



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์โดยใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปีง

Command Shaping Applied to Point to Point Motion of Hard Disk Actuator

นามผู้วิจัย นายนิติรงค์ พงษ์พานิช

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์วิฑิต ฉัตรรัตนกุลชัย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์คุณยุต เอี่ยมสอาด, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์โดยใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปีง

Command Shaping Applied to Point to Point Motion of Hard Disk Actuator

โดย

นายนิติรงค์ พงษ์พานิช

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2552

นิตินรงค์ พงษ์พานิช 2552: การควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์โดยใช้เทคนิค
คอมมานด์เชปปีง ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์วิทิต นัตถรัตนกุลชัย, Ph.D. 68 หน้า

หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (Actuator) จำเป็นต้องเคลื่อนจากแทร็คหนึ่ง ไปยังอีกแทร็คหนึ่งด้วยความแม่นยำและรวดเร็ว แต่หัวอ่านไม่สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วดังต้องการเนื่องจากเกิดการสั่นสะเทือนที่แทร็คเป้าหมาย (Residual Vibration) สาเหตุของการสั่นสะเทือนนี้ ส่วนหนึ่งเนื่องมาจากการที่ Reference Signals ได้แก่ความเร่ง ความเร็วและการขจัด มี Power Spectrum สูงในทุกย่านความถี่รวมทั้งที่ความถี่ธรรมชาติของหัวอ่านด้วย จึงเกิดการสั่นพ้อง (Resonance) เทคนิค Command Shaping เป็นเทคนิคที่ใช้การปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals ที่จะใส่เข้าไปในระบบเพื่อลดค่าพลังงานกระตุ้นในช่วงที่เกิดความถี่ธรรมชาติเพื่อลดการสั่นพ้อง ในบทความนี้เราใช้ฟังก์ชันพื้นฐานฟังก์ชัน Ramped Sinusoid ในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Reference Signals ผลจาก Simulation และจากการทดลองจริง เห็นได้ชัดว่าการสั่นสะเทือนของหัวอ่านจากการใช้ Command Shaping ลดลง ทำให้หัวอ่านสามารถเคลื่อนที่ได้รวดเร็วขึ้น

Nitirong Pongpanich 2009: Command Shaping Applied to Point to Point Motion of Hard Disk Actuator. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Mr. Withit Chatlatanagulchai, Ph.D. 68 pages.

Hard disk actuator is required to move from one track to another with high-level accuracy and with fast move time. However, the actuator cannot move as fast as it should because of the residual vibration at the target track. The cause of this vibration is partly from the fact that the reference signals, which are acceleration, velocity, and position, have high power spectrum energy over wide frequency range including over the actuator's natural frequency. This induces resonance. The command shaping technique re-constructs the reference signals such that its energy content is lower around the natural frequencies of the system to reduce the effect of resonance. In this paper, we use a ramped sinusoidal basis function to reconstruct the reference signals. From the simulation and experimental results, it is clear that the residual vibration of the actuator in the command shaping technique is significantly reduced, enabling the actuator to move faster.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ อาจารย์วิฑิต ถัตรรัตนกุลชัย ที่ได้ให้โอกาส ความรู้ ประสบการณ์ และคำแนะนำต่างๆในการทำงานวิจัยนี้ให้ประสบความสำเร็จไปด้วยอย่างดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ คุณยุต เอี่ยมสอาด ที่ได้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาอย่างใกล้ชิดและร่วมตรวจสอบวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ตลอดที่ข้าพเจ้าได้เรียนมา

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนคุณภาพงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาประจำปีงบประมาณ 2551 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำที่ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสัมผัสเทียม (CRV Lab) ซึ่งตั้งอยู่ที่สถาบันคั่นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIP)T มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และได้รับทุนการสนับสนุนบางส่วนจากสถาบันคั่นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIP)T มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณสำหรับ โอกาส กำลังใจ และข้อคิดดีๆ จาก ครอบครัว และเพื่อนๆ ทุกคน

นิติรงค์ พงษ์พานิช

มีนาคม 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	16
อุปกรณ์	16
วิธีการ	21
ผลและวิจารณ์	45
ผล	45
วิจารณ์	49
สรุปและข้อเสนอแนะ	50
สรุป	50
ข้อเสนอแนะ	50
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	52
ภาคผนวก	55
ภาคผนวก ก โปรแกรม Matlab สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ ในการทำ System Identification	56
ภาคผนวก ข โปรแกรม Matlab สำหรับการใช้ Fast Fourier Transform หาค่าความถี่ธรรมชาติในการทดลองจริง	58
ภาคผนวก ค โปรแกรม Matlab สำหรับเทคนิคคอมมานด์เซปป์ในการ การปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสัญญาณอ้างอิง (Reference Signals)	61
ภาคผนวก ง ผลจากการทดลองเปรียบเทียบการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปป์ กับไม่ใช้เทคนิคคอมมานด์เซปป์	66
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	68

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทำ System Identification	24
2	ตัวแปรที่ใช้สำหรับโครงสร้างคำสั่งแบบ Bang-Bang	39
3	ตัวแปรต่างๆ โดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไซนูซอย	42
4	ค่า Settling Time ของสัญญาณควบคุมทั้งสอง	49

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์	4
2 ส่วนประกอบของแขนของหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์	5
3 Block Diagram การควบคุมของแขนของหัวอ่าน	7
4 ฮาร์ดดิสก์รุ่น DiamondMax Plus 8 ATA/133	16
5 เอนโคเดอร์เซ็นเซอร์	17
6 เซนเซอร์วัดความเร็ว	18
7 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสดตรง	18
8 Power Supply	19
9 การ์ดรับส่งข้อมูล (Data Acquisition) NI PCI 6221 (CB68)	19
10 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง	20
11 Block Diagram การส่งผ่านข้อมูล	20
12 พลศาสตร์ของแขนหัวอ่าน	21
13 ด้านบนมุมในการเคลื่อนที่และด้านล่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ แขนหัวอ่าน	25
14 ความแม่นยำในการทำ System Identification	26
15 Bode Plot ของการทำ System Identification	26
16 กราฟ Fast Fourier Transform	29
17 Block diagram ของการควบคุมแบบ Feed-Forward และ Feedback	32
18 ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด	35
19 ตัวควบคุมเชิงสัดส่วน	35
20 การควบคุมแบบอินทิกรัล	36
21 การควบคุมแบบอนุพันธ์	37
22 ความเร็วที่ออกแบบของ Bang-Bang	39
23 ความเร็วที่ออกแบบของ Bang-Bang	40
24 ตำแหน่งที่ออกแบบของ Bang-Bang	40
25 FFT ของ Bang-Bang	41

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	ความเร่งที่ออกแบบโดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไชนูซอย	43
27	ความเร็วที่ออกแบบโดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไชนูซอย	43
28	ตำแหน่งที่ออกแบบโดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไชนูซอย	44
29	FFT โดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไชนูซอย	44
30	กระแสไฟฟ้าที่ใช้ของสัญญาณควบคุมทั้งสอง	46
31	การสันสะเทือนของสัญญาณควบคุมทั้งสอง	47
32	ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของระบบของสัญญาณควบคุมทั้งสอง	48

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

T	คือ	ค่าแรงบิดของมอเตอร์
c	คือ	ความหน่วงของระบบ
k	คือ	ค่าคงที่ของสปริง
J	คือ	ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์
θ	คือ	มุมของหัวอ่าน
$\dot{\theta}, \ddot{\theta}$	คือ	การอนุพันธ์ตำแหน่งเทียบกับเวลา
V	คือ	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์
I	คือ	กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในมอเตอร์
R_m	คือ	ความต้านทานในขดลวดของมอเตอร์
k_b	คือ	ค่า Back Emf ของมอเตอร์
k_d	คือ	Motor Drive Constant
k_m	คือ	Motor Torque Constant
k	คือ	ค่าคงที่ของสปริง
m	คือ	มวล
T_r	คือ	Bang-Bang Input ของระบบที่มีการเคลื่อนที่กับเวลา
T_f	คือ	Command Shaped Input ที่มีความสัมพันธ์กับเวลา
f_r	คือ	Bang-Bang Command Profile
f_{cs}	คือ	Command Shaped Profile
ω_i	คือ	ความถี่ธรรมชาติของระบบ
ρ	คือ	น้ำหนัก
τ_m	คือ	แรงบิดสูงสุด
N	คือ	จำนวนของความถี่ต่างๆ รอบบริเวณความถี่ธรรมชาติและ
F_{cs}^*	คือ	ฟูเรียรทรานฟอร์มของ Command Shaped Profile
$\Phi_k^*(t)$	คือ	ฟังก์ชันเริ่มไชนูซอย
B_k	คือ	สัมประสิทธิ์ของพื้นฐานฟังก์ชัน k^{th} และ
α_k	คือ	จำนวนลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับพื้นฐานฟังก์ชัน k^{th}

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\ddot{\alpha}_d, \dot{\alpha}_d, \alpha_d$	คือ	ค่าความเร่ง ความเร็ว และตำแหน่ง ของสัญญาณอ้างอิง ที่ออกแบบ ตามลำดับ
α	คือ	ตำแหน่งของแขนหัวอ่านที่เคลื่อนที่จริง
$\hat{P}^{-1}$	คือ	Inverse Dynamics
P	คือ	Plant
G	คือ	ตัวควบคุม
V, V_1, V_2	คือ	แรงดันไฟฟ้า

การควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์โดยใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปีง

Command Shaping Applied to Point to Point Motion of Hard Disk Actuator

คำนำ

ปัจจุบันนี้จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีต่างๆ ได้เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมากในการดำเนินชีวิตและการทำงานของมนุษย์ ซึ่งเทคโนโลยีที่เข้ามามีบทบาทมากที่สุดก็คงจะหนีไม่พ้นคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการทำงานในหลายๆ อาชีพ ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในการจัดพิมพ์เอกสารต่างๆ ใช้ในการหาข้อมูลและเก็บรักษาข้อมูลต่างๆ และสำหรับในทางอุตสาหกรรมนั้นก็ยังใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ให้สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ

ฮาร์ดดิสก์ (Hard disk) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีหน้าที่ในการเก็บข้อมูลหลังจากการทำงาน ไฟล์ต่างๆ ก็จะถูกบันทึกไว้ในฮาร์ดดิสก์ ถ้าหากฮาร์ดดิสก์มีความจุมากก็ยังสามารถบันทึกข้อมูลลงได้มากๆ อีกทั้งยังเป็นพื้นที่สำหรับติดตั้งระบบปฏิบัติการเพื่อให้สามารถเรียกใช้โปรแกรมต่างๆ บนเครื่องคอมพิวเตอร์ และเป็นแหล่งเก็บข้อมูลสำรองของคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่เก็บบันทึกข้อมูลไว้ได้อย่างถาวร แม้ในสถานะที่ไม่มีการจ่ายกระแสไฟฟ้า ข้อมูลสำคัญจะไม่สูญหายไปแม้เวลาปิดเครื่องไปแล้วก็ตาม เมื่อเปิดเครื่องขึ้นมาใหม่ก็สามารถดึงข้อมูลที่อยู่ในฮาร์ดดิสก์มาใช้ได้ต่อไป

แขนของหัวอ่าน (Actuator Arm) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์และเป็นกลไกขับเคลื่อนหัวอ่าน ซึ่งจะทำหน้าที่เคลื่อนหัวอ่านโดยอ้างอิงข้อมูลกับตำแหน่งบนจานแม่เหล็ก จากแทร็คหนึ่งไปยังอีกแทร็คหนึ่ง ซึ่งการเคลื่อนที่ของหัวอ่านนี้จะต้องอาศัยความแม่นยำและรวดเร็วเป็นอย่างมาก โดยการเคลื่อนที่นี้เกิดขึ้นมาจากคำสั่งของตัวควบคุม

โครงสร้างของชิ้นส่วนต่างๆ ของระบบที่มีการเคลื่อนที่นั้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ไปได้ในจุดหนึ่งจะเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นในตัวเอง ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความถี่ธรรมชาติของชิ้นส่วนนั้นๆ ซึ่งค่าความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นนั้นจะไม่ใช่ผลดีต่อชิ้นส่วนต่างๆ ได้ เพราะอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้การเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนนั้นมีความคลาดเคลื่อน ขาดความแม่นยำ ซึ่งไม่เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ต้องการ

ความแม่นยำในการเคลื่อนที่สูง และในบางครั้งค่าความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นนั้น ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ชิ้นส่วนนั้นเกิดความเสียหาย

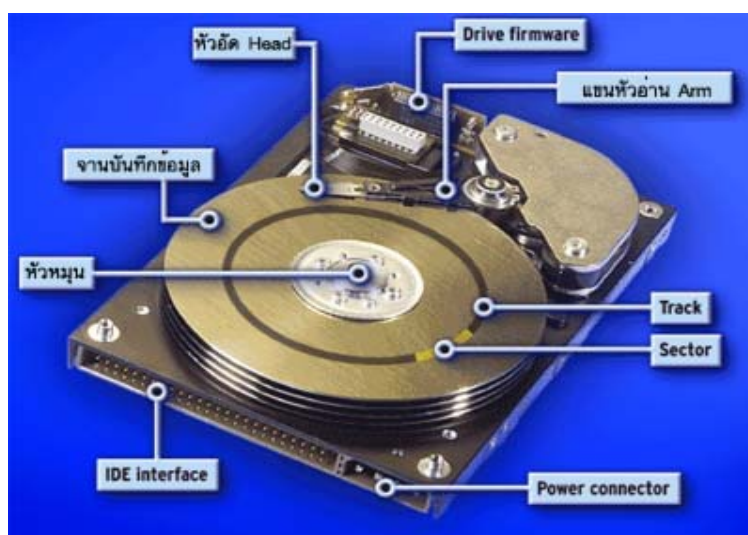
เทคนิคคอมมานด์เชปปีงนั้น เป็นเทคนิคที่ใช้ในการลดค่าพลังงานที่กระตุ้นให้มีค่าที่ลดลงเมื่อเข้าใกล้กับค่าความถี่ธรรมชาติที่ให้ความถี่ที่เกิดขึ้นในช่วงนั้นมีค่าที่ต่ำลง ซึ่งเป็นผลที่ทำให้การเคลื่อนที่ของชิ้นมีความแม่นยำมากขึ้น และลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนนั้น ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้กับแขนของหัวอ่าน ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่ต้องการความแม่นยำในการเคลื่อนที่สูงซึ่งทำหัวการอ่านและเขียนข้อมูลมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

วัตถุประสงค์

ปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสัญญาณอ้างอิง ได้แก่ ความเร่ง ความเร็ว และตำแหน่ง เพื่อลดการสั่นสะเทือนของแขนหัวอ่านซึ่งมีผลมาจากค่าความถี่ธรรมชาติของระบบ โดยใช้เทคนิคคอมมานด์เชปปีง โดยใช้ฟังก์ชันพื้นฐานของฟังก์ชันเร็มไซนุซอย มาลดค่าความถี่ของพลังงานกระตุ้นให้มีค่าน้อยลง

การตรวจเอกสาร

ฮาร์ดดิสก์เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในเครื่องคอมพิวเตอร์ มีหน้าที่ในการเก็บข้อมูลอย่างถาวรหลังจากการทำงาน ไฟล์ต่างๆ ที่ทำก็จะถูกบันทึกลงไปบนฮาร์ดดิสก์ อีกทั้งยังเป็นพื้นที่สำหรับติดตั้งระบบปฏิบัติการเพื่อที่จะสามารถเรียกโปรแกรมต่างๆ บนเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ นอกจากนั้นพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์บางส่วนยังถูกนำมาจำลองเป็นแรมเสมือน หรือ Virtual memory อีกด้วย ซึ่งจะช่วยในการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ให้ทำงานได้อย่างเร็วขึ้น



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์

บทบาทและความสำคัญของฮาร์ดดิสก์

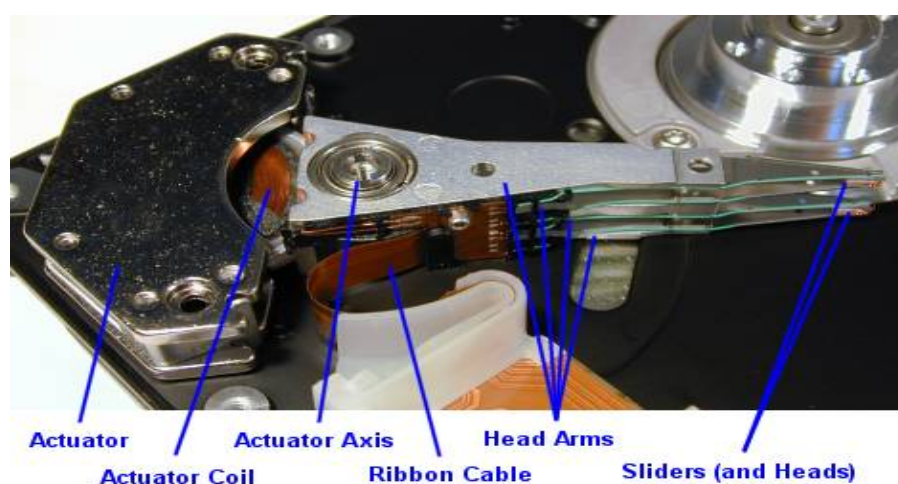
ฮาร์ดดิสก์ เป็นอุปกรณ์ที่เป็นศูนย์กลางของการจัดเก็บข้อมูลที่อุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลประเภทอื่นเทียบไม่ได้ ปัจจุบันฮาร์ดดิสก์จึงมีบทบาทต่อเครื่องคอมพิวเตอร์ในแง่มุมต่างๆ ต่อไปนี้

1. ความจุ เมื่อมีความต้องการติดตั้งโปรแกรม หรือจัดเก็บไฟล์เอกสาร เพราะฉะนั้นความจุของฮาร์ดดิสก์จึงเป็นตัวกำหนดว่าระบบมีความจุมากน้อยเพียงใด

2. ประสิทธิภาพของระบบ ความเร็วของฮาร์ดดิสก์มีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบไม่น้อยไปกว่า CPU หรือ RAM เพราะนอกจากฮาร์ดดิสก์จะเป็นอุปกรณ์หลักสำหรับการจัดเก็บข้อมูลแล้วระบบปฏิบัติการใหม่ๆ ก็มักจะนำเนื้อที่ของฮาร์ดดิสก์มาใช้เป็นหน่วยความจำของระบบอีกด้วย โดยหน่วยความจำนี้เกิดจากการนำ RAM มาใช้ร่วมกับพื้นที่บนฮาร์ดดิสก์ซึ่งเรียกว่า หน่วยความจำเสมือน (Virtual memory) เมื่อต้องการใช้หน่วยความจำมากกว่าปริมาณ RAM ที่มีอยู่ ข้อมูลบางส่วนใน RAM จะย้ายไปพักที่ฮาร์ดดิสก์

3. ความน่าเชื่อถือของระบบ สิ่งที่มีค่าที่สุดสำหรับระบบคอมพิวเตอร์หนึ่งๆ ไม่ใช่ฮาร์ดแวร์หรืออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ราคาแพง แต่คือ ข้อมูลต่างๆ ที่สร้างขึ้นมา ดังนั้นฮาร์ดดิสก์จึงเป็นอุปกรณ์ที่มีส่วนสำคัญอย่างมาก และใช้เป็นเครื่องตัดสินใจได้ว่าระบบใดจะมีความน่าเชื่อถือมากกว่ากัน

แขนของหัวอ่าน (Actuator Arm) ทำงานร่วมกับ Stepping Motor ในการหมุนแขนของหัวอ่านไปยังตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการอ่านเขียนข้อมูล โดยมีคอนโทรลเลอร์ (Controller) ทำหน้าที่แปลคำสั่งที่มาจากคอมพิวเตอร์ จากนั้นก็เลื่อนหัวอ่านไปยังตำแหน่งที่ต้องการ เพื่ออ่านหรือเขียนข้อมูล แต่ต่อมา Stepping Motor ได้ถูกแทนด้วย Voice Coil Motor ที่สามารถทำงานได้เร็วและแม่นยำกว่า Stepping Motor



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบของแขนของหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์

การอ่านและการเขียนข้อมูลของหัวอ่านจะทำได้โดยกลไกขับเคลื่อนหัวอ่าน ซึ่งจะทำหน้าที่เลื่อนหัวอ่านโดยอ้างอิงข้อมูลกับตำแหน่งบนจานแม่เหล็ก จากแทร็คหนึ่งไปยังอีกแทร็คหนึ่ง ซึ่งการเคลื่อนที่หัวอ่านนี้จะต้องอาศัยความแม่นยำและรวดเร็วเป็นอย่างมาก กลไกขับเคลื่อนหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ก็อาศัยหลักการทำงาน คือ เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้หัวอ่านสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่มีข้อมูล ซึ่งระยะทางที่หัวอ่านเคลื่อนที่จะทำได้ใกล้เคียงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป

คุณลักษณะที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการหาตำแหน่ง

การหาตำแหน่ง (Positioning) หมายถึง ความพยายามของฮาร์ดดิสก์ในการนำหัวอ่านหรือเขียนไปอยู่ ณ ตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่ออ่านหรือเขียนข้อมูลกับ Sector ที่ต้องการให้ได้ คุณลักษณะของฮาร์ดดิสก์ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพในการหาตำแหน่งมีดังต่อไปนี้

1. ระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าถึงข้อมูล (Access Time)

คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าถึงข้อมูลไม่ว่าเวลาที่ทำการเขียนหรืออ่านข้อมูลของหัวอ่าน เป็นเวลาที่ฮาร์ดดิสก์ใช้ในการอ่านข้อมูลที่ต้องการ มีหน่วยเป็นมิลลิวินาที (Millisecond: ms) หรือหนึ่งในพันวินาที ในการพิจารณาระยะเวลาในการเข้าถึงข้อมูล จะประกอบด้วยคุณลักษณะที่เกี่ยวข้อง คือ

1.1 Seek Time คือ ช่วงเวลาที่แอดทิวเอเตอร์ใช้ในการเคลื่อนหัวอ่านหรือเขียน การเคลื่อนหัวอ่าน/เขียนเป็นกระบวนการเชิงกล ซึ่งโดยทั่วไปใช้เวลาในระดับมิลลิวินาที หรือเศษหนึ่งส่วนพันของวินาที

1.2 Settle Time หรือ Setting Time คือ ช่วงเวลาที่ฮาร์ดดิสก์รอให้หัวอ่าน/เขียนอยู่ในภาวะเสถียร ซึ่งพร้อมต่อการอ่านหรือเขียนข้อมูล ฮาร์ดดิสก์ทั่วไปจะมี Settle Time น้อยกว่า 0.1 มิลลิวินาที

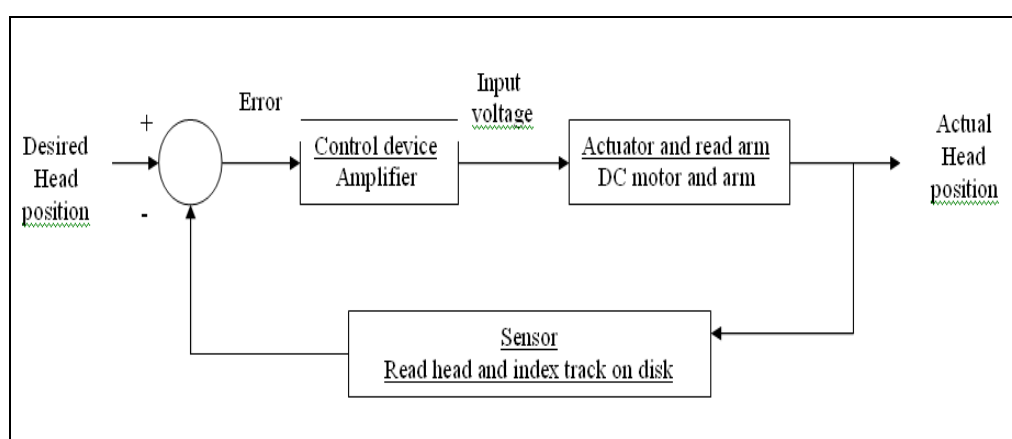
1.3 Command Overhead Time คือ ช่วงเวลานับจากมีการส่งคำสั่งไปยังฮาร์ดดิสก์ จนกระทั่งฮาร์ดดิสก์เริ่มปฏิบัติงานตามคำสั่งนั้น ซึ่งเป็นตัวเลขที่บอกให้รู้ว่าฮาร์ดดิสก์สามารถตอบสนองได้รวดเร็วมากน้อยเพียงใด โดยปกติแล้ว Command Overhead Time จะมีค่าประมาณ 0.5 มิลลิวินาที

1.4 Latency Time คือ ช่วงเวลาที่สูญเสียไปกับการรอคอยให้ Sector หมุนเข้ามาหาหัวอ่าน หรือเขียน ค่า Latency ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วในการหมุนเพลตเตอร์ หรือที่นิยมเรียกกันว่า ความเร็วรอบของฮาร์ดดิสก์

2. รอบความเร็วของฮาร์ดดิสก์ (Revolution)

ความเร็วรอบแกนหมุนจานแม่เหล็กของฮาร์ดดิสก์มีหน่วยวัดเป็นรอบต่อนาที เนื่องจากแกนหมุนจะทำให้หน้าที่ยกของจานแม่เหล็กอยู่ตลอดเวลา ถ้าฮาร์ดดิสก์โดยส่วนใหญ่ที่ใช้กันในปัจจุบันจะมีความเร็วรอบตั้งแต่ 5,400-15,000 RPM

การพัฒนาระบบการเคลื่อนที่ของฮาร์ดดิสก์นั้น คือ ตำแหน่งของหัวอ่านเมื่อมีการเคลื่อนที่จะมีความถูกต้อง แม่นยำ โดยให้แขนของหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการ และเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งภายใน 10 ms สำหรับการควบคุมให้แขนของหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์เคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำนั้น จะต้องรู้ค่าตัวแปรต่างๆ ของแขนของหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ เช่น มวล ค่าความแข็งของสปริง เป็นต้น และในการเคลื่อนที่อาจเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นมาได้นั้น จึงจำเป็นต้องนำเซนเซอร์ (Sensor) มาใช้ในการลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นให้มีความแม่นยำมากขึ้น แล้วที่ขาดไม่ได้ คือ อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในการควบคุม (Control device) ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่ทำให้แขนของหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์เคลื่อนที่ไปตามที่ต้องการ



ภาพที่ 3 Block Diagram การควบคุมของแขนของหัวอ่าน

มนตรี (2548) กล่าวว่า อุปกรณ์ ชิ้นส่วนทางกลที่มีสภาพต้านทานการเคลื่อนที่และสภาพยืดหยุ่นได้ ระบบนั้นจะสามารถสั่นสะเทือนได้เสมอ ถ้าระบบทางกลนั้นถูกกระตุ้นให้สั่นด้วยความถี่ค่าหนึ่ง หรืออาจทำให้สั่นด้วยแรงภายนอกโดยตรง แล้วทำให้ระบบทางกลมีการสั่นหรือเคลื่อนที่แบบซ้ำลักษณะเดียวกันอย่างสม่ำเสมอในคาบที่พิจารณาเดียวกัน จะเรียกการสั่นสะเทือนเชิงกล

การสั่นสะเทือนเชิงกลสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 แบบ ได้แก่

1. การสั่นสะเทือนอย่างอิสระ (free vibration)
2. การสั่นสะเทือนแบบบังคับ (forced vibration)

การสั่นสะเทือนแบบอิสระจะเกิดขึ้นเมื่อระบบทางกลนั้น ถูกกระตุ้นให้สั่นอย่างต่อเนื่องด้วยความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) ค่าหนึ่งหรือหลายค่า โดยไม่ต้องอาศัยแรงกระตุ้นจากภายนอกอย่างต่อเนื่อง สมบัติทางกลก็จะนำไปสู่การสั่นสะเทือน

การสั่นสะเทือนแบบบังคับจะเกิดขึ้นภายใต้การกระตุ้นระบบทางกลด้วยแรงภายนอกอย่างต่อเนื่อง ระบบจะสั่นด้วยความถี่ค่าเดียวกับความถี่ของแรงภายนอกที่มากระตุ้นนั้น หรือผลการจากหมุนที่เสียดสมมูลของชิ้นส่วนที่ประกอบอยู่ในชิ้นส่วนทางกล โดยจะเป็นการกระตุ้นในรูปแบบของฮาร์มอนิก ผลตอบสนองของระบบที่มีต่อการกระตุ้นอย่างต่อเนื่องของแรง คือ แอมพลิจูดของการสั่นของระบบขึ้นอยู่กับความถี่ภายนอกที่กระทำต่อระบบ ถ้าความถี่ภายนอกที่กระทำต่อระบบมีค่าที่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบทางกลนั้น สถานะการสั่นที่เกิดขึ้นเรียกว่า การสั่นพ้อง (resonance) ซึ่งทำให้เกิดการสั่นอย่างรุนแรงและอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบทางกลนั้นได้ การสั่นพ้องนี้สามารถเกิดขึ้นได้ไม่ว่าระบบนั้น จะมีการหน่วงหรือไม่ก็ตาม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความถี่ (frequency ratio) ของระบบ ในที่นี้อัตราส่วนความถี่คืออัตราส่วนของความถี่ของแรงภายนอกต่อความถี่ของธรรมชาติของระบบที่ถูกกระตุ้น ซึ่งจะพบว่าแอมพลิจูดการสั่นจะเปลี่ยนแปลงกับค่าอัตราส่วนความถี่ ดังนั้น ในระบบทางกลหนึ่งๆ จึงจำเป็นต้องคำนวณหาความถี่ธรรมชาติให้ได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นในการวิเคราะห์และแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในช่วงของความถี่ธรรมชาติ เพื่อลดความเสียหายของระบบ

การตรวจเอกสารเกี่ยวกับ เทคนิค Command Shaping

Meckl (1988) ได้กล่าวว่า เทคโนโลยีทางด้านหุ่นยนต์ และการควบคุมเครื่องจักรด้วยการใช้ คอมพิวเตอร์ ได้เข้ามามีบทบาทอย่างมากในการควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติโดยระบบต่างๆ ที่มีการเคลื่อนที่ เมื่อเคลื่อนที่สามารถที่จะกระตุ้นให้เกิดความถี่ธรรมชาติขึ้นซึ่งเป็นผลที่จะทำให้เกิด การสั่นสะเทือน ดังนั้นจึงได้นำวิธีการ Shape Force Profile เพื่อลดค่าพลังงานที่จะไปกระตุ้นที่ ความถี่ธรรมชาติเพื่อให้ระบบเกิดการสั่นที่น้อยลง และทำให้ระบบมีความเร็วขึ้นโดยใช้ Ramped Sinusoid ในการควบคุมที่ไม่ควบคุมความเร็วให้มีค่าที่คงที่ และ Versine Profile ในกรณีที่ทำให้มีการ เคลื่อนที่ของระบบที่ค่าความเร็วคงที่ เป็นโครงสร้างที่ใช้ควบคุมโดยการออกแบบระบบควบคุม เป็นแบบ Close Loop Control เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง และลดความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยยังได้ออกแบบการทดลองระหว่างระบบที่มี Damped กับระบบที่ไม่มี Damped หรือมีค่าที่น้อยๆ มาเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองนั้นสามารถลดค่าการสั่นสะเทือนของระบบได้

Chatlatanagulchai (2006) ได้ทำการศึกษาเทคนิค Command shaping เพื่อลดค่าพลังงาน กระตุ้นในช่วงที่เกิดความถี่ธรรมชาติของระบบ โดยนำไปทำการทดลองกับ Flexible Robot โดยใช้ Bang-Bang ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ยังไม่ได้ทำการ Shape Command มาเปรียบเทียบกับ Ramp Sinusoidal และ Segmented Versine ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทำการ Shape Command แล้ว จากการทดลองโครงสร้าง ที่ได้ปรับเปลี่ยนโครงสร้างสามารถที่จะลดค่าพลังงานในช่วงของความถี่ธรรมชาติได้ และทำให้ระบบ มีความแม่นยำมากขึ้น

Gul (2003) ได้ศึกษาการลดค่าความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นของเครื่อง Wire Bonder โดยใช้ เทคนิค Command Shaping มาใช้ในการลดค่าพลังงานกระตุ้นในช่วงของความถี่ธรรมชาติของระบบ โดยใช้วิธีการทาง Ramp Sinusoidal มาเป็นโครงสร้างที่ใช้ในการควบคุมโดยมีการควบคุมทั้งแบบ Open Loop และ Close Loop เพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองการทั้งสองทั้ง 2 แบบ สามารถลดค่าพลังงานกระตุ้นได้แต่การควบคุมแบบ Close Loop ซึ่งได้ใช้ Feed forward Signal ร่วมกับ Feedback Control Controller สามารถลดค่าพลังงานกระตุ้นและเคลื่อนที่ได้มี ประสิทธิภาพที่ดีกว่า

Ho (1997) ได้กล่าวว่า การสั่นพ้องเกิดขึ้นกับระบบการเคลื่อนที่ทางกล สำหรับการเคลื่อนที่ของ Disk Drive การเคลื่อนที่ของแขนของหัวอ่านก็เป็นบ่อเกิดที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องขึ้นได้ซึ่งไม่เป็นผลที่ดีต่อระบบเพราะแขนของหัวอ่านจะต้องเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งอย่างรวดเร็วซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญเพราะมีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงาน สำหรับการเคลื่อนที่ของแขนของหัวอ่านนั้นใช้ Servo และใช้การทำงานแบบ Close Loop ในการควบคุมให้เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งในเวลาที่เร็วและต้องมีการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างแม่นยำโดยใช้ Bang-Bang Profile ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มี Time-Optimal Control แต่จะต้องทำการปรับแต่งโครงสร้างมีความราบเรียบขึ้นเป็นผลให้ระบบสามารถหลีกเลี่ยงการกระตุ้นที่จะทำให้เกิดการสั่นพ้องทำให้ระบบเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้น

Takaishi (1999) ได้ทำการออกแบบควบคุมแขนของหัวอ่านโดยทำการออกแบบ Finite Impulse Response (FIR) filter ในช่วงของความถี่ที่จะทำให้เกิดการสั่นพ้องและจากการทดลองเมื่อแขนของหัวอ่านเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด จะสามารถลดพลังงานในช่วงของความถี่ที่จะเกิดการสั่นพ้อง

Reynolds (2004) ได้กล่าวถึงประโยชน์ของการพัฒนาการออกแบบควบคุมให้ระบบเคลื่อนที่ไปอย่างที่ต้องการโดยนำเทคนิค Command Shaping มาใช้นั้น มีอยู่หลายประการ ดังนี้

1. ทุกๆ ระบบที่ควบคุมจะมีช่วงเวลาที่สามารถทำงานได้เป็นเวลาที่รวดเร็วอยู่ในตัว แต่ในตัวควบคุมส่วนมากจะทำหน้าที่ในการทำให้ระบบสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ ตามที่ได้ออกแบบโดยจะไม่ได้ทำให้ระบบมีช่วงเวลาในการทำงานที่เร็วขึ้น ดังนั้นเทคนิคที่ใช้ในการทำให้ระบบส่วนมากสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างที่ต้องการนั้น คือ เทคนิคที่ทำงานแบบย้อนกลับโดยสิ่งที่ต้องการจะเกิดขึ้นด้วยการจัดการกับสิ่งที่ได้ใส่เข้าไป คือ ถ้าป้อนค่าที่สามารถทำให้ระบบสามารถทำงานได้ดีและรวดเร็ว ผลที่ได้ก็จะดี โดยที่ตัวควบคุมทำหน้าที่เพียงสั่งให้ระบบทำงานอย่างที่ต้องการ

2. ประโยชน์ของการใช้เทคนิค Command Shaping คือ ระบบสามารถเคลื่อนที่ไปอย่างที่ต้องการและการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ในค่าที่ไม่สูง จนสามารถที่จะทำให้ผลที่ที่ต้องการอยู่ในค่าที่สามารถยอมรับได้ มีความคลาดเคลื่อนที่น้อย

3. ประโยชน์ของการใช้เทคนิค Command Shaping สำหรับควบคุมวิถีทางที่จะให้ระบบเคลื่อนที่นั้น คือ Robustness เทคนิค ซึ่งใช้ในงานที่ต้องการควบคุมให้ระบบเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งให้มีความถูกต้องมากขึ้น และสามารถนำมาประยุกต์ใช้เกี่ยวกับปัญหาของการที่สั่งให้ระบบเคลื่อนที่ไปอย่างที่ต้องการ

Mohamed and Tokhi (2004) ได้ทำการตรวจสอบและวิเคราะห์เพื่อการพัฒนาวิธีการควบคุมแบบ Feed-Forward สำหรับการควบคุมการสั่นสะเทือนของแขนกลแบบยืดหยุ่นโดยใช้เทคนิค Command Shaping ซึ่งเป็นเทคนิคที่อยู่บนพื้นฐานของการปรับแต่งสิ่งที่ป้อนค่าเข้าไปในระบบเพื่อควบคุมการทำงาน โดยรูปแบบทางพลวัตของระบบนั้นจะได้มาจากวิธีการทาง Finite Elements สำหรับค่าตัวแปรต่างๆ ของระบบนั้น ซึ่งใช้สำหรับการออกแบบและประเมินค่าการควบคุมนั้นได้มาจาก Bang-Bang ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ยังไม่ได้มีการปรับแต่งรูปร่างใส่เข้าไปในระบบทำให้เกิดแรงบิดขึ้นทำให้ระบบเกิดการเคลื่อนที่ ตัวควบคุมแบบ Feed-Forward เป็นการออกแบบที่อยู่บนรากฐานของค่าความถี่ธรรมชาติและตัวหน่วงของระบบ โดยผลของการ Simulation ของผลตอบสนองของการควบคุมที่ได้ปรับเปลี่ยน และกรองสิ่งที่ใส่เข้าไปในระบบจะอยู่ในช่วงของเวลาและความถี่ และจากผลการศึกษาในการควบคุมแขนกล โดยใช้เทคนิคการออกแบบการเปลี่ยนแปลงและการสร้างตัวกรองให้แก่ระบบ ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าเทคนิค Command Shaping สามารถทำให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในการลดการสั่นสะเทือนของระบบ

Takaishi and Saito (2003) ได้ออกแบบควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนของหัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ที่จะต้องสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งในการควบคุมนี้ใช้การควบคุมแบบ Feedback Control และ Feed-Forward Control โดยใช้ Feed-Forward Control ควบคุมกับพลังงานของแขนของหัวอ่านในช่วงความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นพ้อง โดย Feed-Forward Control จะถูกออกแบบด้วย FIR-Notch Filter การควบคุมแบบ Feed-Forward Control นั้น เป็นการควบคุมเกี่ยวกับตำแหน่งและกระแสไฟฟ้า จากการควบคุมแบบ Feed-Forward Control ที่ถูกออกแบบโดยใช้ FIR-Notch Filters สามารถที่จะควบคุมให้ระบบเคลื่อนที่ในระยะเวลาที่รวดเร็ว และสามารถลดการสั่นสะเทือนของระบบซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้แขนของหัวอ่านเกิดการสั่นพ้อง

Mimmi (2001) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการ Pre-Shaping การเคลื่อนที่ก่อนที่จะใส่เข้าไปในระบบเพื่อควบคุมการทำงาน โดยได้ทำการทดลองกับแขนกลแบบยืดหยุ่นได้ โดยใช้เทคนิค Command Shaping ซึ่งก่อนที่จะ Pre-Shaping นั้น จำเป็นที่จะต้องรู้ค่าความถี่ธรรมชาติและค่าความหน่วงของ

ระบบเพื่อความแน่นอนในการควบคุม สำหรับการหาค่าความถี่ธรรมชาติและค่าความหน่วงของระบบ นั้นได้ใช้วิธีการที่แตกต่างกัน 3 วิธี ดังนี้

1. การวิเคราะห์หาค่าความถี่ธรรมชาติโดยใช้ ทฤษฎีของ Euler's beam
2. หาค่าความถี่ธรรมชาติโดยใช้วิธีการทดลองโดยใช้ Accelerometer และ Strain Gauges ซึ่ง FFT Spectrum ของสัญญาณที่ Accelerometer จะทำให้ได้ค่าความถี่ในช่วงต่างๆ ที่จะนำมาใช้ในการควบคุมระบบ
3. เป็นการใช่วิธีการทาง Finite Element สำหรับผลของการทดลองนั้น การ Pre-Shaping การเคลื่อนที่ก่อนที่จะใส่เข้าไปในระบบมีลักษณะการเคลื่อนที่ที่ดีกว่าระบบที่ไม่ได้ Pre-Shaping

การตรวจเอกสารเกี่ยวกับการวัดการสั่นสะเทือน

กนกศักดิ์ และ วิจิต (2551) ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลแบบยึดหยุ่น และหาค่าความถี่ธรรมชาติ ได้จากทฤษฎีคานของ Euler -Bernoulli โดยให้แกนอ้างอิงหมุน ขนานกับ แขนกลที่จุดฐาน (Pseudoclamped) และแก้สมการแบบแม่นยำตรงด้วยวิธีแยกตัวแปร แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบแม่นยำตรงที่ได้ ถูกนำมาใช้หาค่าความถี่ธรรมชาติ และถูกนำมาสร้างเป็นแบบจำลอง ปริภูมิสแตต เพื่อใช้ทำนายมุมที่เคลื่อนไปของแขนกล แบบจำลองแบบแม่นยำตรงที่ได้ ถูกนำมา เปรียบเทียบกับวิธีประมาณจากสมการของ Lagrange และชุดทดลองแขนกลชนิดยึดหยุ่นจริง ผลจากการทดลอง สรุปได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการแก้สมการแบบแม่นยำมีความ แม่นยำ และสอดคล้องกับพลศาสตร์ของแขนกลชนิดยึดหยุ่นที่มีอยู่จริงมากกว่าแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีการประมาณ

สิริพงศ์ (2549) ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการวัดการกระจัดของการสั่นสะเทือนที่เป็น ฟังก์ชันฮาร์โมนิกโดยใช้สเตรนเกจ (Strain Gauge) เป็นตัวรับรู้ (Sensor) โดยหลักการของการวัด อาศัยหลักการสั่นสะเทือนเชิงกลเนื่องจากการเคลื่อนที่ของฐานรองรับ(Mechanical Vibration Due to Support Motion) เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นประกอบด้วยสปริงแผ่นที่ติดตั้งกับจุดยึดเป็นแบบคานา ทิ เลเวอร์ (Cantilever Beam) ทำหน้าที่แทนสปริง และมีมวลเซอสมิกส์ (Seismic Mass) ติดที่ปลายคาน ความถี่ธรรมชาติของสปริงในโหมดที่หนึ่งเท่ากับ 8.5 Hz ในการวัดการกระจัด (Displacement)

ใช้สเตรนเกจติดตั้งบนสปริง เพื่อทำการวัดการกระจัดของการสั่นสะเทือนจากการศึกษาทดลองเบื้องต้นในการวัดการกระจัดของการสั่นสะเทือนด้วยวิธีดังกล่าวที่ความถี่ 12 Hz, 15 Hz และ 19 Hz ตามลำดับ พบว่า ขนาดของสัญญาณที่ได้จากวงจรเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการกระจัดซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีอีกทั้งสัญญาณที่ได้ยังมีความชัดเจน

หทัยเทพ (2551) ได้ทำการศึกษาและปรับปรุงการสั่นสะเทือนของรถถีบอ้อยที่มีผลต่อโครงสร้างของตัวรถ โดยทำการตรวจวัดการสั่นสะเทือนโดยใช้เซ็นเซอร์วัดค่าความเร่ง (ADXL 202) โดยทำการวัดค่าออกมาเป็นความต่างศักย์สัญญาณผ่านอุปกรณ์แปลงสัญญาณ (NI USB-6210) และนำข้อมูลไปวิเคราะห์และแปลงค่าเป็นค่าความเร่งของการสั่นสะเทือน โดยใช้โปรแกรม Labview และใช้โปรแกรม Matlab จากการทดลองสามารถวัดค่าการสั่นสะเทือนได้เท่ากับ 1.8 m/s^2

การตรวจเอกสารเกี่ยวกับการควบคุมแบบ Inverse Dynamics

Kummun and Viboon (2008) ได้ควบคุมแขนกล 5 แกนแบบขนานในการควบคุมแบบ Real-Time โดยใช้การควบคุมแบบ Inverse Dynamics สำหรับควบคุมตำแหน่งและใช้ Impedance Control สำหรับควบคุมแรงทางอ้อมจากผลการทดลองในการควบคุมแบบ Real-Time จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่มีค่าที่มีความคลาดเคลื่อนที่น้อยและควบคุมแรงทางอ้อมได้ดี โดยความคลาดเคลื่อนของ Tracking สามารถลดลง 0.4 มิลลิเมตร

วิบูลย์ และ ประสิทธิพร (2551) ได้ใช้แขนกลที่มี 6 องศาอิสระ มาทำการควบคุมการทำงาน ในการควบคุมได้ทำการจำลองการทำงานของการควบคุมแบบ Inverse Dynamics Control และการควบคุมแรงทางอ้อมโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ ผลการจำลองการทำงานของระบบควบคุมที่ได้สามารถนำไปใช้ในการประเมินค่าความยืดหยุ่นของแขนกลและผลจากการจำลองนี้ได้แสดงให้เห็นว่าความยืดหยุ่นของแขนกลนั้นเป็นเชิงเส้น ซึ่งเริ่มต้นจาก 0 จนมีค่าประมาณ 2.5 มิลลิเมตร และเป็นไปตามรูปร่างของแรงสัมผัสจากภายนอกที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

Kai and David (1992) ได้ออกแบบตัวควบคุมโดยอยู่บนพื้นฐานของการใช้ Inverse Dynamics เข้ามาควบคุมแขนกลหลายข้อต่อ ซึ่งประกอบด้วยข้อต่อแบบยืดหยุ่นได้หนึ่งข้อต่อ และทำการ Shaped-Input Filter เพื่อที่จะลดการสั่นสะเทือนของข้อต่อแบบยืดหยุ่นได้ให้มีค่าน้อยลงและป้องกัน

สิ่งรบกวนต่างจากภายนอก โดยผลการทดลองจากแบบจำลองและการทดลองจริงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และมีประสิทธิภาพที่ดี

Meckl and Peter (1995) ได้ทำการออกแบบค่าของแรงบิดที่เหมาะสมของมอเตอร์เพื่อลดการสั่นสะเทือนในการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งให้มีค่าน้อยลง โดยได้ทดลองกับแขนกลแบบยืดหยุ่นได้โดยการใช้ 2 เทคนิค คือ ใช้ Inverse Dynamics และ Open-Loop Optimal โดยจากการทดลอง Inverse Dynamics ทำให้เส้นทางในการเคลื่อนที่ของแขนกลมีความราบเรียบมากขึ้น และ Open-Loop Optimal เป็นวิธีที่จัดการลดค่าพลังงานที่ใส่เข้าไป โดยข้อจำกัดของวิธีการทั้งสองคือ จะมีความไวต่อความคลาดเคลื่อนของค่าตัวแปรต่างๆ ของระบบ

Meckl and Roberto (1994) ได้ควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบที่มีความยืดหยุ่นตัวได้โดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชัน Ramped Sinusoid เข้ามาควบคุมแรงบิดของมอเตอร์เพื่อลดค่าพลังงานกระตุ้นของระบบที่อยู่ในช่วงของความถี่รอบๆความถี่ธรรมชาติของระบบ โดยฟังก์ชัน Ramped Sinusoid จะทำการออกแบบใน Frequency Domain สำหรับการควบคุมจะใช้การควบคุมแบบ Inverse Dynamics ซึ่งประกอบไปด้วยสัญญาณควบคุมแบบ Feed Forward จากการทดลองฟังก์ชัน Ramped Sinusoid สามารถที่จะทำการควบคุมความถี่ของพลังงานกระตุ้นใกล้ความถี่ธรรมชาติให้มีค่าน้อยลงเป็นผลที่ทำให้สามารถลดค่าการสั่นสะเทือนที่ตำแหน่งเป้าหมายได้

Liu (2007) ได้ศึกษาการควบคุมเชิงเส้นแบบป้อนกลับรวมกับวิธีควบคุมแบบ Input Shaping และได้ทำการทดลองกับแขนกลแบบยืดหยุ่นตัวได้ โดยได้ปรับแต่งค่าสัญญาณของ Reference Signal สำหรับระงับการสั่นสะเทือนของระบบ ซึ่งจากผลการทดลองนั้นทำให้เห็นได้ถึงประสิทธิภาพในการทำงานที่ดีของระบบการควบคุม

การตรวจเอกสารเกี่ยวกับการใช้ตัวควบคุมแบบ PID-Controller

ตัวควบคุม (Controller) ที่นิยมใช้ในฮาร์ดดิสก์โดยทั่วไปจะเป็นตัวควบคุมแบบ PID Controller ต่อมาได้มีการพัฒนาตัวควบคุมแบบ PID ให้สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยจะนำ Nonlinearity ของระบบมาพิจารณาในการออกแบบด้วย

Li (2004) ได้ทำการควบคุม Hard Disk Drive โดยได้ทดลองระบบเป็นแบบ Nonlinear และใช้ตัวควบคุมแบบ PID เพื่อให้ระบบเวลาในการเข้าสู่ Settling Time ที่รวดเร็วขึ้นโดยใช้ในการลดค่า Overshoot ที่เกิดขึ้นแก่ระบบ จากการทดลองได้ใช้ $K_p = 0.77, K_i = 0.007724, K_d = 6.952$

Isayed and Muhammad (2007) ได้ทำการออกแบบตัวควบคุม Hard Disk Drive โดยใช้ตัวควบคุมแบบ PID เพื่อลด Settling Time ซึ่งทำให้มีค่า Overshoot ที่ลดลง โดยตัวควบคุมมีความสามารถในการปรับแต่ง Servo ให้มีความเหมาะสมในการอ่านหรือเขียนข้อมูล ซึ่งจากการทดลองตัวควบคุมแบบ PID มีความสามารถที่ทำให้ Hard Disk Drive มีประสิทธิภาพในการอ่านหรือเขียนข้อมูลได้ดี

การตรวจเอกสารเกี่ยวกับการหาโมเดลของระบบ

วโรดม (2550) ได้กล่าวถึงหลักการในการหาโมเดลซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธีการทางทฤษฎีและปฏิบัติ โดยที่

วิธีการทางทฤษฎีเป็นวิธีที่จะต้องเข้าใจทางกายภาพของระบบนั้นๆ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์และหาค่าของส่วนประกอบต่างๆ ทำให้สามารถสร้างสมการพลวัตของระบบได้ ส่วนอีกวิธีหนึ่งที่ดีกว่าในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับใช้งานจริงคือ การหาเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) โดยหลักการพื้นฐาน คือ การป้อนสัญญาณอินพุตที่เหมาะสมให้กับระบบที่ต้องการควบคุมและวัดผลตอบสนองที่เอาต์พุต หลังจากนั้นนำข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่เก็บค่าไว้มาคำนวณหาโมเดลในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน สมการปริภูมิสถานะ หรืออย่างน้อยที่สุดต้องการผลตอบสนองทางความถี่ในแบนด์วิธของระบบป้อนกลับในการออกแบบบนโดเมนความถี่

อุปกรณ์และวิธีการ

ในส่วนแรกจะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งจะแบ่งออกได้เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของแขนห้วอ่านและวิธีการในการเชื่อมต่อข้อมูลในแต่ละอุปกรณ์ในระบบควบคุม สำหรับในส่วนที่สอง จะกล่าวถึงวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนห้วอ่าน, การหาเอกลักษณ์ของระบบ, การควบคุมแบบ Inverse Dynamics และ เทคนิค Command Shaping

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของแขนห้วอ่าน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบไปด้วย ฮาร์ดดิสก์, อุปกรณ์ที่ใช้ในการป้อนเข้าสู่สัญญาณควบคุมแรงดันไฟฟ้าของ Voice Coil Motor และแหล่งจ่ายพลังงาน, ระบบป้อนกลับกลับสัญญาณจากตัวตรวจรู้ ซึ่งประกอบไปด้วย เอนโคเดอร์เซนเซอร์ และเซนเซอร์วัดความเร่ง, ตัวควบคุมประกอบไปด้วยการรับส่งสัญญาณที่ติดตั้งใน Target Computer และคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็น

1. ฮาร์ดดิสก์

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ฮาร์ดดิสก์รุ่น DiamondMax Plus 8 ATA/133 ซึ่งเป็นของยี่ห้อ Maxtor มีความจุ (Formatted Capacity) เท่ากับ 40 GB มี Average Seek Time ที่น้อยกว่า 10 ms และมีความเร็วรอบในการหมุนของแผ่นจานดิสก์ เท่ากับ 7200 RPM



ภาพที่ 4 ฮาร์ดดิสก์รุ่น DiamondMax Plus 8 ATA/133

2. ตัวตรวจรู้ (Sensor)

อุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อบอกถึงสถานะ โดยตัวตรวจรู้ของงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย

2.1 เอนโคเดอร์เซนเซอร์ (Encoder) คือ อุปกรณ์วัดตำแหน่งที่ทำงานโดยอาศัยการยิงลำแสงผ่านแถบมืด-สว่างและส่งออกเป็นสัญญาณดิจิทัล การอ่านค่าการเปลี่ยนแปลงของระดับสัญญาณถูกนำมาคำนวณเป็นอัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง โดยงานวิจัยนี้ใช้ตัวตรวจรู้ของบริษัท Omron รุ่น E6B2 CWZ6BC มีความละเอียดเท่ากับ 2000 ครั้งต่อรอบ (CPR) โดยงานวิจัยนี้ได้ติดกับแขนหัวอ่านเพื่อวัดตำแหน่งที่แขนหัวอ่านเคลื่อนที่ไป



ภาพที่ 5 เอนโคเดอร์เซนเซอร์

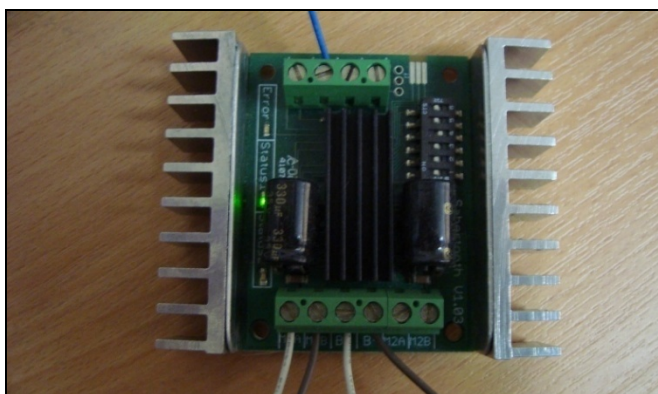
2.2 เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ซึ่งได้ใช้เซ็นเซอร์ของบริษัท Sparkfun Electronics รุ่น ADXL202 ซึ่งมีขนาด 18*18 mm สามารถวัดความเร่งได้ทั้ง 2 แกน คือ แกน x และ แกน y มีคุณสมบัติในการใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 3 v ถึง 5 v โดยเซ็นเซอร์วัดความเร่งนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้หาความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่านได้



ภาพที่ 6 เซนเซอร์วัดความเร็ว

3. วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (Power Amplifier)

ใช้ของยี่ห้อ Dimension Engineering รุ่น Sabertooth V1.03 มีสัญญาณกระแสไฟฟ้าออก 5 V สามารถที่ขับมอเตอร์ได้ 2 ตัว Drive Motor ทำหน้าที่ขยายกระแสไฟฟ้า โดยอุปกรณ์นี้จะรับสัญญาณป้อนเข้าคือกระแสไฟฟ้าที่มีปริมาณและแรงดันต่ำ และจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีปริมาณและแรงดันที่สูงกว่า โดยใช้พลังงานจ่ายแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังมอเตอร์กระแสตรงที่ติดตั้งอยู่บนหุ่นยนต์



ภาพที่ 7 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง

4. Power Supply

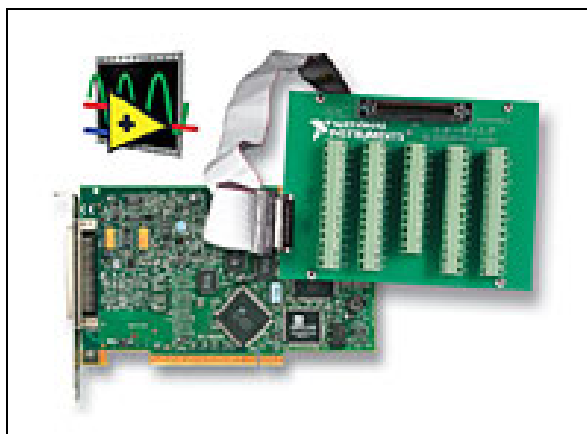
เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยัง Voice Coil Motor ทำให้แขนหัวอ่านเกิดการเคลื่อนที่



ภาพที่ 8 Power Supply

5. Target Computer

คือ คอมพิวเตอร์ที่ใช้เป็นตัวควบคุมของระบบ ในคอมพิวเตอร์นี้ถูกติดตั้งการรับส่งข้อมูล (Data Acquisition) NI PCI 6221 ทำหน้าที่รับสัญญาณ มีความเร็ว 25 kS ต่อวินาทีและความละเอียด 16 บิตสำหรับอนาล็อก ความละเอียด 8 บิตสำหรับดิจิตอล และความละเอียด 32 บิต 80 เมกกะเฮิร์ต สำหรับช่องต่อเคาท์เตอร์ ต่ออยู่กับการ์ดเชื่อมต่อ (CB68) และในคอมพิวเตอร์ตัวนี้ได้ติดตั้งโปรแกรม LabVIEW Real-Time 8.2.0



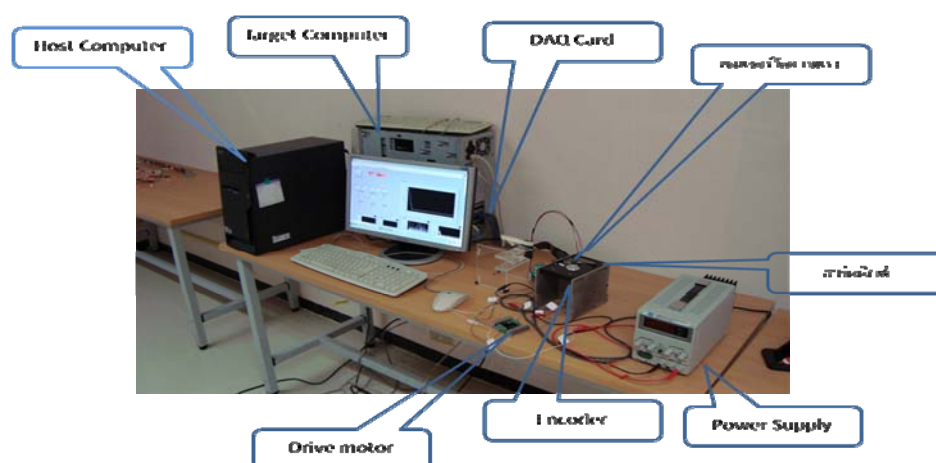
ภาพที่ 9 การ์ดรับส่งข้อมูล (Data Acquisition) NI PCI 6221 (CB68)

6. Host Computer

คือ คอมพิวเตอร์สำหรับพัฒนาแอปพลิเคชันและในคอมพิวเตอร์ตัวนี้ติดตั้งโปรแกรม LabVIEW 8.2.0

วิธีการในการเชื่อมต่อข้อมูล

อุปกรณ์ของการควบคุมแขนของหัวอ่านจะประกอบไปด้วยคอมพิวเตอร์ Host เป็นที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม Labview ในการควบคุมและส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ Target ซึ่งจะมีการควบคุมของ National Instruments เป็นส่วนที่ส่งสัญญาณควบคุมไปยังแขนของหัวอ่าน โดยมี Drive Motor เป็นส่วนที่ขับ Voice Coil ซึ่งทำให้แขนของหัวอ่านให้เคลื่อนที่ไปตามมุมที่ต้องการ โดยมี Encoder เป็นอุปกรณ์ในการวัดมุมที่เคลื่อนและเซนเซอร์วัดความเร็วเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่วัดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่แล้วส่งสัญญาณการเคลื่อนที่มาแสดงผลพร้อมออกทางหน้าจอของคอมพิวเตอร์ Host



ภาพที่ 10 การติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง

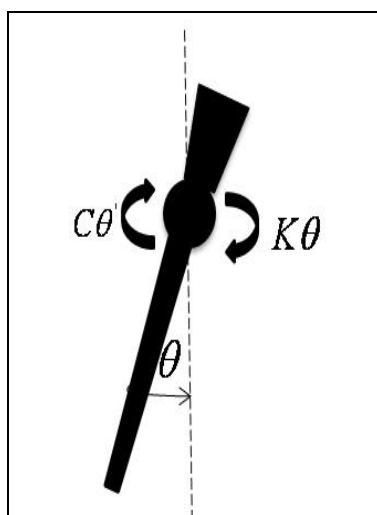


ภาพที่ 11 Block Diagram การส่งผ่านข้อมูล

วิธีการ

สมการการเคลื่อนที่ของแขนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหัวอ่าน เพื่อให้ระบบสามารถควบคุมให้มีประสิทธิภาพที่ดี มีความแม่นยำในการควบคุม จำเป็นที่จะต้องหาสมการการเคลื่อนที่ของระบบเพื่อหาความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใส่เข้าไป (Input) และตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไปของระบบ (Output)



ภาพที่ 12 พลศาสตร์ของแขนหัวอ่าน

แขนของหัวอ่านจะมีลักษณะคล้ายลูกตุ้มที่แกร่งในแนวระดับซึ่งสามารถใช้กฎข้อที่สองของนิวตันในการหาพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของแขนหัวอ่านได้ ซึ่งจากกฎข้อที่สองของนิวตันจะได้

$$\sum T = J \ddot{\theta} \quad (1)$$

$$T - c\dot{\theta} - k\theta = J \ddot{\theta} \quad (2)$$

ทำการจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$T = J \ddot{\theta} + c \dot{\theta} + k\theta \quad (3)$$

เมื่อ T คือ ค่าแรงบิดของมอเตอร์

c คือ ความหน่วงของระบบ

k คือ ค่าคงที่ของสปริง

J คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

θ คือ มุมของหัวอ่าน

และ $\dot{\theta}, \ddot{\theta}$ คือ การอนุพันธ์ตำแหน่งเทียบกับเวลาซึ่งจะทำให้ได้ ความเร็วและความเร่งของ
แกนหัวอ่าน

ในการออกแบบระบบควบคุมนั้น จะต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าของ
มอเตอร์และค่าของแรงบิดที่มอเตอร์ได้สร้างขึ้นจะได้

$$k_d V = IR_m + k_b \dot{\theta} \quad (4)$$

$$\text{และ } T = k_m I \quad (5)$$

เมื่อ V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์

I คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในมอเตอร์

R_m คือ ความต้านทานในขดลวดของมอเตอร์

k_b คือ ค่า Back Emf ของมอเตอร์

k_d คือ Motor Drive Constant

และ k_m คือ Motor Torque Constant

ทำการจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$k_d V = \frac{T}{k_m} R_m + k_b \dot{\theta}$$

$$\begin{aligned}\frac{TR_m}{k_m} &= k_d V - k_b \dot{\theta} \\ T &= \frac{k_d k_m V}{R_m} - \frac{k_b k_m}{R_m} \dot{\theta}\end{aligned}\quad (6)$$

จากสมการที่ (3) และสมการที่ (6) จะได้

$$\begin{aligned}\frac{k_d k_m V}{R_m} - \frac{k_b k_m}{R_m} \dot{\theta} &= J \ddot{\theta} + c \dot{\theta} + k \theta \\ \frac{k_d k_m V}{R_m} &= J \ddot{\theta} + (c + \frac{k_b k_m}{R_m}) \dot{\theta} + k \theta \\ k_d k_m V &= J R_m \ddot{\theta} + (c R_m + k_b k_m) \dot{\theta} + k R_m \theta \\ V &= \frac{J R_m}{k_d k_m} \ddot{\theta} + (\frac{c R_m + k_b k_m}{k_d k_m}) \dot{\theta} + \frac{k R_m}{k_d k_m} \theta\end{aligned}$$

กำหนดให้ a เท่ากับ $\frac{J R_m}{k_d k_m}$, b เท่ากับ $\frac{c R_m + k_b k_m}{k_d k_m}$ และ c เท่ากับ $\frac{k R_m}{k_d k_m}$

$$\text{ดังนั้น จะได้ } V = a \ddot{\theta} + b \dot{\theta} + c \theta \quad (7)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนซึ่งฟังก์ชันที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้าและสัญญาณออกของระบบพลวัต (Dynamic System) โดยฟังก์ชันถ่ายโอนนี้จะเขียนให้อยู่ในรูปตัวแปร s-domain หรือรูปของผลการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) จากสมการที่ (7) สามารถเขียนได้ คือ

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{1}{as^2 + bs + c} \quad (8)$$

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าจะมีค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในที่นี้คือ a, b, c ซึ่งก็คือค่าของมวล ค่าอัตราส่วนความหน่วง และค่าคงที่ของสปริง ตามลำดับ ซึ่งสามารถหาค่าได้จากการหาเอกลักษณ์ของระบบ เพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ ของระบบ

การหาเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification)

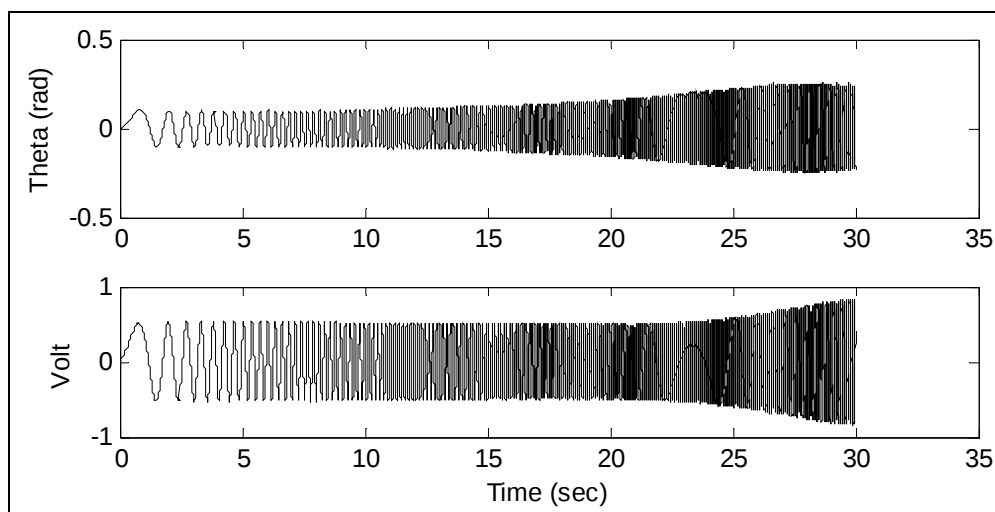
การหาเอกลักษณ์ของระบบ คือ การป้อนสัญญาณอินพุตที่เหมาะสมให้กับระบบที่ต้องการควบคุมและวัดผลตอบสนองที่เอาต์พุต หลังจากนั้นนำข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่เก็บค่าไว้มาคำนวณหาโมเดลในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน สมการปริภูมิสเตรต หรืออย่างน้อยที่สุดต้องการผลตอบสนองทางความถี่ในแบนด์วิธของระบบป้อนกลับในการออกแบบบนโดเมนความถี่

งานวิจัยนี้ได้ใช้การหาเอกลักษณ์ของระบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ เช่น มวล ค่าตัวหน่วง และค่าคงที่ของสปริง โดยได้ทำการทดลองได้ทำการควบคุมเป็นแบบ Close Loop Control โดยได้ใช้ค่าตัวแปรต่างๆ ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการทำ System Identification

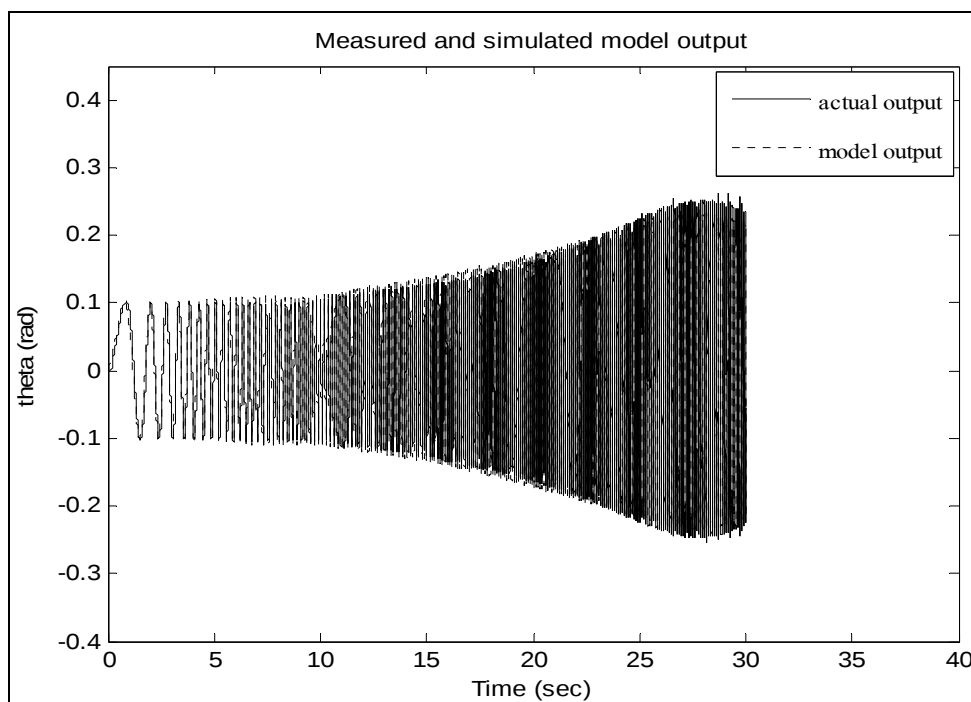
ตัวแปร	เท่ากับ
Amplitude	0.45
Frequency	เริ่มต้นจาก 0.1 จนถึง 8 Hz
Sampling Time	1000 sec
Time	30 sec
Proportional Control (Kp)	1.5
bias	2.5

ในการหาเอกลักษณ์ของระบบ ได้ให้แรงดันไฟฟ้าเข้าไปใน Voice Coil เป็นสัญญาณ Sine Wave ซึ่งค่าแอมพลิจูดที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าที่เท่ากับ 0.45 ซึ่งความถี่ที่ใช้ในการทดลองนี้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.1 ถึง 8 Hz ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลการทดลองเป็นเวลา 30 วินาที ซึ่งผลที่ได้ของแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปใน Voice Coil และมุมที่แขนหัวอ่านเคลื่อนที่ แสดงได้ดังภาพที่ 13



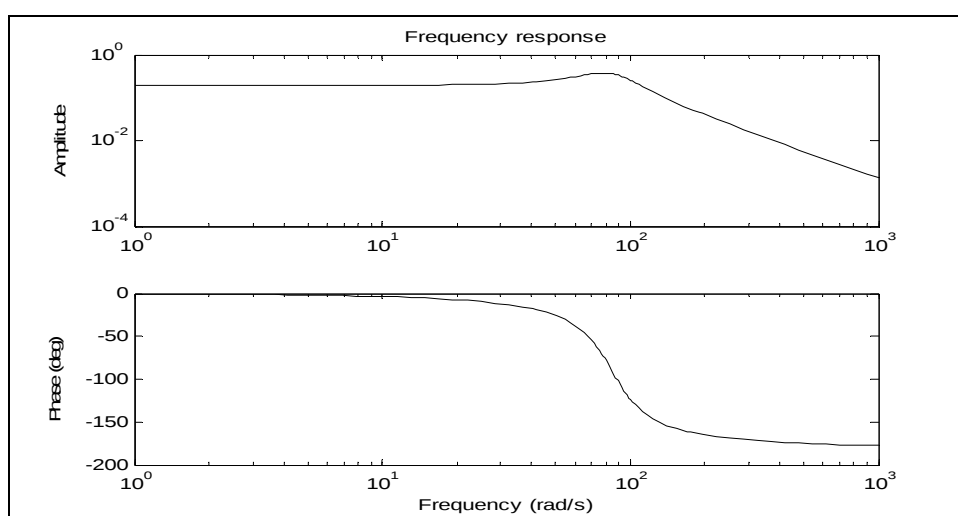
ภาพที่ 13 ด้านบนมุมในการเคลื่อนที่และด้านล่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แขนหัวอ่าน

การทำ System Identification จะทำการควบคุมในระบบในโปรแกรม Labview แล้วทำการเก็บข้อมูลของกระแสไฟฟ้าที่กระตุ้นเข้าไปในระบบ (Input) และระยะที่แขนหัวอ่านเคลื่อนที่ (Output) แล้วนำข้อมูลที่ได้ มาอ่านค่าโดยใช้โปรแกรม Matlab โดยใช้คำสั่ง ident แล้วเข้าไปเลือกในกระบวนการทำ Process Models จะทำให้เห็นประสิทธิภาพความแม่นยำในการควบคุมของระบบ ดังภาพที่ 14 ซึ่งความแม่นยำของระบบควบคุมในขั้นตอนการทำ System Identification นี้มีค่าเท่ากับ 86.58 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือได้ ขั้นตอนการทำ System Identification ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของระบบต่างๆ นั้นมีความแม่นยำมาก



ภาพที่ 14 ความแม่นยำในการทำ System Identification

จากการทำ System Identification เมื่อได้ผลการทดลองออกมาซึ่งสามารถที่จะเขียนเป็น Bode Plot ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึง เฟสมาร์จิน (Phase Margin) และเกนมาร์จิน (Gain Margin) ของระบบได้ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 Bode Plot ของการทำ System Identification

ในขั้นตอนการทำ Process Models เลือกทำการทดลองจะทำให้ได้ Model Transfer Function ซึ่งมีรูปแบบของสมการดังนี้

$$\frac{K}{(Tw)s^2 + (2ZetaTw)s + 1} \quad (9)$$

โดยกระบวนการใน Process Models นี้ทำให้ได้ค่า

$$K = 0.19117, Tw = 0.011854, Zeta = 0.26144$$

นำไปแทนค่าในสมการที่ (9) จะได้

$$\frac{0.19117}{0.0014s^2 + 0.00619s + 1} \quad (10)$$

จากสมการที่ (10) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการที่ (8) ได้คือ

$$\frac{\Theta(s)}{V(s)} = \frac{1}{0.000732s^2 + 0.03237s + 5.2309} \quad (11)$$

วิธีการออกแบบด้วยวิธีตอบสนองเชิงความถี่

การตอบสนองเชิงความถี่ คือ การตอบสนองของระบบพลศาสตร์ในช่วงสถานะอยู่ตัว เมื่อสัญญาณอินพุตที่สั่งการทำงานของระบบเป็นสัญญาณไซน์ชอยด์ ในช่วงความถี่หนึ่งหรือช่วงความถี่ที่สนใจ วิธีการวิเคราะห์การตอบสนองเชิงความถี่ยังสามารถนำมาวิเคราะห์การสั่นสะเทือน ของอุปกรณ์ๆ และยังนำไปถึงการออกแบบของเขตด้านพลศาสตร์ของการทำงานของเครื่องจักรอีกด้วย

ความนิยมในการใช้การออกแบบโดยการวิเคราะห์เชิงความถี่นี้ ก็เนื่องมาจากการออกแบบด้วยวิธีการตอบสนองเชิงความถี่นี้ให้ผลที่ค่อนข้างดี ถึงแม้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจริงที่ใช้ในการออกแบบจะมีค่าที่ผิดพลาดอยู่บ้าง เช่น ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลองทางพลศาสตร์ของระบบที่กำลังให้ความสนใจที่ค่าไม่ตรงกับของจริง ทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ที่สูง

เปลี่ยนแปลงไป ลักษณะเช่นนี้สามารถออกแบบด้วยวิธีการใช้ตัวชดเชย โดยใช้วิธีการทางด้านการตอบสนองเชิงความถี่เพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่แน่นอนนี้ได้

การออกแบบด้วยการตอบสนองเชิงความถี่นี้ทำได้ค่อนข้างง่าย โดยเพียงแค่ใช้ข้อมูลที่วัดได้จากการทดลองกับระบบจริง เช่น วัจนาค (Magnitude) และมุมเฟส (Phase) ของสัญญาณตอบสนองของระบบในช่วงสถานะอยู่ตัวของระบบที่มีสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณไซน์ชอยด์

ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequencies)

ถ้าพิจารณาระบบพลศาสตร์พื้นฐานที่มีอันดับเท่ากับสอง ซึ่งประกอบด้วยมวล (Mass) สปริง (Spring) ตัวหน่วง (Damper) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t)$$

ซึ่งสามารถที่จะหาค่าความถี่ธรรมชาติและตัวหน่วงของระบบได้จาก

$$\omega_n = \sqrt{k/m} \quad \text{และ} \quad \zeta = c/2\omega_n m$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ของสปริง

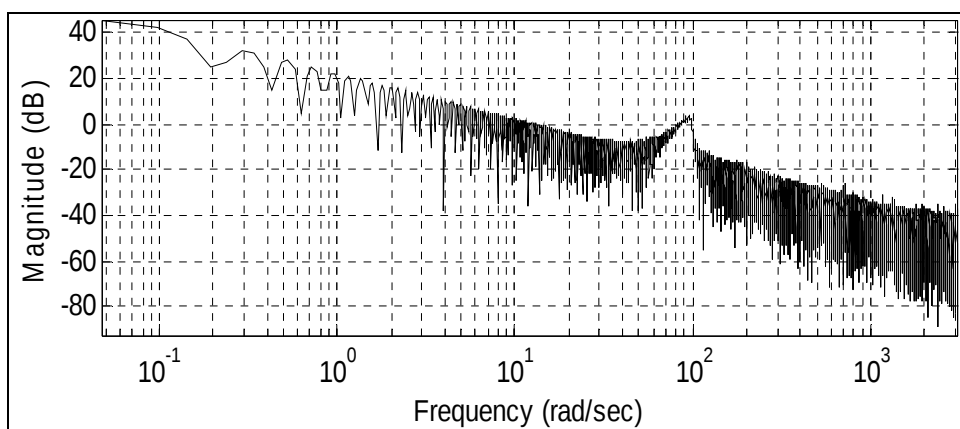
m คือ มวล

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานที่เกี่ยวข้องกับการสั่นสะเทือนซึ่งเป็นผลที่มาจากความถี่ธรรมชาติของระบบเพื่อที่จะทำการลดค่าการสั่นสะเทือนให้มีค่าที่ลดน้อยลง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการหาค่าความถี่ธรรมชาติของระบบก่อนที่จะเริ่มทำการทดลอง

การหาค่าความถี่ธรรมชาติของระบบนั้น สามารถที่จะทำได้หลายวิธีทั้งจากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบและจากการทำการทดลองจริงโดยใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง

จากสมการฟังก์ชันถ่ายโอนสมการที่ (11) จะทำให้ได้ความถี่ธรรมชาติอยู่ที่ 84.5 rad/s ซึ่งนำมาเปรียบเทียบกับทำการทดลองจริงซึ่งวัดค่าโดยใช้เซนเซอร์วัดความเร่งซึ่งจะทำการเก็บ

ข้อมูลของค่าความถี่ในขั้นตอนของการทำ System Identification แล้วนำค่าที่บันทึกได้มาคำนวณในโปรแกรม Matlab จะทำให้ได้ กราฟ Fast Fourier Transform หรือ FFT ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 กราฟ Fast Fourier Transform

จาก กราฟ FFT ที่ได้จากการทำการทดลอง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าความถี่ในช่วง 90 rad/s ค่าความถี่มีค่าที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความถี่ธรรมชาติของระบบ โดยจะสังเกตเห็นได้ว่า ความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการคำนวณจากฟังก์ชันถ่ายโอน และการทำการทดลองจริงมีค่าที่ห่างกันไม่มาก ซึ่งอาจจะเป็นผลที่มาจากความละเอียดของเซนเซอร์วัดความถี่ที่ทำให้ค่าที่ได้ไม่ตรงกันเท่าที่ควร แต่สำหรับในการทำงานวิจัยนี้ค่าความถี่ธรรมชาติที่ใช้ทำการทดลองจะเทียบกับค่าที่ได้จากเซนเซอร์วัดความถี่ ซึ่งก็คือ 90 rad/s เพื่อจะได้มีความสอดคล้องกันกับการออกแบบควบคุมระบบต่อไป

เทคนิคคอมมานด์เชปปีง (Command Shaping Technique)

การสั่นสะเทือนจะเกิดขึ้นภายใต้การกระตุ้นระบบทางกลด้วยแรงภายนอกอย่างต่อเนื่อง ระบบจะสั่นด้วยความถี่ค่าเดียวกับความถี่ของแรงภายนอกที่มากระตุ้นนั้น หรือผลการจากหมุนที่เสียสมดุลของชิ้นส่วนที่ประกอบอยู่ในชิ้นส่วนทางกล โดยจะเป็นการกระตุ้นในรูปแบบของฮาร์มอนิก ผลตอบสนองของระบบที่มีต่อการกระตุ้นอย่างต่อเนื่องของแรง คือ แอมพลิจูดของการสั่นของระบบ ขึ้นอยู่กับความถี่ภายนอกที่กระทำต่อระบบ ถ้าความถี่ภายนอกที่กระทำต่อระบบมีค่าที่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบทางกลนั้น สถานะการสั่นที่เกิดขึ้นเรียกว่า การสั่นพ้อง (resonance) ซึ่งทำให้เกิดการสั่นอย่างรุนแรงและอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อระบบทางกลนั้นได้

ดังนั้น ในการออกแบบในงานทางด้านวิศวกรรมระบบควบคุมนั้น จึงควรคำนึงถึงค่าความถี่ธรรมชาติของในแต่ละระบบด้วย เพื่อให้การทำงานในงานต่างๆ ที่ประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น และยังช่วยป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับระบบและผู้ใช้งาน

เทคนิคคอมมานด์เชปปีงนั้น เป็นเทคนิคที่ใช้ในการลดค่าพลังงานที่กระตุ้นให้มีค่าที่ลดลงเมื่อเข้าใกล้กับค่าความถี่ธรรมชาติที่ให้ความถี่ที่เกิดขึ้นในช่วงนั้น มีค่าที่ต่ำลงซึ่งเป็นผลที่ทำให้การเคลื่อนที่ของระบบมีความแม่นยำมากขึ้น และลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับระบบนั้น ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้กับแขนของหัวอ่าน ซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งที่ต้องการความแม่นยำในการเคลื่อนที่ที่สูง ซึ่งทำหัวการอ่านและเขียนข้อมูลมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

สมการที่ (12) คือ สมการ Cost Function ซึ่งอยู่ในรูปของฟูเรียทรานฟอร์มซึ่งเป็นสมการที่ใช้อธิบายลักษณะของเทคนิคคอมมานด์เชปปีง จากความแตกต่างระหว่างการสังเคราะห์ Command Function และ Bang-Bang Command Function ซึ่งได้อธิบายถึงขอบเขตของสเปกตรัมของความถี่ธรรมชาติของระบบ จากสมการ Cost Function

$$J_c = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_r} \frac{1}{\tau_m^2} [f_r(t) - f_{cs}(t)]^2 dt + \rho \sum_{i=1}^N (\omega_i T_r)^2 |F_{cs}^*(\omega_i T_f)|^2 \quad (12)$$

โดยที่ T_r คือ Bang-Bang Input ของระบบที่มีการเคลื่อนที่กับเวลา

T_f คือ Command Shaped Input ที่มีความสัมพันธ์กับเวลา

f_r คือ Bang-Bang Command Profile

f_{cs} คือ Command Shaped Profile

ω_i คือ ความถี่ธรรมชาติของระบบ

ρ คือ น้ำหนัก

τ_m คือ แรงบิดสูงสุด

N คือ จำนวนของความถี่ต่างๆรอบบริเวณความถี่ธรรมชาติและ

F_{cs}^* คือ ฟูเรียทรานฟอร์มของ Command Shaped Profile

ซึ่งจากสมการที่ (12) สามารถอธิบายได้ว่า เราต้องการให้ฟังก์ชันพื้นฐานของเทคนิคคอมมานด์เชปปีงเข้าใกล้กับฟังก์ชันคำสั่งแบบ Bang-Bang ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว แต่มีข้อเสียที่มีแอมพลิจูดที่สูงซึ่งเป็นผลที่ทำให้ไปกระตุ้นให้ความถี่ในช่วงของความถี่ธรรมชาติมีค่าที่สูงขึ้น โดยความสัมพันธ์ของการสั่นสะเทือนเนื่องมาจากความถี่ธรรมชาตินั้น Meckl ได้แสดงให้เห็นโดยกับระบบที่มีมวล 2 มวล โดยที่เป็นระบบที่ปราศจากตัวหน่วง ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของสัญญาณที่ความถี่ธรรมชาติของระบบ และแอมพลิจูดของความเร่งที่หลงเหลืออยู่เมื่อระบบเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งที่ต้องการโดยความสัมพันธ์นี้จะสามารถแสดงได้ โดยสมการ

$$A^* = \frac{A}{F_{\max} / (m_1 + m_2)} = \omega_n T_f |F^*(\omega_n T_f)| \quad (13)$$

ในการควบคุมของงานวิจัยนี้จะใช้ฟังก์ชันพื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไซนูซอยมาทำการออกแบบสัญญาณอ้างอิง (Reference Signal) ของแกนหัวอ่านเพื่อให้แกนหัวอ่านเคลื่อนที่ไปอย่างที่ต้องการ โดยฟังก์ชันเริ่มไซนูซอยเป็นฟังก์ชันที่ใช้สำหรับระบบที่ออกแบบ โดยขึ้นอยู่กับค่าความเร่งของระบบจากการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยลดความถี่ของพลังงานกระตุ้นในช่วงของความถี่ธรรมชาติของแกนหัวอ่านให้มีค่าที่ลดน้อยลง

$$f_{rs}(t) = \tau_m \sum_{k=1}^L \frac{\beta_k}{\alpha_k^2} \Phi_k^*(t) \quad (14)$$

เมื่อ

$$\Phi_k^*(t) = \alpha_k \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{t}{T_f} \right) + \sin \left(\alpha_k \frac{t}{T_f} \right) - \frac{\alpha_k}{2} \cos \left(\alpha_k \frac{t}{T_f} \right) \quad (15)$$

$\Phi_k^*(t)$ คือ ฟังก์ชันเริ่มไซนูซอย

B_k คือ สัมประสิทธิ์ของพื้นฐานฟังก์ชัน k^{th} และ

α_k คือ จำนวนลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับพื้นฐานฟังก์ชัน k^{th}

จำนวนลักษณะคือค่าที่เลือกไว้

ดังนั้น พื้นฐานของฟังก์ชันจะมีขนาดเป็นศูนย์ และความชันจะอยู่ที่จุดปลาย โดยเมื่อเราใช้เงื่อนไขของขอบเขต หาอนุพันธ์เทียบกับเวลา ของสมการและทำการหาค่าที่จุดปลาย ซึ่งจะได้จำนวนลักษณะที่เราต้องการจากสมการ

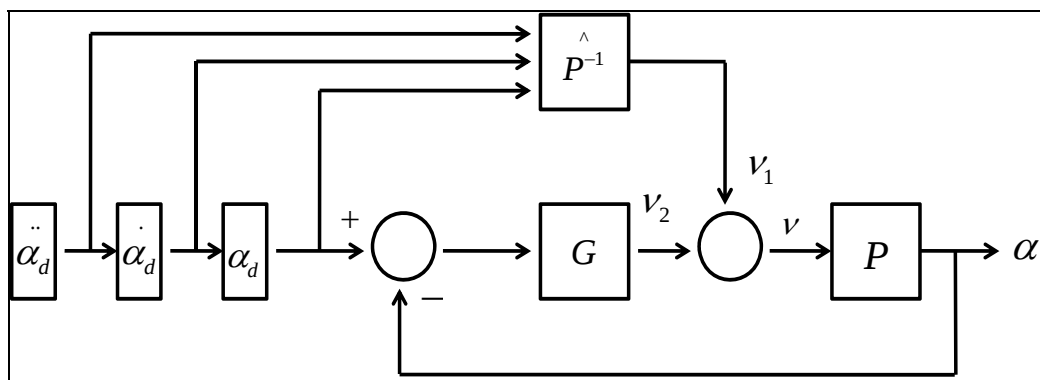
$$\frac{\alpha_k}{2} \sin \alpha_k + \cos \alpha_k - 1 = 0, \text{ (for } \alpha_k \neq 2\pi n, n = 1, 2, \dots). \quad (16)$$

การควบคุมแบบ Inverse Dynamics

ในการออกแบบการควบคุมของงานนี้ใช้ระบบควบคุมแบบ Inverse Dynamics ในการควบคุม โดยเป็นเทคนิคที่อยู่ในระบบแบบ Close-loop ซึ่งประกอบไปด้วย การควบคุมแบบ Feed-Forward และการควบคุมแบบ Feedback

โดยการควบคุมแบบ Feed-Forward ใช้ในการป้อนสัญญาณอ้างอิง (Reference Signals) ที่ได้ทำการออกแบบไว้ซึ่ง ได้แก่ ความเร่ง ความเร็ว และตำแหน่ง ของแขนหัวอ่านก่อนเพื่อควบคุมแรงบิดของ Voice Coil ให้เหมาะสมกับที่ต้องการเพื่อหลีกเลี่ยงการไปกระตุ้นความถี่ของพลังงานที่ใส่เข้าไปในระบบ

ส่วนการควบคุมแบบ Feedback ใช้ในการควบคุมคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของแขนหัวอ่านที่เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายให้มีค่าที่น้อยที่สุด หรือใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิงที่ใส่เข้าไปในระบบ โดยมีตัวควบคุม (Controller) ในการควบคุมความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 17 Block diagram ของการควบคุมแบบ Feed-Forward และ Feedback

โดยที่ $\ddot{\alpha}_d$, $\dot{\alpha}_d$ และ α_d คือ ค่าความเร่ง ความเร็ว และตำแหน่งของสัญญาณอ้างอิงที่
ออกแบบ ตามลำดับ

α คือ ตำแหน่งของแขนหัวอ่านที่เคลื่อนที่จริง

$\hat{P}^{-1}$ คือ Inverse Dynamics

P คือ Plant

G คือ ตัวควบคุม

V, V_1, V_2 คือ แรงดันไฟฟ้า

โดยทั่วไป ในระบบควบคุมเราต้องการที่จะทำให้ α มีค่าที่เท่ากับ $\ddot{\alpha}_d, \dot{\alpha}_d, \alpha_d$ ซึ่งเป็น
ค่าที่ได้ทำการออกแบบไว้ ซึ่งแสดงว่าระบบที่ทำการควบคุมไม่มีความคลาดเคลื่อน แต่ในความเป็น
จริงนั้นไม่มีระบบใดๆ ที่ไม่มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงต้องมีตัวควบคุมเข้ามาลดความคลาดเคลื่อน
ที่เกิดขึ้นให้มีค่าน้อยลง

ในภาพที่ 17 ได้แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ Inverse Dynamics ซึ่งจะ
สังเกตได้จาก $\hat{P}^{-1}$ มีสัญญาณควบคุมสิ่งที่ใส่เข้าไปในระบบ (Input) คือ สัญญาณอ้างอิงที่ออกแบบ
($\ddot{\alpha}_d, \dot{\alpha}_d, \alpha_d$) แล้วสิ่งที่ได้ (Output) คือ แรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมกับระบบ (V_1) ส่วนความ
แตกต่างของ P คือ สัญญาณควบคุมที่ใส่เข้าไปคือ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากตัวควบคุม (V_2) แล้ว
สิ่งที่ได้คือ ตำแหน่งของแขนหัวอ่านที่เคลื่อนที่จริง (α)

Inverse Dynamics ของระบบควบคุมนี้ได้มาจาก Dynamics Models ของระบบซึ่งได้มา
จากการหาสมการการเคลื่อนที่ของระบบโดยได้ค่าต่างๆ มาจากการทำ System Identification
สมการที่ (11) แล้วทำการ Inverse กลับเพื่อที่จะให้ได้ สัญญาณอ้างอิงซึ่งเป็นสิ่งที่ใส่เข้าไปใน
ระบบและสิ่งที่ต้องการให้เกิดขึ้นคือแรงบิดที่เหมาะสมของ Voice Coil ตามสมการที่ (17)

$$\frac{V(s)}{\Theta(s)} = \frac{0.000732s^2 + 0.03237s + 5.2309}{1} \quad (17)$$

การออกแบบตัวควบคุม (Controller Design)

อุปกรณ์ควบคุมจะถูกออกแบบไว้เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมไปควบคุมระบบเมื่อมีสัญญาณผิดพลาดเกิดขึ้น หลักการหรือวิธีการควบคุมนั้นเรียกว่า กฎของการควบคุม หรือกฎการควบคุม (Control Law) เมื่อสัญญาณผิดพลาด มีค่าไม่เป็นศูนย์ซึ่งอาจเป็นผลอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงที่คำสั่งหรือเกิดสัญญาณรบกวนก็ได้ หน้าที่ของตัวควบคุม คือ พยายามควบคุมตัวแปรของระบบให้ มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ ซึ่งอาจจะสรุปหน้าที่ของตัวควบคุมได้ดังนี้

- ลดค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (Minimize the Steady State Error)
- ลดค่าเวลาเข้าที่ (Minimize the Settling Time)
- เพื่อให้ตอบสนองในช่วงต้น (Transient Response) มีลักษณะตามที่กำหนดไว้ เช่น ต้องการ ทำให้ค่าโอเวอร์ชูตมีค่าน้อยที่สุด กำหนดค่าเวลาอยู่ตัว กำหนดค่าอัตราการหน่วง (Damping Ratio) และค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency)

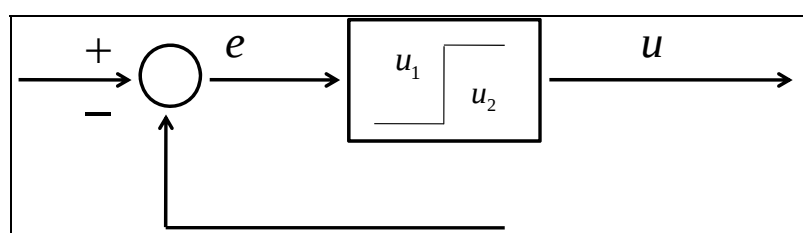
ในทางปฏิบัติการกำหนดลักษณะเฉพาะสำหรับออกแบบระบบควบคุมมีรายละเอียดมากกว่านี้ เช่น การออกแบบอาจจะต้องการกำหนดความถี่แถบ (Bandwidth) ที่ทำให้ระบบมีความปลอดภัย ซึ่งก็คือระบบความปลอดภัยจากการที่ระบบจะไม่มีเสถียรภาพหรือไม่มีความสมดุล ซึ่งระบบต่างๆ ไป ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการควบคุมจะไม่สามารถหาค่าได้ถูกต้องแม่นยำ แต่สามารถหาขอบเขตของความผิดพลาดหรือค่าเบี่ยงเบนของพารามิเตอร์ของระบบที่ต้องการควบคุม เราสามารถเลือกออกแบบระบบควบคุม หรือตัวควบคุมชนิดต่างๆ โดยตัวควบคุมที่ออกแบบนี้จะมี ความไว (Sensitivity) มากน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงหรือเบี่ยงเบนของค่าพารามิเตอร์แตกต่างกันออกไป ดังนั้น ก็ออกแบบบางครั้งอาจจะต้องครอบคลุมถึงความไว ของระบบควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลง พารามิเตอร์ของระบบด้วย เพื่อให้ระบบควบคุมโดยรวมมีความปลอดภัยต่อการใช้งานเมื่อค่า พารามิเตอร์ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่ระบบกำลังทำงาน

ตัวควบคุมในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Controller) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการทำการของระบบพลศาสตร์ที่ต้องการจะควบคุม โดยระบบควบคุมแบบอัตโนมัตินี้จะมีส่วนที่ทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดค่าตัวแปรสถานะหรือตัวแปรปริภูมิสแตต หรือ State Variables จริงของระบบด้วยตัวตรวจรู้ (Sensor) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ต้องการ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นค่าความแตกต่างนี้จะถูกใช้สำหรับสร้างสัญญาณควบคุม ซึ่งสามารถ

ลดการเปลี่ยนแปลงหรือความผิดพลาดนี้ลงได้ เพื่อให้ค่าความผิดพลาดนี้มีค่าเป็นศูนย์หรือน้อยให้ เป็นตัวเลขที่มีค่าตัวเลขที่มีขนาดเล็ก

ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด (Two-Position Control)

ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด แบบนี้จะพบเห็นค่อนข้างมากใน อุปกรณ์ต่างๆ ไปบ้างครั้งจะถูกเรียกว่าการควบคุมแบบแบน-แบน (Bang-Bang Control)

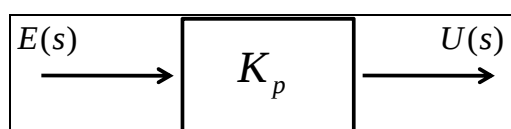


ภาพที่ 18 ตัวควบคุมแบบสองตำแหน่งหรือตัวควบคุมแบบเปิด-ปิด

ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุม u จะมีค่าอยู่สองค่า u_1 และ u_2 ขึ้นอยู่กับค่าสัญญาณ ผิดพลาด error

ตัวควบคุมเชิงสัดส่วน (Proportional Control)

การควบคุมระบบแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนนั้น สัญญาณควบคุมจะเป็น สัดส่วนโดยตรงกับค่าสัญญาณความผิดพลาด ที่เกิดขึ้นระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุต ของระบบที่ทำการควบคุมนั้นจะเขียนได้ ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ตัวควบคุมเชิงสัดส่วน

ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมและสัญญาณผิดพลาดที่ส่งเข้าไปในระบบ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(t) = K_p e(t)$$

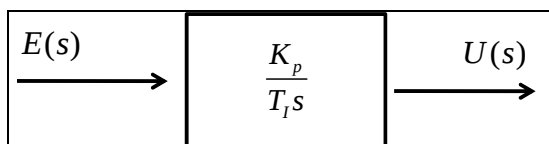
ถ้าเขียนให้อยู่ในรูปแบบผลการแปลงลาปลาซ จะได้ว่า

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

เมื่อค่าเกน K_p จะเป็นค่าอัตราขยายของตัวควบคุมนี้จะถูกเรียกว่าเกนสัดส่วน

ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control)

การควบคุมแบบอินทิกรัล นั้นมีรูปแบบของ Block Diagram ดังนี้



ภาพที่ 20 การควบคุมแบบอินทิกรัล

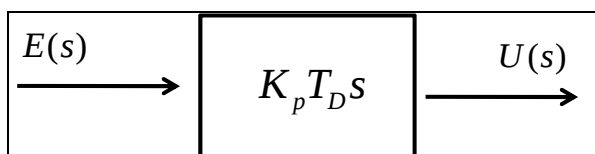
ถ้าเขียนให้อยู่ในรูปแบบผลการแปลงลาปลาซ จะได้ว่า

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p}{T_I s}$$

จากรูปแบบของการควบคุมแบบอินทิกรัลเมื่อ T_I เท่ากับ Integral Time หรือ Reset Time จะเห็นว่าสัญญาณควบคุม อาจจะมีค่าค่อนข้างมากก็โดยไม่ลดลง ใดๆ ที่สัญญาณผิดพลาด มีค่าเป็นศูนย์ในภายหลังหรือเมื่อเวลาผ่านไปแล้วก็ตาม ทั้งนี้ก็เพราะว่าสัญญาณควบคุมในกรณีของการควบคุมแบบอินทิกรัลขึ้นอยู่กับค่าในอดีต (Part Value) ไม่เหมือนกับตัวควบคุมเชิงสัดส่วน ซึ่งอยู่กับค่าปัจจุบัน

ประโยชน์ของการควบคุมแบบอินทิกรัล ก็เพื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว ในขณะที่เดียวกันค่าความมีเสถียรภาพของระบบก็จะลดน้อยลงด้วย

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control)



ภาพที่ 21 การควบคุมแบบอนุพันธ์

ถ้าเขียนให้อยู่ในรูปแบบผลการแปลงลาปลาซ จะได้ว่า

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p T_D s$$

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะช่วยในการเพิ่มความหน่วง (Damping) ให้กับระบบที่ต้องการควบคุม นั่นก็คือ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้น แต่โดยทั่วไปแล้วตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์นี้จะไม่ทำให้ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวมีค่าเป็นศูนย์ได้ ในขณะเดียวกันจะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์นี้เป็นสัญญาณที่เกิดจากการหาอนุพันธ์ของสัญญาณผิดพลาด

$\frac{de(t)}{dt}$ ดังนั้น ถ้าสัญญาณผิดพลาดนี้มีสัญญาณรบกวนมาก สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์นี้จะกระเพื่อมค่อนข้างมาก เนื่องจากค่าความชันของสัญญาณเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมของเราไม่มีเสถียรภาพ

ตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์ ส่วนมากแล้วใช้ร่วมกับตัวควบคุมตัวอื่น ใช้ร่วมกับการควบคุมสัดส่วน ซึ่งจะเรียกว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์หรือพีดี (PD-control) ถ้าตัวควบคุมเชิงสัดส่วนใช้ร่วมกับอินทิกรัลจะเรียกว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลหรือพีไอ (PI-control) และใช้ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์รวมกันกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนและตัวควบคุมแบบอินทิกรัล ซึ่งจะเลือกตัวควบคุมแบบนี้ว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID-control)

ในงานวิจัยนี้ตัวควบคุมที่ใช้เป็นแบบตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์หรือพีดี (PD-control) โดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน หรือค่า P มีค่าเท่ากับ 68 และใช้ค่าตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ หรือ D มีค่าเท่ากับ 0.1 โดยค่าตัวควบคุมที่ได้นั้นได้มาจากการทำการทดลองจริงที่ทำการปรับค่าตัวควบคุมให้มีความเหมาะสมที่สุด โดยดูจากตำแหน่งของแขนหัวอ่านที่เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายว่ามีความแม่นยำมากแค่ไหนและความรวดเร็วในการเคลื่อนที่ไปของแขนหัวอ่าน

แบบจำลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหัวอ่าน (Simulation)

การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหัวอ่านนี้ การออกแบบควบคุมได้แบ่งการควบคุมออกเป็น 2 ระบบ คือ การควบคุมที่มีการออกแบบค่าสัญญาณอ้างอิงเพื่อลดค่าพลังงานในช่วงของควมถี่ธรรมชาติของระบบเป็นผลให้การสั่นสะเทือนของระบบมีค่าที่ลดลง โดยใช้โครงสร้างฟังก์ชันพื้นฐานของฟังก์ชันเร็มไซนุซอย และทำการเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่ยังไม่ได้ทำการเปลี่ยนแปลง โครงสร้าง คือ Bang-Bang Command

โครงสร้างคำสั่งแบบ Bang-Bang

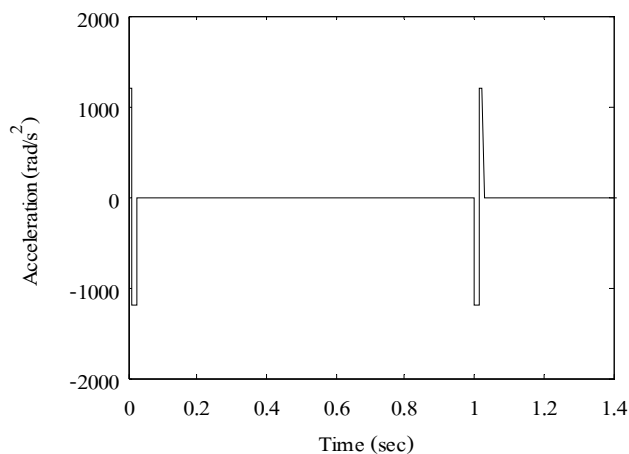
Bang-Bang เป็นคำสั่งที่ทำให้ระบบควบคุมสามารถเคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างรวดเร็วแต่ผลที่ได้ก็คือ จะมีแอมพลิจูดที่สูงในทุกๆ ย่านความถี่ ซึ่งสำหรับความถี่ที่ตรงกับควมถี่ธรรมชาติจะเป็นการกระตุ้นให้มีแอมพลิจูดที่สูงขึ้นกว่าเดิม ซึ่งทำให้ระบบเมื่อเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายจะเกิดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นเป็นผลที่ทำให้ระบบใช้เวลาในการเคลื่อนที่เข้าไปถึงที่ที่ต้องการได้ช้า

ในการควบคุมในงานวิจัยนี้เราใช้การควบคุมแบบ Inverse Dynamics เข้ามาทำการควบคุม ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องออกแบบสัญญาณอ้างอิงของการเคลื่อนที่ของระบบก่อน โดยใช้โปรแกรม MatLab ในการออกแบบ ซึ่งค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้มีดังตารางที่ 2

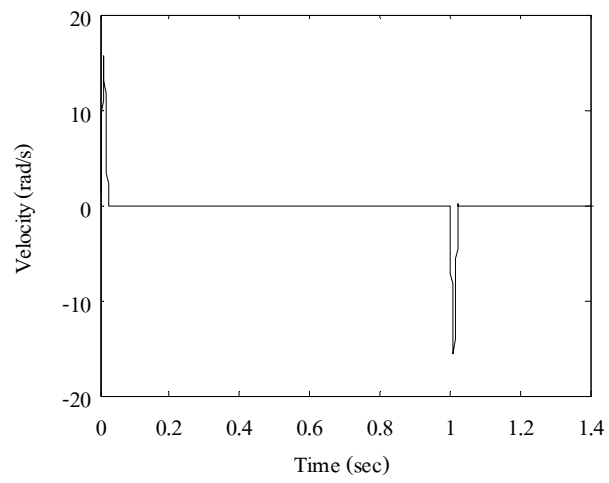
ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ใช้สำหรับโครงสร้างคำสั่งแบบ Bang-Bang

ตัวแปร	เท่ากับ
$\tau_{\max}$	1200 Nm
ตำแหน่งที่เคลื่อนที่	0.2 rad
Sampling Time	0.001 sec
Time	2 sec

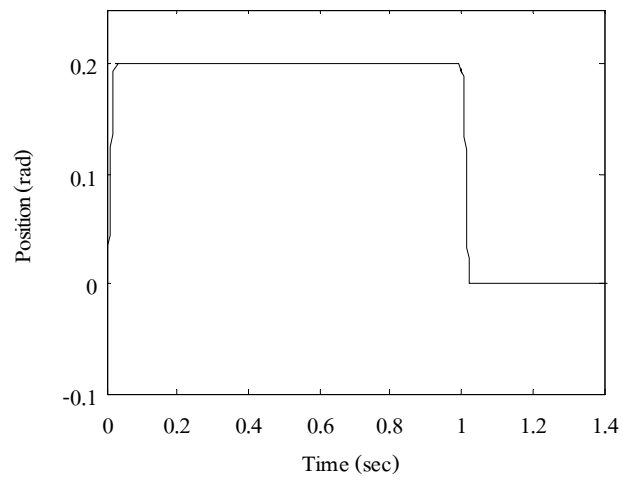
สัญญาณอ้างอิงควบคุมที่ได้ทำการออกแบบไว้ในกรณีของคำสั่งแบบ Bang-Bang นั้นเป็นไปตามภาพที่ 22 จนถึงภาพที่ 24 ซึ่งก็คือ สัญญาณควบคุมที่เป็นความเร่ง ความเร็ว และตำแหน่งที่ต้องการให้แขนหัวอ่านเคลื่อนที่ไป ตามลำดับ ซึ่งได้ทำการออกแบบออกเป็น 2 ช่วง คือ ให้แขนหัวอ่านเคลื่อนที่ไป 0.2 rad แล้วเคลื่อนที่กลับมาที่ตำแหน่งเดิม



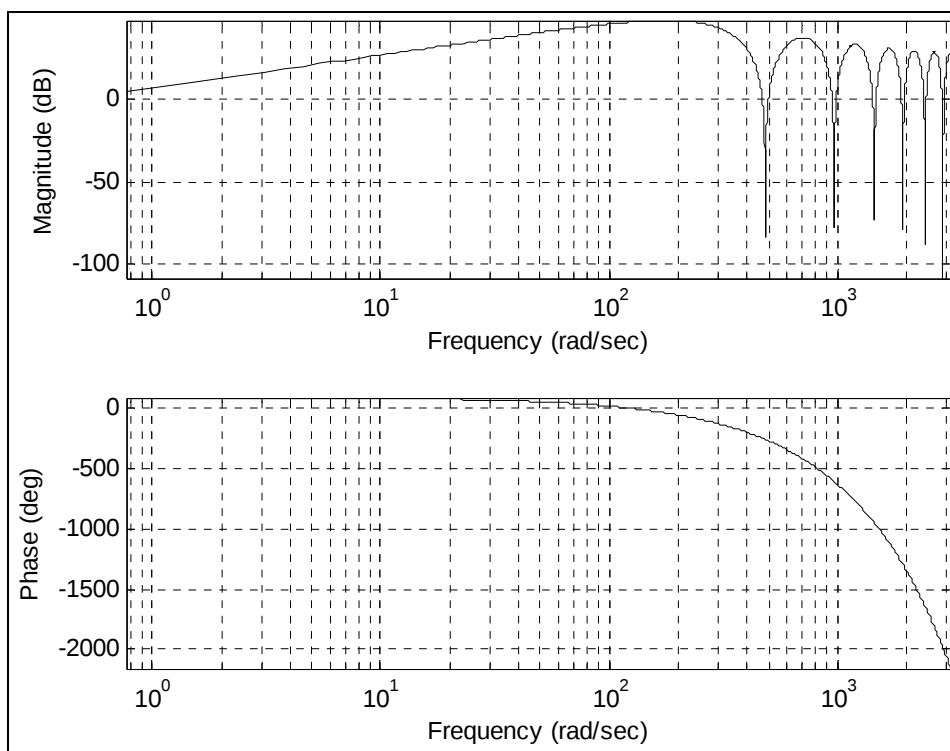
ภาพที่ 22 ความเร่งที่ออกแบบของ Bang-Bang



ภาพที่ 23 ความเร็วที่ออกแบบของ Bang-Bang



ภาพที่ 24 ตำแหน่งที่ออกแบบของ Bang-Bang



ภาพที่ 25 FFT ของ Bang-Bang

จากภาพที่ 25 จะเห็นได้ว่าในทุกๆ ย่านความถี่ของโครงสร้างแบบ Bang-Bang จะมีความถี่ที่สูง ซึ่งสำหรับในช่วงความถี่ที่ 90 rad/sec ซึ่งเป็นความถี่ธรรมชาติของระบบ จะมีผลเมื่อพลังงานกระตุ้นที่ใส่เข้าไปมีความถี่ที่ตรงกับความถี่ธรรมชาติ จะทำให้ระบบมีแอมพลิจูดที่สูงขึ้นกว่าเดิม เป็นผลที่ทำให้ระบบจะมีการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น

ฟังก์ชันพื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไขวชอย

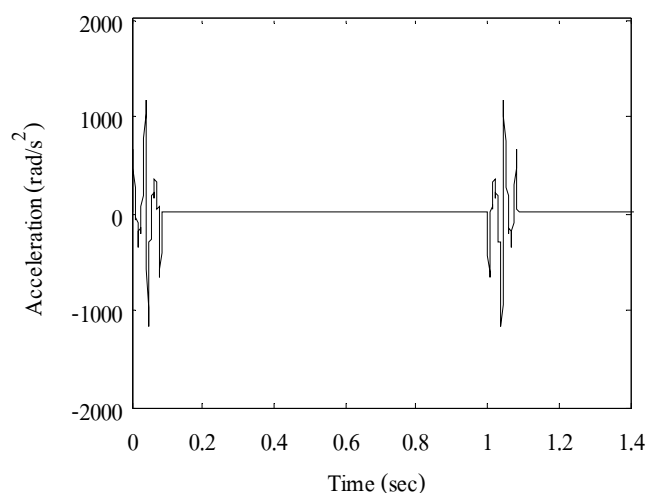
จากปัญหาการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากความถี่ของพลังงานกระตุ้นนั้น ไปกระตุ้นความถี่ในช่วงของความถี่ธรรมชาติให้มีค่าที่สูงขึ้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเทคนิคคอมมานด์เชปปีงโดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไขวชอยเข้ามาออกแบบสัญญาณอ้างอิงของระบบ เพื่อลดค่าความถี่ของพลังงานกระตุ้นที่อยู่ในช่วงของความถี่ธรรมชาติให้มีค่าที่น้อยลง โดยได้ออกแบบให้มีการลดระดับพลังงานกระตุ้นให้มีความถี่ที่น้อยลงในช่วง 90 rad/sec โดยค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้มีดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตัวแปรต่างๆ โดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไซนูซอย

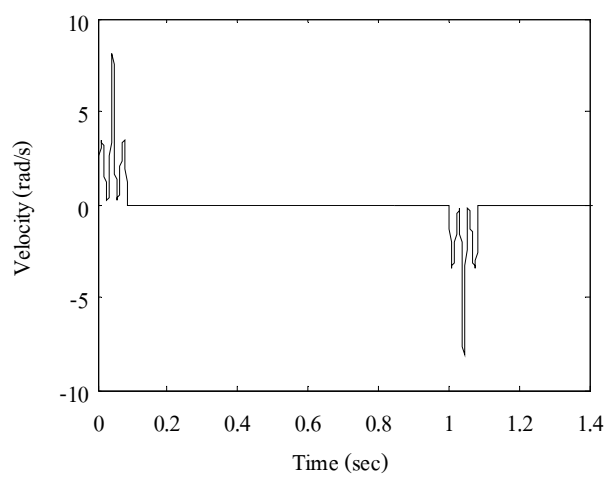
ตัวแปร	เท่ากับ
$\tau_{\max}$	1200 Nm
ตำแหน่งที่เคลื่อนที่	0.2 rad
Sampling Time	0.001 sec
Time	2 sec
น้ำหนัก	0.085
L	10

จากทดลองนี้ได้ทำการใส่ค่าน้ำหนักเข้าไปที่บริเวณความถี่ 90 rad/sec ซึ่งก็คือความถี่ที่ตรงกับความถี่ธรรมชาติของแขนหัวอ่าน เพื่อให้ความถี่ของพลังงานกระตุ้นมีค่าที่ลดลงที่บริเวณความถี่นั้น โดยค่าน้ำหนักที่ใส่เข้าไปในการออกแบบสัญญาณควบคุมนั้นได้มาจากการทำการทดลองโดยอ้างอิงกับค่าแรงบิดสูงสุดของ Voice Coil แล้วดูค่า Settling Time ที่รวดเร็วที่สุด เพราะว่าค่าน้ำหนักที่ใส่เข้าไปนั้นมีผลต่อการความรวดเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบ ถ้าค่าน้ำหนักที่ใส่เข้าไปมีค่าที่สูง ค่าพลังงานงานกระตุ้นในช่วงนั้นก็จะมีค่าที่ต่ำลงเป็นผลให้ระบบเคลื่อนที่ได้ช้าลง แต่ถ้าให้ค่าน้ำหนักมีค่าที่น้อยเกินไป ระบบก็จะมีการเคลื่อนที่ที่เหมือนกับการควบคุมโดยใช้โครงสร้างคำสั่งแบบ Bang-Bang ซึ่งก็จะไปกระตุ้นความถี่ในช่วงของความถี่ความธรรมชาติของระบบทำให้มีแอมพลิจูดที่สูง ดังนั้นจึงต้องทำการปรับค่าน้ำหนักให้มีความเหมาะสมกับระบบ

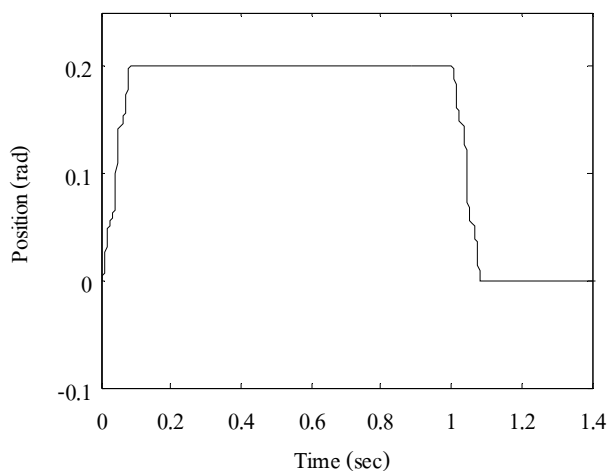
ภาพที่ 26 ถึงภาพที่ 28 คือ ความเร่ง ความเร็ว และตำแหน่งที่เคลื่อนที่ ซึ่งเป็นสัญญาณอ้างอิงที่ออกแบบโดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไซนูซอย โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าสัญญาณอ้างอิงที่ได้จะมีความแตกต่างกับโครงสร้างคำสั่งแบบ Bang-Bang ซึ่งเป็นผลที่มาจากค่าน้ำหนักที่ใส่เข้าไปที่ความถี่ของพลังงานกระตุ้นที่ 90 rad/sec สัญญาณอ้างอิงที่ได้ก็จะลดระดับพลังงานในช่วงนั้นให้ต่ำลง



ภาพที่ 26 ความเร่งที่ออกแบบโดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไซนูซอย

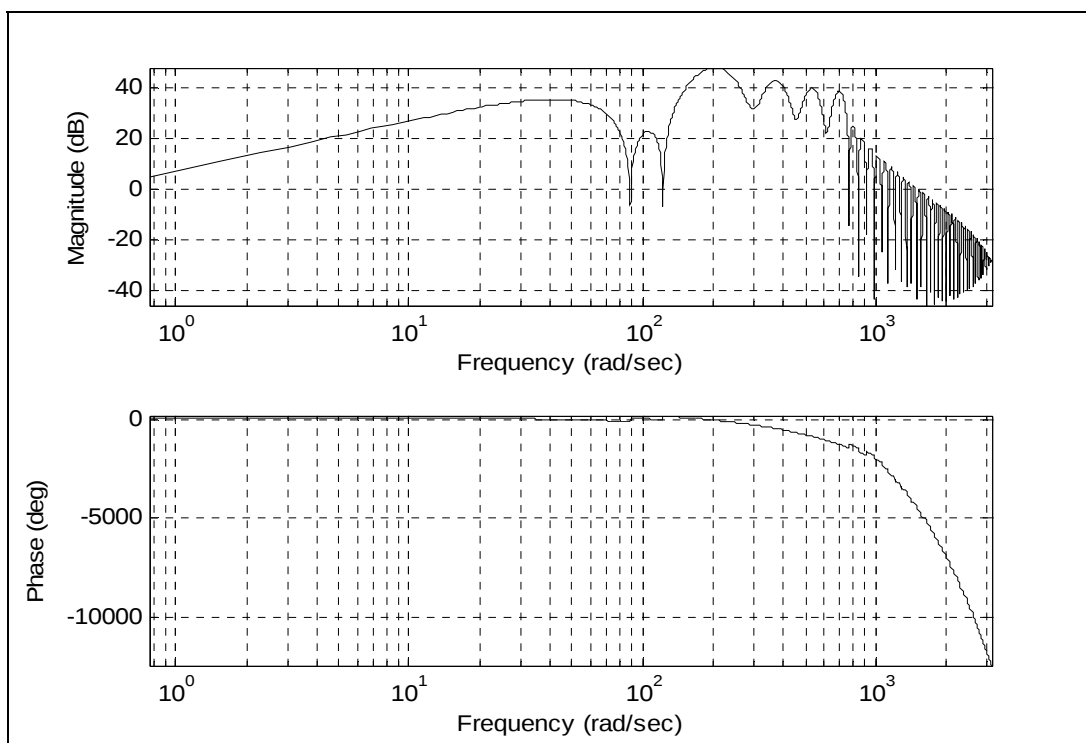


ภาพที่ 27 ความเร็วที่ออกแบบโดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไซนูซอย



ภาพที่ 28 ตำแหน่งที่ออกแบบโดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไชนูซอย

ภาพที่ 29 เป็นกราฟ FFT ที่ใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไชนูซอยในการออกแบบสัญญาณอ้างอิง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ความถี่ในช่วง 90 rad/sec จะมีสัญญาณแอมพลิจูดที่ลดลงในช่วงที่ครอบคลุมความถี่ธรรมชาติของระบบ เนื่องมาจากค่าน้ำหนักที่ใส่เข้าไปในระบบ



ภาพที่ 29 FFT โดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไชนูซอย

ผลและวิจารณ์

ผล

งานวิจัยนี้ได้เก็บบันทึกค่าผลการทดลองของสัญญาณควบคุมทั้งสอง คือ สัญญาณควบคุมของ Bang-Bang ซึ่งเป็นสัญญาณควบคุมที่ไม่ได้ปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสัญญาณอ้างอิง และสัญญาณควบคุมที่ออกแบบโดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไชนูซอย ซึ่งเป็นเทคนิคคอมมานด์เชปปีงที่มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสัญญาณควบคุม แล้วนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่งเป้าหมายของระบบว่าการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นมีความแตกต่างกันแค่ไหน ความรวดเร็วในการเข้าถึงตำแหน่งเป้าหมายมีความรวดเร็วเท่าไร และความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของระบบ

สำหรับผลการทดลองที่จะนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการควบคุมในงานวิจัยนี้ได้ทำการบันทึกผลการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ข้อ ดังต่อไปนี้

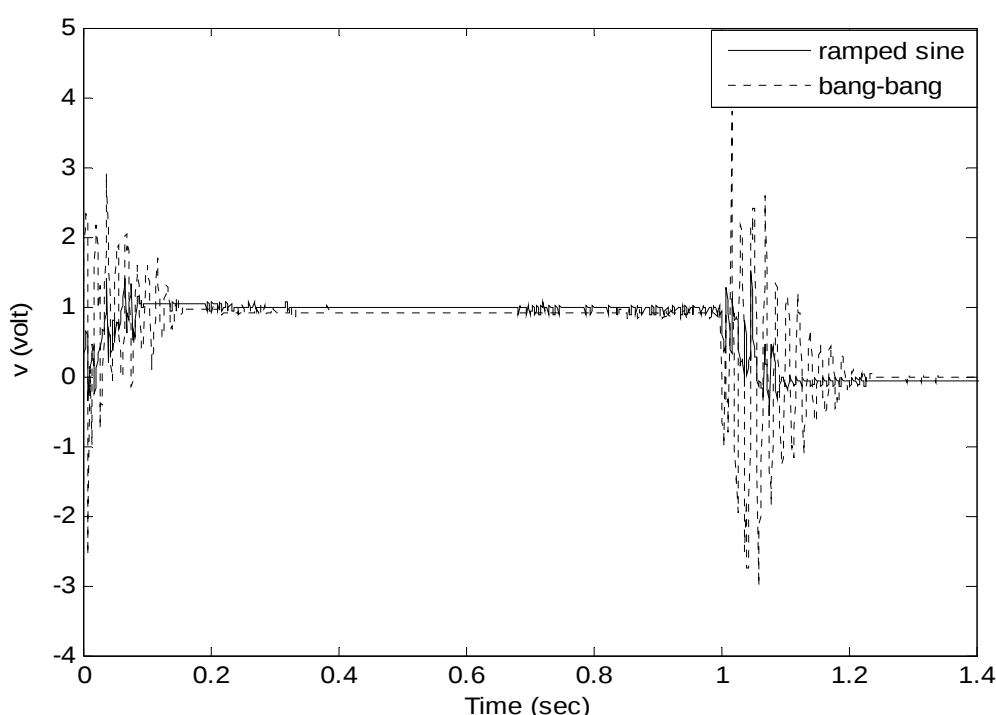
1. ปริมาณกระแสไฟฟ้าหรือพลังงานกระตุ้นที่ใส่เข้าไปในระบบ
2. การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเมื่อระบบเคลื่อนที่ไปถึงที่ตำแหน่งเป้าหมาย
3. ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของระบบเมื่อเคลื่อนที่ไปถึงยังตำแหน่งเป้าหมาย

โดยจากผลการทดลองทั้ง 3 ข้อ ได้ทำการแสดงผลการทดลองด้วยรูปภาพโดยเส้นทึบจะแสดงถึงสัญญาณควบคุมที่ออกแบบโดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไชนูซอย และเส้นประจะแสดงถึงการออกแบบโดยใช้สัญญาณควบคุมของ Bang-Bang

ปริมาณกระแสไฟฟ้าหรือพลังงานกระตุ้นที่ใส่เข้าไปในระบบ

ในการควบคุมระบบต่างๆ ให้เคลื่อนที่นั้น จะต้องมีการใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไปในระบบ เพื่อให้ระบบเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ดังนั้นในระบบควบคุมที่ดีจึงต้องสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายโดยมีอัตราการใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่น้อย

จากภาพที่ 30 เป็นรูปของปริมาณของกระแสไฟฟ้า หรือพลังงานกระตุ้นที่ใส่เข้าไปควบคุม Voice Coil เพื่อให้แขนหัวอ่านเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายโดยจะสังเกตเห็นได้ว่าสัญญาณควบคุมของ Bang-Bang ซึ่งจะใช้ปริมาณของกระแสไฟฟ้าในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหัวอ่านที่มากกว่าสัญญาณควบคุมที่อยู่บนพื้นฐานของฟังก์ชันเร่มไซน์ซอ ซึ่งจะมีปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าน้อย เป็นผลที่ทำให้ระบบควบคุมมีค่า Overshoot ที่น้อยทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่น้อยลง

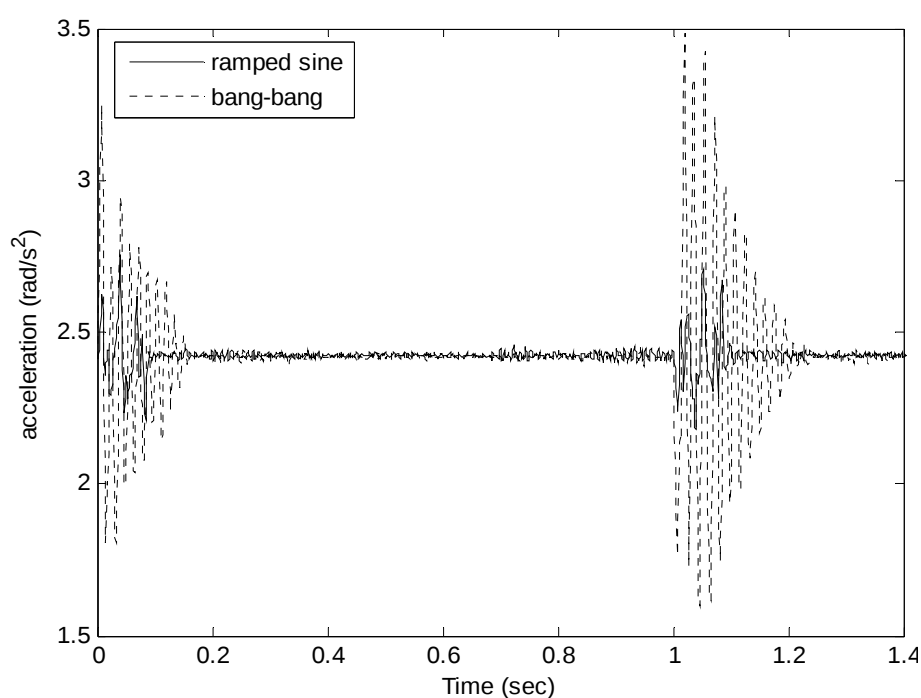


ภาพที่ 30 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ของสัญญาณควบคุมทั้งสอง

การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นเมื่อระบบเคลื่อนที่ไปถึงที่ตำแหน่งเป้าหมาย

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้ได้ทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหัวอ่าน เพื่อลดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเป้าหมาย โดยสาเหตุของการสั่นสะเทือนนี้เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความถี่ของพลังงานกระตุ้นที่มีค่าที่ตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบ โดยทำการลดระดับของพลังงานกระตุ้นให้มีแอมพลิจูดที่น้อยลงที่บริเวณของความถี่ธรรมชาติของระบบ

จากภาพที่ 31 เป็นผลของการสั่นสะเทือนที่ได้เก็บข้อมูลมาจากเซนเซอร์วัดความเร่ง ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นของสัญญาณควบคุมทั้งสอง คือ สัญญาณควบคุมที่ออกแบบโดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไขวชอย และการออกแบบโดยใช้สัญญาณควบคุมของ Bang-Bang โดยจากผลที่ได้ของสัญญาณควบคุมที่ออกแบบโดยใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไขวชอยจะมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นที่น้อยกว่าการออกแบบโดยใช้สัญญาณควบคุมของ Bang-Bang

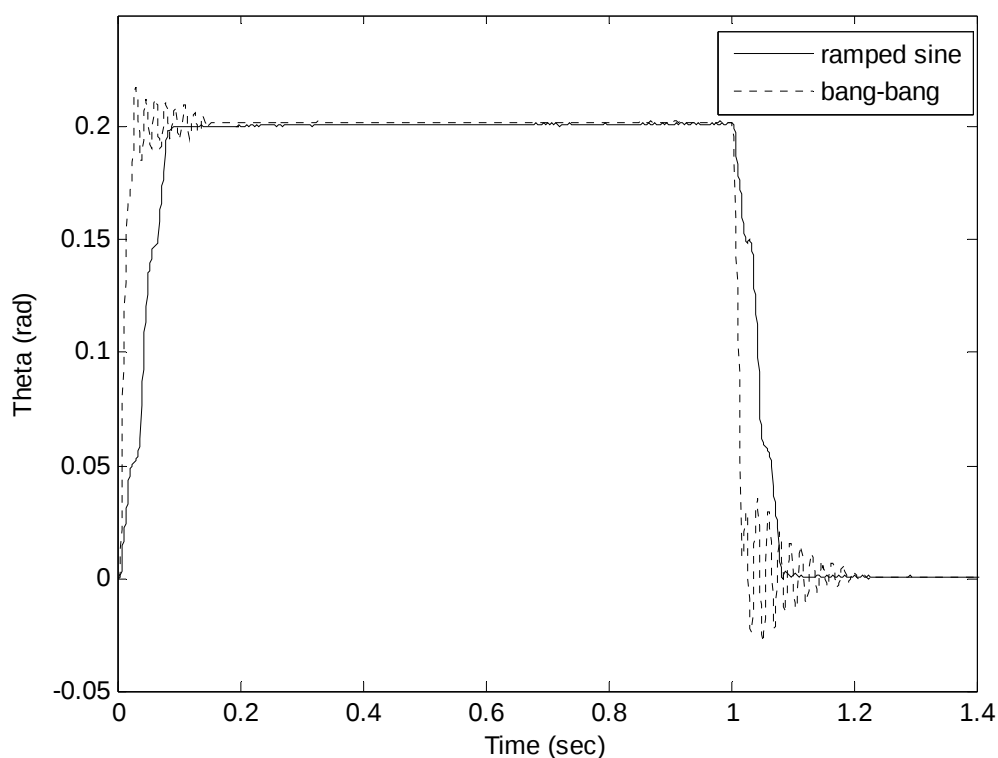


ภาพที่ 31 การสั่นสะเทือนของสัญญาณควบคุมทั้งสอง

ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของระบบเมื่อเคลื่อนที่ไปยังยังตำแหน่งเป้าหมาย

จากภาพที่ 32 เป็นภาพที่แสดงการเคลื่อนที่ของแขนหัวอ่านโดยในการทดลองนี้เราต้องการให้แขนหัวอ่านเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไป 0.2 rad/sec แล้วเคลื่อนที่กลับมาที่ตำแหน่งเดิม ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้แขนหัวอ่านสามารถเคลื่อนที่ไปได้อย่างแม่นยำ และเมื่อดูผลการทดลองในด้านของสั่นสะเทือนของระบบที่ตำแหน่งเป้าหมายจากรูป จะแสดงให้เห็นว่าที่การควบคุมที่ใช้สัญญาณควบคุมของ Bang-Bang จะสามารถที่จะทำให้ระบบเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้รวดเร็ว แต่จะมี Overshoot เกิดขึ้นทำให้ Settling Time มีค่าที่มากขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคคอมมานด์เซปปีงที่อยู่บนพื้นฐานของฟังก์ชันเรมไซนูซอย เข้ามาในการปรับเปลี่ยนสัญญาณอ้างอิง เพื่อลดระดับของพลังงานกระตุ้นให้มีความถี่ที่น้อยลงที่ ความถี่รอบๆ ความถี่ธรรมชาติของระบบโดยจะสังเกตจากเส้นทึบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของ ระบบจะมี Overshoot เกิดขึ้นน้อยลงเป็นผลที่ทำให้ Settling Time ของระบบน้อยลง ซึ่งเป็นผลที่ดี สำหรับระบบที่ต้องการการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 32 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของระบบของสัญญาณควบคุมทั้งสอง

ในงานวิจัยนี้ต้องการให้แขนของหัวอ่านเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งเป็นระยะทาง 0.2 rad ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้มุมที่แขนหัวอ่านเคลื่อนที่ได้จริงจะอยู่ที่ 0.2003 rad ซึ่งแสดงว่า ในการควบคุมระบบมีความคลาดเคลื่อนที่น้อย ซึ่งอยู่ที่ 0.3 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4 ค่า Settling Time ของสัญญาณควบคุมทั้งสอง

สัญญาณควบคุม	Settling Time
สัญญาณควบคุมของ Bang-Bang	0.142 sec
พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไชนูซอย	0.082 sec

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า สัญญาณควบคุมที่ใช้พื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไชนูซอยจะสามารถลดค่าการสั่นสะเทือนของระบบได้ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้จากค่า Overshoot ที่ลดลงซึ่งเป็นผลที่ทำให้ระยะเวลาในการเข้าถึงตำแหน่งเป้าหมายของระบบมีค่าที่รวดเร็วกว่าการใช้สัญญาณควบคุมของ Bang-Bang ซึ่งมีการเคลื่อนที่ที่รวดเร็วแต่จะเกิดการสั่นสะเทือนที่มาก ถ้าเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองจะเห็นได้ว่า Settling Time ของสัญญาณควบคุมทั้งสองมีค่าที่แตกต่างกันถึง 0.06 sec

วิจารณ์

1. การหาค่าความถี่ธรรมชาติของแขนห้วนอ่านจากภาพที่ 16 นั้น ได้แสดง กราฟ FFT ของระบบซึ่งจากกราฟจะสังเกตเห็นได้ว่าที่ 90 rad/s นั้น จะมีแอมพลิจูดที่สูงขึ้น ซึ่งก็คือความถี่ธรรมชาติของระบบ แต่จากสมการการเคลื่อนที่ของระบบนั้น จะสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติได้อยู่ที่ 84.5 rad/s ซึ่งมีค่าที่คลาดเคลื่อนอยู่เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของระบบนั้นอาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง

2. ค่า Settling Time ที่ได้ในงานวิจัยนี้มีค่าที่ต่ำกว่าของจริง เป็นผลที่เนื่องมาจากงานวิจัยนี้ได้ทำการติดอุปกรณ์ในการวัดค่า เช่น เซนเซอร์วัดความเร็ว เช่น เซนเซอร์วัดมุม ดังนั้นจึงเป็นผลที่สำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของแขนห้วนลดลง

3. ฮาร์ดแวร์เป็นระบบที่มีความไวต่อสิ่งรบกวนที่สูง แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองในระบบเปิด ดังนั้น จึงมีปัจจัยต่างๆ ที่เข้ามารบกวนระบบซึ่งอาจมีผลต่อประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของระบบ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหัวอ่านจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งนั้น เมื่อระบบเคลื่อนที่ไปจนถึงตำแหน่งเป้าหมายแล้วระบบจะเกิดการสั่นสะเทือนขึ้น ซึ่งมีผลที่ทำให้ความแม่นยำในการอ่านหรือเขียนข้อมูลมีความล่าช้าเกิดขึ้นซึ่งไม่เป็นผลที่ดี เพราะความรวดเร็วในการอ่านหรือเขียนข้อมูลนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลที่มาจากความถี่ธรรมชาติในตัวของระบบเอง

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีทางการอ่านเขียนข้อมูลได้ใช้ตัวกรองสัญญาณแบบ Notch-Filtered เพื่อกรองความถี่ในช่วงของความถี่ธรรมชาติออก แต่สัญญาณแบบ Notch-Filtered นั้นไม่สามารถกรองความถี่ได้ในช่วงที่กว้าง จึงไม่สามารถทำงานได้ครอบคลุมทุกระบบได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเทคนิคคอมมานด์เชปป์มาทำการควบคุม ซึ่งสามารถทำงานได้ครอบคลุมความถี่ได้มากกว่าการใช้ Notch-Filtered การควบคุมนี้อยู่บนพื้นฐานของฟังก์ชันเริ่มไซนูซอยเข้ามาทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของสัญญาณอ้างอิงของระบบ (Reference Signals) ซึ่งได้แก่ ความเร่ง ความเร็ว และตำแหน่งการเคลื่อนที่ของระบบ เพื่อลดระดับของพลังงานกระตุ้นให้มีความถี่ที่น้อยลงเมื่ออยู่ในช่วงของความถี่ธรรมชาติของแขนของหัวอ่าน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การนำเทคนิคคอมมานด์เชปป์มาใช้ในการควบคุมระบบนั้นสามารถที่จะลดการสั่นสะเทือนเมื่อระบบเคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่งเป้าหมายได้ดี ซึ่งมี Settling Time ที่น้อยกว่าการควบคุมที่ไม่ได้ใช้เทคนิคคอมมานด์เชปป์ จึงเป็นผลที่ทำให้แขนหัวอ่านมีการเคลื่อนที่ไปถึงยังข้อมูลที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วขึ้น

ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการติดเซนเซอร์วัดมุมและเซนเซอร์วัดความเร่ง ซึ่งอาจจะทำให้ระบบพลศาสตร์ของระบบมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เพื่อให้ระบบควบคุมมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นควรใช้อุปกรณ์ที่ไม่ทำให้ระบบพลศาสตร์ของระบบมีค่าเปลี่ยนแปลง และควรใช้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการวัดที่มีความละเอียดที่สูงเพื่อให้ได้ค่าที่มีความถูกต้องมากกว่าเดิม

การใช้ตัวควบคุมแบบ PD-Controller อาจทำให้ระบบเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ ซึ่งจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมมีค่าที่ต่ำลง ดังนั้นจึงควรใช้ตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การใช้เทคนิค QFT หรือ Optimal control เข้ามาในการหาตัวควบคุม จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการทำงานมากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กนกศักดิ์ เอี่ยมสมัย และ วิทิตนัฏ รัตนกุลชัย. 2551. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบแม่นยำตรงของแขนกลชนิดยืดหยุ่นได้. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22: 399-404.

มนตรี พิรุณเกษตร. 2548. การสั่นสะเทือนเชิงกล. สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ.

วโรดม ตู้จินดา. 2550. การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมทางวิศวกรรม. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สิริพงศ์ เอี่ยมชัยมงคล. 2549. การศึกษาเบื้องต้นในการวัดการกระจัดของการสั่นสะเทือนแบบฮาร์มอนิกโดยใช้สเตรนเกจ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20. ตุลาคม 2549.

หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ. 2551. การศึกษาและปรับปรุงคุณภาพของรถแทรกเตอร์สี่ล้อที่ใช้ในการเกษตรของไทยด้วยระเบียบวิธีการทางวิศวกรรมการสั่นสะเทือน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22: 370-375.

Chatlatanagulchai, W. 2006. Command Shaping Applied to a Flexible Robot with Configuration-Dependent Resonance. **Proc. American Control Conference Minneapolis: 1766-1711.**

Dorf, R.C. and H.B. Robert. 2005. **Modern Control Systems.** Pearson Educational International, the United States of America.

Ho, H.T. 1997. Fast Servo Bang-Bang Seek Control. **IEEE Transactions on Magnetics.** vol.33, no.6, November 1997.

- Isayed, B.M and A.H. Muhammad. 2007. A Nonlinear PID Control Scheme for Hard Disk Drive Servosystems. **Mediterranean Conference on Control and Automation**, July 2007.
- K.A. Gul. 2003. **Command Shaping Control for the Z-axis of a Wire Bonder for Reducing Residual Vibration**. M.S. thesis M.E., Purdue University.
- Liu, K.P. 2007. Experimental Evaluation of Preshaped Inputs to Reduce Vibration for Flexible Manipulation. **The Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics**, August 2007: 2411-2415.
- Li, Y. 2004. A Nonlinear Control Scheme for Fast Settling in Hard Disk Drives. **IEEE Transactions on Magnetics**, vol 40, no 4, July 2004: 2086-2088.
- Chooprasird, K and V. Sangveraphunsiri. 2008. Embedded Force Control for a Hybrid 5-Axis H-4 Family Parallel Manipulator. **The 22nd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand**: 308-313.
- Meckl, P.H. 1988. **Control of vibration in mechanical system using shaped reference input**. Ph.D. Dissertation Dept. Mechanical Eng, Massachusetts Institute of Technology.
- Meckl, P.H. 1994. Robust Motion Control of Flexible Systems Using Feedforward Forcing Functions. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**. vol. 2, no. 3, September 1994: 245-254.
- Mimmi, G. and P. Pennacchi. 2001. Pre-shaping motion input for a rotating flexible link. **International Journal of Solids and Structures** 38(2001): 2009-2023.
- Mohamed, Z. and M.O.Tokhi. 2004. Command shaping techniques for vibration control of a flexible robot manipulator. **Mechatronics** 14: 69-90.

Reynolds, M.C. 2004. **The Application of command shaping to The Tracking Problem.**

Ph.D. Thesis M.E. Purdue University.

Kinceler, R and P. Meckl. 1995. Input Shaping for Nonlinear Systems. **American Control Conference**, June 1995: 914-918.

Takaishi, K. 1999. Fast Seek Control Taming Actuator Vibration for Magnetic Disk Drives. **IEEE**. 0-7803-5555-5/99.

Takaishi, K. and S. Saito. 2003. Seek Control and Settling Control Taming Actuator Resonance of Hard Disk Drives. **IEEE Transactions on Magnetics**. Vol. 39, No. 2:838-843.

Zuo, K. and D. Wang. 1992. Closed Loop Shaped-Input Control of a Class of Manipulators with a Single Flexible Link. **International Conference on Robotic and Automation**: 782-787.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

โปรแกรม Matlab สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบในการทำ System Identification

โปรแกรม Matlab สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบในการทำ System Identification

```
clear  
close all  
  
%load raw data  
V = load('D:\thesis\AOOK\SID2\V_5.txt');  
theta1 = load('D:\thesis\AOOK\SID2\THETA_5.txt');  
  
%time  
ts = 0.001; %sampling time  
t = 0:ts:ts*(length(V)-1);  
  
figure(1),  
subplot(311),plot(t,theta1)  
subplot(312),plot(t,V)
```

ภาคผนวก ข

โปรแกรม Matlab สำหรับการใช้ Fast Fourier Transform
หาค่าความถี่ธรรมชาติในการทดลองจริง

โปรแกรม Matlab สำหรับการใช้ Fast Fourier Transform
หาค่าความถี่ธรรมชาติในการทดลองจริง

```
function [w,X] = MyFFT(t,x,N,showplot)
    if ~exist('N') | isempty(N) | N<length(x)
        p = ceil(log(length(x))/log(2))+2;
        N = 2^p;
    end
    X = fft(x,N)/sqrt(N);
    X = X(1:N/2);
    dt = t(2)-t(1);
    df = 1/(dt*N);
    f = (0:N/2-1)*df;
    w = 2*pi*f;
    if exist('showplot') & lower(showplot)=='plot'
        mag = 20*log10(abs(X));
        ph = unwrap(angle(X))*180/pi;

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

        subplot(212)
        semilogx(w,ph)
        axis([min(w) max(w) min(ph) max(ph)])
```

```
grid on

    xlabel('Frequency (rad/sec)')
    ylabel('Phase (deg)')

end

clear

close all


%load raw data
x = load('D:\thesis\AOOK\SID2\FFT_5.txt');

%time

%ts = 0.0005; %sampling time
ts = 1000/1000000;
t = 0:ts:ts*(length(x)-1);
MyFFT(t,x,[],'plot')
```

ภาคผนวก ค

โปรแกรม Matlab สำหรับเทคนิคคอมมานด์เซปป์ในการปรับเปลี่ยนโครงสร้าง
ของสัญญาณอ้างอิง (Reference Signals)

**โปรแกรม Matlab สำหรับเทคนิคคอมมานด์เซปิ้งในการปรับเปลี่ยนโครงสร้าง
ของสัญญาณอ้างอิง (Reference Signals)**

```

clear
close all
clc
%Ramped sine desired trajectories.....
load alpha
ts = 0.001; %sampling time (s)
T = 1; %end time (s)
tt = 0:ts:2*T-ts; %time (s)
J = 1; %inertia
wn = [90]; %natural frequencies (rad/s)
Yf = 0.2; %final position (rad)
Fmax = 1200; %max torque (Nm)
rho = 0.08; %weight in the cost function
L=10; %number of sine terms
[B,Tf]=rs_coefs(wn,rho,L, Yf, Fmax, J);
t=0:ts/Tf:1; %dimensionless time (at sample rate)
F=forcfunc(t,B,a); %dimensionless force (torque)
tdim=0:ts:Tf; %dimensional time (s)
%SF = max(F);
SF = 1; % Modified by prof. Meckl at 13th of August, 2004
Fdim=F*Fmax/SF; % dimensional torque (N-m)
ndif=length(tdim)-length(Fdim);
Fdim=[Fdim zeros(1,ndif)];
alphard(1)=0; alphas(1)=0;
    for i=1:length(Fdim)
        alphas2d(i) = Fdim(i);
    end

```

```

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

```

%Square-wave desired trajectories.....

```
alphas2d_max = Fmax;
```

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

```

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

```

%Continuous desired trajectories.....

```

%Square-wave
alphas2d = [alphas2d, -alphas2d];
alphasd = [alphasd, -alphasd];
    for i=1:length(alphasd)-1
        alphas(i+1) = alphas(i)+ts*alphasd(i);
    end
%Ramped sine
alphar2d = [alphar2d, -alphar2d];
alphard = [alphard, -alphard];
    for i=1:length(alphard)-1
        alphar(i+1) = alphar(i)+ts*alphard(i);
    end
%Plot.....
figure(1)
subplot(221),plot(tt,alphar2d)
subplot(222),plot(tt,alphard)
subplot(223),plot(tt,alphar)
figure(2)
subplot(221),plot(tt,alphas2d)
subplot(222),plot(tt,alphasd)
subplot(223),plot(tt,alphas)
figure(3)
%MyFFT(tdim,Fdim,[],'plot');
MyFFT(tt,alphar2d,[],'plot');
figure(4)
MyFFT(tt,alphard,[],'plot');
figure(5)
MyFFT(tt,alphar,[],'plot');
figure(6)
MyFFT(tt,alphas2d,[],'plot');

```

```

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

        %write to files
fid=fopen('re-alphas2d_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphas2d);
status=fclose(fid);
fid=fopen('re-alphard_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphard);
status=fclose(fid);
fid=fopen('re-alphas_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphas);
status=fclose(fid);
fid=fopen('re-alphas2d_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphas2d);
status=fclose(fid);
fid=fopen('re-alphasd_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphasd);
status=fclose(fid);
fid=fopen('re-alphas_v2.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',alphas);
status=fclose(fid);

```

ภาคผนวก ง

ผลจากการทดลองเปรียบเทียบการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปปีง
กับไม่ใช่เทคนิคคอมมานด์เซปปีง

**ผลจากการทดลองเปรียบเทียบการใช้เทคนิคคอมมานด์เซปิ้ง
กับไม่ใช้เทคนิคคอมมานด์เซปิ้ง**

```

clear
close all
clc
ts = 0.001;
T = 2;
t = 0:ts:T;

%load raw data
vr = load('D:\thesis\AOOK\goback\vr_2.txt');
vs = load('D:\thesis\AOOK\goback\vs_2.txt');
alphar = load('D:\thesis\AOOK\goback\thetar_2.txt');
alphas = load('D:\thesis\AOOK\goback\thetas_2.txt');
accr = load('D:\thesis\AOOK\goback\accr_2.txt');
accs = load('D:\thesis\AOOK\goback\accs_2.txt');

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

figure(1),
plot(t,vr(1:length(t))),hold on, plot(t,vs(1:length(t)),'r'),hold off
figure(2),
plot(t,alphar(1:length(t))),hold on, plot(t,alphas(1:length(t)),'r'),hold on, plot(t,ref),hold off
figure(3),
plot(t,accr(1:length(t))),hold on, plot(t,accs(1:length(t)),'r'),hold off

```

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายนิติรงค์ พงษ์พานิช	
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 28 กันยายน 2527	
สถานที่เกิด	จังหวัดกาญจนบุรี	
ประวัติการศึกษา	ประถมศึกษา	โรงเรียนเขมรภัทร์ศึกษา
	มัธยมศึกษา	โรงเรียนสารสิทธิ์พิทยาลัย
	อุดมศึกษาปริญญาตรี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน	
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสนับสนุนคุณภาพงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2551 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	