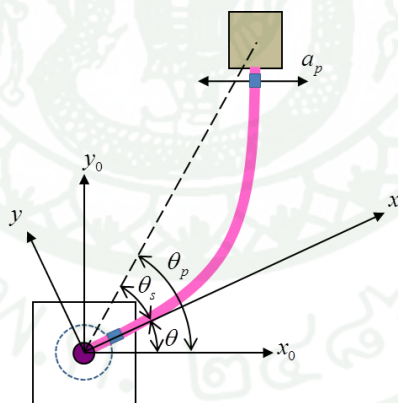
ระบบแขนกลเชื่อมโยงยืดหยุ่นได้ (Flexible-link robot system)

สำหรับกลแขนเชื่อมโยงยืดหยุ่นได้เราใช้ไม้อับรัดเหล็กแทนตัวแขนกลต่อกับมอเตอร์ ซึ่งไม้อับรัดเหล็กมีคุณสมบัติยืดหยุ่น ที่ปลายแขนกลจะติดกล่องขนาดเล็กเอาไว้เพื่อใส่เหรียญ ส่วนการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับความเร็ว (Accelerometer) จะติดเอาไว้ที่ปลายแขนกล และตัววัดแรงดึงเครียด (Strain gauge) เอาไว้ที่ต้นแขนกล นอกจากนั้นเราใช้อุปกรณ์วัดตำแหน่ง (Encoder) วัดมุมที่เปลี่ยนไปของมอเตอร์ (Motor)



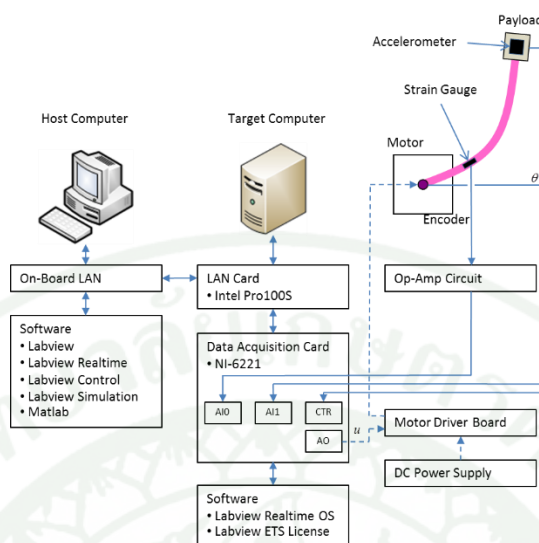
ภาพที่ 17 แขนกลเชื่อมโยงยืดหยุ่นได้ที่ใช้ทดลอง

เราสามารถหารูปการจำลองของมุมมองที่เปลี่ยนไปของมอเตอร์ดังภาพที่ 18 โดยที่ θ เป็นมุมของมอเตอร์, θ_s คือมุมที่ถูกเพิ่มขึ้นมาเมื่อเทียบตัววัตถุถึงแกนกับตัววัดแรงดึงเครียด (Strain gauge), $\theta_p = \theta + \theta_s$ เป็นมุมของวัตถุเมื่อเทียบกับแกน x_0 , a_p คือ ความเร่งของน้ำหนักบรรทุกวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจจับความเร็ว (Accelerometer)



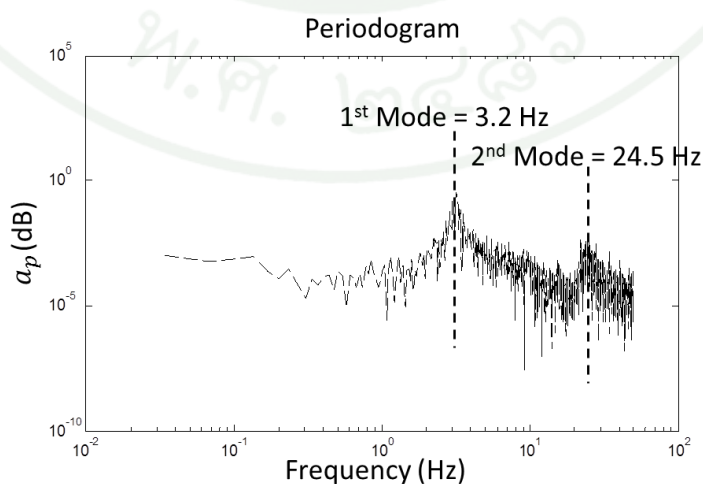
ภาพที่ 18 แผนภาพไดอะแกรมของแขนกลเชื่อมโยงยืดหยุ่นได้

ภาพที่ 19 เป็นการติดตั้งระบบทั้งหมดเพื่อพร้อมใช้ในการตั้งค่า และตรวจสอบผลที่เกิดขึ้นผ่านคอมพิวเตอร์ เราใช้บอร์ดของบริษัท National Instruments รุ่น NI-PCI6221 จากแผนภาพ u คือ สัญญาณที่เข้าไปตั้งค่าให้มอเตอร์ทำงาน ระบบจะส่งค่า θ และ a_p กลับมาเพื่อตรวจสอบ



ภาพที่ 19 แผนภาพระบบเชื่อมต่อแขนกลเชื่อมโยงยืดหยุ่นได้

เนื่องจากการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าต้องการค่าของความถี่ธรรมชาติและค่าอัตราส่วนการหน่วงของระบบ เราจึงต้องทดลองระบบปิดในสถานะที่ไม่มีน้ำหนักบรรทุก โดยให้มุมอ้างอิงของมอเตอร์ θ_r ตั้งงานเป็นสัญญาณลูกคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Square wave) ที่ขนาด 20 องศา ความถี่จาก 0.1 ถึง 0.5 Hz เป็นเวลา 60 วินาที ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์ (PI Controller) ที่เราใช้ $k_p = 0.1$, $k_i = 0.05$ ที่ได้จากการปรับตามความเหมาะสม ภาพที่ 20 แผนภาพวงจร(Periodogram) ซึ่งวัดค่าความถี่ธรรมชาติโหมดแรกเท่ากับ 3.2 Hz และโหมดที่สองเท่ากับ 24.5 Hz



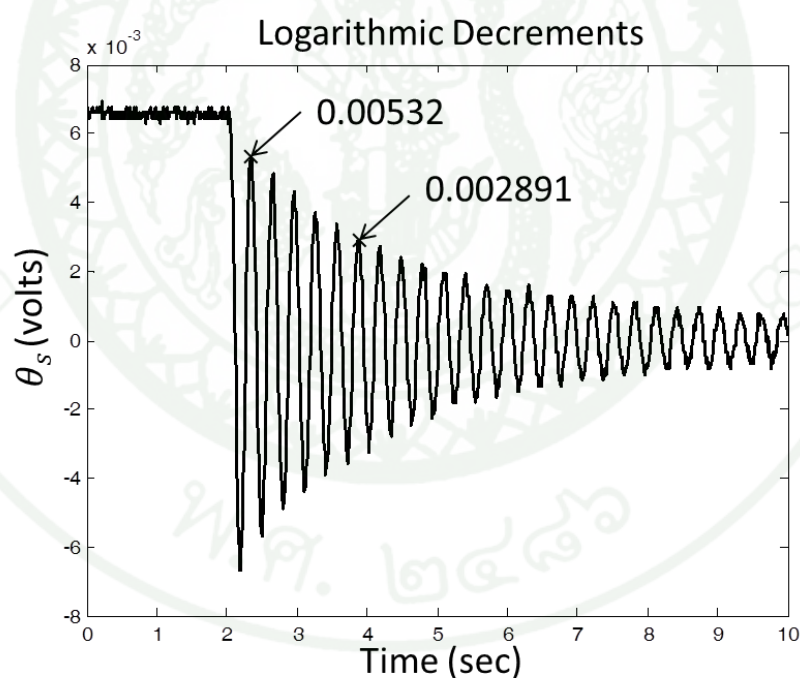
ภาพที่ 20 แผนภาพวงจร (Periodogram) ของโหมคแรกและโหมคที่สอง

เราจะหาอัตราส่วนการหน่วงของโหมคแรกโดยการจับที่ปลายแขนกลเอาไว้ แล้วใส่มุมให้กับมอเตอร์ เสร็จแล้วจึงปล่อยและวัด θ_s ออกมาจากตัววัดแรงดึงเครียด (Strain gauge) ได้ดังภาพที่ 21 จากการลดลงบนกราฟลอการิทึม เราสามารถนำมาคำนวณหาอัตราส่วนการหน่วงของแขนกลได้ดังนี้

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x_0}{x_n} = \frac{1}{5} \ln \frac{0.00532}{0.002891} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (39)$$

เราสามารถหาอัตราส่วนความหน่วงได้ทั้งสองโหมคจากสมการที่ (39) ได้เป็น

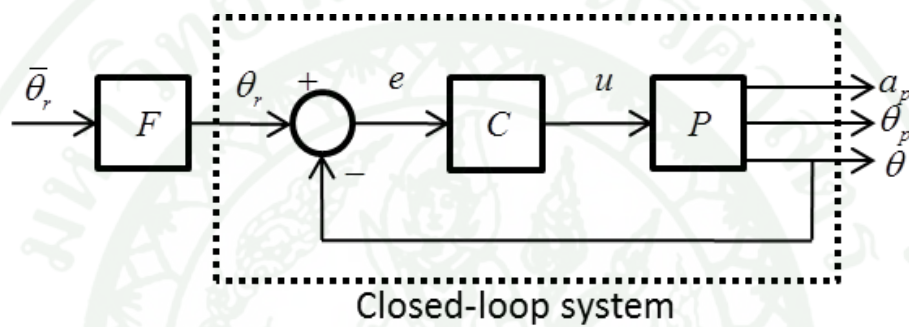
$$\zeta = 0.0192$$



ภาพที่ 21 กราฟแสดงสัญญาณที่วัดออกมาจากตัววัดแรงดึงเครียด (Strain gauge)

การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าไม่ประยุกต์ (Unadaptive input shaping)

ภาพที่ 22 แผนภาพระบบการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าไม่ประยุกต์โดยที่ F เป็นตัวปรับเปลี่ยนสัญญาณ (Input shaper), C เป็นตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์ (PI Controller), P เป็นแขนกลเชื่อมโยงยืดหยุ่นได้, $\bar{\theta}_r$ เป็นมุมมอเตอร์อ้างอิง และ e เป็นมุมมอเตอร์ติดตามค่าผิดพลาด (Tracking error)



ภาพที่ 22 แผนภาพของการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าไม่ประยุกต์ (Unadaptive input shaping)

F ในระบบปิดเราจะใช้ค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์ (PI Controller) เราจะได้ว่า

$$P = \left(\frac{\bar{\omega}_{n1}^2}{s^2 + 2\bar{\zeta}_1\bar{\omega}_{n1}s + \bar{\omega}_{n1}^2} \right) \left(\frac{\bar{\omega}_{n2}^2}{s^2 + 2\bar{\zeta}_2\bar{\omega}_{n2}s + \bar{\omega}_{n2}^2} \right) \quad (40)$$

โดยที่ค่า $\bar{\omega}_{n1}, \bar{\omega}_{n2}, \bar{\zeta}_1, \bar{\zeta}_2$ ได้อธิบายในหัวข้อก่อนหน้า ค่าที่ได้ออกมาของทั้งสองโหมดสามารถคำนวณออกมาได้ $\omega_{n1} = 21.105 \text{ rad/sec}$, $\omega_{n2} = 153.804 \text{ rad/sec}$, $\zeta_1 = 0.017$ และ $\zeta_2 = 0.019$ ตัวปรับเปลี่ยนสัญญาณ F สามารถเขียนในทำนองเดียวกับตัวกรองเอฟไออาร์

$$F(z) = F_1(z)F_2(z) \quad (41)$$

$$F_1(z) = \left(\bar{F}_1 + \bar{F}_2 z^{t_2} + \bar{F}_3 z^{t_3} \right) \quad (42)$$

ที่ i th โหมด

$$\bar{F}_1 = \frac{1}{(1+2K+K^2)}, \bar{F}_2 = \frac{2K}{(1+2K+K^2)}, \bar{F}_3 = \frac{K^2}{(1+2K+K^2)}$$

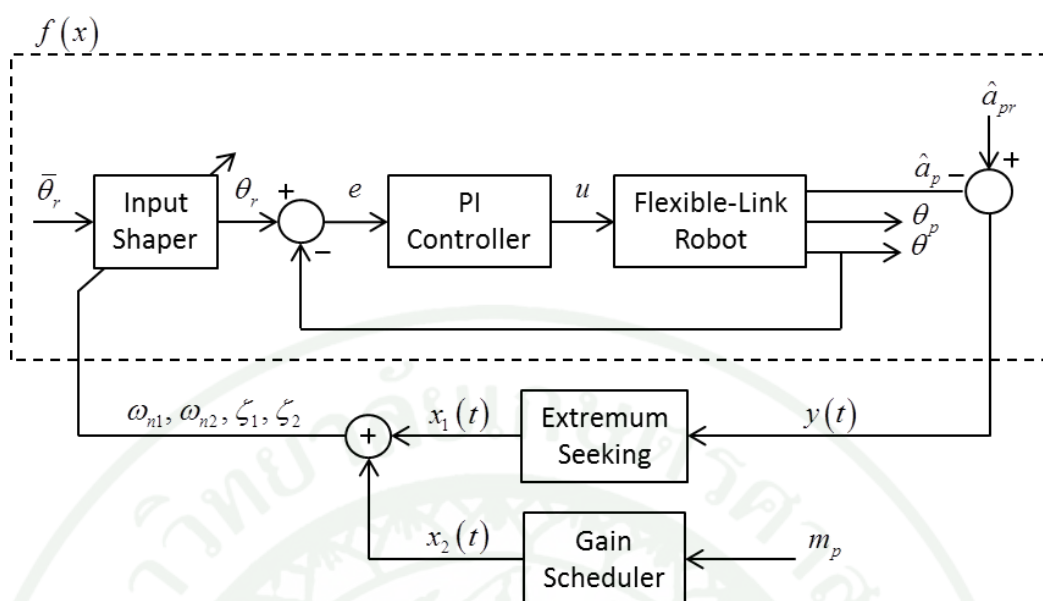
$$K = e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}, t_2 = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}, t_3 = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$$

t_s คือ การสุ่มเวลา (Sampling time) และ z คือ ตัวปฏิบัติการเปลี่ยนผ่านแซด (z-transform operator) ความเร่งบรรทุกน้ำหนักเราสามารถประมาณที่เป็นผลรวมในการเคลื่อน ที่ของแกนกล เชื่อมโยงยึดหยุ่นได้ดังนี้

$$\hat{a}_p = \int |a_p| dt \quad (43)$$

ระบบการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตราขยายและการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking gain-scheduled input shaping system)

เมื่อมีการเปลี่ยนน้ำหนักประสิทธิภาพของระบบจะลดลงซึ่งเป็นผลมาจากค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงที่เปลี่ยนไปในเวลานั้นๆ ด้วยเหตุที่ว่าไม่มีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบ จึงได้ออกแบบระบบที่รับรู้การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่เกิดขึ้นก่อนนำไปแก้ไขสัญญาณนำเข้าตามภาพที่ 23 ประกอบด้วย 4 ส่วนสำคัญได้แก่ ตัวปรับเปลี่ยนสัญญาณ (Input shaper), ตัวควบคุมมอเตอร์ (Controller), การแสวงหาค่าขีดสุด (Extremum-seeking), ตัวกำหนดอัตราขยาย (Gain-scheduled) สำหรับสัญญาณขาออกส่วนของค่า \hat{a}_p จะเทียบค่ากับค่าอ้างอิง \hat{a}_{pr} ก่อนเข้าสู่ส่วนการแสวงหาค่าขีดสุด (Extremum-seeking) ซึ่งจะไปรวมกับตัวกำหนดอัตราขยาย (Gain-scheduled) ก่อนนำไปปรับที่ตัวปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าอีกต่อหนึ่ง



ภาพที่ 23 แผนภาพระบบที่ใช้กับแขนกลเชื่อมโยงยืดหยุ่นได้

ตัวปรับสัญญาณจะได้รับค่ามุมอ้างอิง $\bar{\theta}_r$ และปรับสัญญาณอ้างอิง θ_r ก่อนจะใช้ข้อมูลความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงของทั้งสองโหมดเข้ามาใช้ก่อนส่งผ่านไปยังตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์ (PI Controller) และแขนกลเชื่อมโยงยืดหยุ่นได้ ความเร่งของตัวบรรทุกน้ำหนัก \hat{a}_p จะถูกนำเข้าไปพิจารณาค่าส่วนต่างกับ \hat{a}_{pr} ที่เป็นค่าอ้างอิงของ \hat{a}_p จะได้ว่า การแสวงหาค่าสุดขีดน้อยที่สุด $y = \hat{a}_{pr} - \hat{a}_p$ โดยเรากำหนดให้เป็นศูนย์ ค่าถัดมา x_1 ค่าขาออกของการแสวงหาค่าขีดสุด $x_1 = \{\Delta\omega_{n1}, \Delta\omega_{n2}, \Delta\zeta_1, \Delta\zeta_2\}$ ทั้งหมดจะเป็นค่าน้อยที่สุดของระบบที่จะทำให้การสั่นลดลง

ในกรณีที่เราไม่ใช้ตัวกำหนดอัตราขยาย (Gain-scheduler) เราสามารถใช้ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low-pass filter) และตัวกรองสัญญาณความถี่สูง (High-pass filter) เข้ามาช่วย ถ้า $\omega = 2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ตัวกรองสัญญาณความถี่สูง (High-pass filter) จะได้ว่า $\frac{s}{(s+h)}$ เมื่อ $h = 0.5$

กรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low-pass filter) จะได้ว่า $\frac{l}{(s+l)}$ เมื่อ $l = 1$ พารามิเตอร์อื่นจะได้ว่า

$a_{\omega_{n1}} = 1, a_{\zeta_1} = 0.001, a_{\omega_{n2}} = 1, a_{\zeta_2} = 0.0015$, เป็นค่าฟังก์ชันไซน์ จะได้ว่าค่าประยุกต์อัตราขยาย $\gamma_{\omega_{n1}} = 100, \gamma_{\zeta_1} = -0.07, \gamma_{\omega_{n2}} = -1,000, \gamma_{\zeta_2} = -0.01$

ในกรณีที่เรารู้ตัวกำหนดอัตราขยาย (Gain-scheduler) เราจะออกแบบค่าพารามิเตอร์ได้ $a_{\omega_{n1}} = 0.1$, $a_{\zeta_1} = 0.001$, $a_{\omega_{n2}} = 0.1$, $a_{\zeta_2} = 0.00015$ เป็นค่าฟังก์ชันไซน์ จะได้ค่าประยุคต์อัตราขยาย $\gamma_{\omega_{n1}} = -10$, $\gamma_{\zeta_1} = -0.007$, $\gamma_{\omega_{n2}} = -100$, $\gamma_{\zeta_2} = -0.01$ จะเห็นได้ว่าทั้งสองกรณีจะได้ค่าประยุคต์อัตราขยายเท่ากันเนื่องจากได้รับค่าความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงมาจากชุดเดียวกัน

โดยปกติตัวกำหนดอัตราขยาย (Gain-scheduler) ที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมเราจะวัดค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนไปจากตัวรับรู้ (Sensor) แต่ในกรณีนี้เราจะใช้วิธีการทำซ้ำเพื่อที่จะหาค่าออกมา โดยจะแบ่งเป็น 4 กรณี ได้แก่ 0, 3, 6, 9 เหรียญตามลำดับ เหรียญที่ใช้เป็นเหรียญ 5 บาท ตารางที่ 1 เป็นค่าที่วัดออกมาได้จากแต่ละกรณี

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากทั้ง 4 กรณี

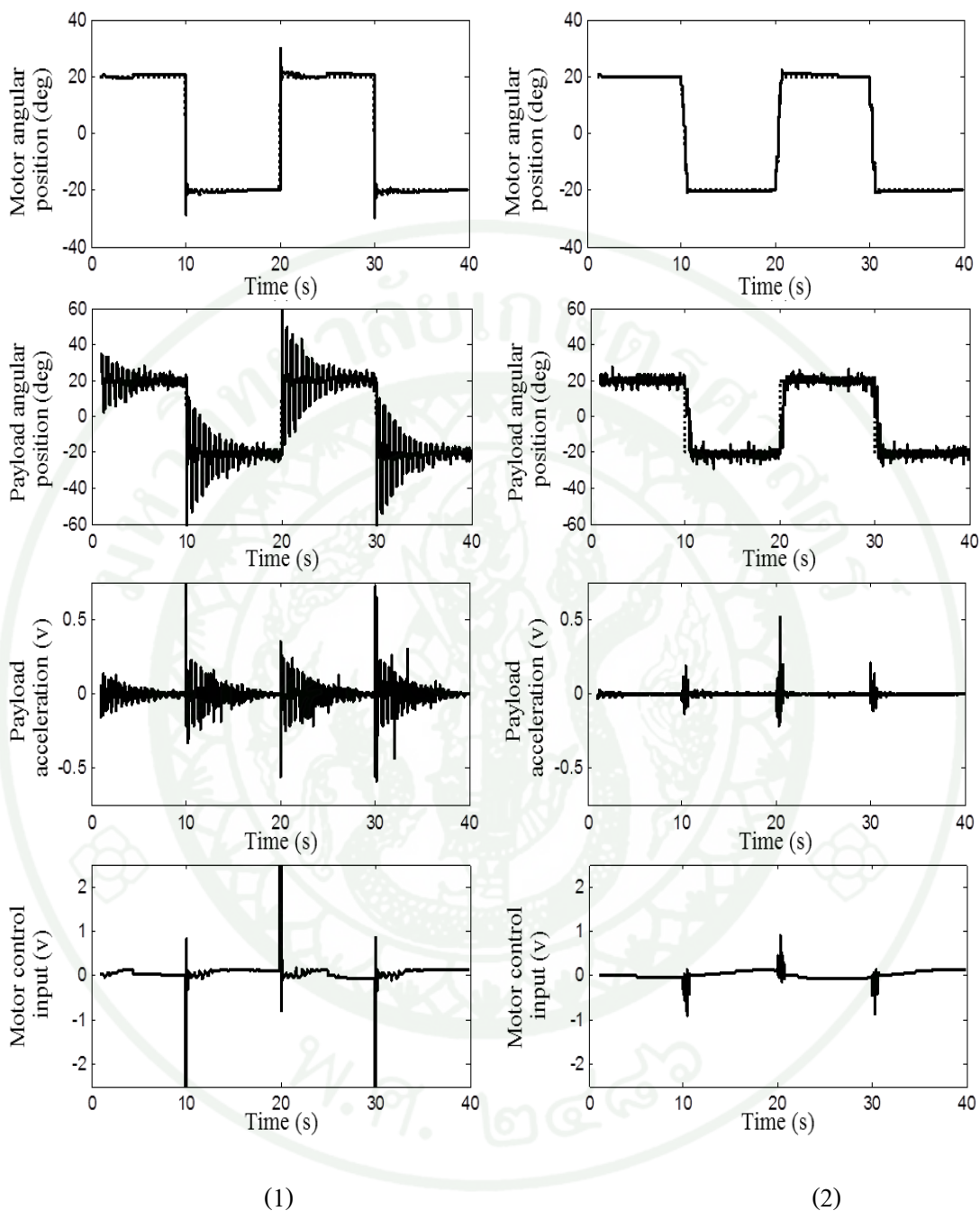
	0 coins	3 coins	6 coins	9 coins
$\bar{\omega}_{n1} (rad.s^{-1})$	21	18	15	12
$\bar{\zeta}_1$	0.017	0.015	0.012	0.010
$\bar{\omega}_{n2} (rad.s^{-1})$	153	130	100	70
$\bar{\zeta}_2$	0.019	0.016	0.013	0.010

ผลและวิจารณ์

ผล

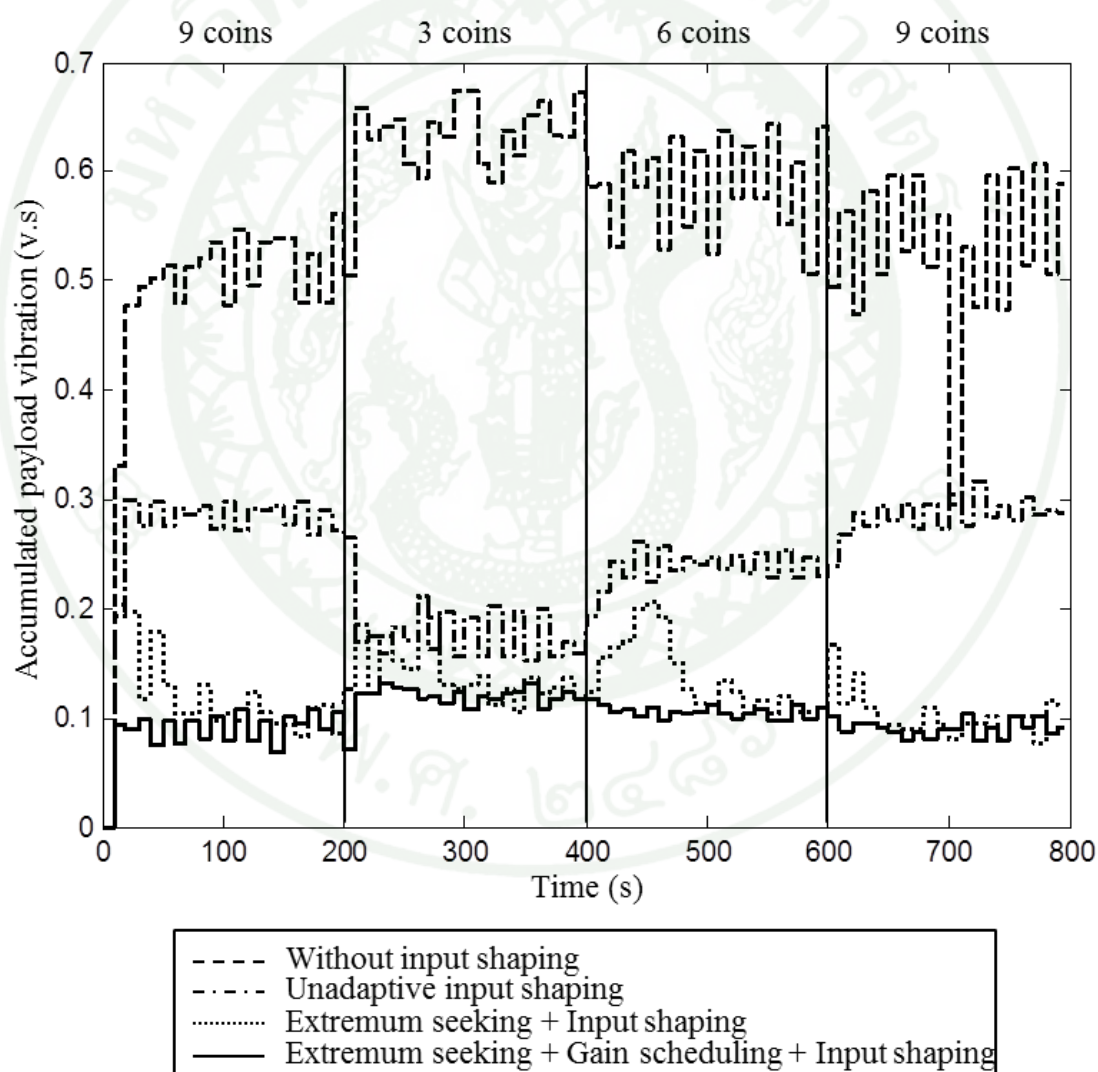
จากการทดลองแขนกลเชื่อมโยงยึดหุ่นได้ดังภาพที่ 17 โดยจะเคลื่อนที่ไปตามสัญญาณอ้างอิงคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (Square wave) ขนาด 20 องศา ในช่วงเวลา 30 วินาที โดยเราจะค่อยๆ เพิ่มจำนวนเหรียญเขาไปเริ่มจาก 0, 9, 3, 6 และ 9 เหรียญตามลำดับ เปรียบเทียบทั้งหมด 4 กรณี 1. ไม่ใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (Without input shaping) 2. ใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าเพียงอย่างเดียว (Unadaptive input shaping) 3. ใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้และการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking with input shaping) 4. ใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตราการขยายและการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking with gain scheduling and input shaping)

ภาพที่ 24 เป็นการเปรียบเทียบระบบที่ไม่ได้ใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (Without input shaping) กับระบบที่ใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตราการขยายและการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking with gain scheduling and input shaping) เพื่อให้เห็นความแตกต่างทั้งทางมุมของมอเตอร์ มุมของตัวบรทุกน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับตัวอ้างอิง มุมของตัวบรทุกน้ำหนักและสัญญาณไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ของทั้งสองวิธี



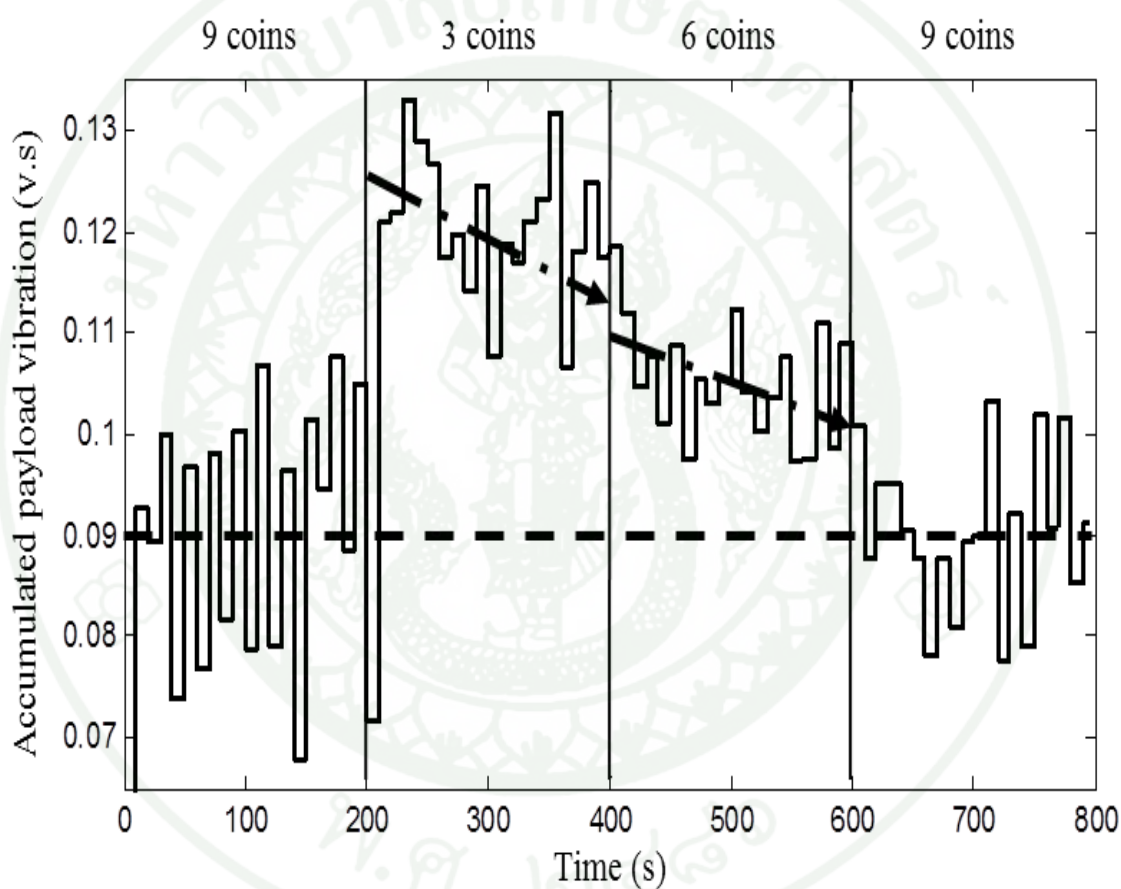
ภาพที่ 24 (1) แสดงถึงระบบที่ไม่ได้ใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (2) แสดงถึงระบบที่ใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตราการขยายและการแสวงหาค่าสุดขีด เปรียบเทียบมุมที่เปลี่ยนแปลงไปรวมถึงตัวควบคุมมอเตอร์ที่ทดลองกับแกนกลยึดหยุนได้

ภาพที่ 25 เป็นผลการทดลองในกรณีทั้ง 4 เปรียบเทียบการเลือกใช้ระบบควบคุมที่แตกต่างกันไป โดยเราจะวัดการสั่นที่เกิดขึ้นออกมาจากค่าของ \hat{d}_p ในกรณีของการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าไม่ประยุกต์ค่า (Unadaptive input shaping) เรากำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ขึ้นมาจากการทดลองซ้ำๆ ส่วนวิธีการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตราขยายและการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking with gain-scheduled and input shaping) และใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้และการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking with input shaping) ค่าระบบจำทำการหาค่าพารามิเตอร์ได้เอง



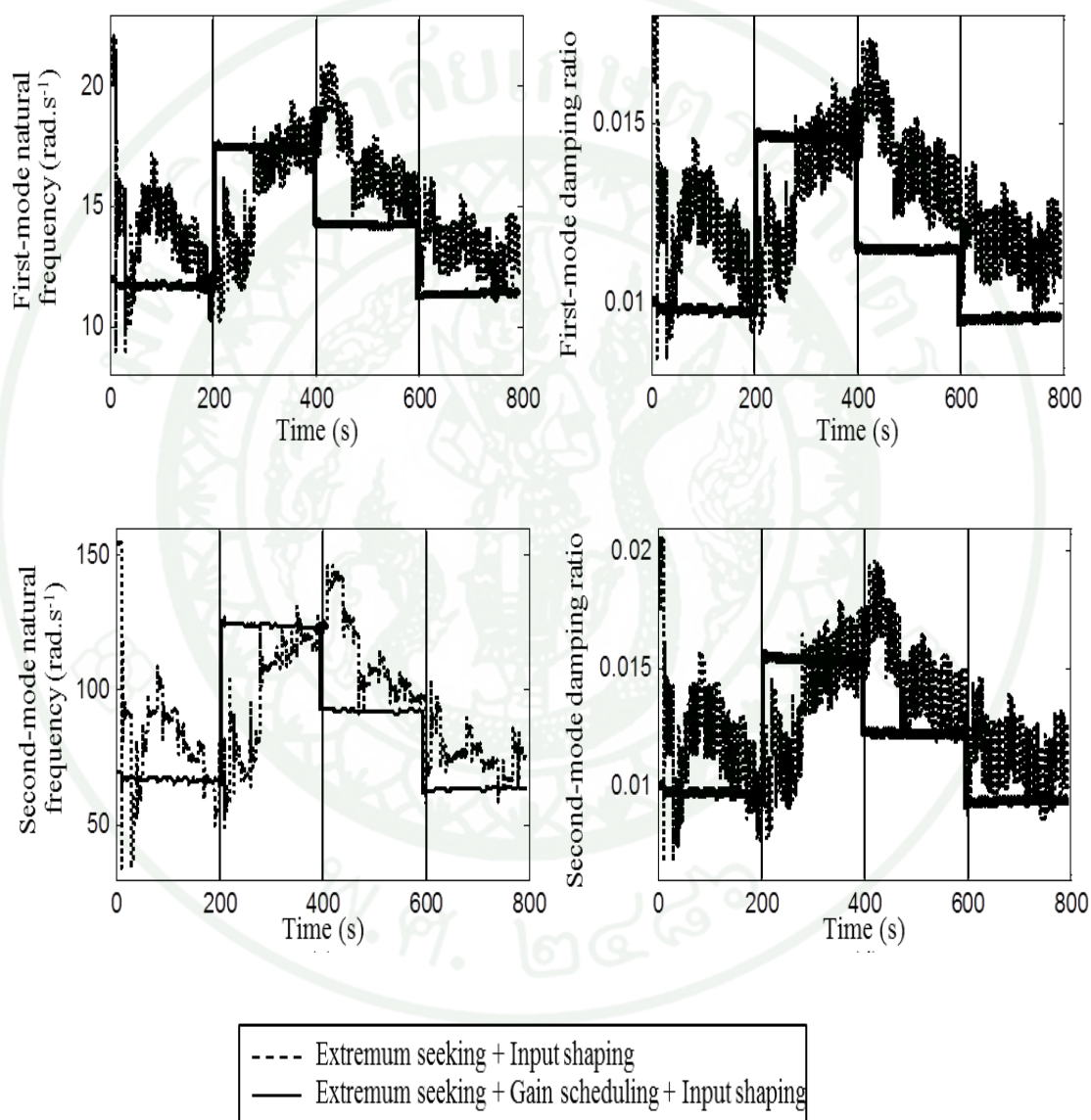
ภาพที่ 25 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบระบบควบคุมในกรณีต่างๆ

ภาพที่ 26 เราสนใจเฉพาะการสั่นที่เกิดขึ้นของแต่ละกรณีที่ใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตราขยายและการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking with gain-scheduled and input shaping) เราต้องมีการปรับตัวปรับอัตราขยาย (Gain-scheduler) ไปตามความเหมาะสมของกรณี โดยปรับไปพร้อมกับน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งค่าของอัตราขยาย (Gain-scheduled) ดังกล่าวเราได้ทำการทดลองที่ละกรณีแล้วเก็บค่าออกมาเพื่อกำหนดค่าอัตราการขยายเอาไว้ใช้ในขณะที่ยานกลทำงานภายใต้น้ำหนักแต่ละค่า



ภาพที่ 26 กราฟขยายของระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้และการแสวงหาค่าสุดขีด

ภาพที่ 27 เปรียบเทียบการออกแบบพารามิเตอร์ของระหว่างระบบควบคุมการปรับ - เปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้และการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking with input shaping) กับระบบปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตราขยายและการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking with gain-scheduled and input shaping)



ภาพที่ 27 กราฟเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติและอัตราส่วนการหน่วงของระบบควบคุมทั้งสองแบบ

วิจารณ์

จากภาพที่ 25 กรณีไม่ใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้า (Without input shaping) จะมีค่า \hat{d}_p อยู่ในช่วง 0.48 ถึง 0.68 v.s ช่วงที่การสั่นเกิดขึ้นมากที่สุดคือช่วงที่เราใส่ 3 เหยียด เนื่องจากเป็นช่วงที่แขนกลบรรทุกน้ำหนักน้อย ต่างจากช่วงที่เราใส่ 9 เหยียด กรณีที่มีน้ำหนักมากการสั่นจึงน้อยกว่า กรณีใช้การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าไม่ประยุกต์ค่า (Unadaptive input shaping) จะมีค่า \hat{d}_p อยู่ในช่วง 0.16 ถึง 0.3 v.s เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของระบบที่เรากำหนดมาจากการคำนวณในช่วงไม่ใช่เหยียด ทำให้ในช่วงที่เราใส่ 3 เหยียด ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักที่ใกล้เคียงกับไม่มีน้ำหนักที่สุด การสั่นจึงต่ำกว่าในช่วงอื่น กรณีการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้และการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking input shaping system) จะมีค่า \hat{d}_p อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.2 v.s ส่วนของการแสวงหาค่าสุดขีดจะหาค่าเหมาะสมที่สุดจะทำทันทีที่มีน้ำหนักเปลี่ยน แต่ต้องใช้เวลาในการหาค่าเนื่องจากไม่ทราบค่าเริ่มต้นในการหาที่แน่นอนทำให้เสียเวลาจากการหาค่า แต่ก็ถือว่าเกิดการสั่นน้อยเมื่อเทียบกับสองระบบแรก กรณีสุดท้ายการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตราขยายและการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking gain-scheduled input shaping system) จะมีค่า \hat{d}_p อยู่ในช่วง 0.07 ถึง 0.13 v.s เป็นกรณีที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีก่อนๆ เนื่องจากการปรับค่าอัตราขยายเมื่อน้ำหนักเปลี่ยนแปลงเหมือนเป็นการให้ค่าช่วงที่เหมาะสมเริ่มต้นกับระบบเข้าไปทำให้การแสวงหาค่าสุดขีดทำงานได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ค่าต่ำที่สุดของ \hat{d}_p มีค่าเท่ากับ 0.07 สามารถเรียกได้ว่ามีการสั่นเป็นศูนย์

ภาพที่ 26 เราขยายกราฟการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตราขยายและการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking with gain-scheduled and input shaping system) เพื่อทำการพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ จะเป็นได้ว่าเมื่อเรากำหนดอัตราขยาย (Gain-scheduled) การรับรู้ถึงสภาวะที่เปลี่ยนไปของน้ำหนักจะทำให้การแสวงหาค่าสุดขีดทำได้เร็วมากขึ้นซึ่งจะเป็นผลดีต่อการนำไปสร้างสัญญาณใหม่ นอกจากนั้นแล้วยังได้แสดงถึงแนวทางการสั่นที่ลดลงซึ่งเป็นไปตามที่เราคาดการณ์เอาไว้ตั้งแต่แรก

ภาพที่ 27 เมื่อเรานำกราฟของกรณีการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตราขยายและการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking with gain-scheduled and input shaping) มาขยายดูเพื่อเปรียบเทียบกับกราฟของการปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าแบบปรับตัวได้และการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking with input shaping) ก็จะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นกว่าระบบแบบที่ไม่มีการกำหนดอัตราขยาย (Gain-scheduled) กว่าที่ค่าของระบบจะเข้าสู่สภาวะการสั่นต่ำ

ต้องใช้เวลาในการปรับจูนนานจนบางครั้งสภาวะของแกนกลูกเปลี่ยนน้ำหนักไปแล้วระบบยังหาค่าจุดศูนย์กลางที่เหมาะสมได้ไม่ดีเพียงพอ จึงเป็นข้อดีของระบบที่มีการกำหนดอัตราขยาย (Gain-scheduled)



สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าไปไม่ประยุกต์ค่า (Unadaptive input shaping) ไม่สามารถที่จะปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนไปได้ ค่าพารามิเตอร์จึงถูกจำกัดเอาไว้ตามการคำนวณในครั้งแรกเท่านั้น ซึ่งทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานที่มีหลายสถานะหรือมีแรงมากระทำ ทำให้การควบคุมแบบนี้ไม่สามารถใช้กับงานที่ต้องการความต่อเนื่องและการเปลี่ยนแปลงค่าความถี่ธรรมชาติ การปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าไปแบบปรับตัวได้และการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking with input shaping) ก็สามารถใช้งานได้กับแขนกลที่ไม่ต้องการความแม่นยำสูง และไม่ได้มีการเปลี่ยนสถานะน้ำหนักบ่อยๆ เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งตัววัด แต่กับระบบปรับเปลี่ยนสัญญาณนำเข้าไปแบบปรับตัวได้ด้วยการกำหนดอัตราขยายและการแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking with gain-scheduled and input shaping) สามารถที่จะหาค่าพารามิเตอร์ใหม่ที่เกิดขึ้นจากผลของระบบที่เปลี่ยนไป และนำค่าพารามิเตอร์นั้นไปปรับปรุงสัญญาณนำเข้าไปเพื่อลดการสั่นได้ ประสิทธิภาพของแต่ละระบบได้แสดงดังกราฟเปรียบเทียบก่อนหน้านี้ ข้อได้เปรียบคือการทำงานที่ต่อเนื่อง แม่นยำ และประสิทธิภาพที่สูงกว่า ในกรณีที่ปรับใช้กับตัววัดชนิดอื่นยิ่งสะดวกเพียงแค่อัปเกรดการทำงานในส่วนของตัววัดเขาไปในระบบก็สามารถใช้งานได้ทันที การแสวงหาค่าสุดขีดจะเพิ่มขึ้นในลักษณะที่ระบบทำงานต่อเนื่อง หากต้องการที่จะหาเฉพาะส่วนหนึ่งส่วนใด อาจจะต้องกำหนดขอบเขตในช่วงเวลาการหาเพื่อให้ค่าสุดขีดในช่วงเวลาที่เรากำลังต้องการได้

ข้อเสนอแนะ

1. ตัวกำหนดอัตราขยาย (Gain-scheduler) ควรปรับใช้ร่วมกับเซ็นเซอร์ชนิดต่างๆ เช่น เซ็นเซอร์ตรวจจับน้ำหนักที่เปลี่ยนไป เพื่อบอกถึงสถานะที่เปลี่ยนไปของระบบได้โดยไม่ต้องคอยปรับจูนค่าอัตราขยาย
2. การแสวงหาค่าสุดขีด (Extremum-seeking) ควรออกแบบให้ทำงานได้ในหลายๆ โหมดการทำงาน แยกส่วนในการออกแบบและปรับแก้ไขเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานได้มากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Ariyur, K.B. and M. Krstic. 2003. **Real-Time Optimization by Extremum-Seeking Control**. 1st ed. Wiley Interscience. NJ.
- Bodson, M. 1998. An adaptive algorithm for the tuning of two input shaping methods. **Automatica**. 34(6): 771–776.
- Chang, P.H. and H.S. Park. 2005. Time-varying input shaping technique applied to vibration reduction of an industrial robot. **Control Engineering Practice** 13: 121-130.
- Chatlatanagulchai, W. and K. Saeheng. 2009a. Real-time reference position shaping to reduce vibration in slewing of a very-flexible-joint robot. **J. of Research in Engineering and Tech.** 6(1): 51–66.
- Chatlatanagulchai, W., T. Srivongsa and P.H. Meckl. 2009b. Reference input shaping to reduce move time of a very flexible one-link manipulator. **Kasetsart Journal**. 43(2): 411–421.
- Cole, M.O.T. and T. Wongratanaphisan. 2013. A direct method of adaptive FIR input shaping for motion control with zero residual vibration. **IEEE/ASME Trans. on Mechatronics**. 18(1): 316–327.
- Cutforth, C.F. and L.Y. Pao. 2004. Adaptive input shaping for maneuvering flexible structures. **Automatica**. 40: 685–693.
- Giovanni Mimmi, Paolo Pennacchi. 2001. Pre-shaping motion input for a rotating flexible link. **International Journal of Solids and Structures** 38: 2009-2023.
- Kapucu, S., Nihat Yildirim, Hakan Yavuz, Sedat Baysec. 2008. Suppression of Residual Vibraton of a Translating-Swinging Load by a Flexible Manipulator. **Mechtronic** 18: 121-128.

- Kozak, K., I. Ebert-Uphoff and W. Singhose. 2004. Locally linearized dynamic analysis of parallel manipulators and application of input shaping to reduce vibrations. **ASME J. of Mechanical Design**. 126: 156–168.
- Ljung, L. 1987. **System Identification Theory for the User**. 1st ed. Prentice Hall. NJ.
- Mark A. Lau, Lucy Y. Pao. 2003. Input Shaping and Time-optimal Control of Flexible Structures. **Automatica** 39: 893-900.
- Martinez, E., 2007. Extremum-Seeking control of redox processes in wastewater chemical treatment plants. **European Symposium on Computer Aided Process Engineering**.
- Modi, N., Tapan K. Saha. 2013. Application of Extremum-Seeking control to design power oscillation damping controller. **Electric Power System Research** 101: 49-55.
- Park, J., P.H. Chang, H.S. Park and E. Lee. 2006. Design of learning input shaping technique for residual vibration suppression in an industrial robot. **IEEE/ASME Trans. on Mechatronics**. 11(1): 55–65.
- Park, J.Y., Pyung-Hun Chang. 2004. Vibration Control of a Telescopic Handler Using Time Delay Control and Commandless Input Shaping Technique. **Control Engineering Practice**. 12: 769-780
- Pelaez, Gu., Pelaez, J.M. Perez, A. Vizan, E. Bautista. 2005. Input Shaping Reference Commands for Trajectory Following Cartesian Machines. **Control Engineering Practice** 13: 941-958
- Pereira, E., J.R. Trapero, I.M. Diaz and V. Feliu. 2012. Adaptive input shaping for single-link flexible manipulators using an algebraic identification. **Control Engineering Practice**. 20: 138–147.

- Rhim, S. and W.J. Book. 2001. Noise effect on adaptive command shaping methods for flexible manipulator control. **IEEE Trans. on Control Systems Tech.** 9(1): 84–92.
- Rhim, S. and W.J. Book. 2004. Adaptive time-delay command shaping filter for flexible manipulator control. **IEEE/ASME Trans. on Mechatronics.** 9(4): 619–626.
- Robert L. Well, John K. Schueller and Jiri Tlustý. 1990. Feedforward and Feedback Control of a Flexible Robotic Arm. **Control Systems Magazine, IEEE** 13: 9-15.
- Sadettin, K., G. Alici and S. Baysec. 2000. Residual swing vibration reduction Using a Hybrid Input Shaping Method. **Mechanism and Machine Theory** 36: 311-326.
- Singer, N.C. and W.C. Seering. 1990. Preshaping command inputs to reduce system vibration. **ASME J. of Dynamics System, Measurement and Control.** 112(1): 76–82.
- Singhose, W. 2009. Command Shaping for Flexible Systems: A Review of the First 50 Years. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing.** 10:153-168.
- Smith, O.J.M. 1957. Posicast control of damped oscillatory systems. **Proc. IRE.** 45: 1249–1255.
- Stergiopoulos, J. and A. Tzes. 2007. Adaptive input shaping for nonlinear systems: a case study. **ASME J. of Dynamics System, Measurement and Control.** 129: 219-223.
- Tzes, A. and S. Yurkovich. 1993. An adaptive input shaping control scheme for vibration suppression in slewing flexible structures. **IEEE Trans. on Control Systems Tech.** 1(2): 114–121.
- Vaughan, J., A. Yano and W. Singhose. 2008. Comparison of robust input shapers. **J. of Sound and Vibration.** 315(4-5): 797–815.

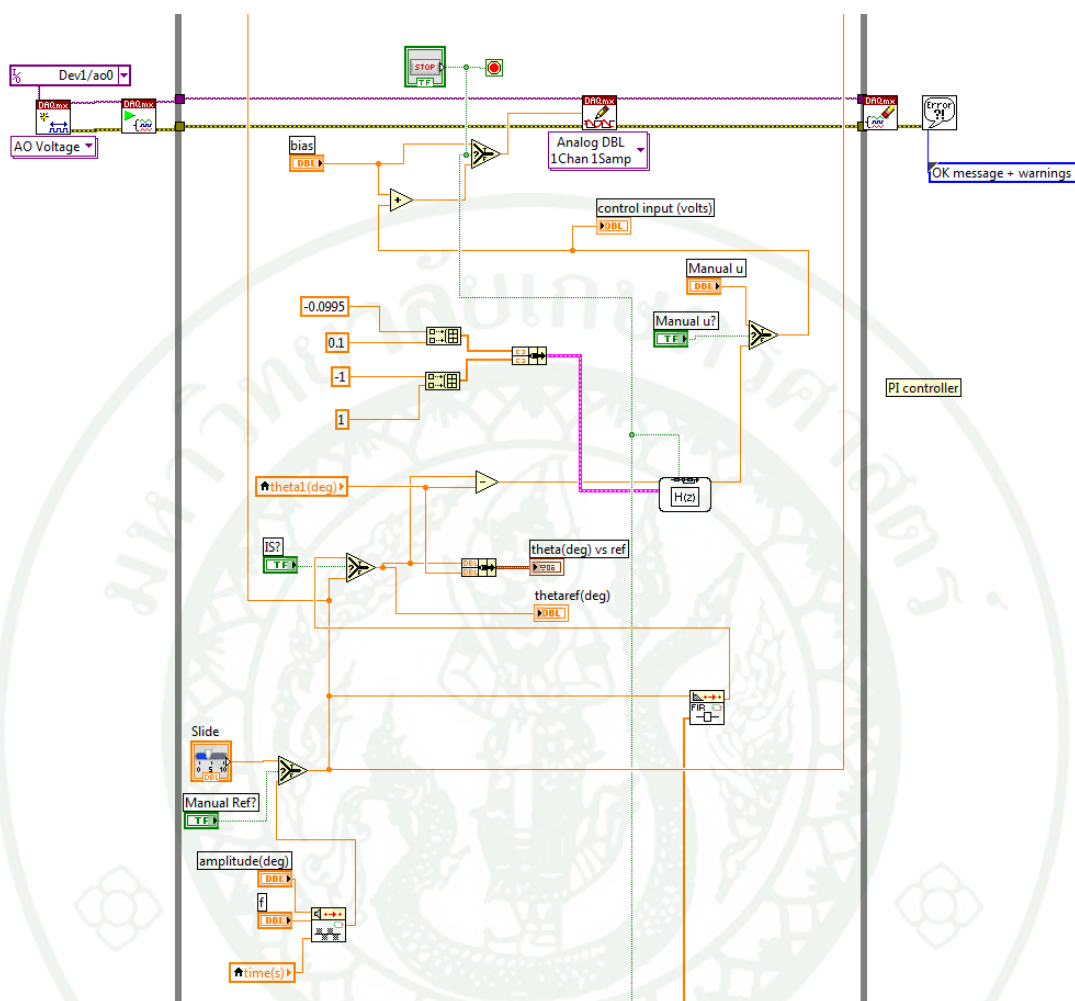
Zhang, C. and R. Ordonez. 2012. **Extremum-Seeking Control and Applications**. 1st ed.
Springer, London.



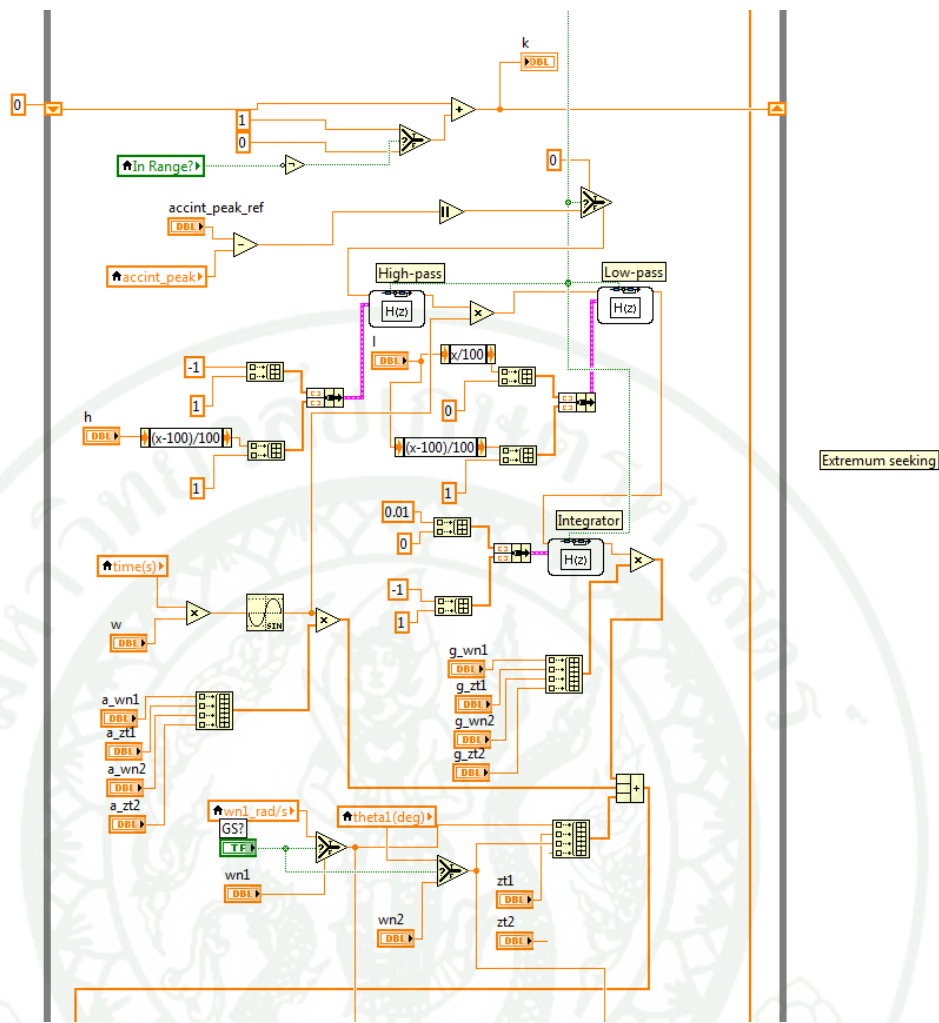


ภาคผนวก

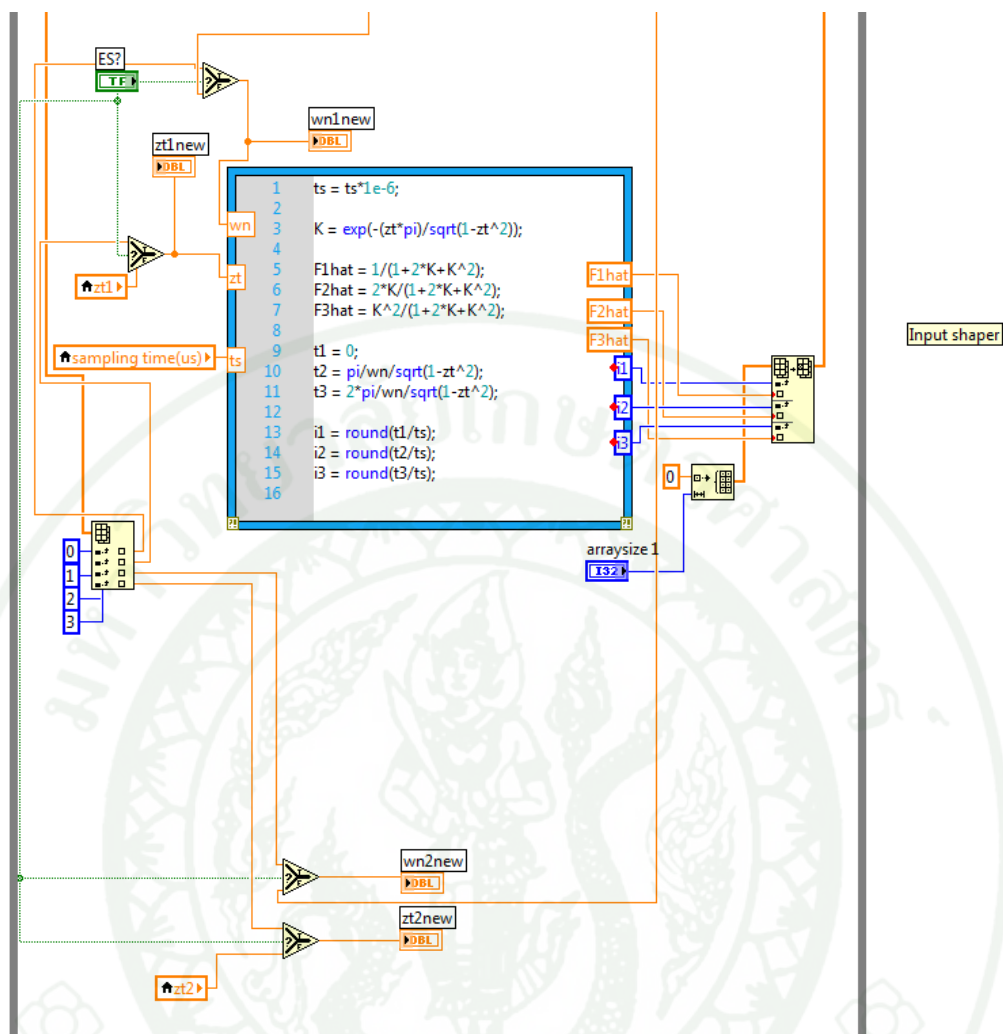
แผนภาพระบบควบคุมแกนกลเชื่อมโยงยืดหยุ่นได้



ภาพผนวกที่ 1 แผนภาพระบบควบคุมส่วน PI Controller ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LABVIEW



ภาพผนวกที่ 2 แผนภาพระบบควบคุมส่วน Extremum-seeking ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LABVIEW



ภาพผนวกที่ 3 แผนภาพระบบควบคุมส่วน Input shaping ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม
LABVIEW

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายสัจจา ตะเวทิงค์
เกิดวันที่	26 สิงหาคม 2528
สถานที่เกิด	อำเภอลาดพร้าว จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ.(วิศวกรรมศาสตร์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-

