



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

วิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชา

เรื่อง การควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณสำหรับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

Quantitative Feedback Control of Hard Disk Actuator

นามผู้วิจัย นายภูวดล โพธิ์แดง

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ยวีทิต ฉัตรรัตนกุลชัย, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชัย ศิวัะ โกศิษฐ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กาญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณสำหรับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

Quantitative Feedback Control of Hard Disk Actuator

โดย

นายภูวดล โพธิ์แดง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2552

ภูวดล โพธิ์แดง 2552: การควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณสำหรับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
อาจารย์วิทิต จัตรรัตนกุลชัย, Ph.D. 107 หน้า

หัวอ่านฮาร์ดดิสก์จำเป็นต้องเคลื่อนที่ไปยังแทร็กที่ต้องการด้วยความเร็วและความแม่นยำสูง การออกแบบระบบควบคุมของหัวอ่านเป็นสิ่งที่ท้าทายเนื่องจากหลายปัจจัย ได้แก่ ความไม่แน่นอนของแบบจำลอง สภาพการใช้งานที่มีแรงสั่นสะเทือนจากภายนอก สัญญาณรบกวนที่เซ็นเซอร์ และความต้องการประสิทธิภาพที่สูง เทคนิคการควบคุมที่ใช้กับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบัน ไม่ได้นำสิ่งเหล่านี้มาพิจารณาทั้งหมด ส่งผลให้ประสิทธิภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่านไม่ดีเท่าที่ควร

บทความนี้นำทฤษฎีการควบคุมย้อนกลับเชิงปริมาณ (Quantitative feedback theory; QFT) มาใช้เพื่อการออกแบบระบบควบคุมหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ QFT เป็นเทคนิคการออกแบบเชิงความถี่ ที่ไม่ต้องอาศัยแบบจำลองที่แม่นยำ เนื่องจากระบบควบคุมถูกออกแบบมาจากเซตของฟังก์ชันถ่ายโอน นอกจากนี้เรายังสามารถกำหนดคุณสมบัติด้านการลดผลกระทบของการสั่นสะเทือนภายนอก (Disturbance rejection) และคุณลักษณะของการเคลื่อนที่ที่ต้องการ (Tracking specification) จากการจำลองและการทดลองจริง จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมหัวอ่านฮาร์ดดิสก์นี้ ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Puwadon Poedaeng 2009: Quantitative Feedback Control of Hard Disk Actuator.
Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical
Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor:
Mr. Withit Chatlatanagulchai, Ph.D. 107 pages.

Hard disk actuator must be fast and accurate. Control design of the hard disk actuator is challenging due to uncertainty in the hard disk actuator's model, input disturbance, external vibration, sensor noise, and tight performance specification. This paper presents control design based on the quantitative feedback theory (QFT), which has not been used in any literature. QFT is a frequency-domain method. The hard-disk controller is designed on a set of uncertain model called plant template. Specifications such as disturbance rejection and tracking can be formulated in frequency domain. Both simulation and experimental results have shown the effectiveness of the controller.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. วิทิต นัตรรัตนกุลชัย ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้การช่วยเหลือในเรื่องการวางแผนการดำเนินงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนการให้คำปรึกษา คำแนะนำ และการตรวจแก้ข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิชัย ศิวะโกศิษฐ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ ดร. ธเนศ อรุณศรีโสภณ ประธานการสอบ และกราบขอบพระคุณ ดร. กฤษดา วรรณทอง ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกสถาบัน ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ตลอดจนพี่น้อง และเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ชี้แนะ ให้คำปรึกษา และสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ภูวดล โพธิ์แดง

มกราคม 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	27
อุปกรณ์	27
วิธีการ	31
ผลและวิจารณ์	50
ผล	50
สรุปและข้อเสนอแนะ	60
สรุป	60
ข้อเสนอแนะ	60
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	61
ภาคผนวก	64
ภาคผนวก ก รูปแบบ ขนาด และการพัฒนาของฮาร์ดดิสก์	65
ภาคผนวก ข การหาความไม่แน่นอนของระบบและการสร้าง Plant template	72
ภาคผนวก ค การสร้างขอบเขตของ QFT	77
ภาคผนวก ง การเปรียบเทียบผลของการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูงกับการ ออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่ต่ำ	82
ภาคผนวก จ Matlab program code	91
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	107

สารบัญตาราง

ตารางผนวกที่

หน้า

ข1 ผลค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้มาจากการหาเอกลักษณ์ของระบบ

74

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์	6
2	ส่วนประกอบของแผ่น Platter (แผ่นจานดิสก์)	7
3	การออกแบบตัวควบคุมด้วยระบบเปิด	13
4	กระบวนการออกแบบตัวควบคุมด้วย QFT	15
5	Region of plant parametric uncertainty	17
6	แสดง Bode diagram บนช่วงความถี่เปลี่ยนแปลงในค่าตัวแปรต่างๆ ของระบบ	18
7	Plant template ที่ความถี่เท่ากับ 1 rad/s	18
8	Plant template ในทุกความถี่ที่สนใจ	19
9	ภาพระบบการออกแบบตัวควบคุมด้วย QFT แบบ Multi input single output	20
10	ภาพคุณสมบัติเชิงเวลาของระบบเมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นไม่เท่ากับศูนย์	22
11	ค่าขอบเขตบน (Upper bound) ขอบเขตล่าง (Lower bound) และ Plant input ของระบบ	22
12	Step forcing function ของ Upper bound และ Lower bound	23
13	ภาพคุณสมบัติเชิงความถี่ของ Tracking specification	25
14	ลักษณะของการต่ออุปกรณ์ในการทดลอง	27
15	Data acquisition card (DAQ) NI PCI 6221	28
16	วงจรจับมอเตอร์กระแสตรง รุ่น Sabertooth2x10	29
17	เอนโคเดอร์เซ็นเซอร์ (Encoder Sensor) ของบริษัท Omron รุ่น E6b2-cwz6c	29
18	ชุดทดลองหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (Maxtor รุ่น Diamondmax plus 8 ขนาดความจุ 40 GB)	30
19	Diagram ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์	32
20	ผลการเปรียบเทียบค่าเอกลักษณ์ของระบบ (System identification) ที่เป็นค่าจริง	34
21	กระบวนการในการออกแบบตัวควบคุมด้วย QFT	35
22	Plant template ที่ถูกสร้างขึ้นจากทุกความถี่ที่สนใจ	36
23	ผลลัพธ์ที่เกิดจากการนำค่าต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบด้วย QFT มากำหนดจุดบน แผนภูมินิโคลส์ (กำหนดขอบเขตแบบ Output disturbance rejection)	37
24	ผลของการตอบสนองเชิงเวลาที่เกิดจากการนำค่า T_{RU} และ T_{RL} มาทดสอบ	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	Bode diagram ของขอบเขตแบบ Tracking ทั้งในส่วนขอบเขตบนและขอบเขตล่าง	40
26	ผลของขอบเขตแบบ Tracking ที่ความถี่ต่างๆ ที่เลือก	40
27	การนำขอบเขตทั้งหมดที่สร้างขึ้นมารวมให้อยู่ภายในรูปเดียวกันและทำการรวมขอบเขตทั้งหมดเข้าด้วยกัน	41
28	ลักษณะของ Nominal plant กับขอบเขตทั้งหมดก่อนการออกแบบตัวควบคุม	43
29	การจัด Nominal plant ให้สอดคล้องกับขอบเขตทั้งหมด	43
30	ผลของการออกแบบตัวฟิลเตอร์โดยการกำหนดจุดบน Bode diagram ให้ความถี่ของตัวควบคุมอยู่ในภายใต้ขอบเขตที่ต้องการ	44
31	การออกแบบตัวฟิลเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว	45
32	ผลการทดสอบการทำงานในโดเมนเชิงความถี่ของ Output disturbance rejection	46
33	ผลการจำลองการทำงานในโดเมนเชิงความถี่ของขอบเขตแบบ Tracking	47
34	ผลของเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบเพื่อใช้ดูผลตอบสนองในโดเมนเชิงเวลาของขอบเขตต่างๆ ที่มีผลต่อระบบ	48
35	ผลการจำลองผลการตอบสนองของระบบในโดเมนของ Output disturbance rejection	48
36	ผลการจำลองการทำงานในโดเมนเวลาของ Tracking specification	49
37	ผลการจำลองโดเมนเวลาของ Tracking specification (พิจารณาในระยะใกล้)	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 ฮาร์ดดิสก์ชนิดต่างๆ (ก) และฮาร์ดดิสก์แบบ SSD (ข)	66
ก2 องค์ประกอบภายในฮาร์ดดิสก์ในปี 1997 (ก) และในปัจจุบัน (ข)	67
ก3 ขนาดฮาร์ดดิสก์แบบเก่า (ก) และขนาดฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบัน (ข) ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 8 นิ้ว 5.25 นิ้ว 3.5 นิ้ว 2.5 นิ้ว 1.8 นิ้ว และ 1 นิ้ว	67
ก4 ลักษณะของฮาร์ดดิสก์ (ก) (ข) และ (ค) และ การเชื่อมต่อ แบบ IDE และ E-IDE (ง)	68
ก5 ลักษณะ (ข) และการเชื่อมต่อฮาร์ดดิสก์แบบ SCSI (ก)	69
ก6 ลักษณะและการเชื่อมต่อของฮาร์ดดิสก์แบบ Serial ATA (ก) (ข) และ (ค)	70
ก7 ลักษณะของฮาร์ดดิสก์จากภายใน (ก) และ (ข) สัญลักษณ์ภายนอก (ค)	71
ก8 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์	71
ค1 ตารางแผนภูมิโคสส์	78
ง1 ขอบเขตแบบ Output disturbance rejection เมื่อไม่ทำการออกแบบ ตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง	84
ง2 ขอบเขตแบบ Output disturbance rejection เมื่อทำการออกแบบ ตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง	84
ง3 ขอบเขตแบบ Tracking เมื่อไม่ทำการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง	85
ง4 ขอบเขตแบบ Tracking เมื่อทำการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง	85
ง5 ขอบเขตแบบ Output disturbance rejection เมื่อไม่ทำการออกแบบ ตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง	86
ง6 ขอบเขตแบบ Output disturbance rejection เมื่อทำการออกแบบ ตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง	86
ง7 ขอบเขตแบบ Tracking เมื่อไม่ทำการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง	87
ง8 ขอบเขตแบบ Tracking เมื่อไม่ทำการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง ซึ่งทำการขยายภาพเพื่อให้เห็นการทำงานภายใต้ขอบเขตที่กำหนด	87
ง9 ขอบเขตแบบ Tracking เมื่อทำการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง	88
ง10 ขอบเขตแบบ Tracking เมื่อทำการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง ซึ่งทำการขยายภาพเพื่อให้เห็นการทำงานภายใต้ขอบเขตที่กำหนด	88

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง11 ค่าความผิดพลาดในสถานการณ์จำลองเมื่อไม่มีการออกแบบ ตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง	89
ง12 ค่าความผิดพลาดจากสถานการณ์จำลองเมื่อมีการออกแบบ ตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง	89

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

u_r	=	สัญญาณตัวควบคุม
P	=	ระบบ
y_r	=	สัญญาณของระบบที่ต้องการ
d	=	สิ่งรบกวนของระบบ
r	=	สัญญาณอ้างอิงของระบบ
P^{-1}	=	ส่วนกลับของระบบที่เราสนใจ
H	=	เซ็นเซอร์
G	=	ตัวควบคุม
F	=	ตัวฟิลเตอร์
P_d	=	ระบบของสิ่งรบกวนภายนอก
n	=	สัญญาณรบกวน
u	=	สัญญาณตัวควบคุม
y	=	ค่าสัญญาณขาออกของระบบ
ω	=	ค่าความถี่
d_i	=	สิ่งรบกวนภายในของระบบ
d_o	=	สิ่งรบกวนภายนอกของระบบ
δ_{dl}	=	ค่าคงที่ในการใช้กำหนดคุณสมบัติแบบการลดสิ่งรบกวนภายในระบบ
δ_{do}	=	ค่าคงที่ในการใช้กำหนดคุณสมบัติแบบการลดสิ่งรบกวนภายนอกระบบ
F_m	=	โมเดลที่เราต้องการให้ระบบเคลื่อนที่ตาม
δ_m	=	ค่าคงที่ในการใช้กำหนดคุณสมบัติแบบการเคลื่อนที่ตามโมเดล
α	=	ค่าขอบเขตล่างของระบบ
β	=	ค่าขอบเขตบนของระบบ
δ_n	=	ค่าคงที่ในการใช้กำหนดคุณสมบัติแบบการลดสัญญาณรบกวน
δ_c	=	ค่าคงที่ในการใช้กำหนดคุณสมบัติแบบการใช้พลังงานของระบบ
ξ	=	สัมประสิทธิ์ค่าความหน่วงของระบบ
Mp	=	Maximun over shoot
t_{RU}	=	Rise time ของขอบเขตบน
t_{RL}	=	Rise time ของขอบเขตล่าง

ω_n = เป็นความถี่ที่ใช้ในการออกแบบ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

a = เป็นตัวชิโรที่เพิ่มเข้ามาที่ขอบเขตบนของระบบ

a_1 = เป็นตัวโพลที่เพิ่มเข้ามาที่ขอบเขตล่างของระบบ

a_2 = เป็นตัวโพลที่เพิ่มเข้ามาที่ขอบเขตล่างของระบบ

a_3 = เป็นตัวโพลที่เพิ่มเข้ามาที่ขอบเขตล่างของระบบ

GB = ขนาดความจุของฮาร์ดดิสก์มีหน่วยเป็นจิกะไบต์

T = ค่าทอร์กที่เกิดขึ้นในระบบ

c = ค่าความหน่วงของระบบ

θ = มุมของหัวอ่านที่เคลื่อนที่ไป

k = ค่าคงของสปริง

J = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

K_d = ค่า Motor drive constant

V = ค่าความดันที่ป้อนให้กับระบบ

I = ค่ากระแสไฟฟ้าในขดลวด

R_m = ค่าความต้านทานในขดลวดของมอเตอร์

K_b = ค่ากระแสไหลย้อนกลับในขดลวดของมอเตอร์

K_m = ค่า Motor torque constant

n = จำนวนข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

E = ค่า Minimum square error

N = จำนวนสมาชิกของเซตความผิดพลาดทั้งหมดในช่วงที่กำหนด

X_{RMS} = ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย

K_p = อัตราการขยาย

K_d = ตัว Differentiator

K_i = ตัว Integrator

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

LTI	=	Linear time invariant
QFT	=	Quantitative feedback theory
MISO	=	Multi input single output
MIMO	=	Multi input multi output
SISO	=	Single input single output

การควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณสำหรับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

Quantitative Feedback Control of Hard Disk Actuator

คำนำ

ฮาร์ดดิสก์ (Hard disk) หรือ จานบันทึกแบบแข็ง (ศัพท์บัญญัติ) คือ อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่บรรจุข้อมูลแบบไม่ลบเลือน มีลักษณะเป็นจานโลหะที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กซึ่งหมุนอย่างรวดเร็วเมื่อทำงาน การติดตั้งเข้ากับตัวคอมพิวเตอร์สามารถทำได้ผ่านการต่อเข้ากับมาเธอร์บอร์ด (Motherboard) ที่มีอินเตอร์เฟซแบบขนาน (PATA) แบบอนุกรม (SATA) แบบเล็ก (SCSI) (ภาพผนวกที่ ก5) รวมไปถึงอินเตอร์เฟซอนุกรมแบบต่อนอก (eSATA) โดยในปี 2008 ได้มีการพัฒนาเป็นแบบ Hybrid drive และ SSD (ภาพผนวกที่ ก1) นอกจากนี้ฮาร์ดดิสก์ยังสามารถต่อเข้ากับเครื่องจากภายนอกโดยผ่านทางสายยูเอสบี หรือสายไฟร์ไวร์ได้ ทำให้การใช้ฮาร์ดดิสก์มีความสะดวกยิ่งขึ้นในกรณีที่ไม่มีคอมพิวเตอร์ถาวรเป็นของตนเอง

ฮาร์ดดิสก์ที่มีกลไกแบบปัจจุบันถูกประดิษฐ์ขึ้นเมื่อ พ.ศ. 2499 (1956) โดยนักประดิษฐ์คนบุกเบิกแห่งบริษัทไอบีเอ็ม เรย์โนลด์ จอห์นสัน ซึ่งในขณะนั้นฮาร์ดดิสก์ (ภาพผนวกที่ ก2) มีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ (มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 นิ้ว) และมีความจุเพียงระดับเมกะไบต์เท่านั้น ซึ่งในปัจจุบันเป็นระดับกิกะไบต์ ($1,024 \text{ MB} = 1 \text{ GB}$) ในยุคแรกใช้ชื่อเรียกว่า “ฟิกส์ดิสก์ (Fixed disk)” หรือจานบันทึกที่ติดอยู่กับที่ ต่อมาภายหลังจึงเรียกว่า “ฮาร์ดดิสก์ (Hard disk) จานบันทึกแบบแข็ง” เพื่อจำแนกประเภทออกจากฟลอยด์ดิสก์ (จานบันทึกแบบอ่อน)

ตั้งแต่เข้าสู่ช่วงคริสต์ศตวรรษที่ 21 เป็นต้นมา ฮาร์ดดิสก์สามารถพบได้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป ไม่เฉพาะภายในคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องเท่านั้น เช่น เครื่องเล่นเอ็มพีที เครื่องบันทึกภาพดิจิทัล กล้องถ่ายรูป คอมพิวเตอร์ขนาดพกพา PDA และในปี 2548 เริ่มมีการติดตั้งฮาร์ดดิสก์ไว้ในโทรศัพท์มือถือบางรุ่นด้วย (โนเกียและซัมซุง สองบริษัทผู้ผลิตและจำหน่ายโทรศัพท์มือถือ 2 รายแรกที่มีการติดตั้งฮาร์ดดิสก์ภายในโทรศัพท์เคลื่อนที่)

ประสิทธิภาพการทำงานของฮาร์ดดิสก์แปรผันตรงกับความจุ (ความจุมาก→ประสิทธิภาพการทำงานมาก) และปัจจุบันนี้ตลาดมีความต้องการอุปกรณ์ที่มีความจุมาก มีความน่าเชื่อถือในด้าน

การรักษาความปลอดภัยของข้อมูล และไม่จำเป็นต้องต่อเข้ากับอุปกรณ์ที่ใหญ่กว่าอันใดอันหนึ่ง ซึ่งความต้องการต่างๆ เหล่านี้นำไปสู่การพัฒนาฮาร์ดดิสก์รูปแบบใหม่ๆ ขึ้นมา เช่น กลุ่มงานบันทึกข้อมูลอิสระ (RAID) และกลุ่มฮาร์ดดิสก์ที่มีลักษณะเชื่อมต่อกันเป็นเครือข่าย ได้แก่ (1) ระบบ NAS; Network attached storage เป็นการนำฮาร์ดดิสก์มาทำเป็นเครือข่ายส่วนตัว และ (2) ระบบ SAN; Storage area network; เป็นการนำฮาร์ดดิสก์มาเป็นพื้นที่ส่วนกลางในการเก็บข้อมูล

ความจุของฮาร์ดดิสก์โดยทั่วไปในปัจจุบันนั้นมีตั้งแต่ 20 GB-1.5 TB สำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะในปัจจุบันมีความจุของฮาร์ดดิสก์ประมาณ 60 GB-200 GB ในส่วนของการคำนวณประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ (1) พิจารณาอัตราการไหลของข้อมูล (Data rate) คือ จำนวนไบต์/วินาที ที่หัวอ่านฮาร์ดดิสก์สามารถส่งไปให้ซีพียู หรือตัวประมวลผล ซึ่งปกติมีอัตราประมาณ 5-40 MB/วินาที และ (2) พิจารณาเวลาค้นหา (Seek time) คือ เวลาที่ข้อมูลถูกส่งไปให้กับซีพียู โดยปกติมีอัตราประมาณ 10-20 ms

หลักในการบันทึกข้อมูลลงบนฮาร์ดดิสก์นั้น จำเป็นต้องใช้สารแม่เหล็กที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นแก้ว หรือแผ่นอะลูมิเนียมที่มีความเรียบมากจนเหมือนกับกระจก ซึ่งสารแม่เหล็กนี้สามารถลบหรือเขียนใหม่ได้อยู่ตลอดเวลา และเมื่อบันทึกหรือเขียนไปแล้วสารแม่เหล็กนี้สามารถจำรูปแบบเดิมได้เป็นเวลาหลายปี สำหรับการเข้าถึงข้อมูลในบริเวณใดบริเวณหนึ่งนั้น หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (Head r/w) ถือเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการเคลื่อนตัวไปยังตำแหน่งที่ต้องการบันทึกหรืออ่านข้อมูล

หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (Head r/w) ปริมาณของหัวอ่านขึ้นอยู่กับขนาด และจำนวนของจานดิสก์ การเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์บนจานดิสก์นั้น จะมีการเว้นระยะห่างระหว่างกันอย่างคงที่ หากฮาร์ดดิสก์ได้รับการกระทบกระเทือนจนระยะห่างผิดเพี้ยนไป ย่อมส่งผลให้ฮาร์ดดิสก์ไม่สามารถทำงานได้ แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาฮาร์ดดิสก์รุ่นใหม่ ๆ ขึ้น โดยการออกแบบให้มีจุดพักหัวอ่านไว้ด้านข้างเพื่อป้องกันการกระทบบนจานดิสก์ ในฮาร์ดดิสก์ 1 ตัว ประกอบด้วยหัวอ่าน 2 หัว ซึ่งตั้งอยู่คนละด้านของฮาร์ดดิสก์ (ภาพผนวกที่ ก8) สำหรับความเร็วในการหมุนของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์อยู่ที่ 3,000 นิ้ว/วินาที (~170 ไมล์/ชั่วโมง หรือ 270 กิโลเมตร/ชั่วโมง)

ด้วยความสำคัญของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่มีผลโดยตรงต่อการจัดเก็บข้อมูล จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการออกแบบนี้ทำได้โดยการพิจารณาสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบ ประสิทธิภาพของตัวควบคุมที่ได้นั้น ขึ้นอยู่กับความ

แม่นยำของสมการ แต่ในทางปฏิบัตินั้น การหาสมการที่ใกล้เคียงกับระบบจริงๆ ทำได้ยากมาก นอกจากนั้นแล้ว การทำงานของฮาร์ดแวร์ยังมีปัจจัยรบกวนอื่นๆ อีกมากมาย เช่น แรงเสียดทานของลูกปืน แรงต้านทานจากแฉงสายไฟ แรงสั่นสะเทือนจากภายนอก หรือสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เป็นต้น

การควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณ (Quantitative feedback theory; QFT) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ไม่จำเป็นต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบที่แม่นยำมากนัก โดย QFT ทำการออกแบบตัวควบคุมในเซตของระบบสมการที่ได้มาจากขั้นตอนของการหาเอกลักษณ์ของระบบ หรือเรียกว่าขั้นตอน System identification ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมทำโดยการกำหนดโดเมนความถี่บนแผนภูมินิโคลส์ (Nichols chart; N) นอกจากนี้การออกแบบยังสามารถกำหนดค่าคุณสมบัติต่างๆ ของระบบได้ เช่น การลดสิ่งรบกวน (Disturbance rejection) การเคลื่อนที่ตามสัญญาณ (Tracking) ปัญหาด้านพลังงาน (Controller effort) หรือแม้กระทั่งการลดสัญญาณรบกวน (Noise rejection) เป็นต้น การที่สามารถกำหนดค่าคุณสมบัติต่างๆ ได้ส่งผลให้ตัวควบคุมๆ ที่ได้จากการออกแบบนั้นสามารถทำงานได้ดีขึ้น

ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนี้ ผู้จัดทำจึงสนใจและเลือกทำการศึกษาเทคนิค QFT ซึ่งเป็นเทคนิคที่สะดวกต่อการนำมาใช้งาน และสามารถแก้ไขข้อบกพร่องของการออกแบบด้วยเทคนิคอื่นๆ ได้ ส่งผลให้หัวข้อฮาร์ดแวร์ที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคนี้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้แล้ว การออกแบบด้วยเทคนิค QFT เป็นเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจ แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลาย และยังไม่มีการนำมาประยุกต์ใช้งานกับฮาร์ดแวร์มากนัก ดังนั้น เพื่อเป็นการศึกษาที่นำไปสู่การเผยแพร่ให้เห็นถึงขั้นตอนการทำงาน ขั้นตอนการสร้างชุดทดลอง ตลอดจนข้อดี และข้อจำกัดต่างๆ ของเทคนิค QFT ซึ่งสิ่งต่างๆ เหล่านี้เป็นที่มาของการศึกษาในครั้งนี้

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ในการทำงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย 2 ข้อหลักๆ ดังนี้

1. เพื่อศึกษาการทำงานของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ สร้างชุดทดลองหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ประกอบกับการออกแบบตัวควบคุมของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ด้วยทฤษฎี “การควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณ (Quantitative feedback theory; QFT)”
2. นำตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบ ไปทำการทดลองกับชุดทดลองหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

การตรวจเอกสาร

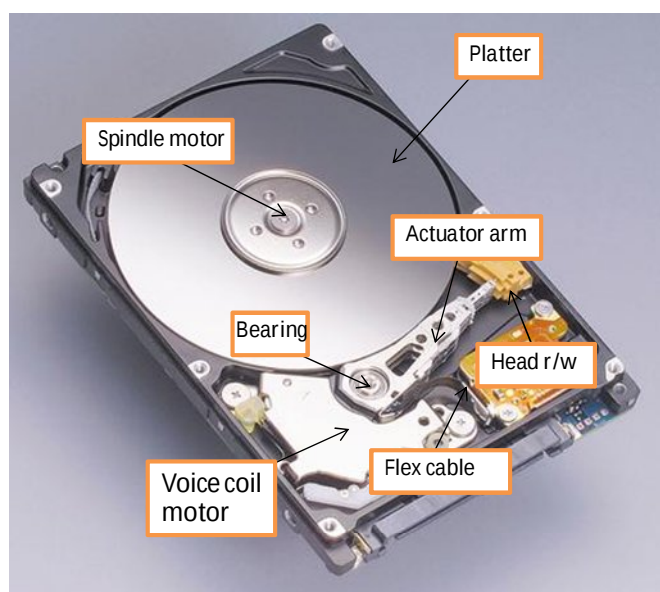
ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์

Hard disk (ฮาร์ดดิสก์) มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำจากวัสดุที่เป็นโลหะ มีความแข็งแรงทนทาน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายจากการหยิบจับ ด้านบนเป็นแผ่นโลหะเงา ส่วนด้านล่างเป็นแผงวงจร หรือ PCB

ลักษณะการเชื่อมต่อฮาร์ดดิสก์มีคำศัพท์เรียกที่เป็นทางการว่า “อินเตอร์เฟซ (Interface)” ซึ่งแบ่งลักษณะการเชื่อมต่อได้เป็น 2 ประเภท คือ (1) แบบ IDE และ E-IDE (ภาพผนวกที่ ก4) และ (2) แบบ SCSI (Small computer system interface) หรือเรียกว่า “สก็ซี” (ภาพผนวกที่ ก5) เป็นชนิดที่มีทั้งความจุ และความเร็วในการถ่ายโอนข้อมูลสูงกว่าแบบ E-IDE นอกจากนั้นยังสามารถพ่วงอุปกรณ์ที่เป็น SCSI ได้อีก 7-15 ตัว นิยมใช้ SCSI กับระบบเครือข่าย

ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์ (ภาพที่ 1) โดยทั่วไปประกอบด้วย 7 ส่วน หลักๆ คือ

1. Spindle motor (มอเตอร์หมุนจานดิสก์)
2. Platter (แผ่นจานดิสก์)
3. Flex cable
4. Bearing
5. Head r/w (หัวอ่าน)
6. Actuator arm (แขนของหัวอ่าน)
7. Voice coil motor (VCM)



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์

ฮาร์ดดิสก์โดยส่วนใหญ่ประกอบด้วยแผ่นจานแม่เหล็ก (Platter) สองแผ่นหรือมากกว่ามาจัดเรียงให้อยู่บนแกนเดียวกัน ซึ่งเรียกแกนนี้ว่า Spindle มีหน้าที่ทำให้แผ่นแม่เหล็กหมุนไปพร้อมๆ กัน จากการขับเคลื่อนของมอเตอร์ด้วยความเร็ว 3,600 *RPM* ในแต่ละหน้าของแผ่นจานจะมีหัวอ่านเขียนประจำเฉพาะ โดยหัวอ่านเขียนทุกหัวมีลักษณะที่เชื่อมติดกันคล้ายหวี ทำให้สามารถเคลื่อนเข้าออกระหว่างแทร็กต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว

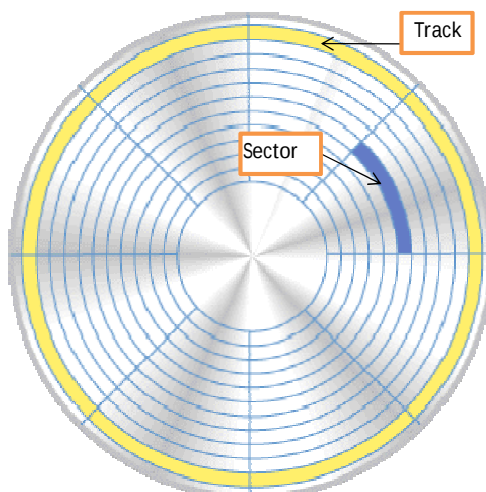
Spindle motor (มอเตอร์หมุนจานดิสก์)

Spindle motor เป็นมอเตอร์หมุนจานแผ่นดิสก์ที่มีความสำคัญมาก เพราะยิ่งหมุนเร็วเท่าไร หัวอ่านยิ่งเจอข้อมูลเร็วเท่านั้น ในการวัดความเร็วของการหมุนนี้ ใช้หน่วยวัดเป็น “รอบต่อนาที (Revolution per minute; *RPM*)” ถ้าเป็น Spindle motor รุ่นเก่า มีความเร็วของการหมุนเท่ากับ 3,600 *RPM* ต่อมาพัฒนาเป็น 5,400 *RPM* และ 7,200 *RPM* ตามลำดับ ซึ่งในปัจจุบันความเร็วของ Spindle motor มีค่าถึง 10,000 *RPM*

Spindle motor นี้ได้ใช้ Stepper motor เป็นตัวขับเคลื่อน เนื่องจากการทำงานของฮาร์ดดิสก์ต้องควบคุมให้แผ่น Platter หมุนด้วยความเร็วคงที่ตลอดการทำงาน เพราะถ้าหมุนด้วยความเร็วไม่คงที่แล้ว ส่งผลให้ไม่สามารถอ่านและเขียนข้อมูลได้ ซึ่งปัญหาของการควบคุมความเร็วให้คงที่ของ Spindle motor นี้ ถือเป็นหัวข้อวิจัยหนึ่งที่มึนนักวิจัยสนใจทำการศึกษากันมาก

Platter (แผ่นจานดิสก์)

Platter หรือ แผ่นจานดิสก์ (ภาพที่ 2) มีลักษณะเป็นจานกลมๆ เคลือบด้วยสารแม่เหล็กวางซ้อนกันอยู่หลายๆ ชั้น ซึ่งสารแม่เหล็กนี้ได้ถูกเหนี่ยวนำให้มีสถานะ 0 กับ 1 เพื่อจัดเก็บข้อมูล แผ่นจานดิสก์แต่ละแผ่นสามารถจัดเก็บข้อมูลได้ทั้ง 2 ด้าน ซึ่งหน้าที่หลักของ Platter คือหน้าที่ในการเก็บข้อมูล แผ่นจานดิสก์ประกอบด้วยแทร็ก (Track) และเซกเตอร์ (Sector) โดยในแต่ละแทร็คนั้นมีจำนวนเซกเตอร์อยู่ประมาณ 100-200 เซกเตอร์ การทำงานของฮาร์ดดิสก์นั้นใช้สัญญาณจากตัวเซกเตอร์นี้เป็นตัวอ้างอิงตำแหน่งของหัวอ่าน ซึ่งในปัจจุบันนั้นฮาร์ดดิสก์ได้พัฒนาความสามารถในการเก็บข้อมูลได้สูงมาก ทำให้แทร็กที่ใช้เก็บข้อมูลมีขนาดเล็กลง (ความจุของแทร็กที่ความกว้าง 1 นิ้ว อยู่ที่ประมาณ 70,000-100,000 แตร็ก)



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบของแผ่น Platter (แผ่นจานดิสก์)

Flex cable และ Bearing

Flex cable และ Bearing นี้ถือเป็นปัญหาแบบไม่เชิงเส้นที่น่าสนใจ เนื่องจากทั้งสองสิ่งนี้สามารถรบกวนการทำงานของระบบ ซึ่งอาจส่งผลให้ระบบทำงานผิดพลาดได้ โดยเฉพาะ Bearing ถ้าฮาร์ดดิสก์มีขนาดเล็ก เช่น ขนาด 2.5 นิ้ว หรือ 1 นิ้ว แรงที่เกิดจาก Bearing นี้ ส่งผลโดยตรงต่อระบบการทำงาน แต่ฮาร์ดดิสก์ขนาด 3.5 นิ้ว นั้นสามารถต้านแรงนี้ทิ้งได้

Head r/w (หัวอ่าน)

หัวอ่าน (Head r/w) เป็นส่วนที่ใช้ในการอ่าน-เขียนข้อมูล มีขนาดเล็กและมีความซับซ้อนมาก ทำให้มีราคาแพง ซึ่งภายในของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์มีลักษณะเป็นขดลวด

Actuator Arm (แขนของหัวอ่าน)

แขนของหัวอ่าน (Actuator Arm) มีการทำงานร่วมกับมอเตอร์หมุนแขน ซึ่ง Actuator Arm นี้ มีหน้าที่ในการหมุนแขนของหัวอ่าน ทำให้หัวอ่านสามารถอ่านข้อมูลได้

Voice coil motor (VCM)

VCM หรือ Voice coil motor เป็นอุปกรณ์ในฮาร์ดดิสก์ที่มีหลักการทำงานคล้ายกับ Servo motor แต่แตกต่างกันที่มุมการเคลื่อนที่ของ Actuator arm ซึ่งจำกัดอยู่ที่ประมาณ 25 องศา ในส่วนของ VCM นี้ มีหน้าที่ในการขับเคลื่อนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ให้ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

งานวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

Abdullah (2007) ได้อธิบายเกี่ยวกับการทำงานของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไว้ว่า โดยทั่วไปแล้วการทำงานของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ประกอบด้วย 2 โหมดการทำงานคือ Track seek และ Track following ซึ่งทั้ง 2 โหมดนี้มีความแตกต่างกัน คือ (1) *Track seek* เป็นการทำงานแบบ Point to point ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ระหว่างแทร็กข้อมูลเริ่มต้นกับแทร็กข้อมูลที่ต้องการ ให้สามารถเคลื่อนที่ได้เร็วที่สุด และ (2) *Track following* เป็นการทำงานต่อจากโหมด Track seek ซึ่งมีความละเอียดในการทำงานที่สูง เป็นการนำหัวอ่านเคลื่อนที่ไปยังแทร็กที่ต้องการ ซึ่งความผิดพลาดที่ยอมรับได้ของการทำงานในโหมดนี้อยู่ที่ 15% และ 10% สำหรับการอ่านและเขียนข้อมูลตามลำดับ ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดทั้งสองจำนวนนี้ ได้มาจากการวัดขนาดความกว้างของแทร็กข้อมูลบนแผ่น Platter

การออกแบบตัวควบคุมในสมัยเริ่มคิดค้นฮาร์ดดิสก์นั้น เป็นการออกแบบตัวควบคุมแบบระบบเปิด ด้วยข้อจำกัดในประสิทธิภาพการทำงานของวิธีนี้ ส่งผลให้มีการนำวิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบปิด/ป้อนกลับมาใช้แทน นอกจากนี้ในปัจจุบันยังมีการพัฒนาต่อไปอีก โดยการนำทฤษฎีใหม่ๆ เข้ามาช่วยในการออกแบบตัวควบคุม เช่น การออกแบบตัวควบคุมแบบ PID การออกแบบตัวควบคุมโดยพิจารณาความไม่เชิงเส้นของระบบพลศาสตร์ หรือการออกแบบตัวควบคุมแบบ Black box เป็นต้น ซึ่งเหตุผลของการนำวิธีการต่างๆ เหล่านี้มาใช้คือ ความต้องการในการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของหัวอ่าน เพื่อรองรับความสามารถในการเก็บข้อมูลที่มาก

PID (Proportional Integrator Differentiator) เป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันมากในด้านอุตสาหกรรม นอกจากการนำเทคนิคพีไอดีมาใช้แล้ว ยังมีการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานโดยพิจารณาความไม่เชิงเส้นของระบบพลศาสตร์เข้ามาประกอบในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของฮาร์ดดิสก์ที่สูงขึ้นด้วย

Jainyi *et al.* (2000) ได้นำเทคนิคการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธี PID มาใช้ และยังสามารถนำการพิจารณาความไม่เชิงเส้นของระบบมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับ TD (Track differentiator) และ ESO (Extended state observer) ซึ่งในการทำการทดลองนั้น มีทั้งส่วนของการทดสอบในสถานการณ์จำลองและการทดสอบในสถานการณ์จริง ผลที่ได้คือ ฮาร์ดดิสก์สามารถทำงานได้ดีในระดับที่น่าพอใจ

Dirk *et al.* (2002) ทำการสร้างระบบสมการของฮาร์ดดิสก์ทั้งในส่วนของ VCM และในส่วนมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนแผ่น Platter โดยใช้กฎของนิวตันและกฎของฟาราเดย์ เป็นบรรทัดฐานในการสร้างระบบสมการ โดยทำการทดลองในสถานการณ์จำลองเพียงอย่างเดียว หลังจากการทดลองแล้วพบว่า การสร้างระบบสมการนี้ ทำให้ลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการออกแบบตัวควบคุมได้

Ying *et al.* (2004) ได้ทำการศึกษาสมการทางคณิตศาสตร์ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ประกอบกับการใช้ PID ในการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งในขั้นตอนของการออกแบบนั้นแยกได้เป็น 2 ส่วน คือ ค่า P และ ค่า D ใช้การออกแบบตามปกติ แต่ในส่วนของค่า I นั้น ใช้วิธีการพิจารณาความไม่เชิงเส้นของระบบมาใช้ในการออกแบบ ซึ่งผลที่ได้คือ ตัวควบคุมหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีนี้ มีค่า Over shoot ของระบบลดลง เหลือเพียง 17% โดยส่วนของค่า Over shoot ที่ลดลงนี้ทำให้ฮาร์ดดิสก์สามารถทำงานได้ดีขึ้น

Muhammad and Ahmad (2006) ได้นำวิธี PID มาใช้เพื่อการออกแบบตัวควบคุมด้วยเช่นกัน แต่พิเศษตรงที่มีการนำค่า Gain สามารถปรับค่าได้ตามความเหมาะสมและสภาวะการทำงาน of ฮาร์ดดิสก์ มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม ผลที่ได้คือ ค่า Gain ที่สามารถปรับได้นั้น ส่งผลให้การกระตุ้นของระบบลดน้อยลง ระบบเกิดการสั่นน้อยลง หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่ได้จึงทำงานได้ดีขึ้น

นอกจากวิธีต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีการนำวิธีแบบ Black box มาใช้ในการออกแบบ เช่น วิธีเครือข่ายประสาทเทียม และวิธีกลศาสตร์ค่ากวม เป็นต้น Mohanadas *et al.* (2000) ได้นำวิธีกลศาสตร์ค่ากวม มาใช้เพื่อการออกแบบตัวควบคุม โดยวิธีนี้สามารถใช้กับการออกแบบตัวควบคุมของฮาร์ดดิสก์ได้กับทั้ง 2 โหมดการทำงาน คือ Track seeking และ Track following หลังจากการทดลองแล้วพบว่า ตัวควบคุมที่ได้นี้สามารถทำงานได้ดีขึ้นในทั้งสองโหมดการทำงาน of ฮาร์ดดิสก์

สำหรับการใช้วิธีเครือข่ายประสาทเทียมเพื่อการออกแบบตัวควบคุมนั้น สามารถใช้เป็นตัวควบคุมโดยตรงหรือเป็นตัวช่วยลดค่าความไม่เชิงเส้นต่างๆ ของระบบก็ได้ ยกตัวอย่างเช่น แรงเสียดทานของลูกปืน แรงต้านอากาศ แรงต้านทานจากแผงสายไฟฟ้า หรือแม้กระทั่งการสั่นสะเทือนจากภายนอก เป็นต้น

Gudio *et al.* (2005) ใช้วิธีเครือข่ายประสาทเทียมในการออกแบบตัวควบคุมหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่มีการทำงานในย่านความถี่สูง โดยทำการทดลองในสถานการณ์จำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งผลที่ได้พบว่า ตัวควบคุมที่ได้จากการออกแบบนี้ สามารถชดเชยการทำงานในโหมด Resonance notch filter นอกจากนี้ยังสามารถชดเชยตัวแปรอื่นๆ ที่ทำให้ระบบเกิดการทำงานที่ผิดพลาดได้ และเมื่อนำตัวควบคุมที่ได้ไปทำการทดลองในสถานการณ์จริงพบว่า ฮาร์ดดิสก์สามารถทำงานได้ดีขึ้น

ในการออกแบบตัวควบคุม ถ้าสมการที่ใช้มีความแม่นยำสูง ย่อมส่งผลให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพไปด้วย แต่โดยทั่วไปในธรรมชาติแล้ว ระบบพลศาสตร์มักเป็นระบบที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinearity) ดังนั้น การหาสมการที่แม่นยำของระบบพลศาสตร์นั้นทำได้ยากมาก ด้วยสาเหตุดังกล่าวนี้ จึงได้มีการศึกษาทฤษฎีการควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณ (Quantitative feedback theory, QFT) ซึ่งเป็นวิธีการออกแบบตัวควบคุมที่ไม่จำเป็นต้องใช้สมการที่แม่นยำมากนัก การออกแบบนั้นเป็นลักษณะของการพิจารณาเซตสมการของความไม่แน่นอนในระบบพลศาสตร์มาออกแบบ

การประยุกต์ใช้เทคนิค QFT ในงานวิจัย

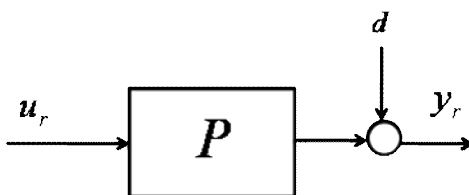
QFT ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ.1956 โดย Isaac Horowitz ประกอบด้วย 2 รูปแบบ คือ (1) แบบ SISO (Single input single output) หรือ MISO (Multi input single output) และ (2) แบบ MIMO (Multi input multi output) นอกจากนี้ยังมีผู้นำ QFT ประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ อีกมากมาย เช่น Maj *et al.* (1995) ใช้ QFT เพื่อการออกแบบตัวควบคุมของเครื่องบินรบ F-16 Vista ในโหมดการบินที่มีความเร็วต่ำกว่าเสียง โดยทำการทดลองในสถานการณ์จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่าการออกแบบด้วย QFT นี้สามารถทำงานได้ดีกับระบบที่มีความไม่แน่นอนสูง นอกจากนั้นยังสามารถช่วยแก้ปัญหาเรื่องการใช้พลังงานในการควบคุมที่มากเกินไปได้ด้วย

Jinying *et al.* (2006) ใช้ QFT ออกแบบตัวควบคุมใน Hydraulic actuator มีลักษณะที่เป็น การออกแบบ แบบ Two degree of freedom นอกจากการออกแบบตัวควบคุมแล้ว ยังมีการออกแบบตัวฟิลเตอร์ ขึ้นมาเพื่อให้ระบบทำงานอยู่ในขอบเขตที่ต้องการ ในการออกแบบตัวควบคุม และการออกแบบตัวฟิลเตอร์นี้ เป็นการออกแบบบนแผนภูมิโนโลสที่ช่วยแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในตัวควบคุมที่มีผลต่อระบบโดยตรง ในส่วนของการทดลองทั้งหมดเป็นการจำลองสถานการณ์การทำงานในคอมพิวเตอร์ ซึ่งพบว่าตัวควบคุมที่ได้นี้สามารถแก้ปัญหาเรื่องการใช้พลังงานของระบบ และลดสิ่งรบกวนที่มีผลต่อระบบได้ดี

David and Gregory (1997) ทำการทดลอง และเปรียบเทียบตัวควบคุมของ Variable hydraulic vane pump ระหว่าง QFT กับ Optimal control ที่ใช้ Nonlinear constrain เมื่อทำการออกแบบตัวควบคุมจากเทคนิคทั้งสองแบบ ต่อมาจึงนำตัวควบคุมที่ได้มากำหนดจุดลงบนแผนภูมิ นิโคลส์ เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของตัวควบคุมทั้งสองแบบ ผลที่ได้พบว่า Optimal control และ QFT นั้นสามารถสร้างตัวควบคุมได้มีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกัน

Quantitative feedback theory; QFT

การออกแบบตัวควบคุมแบบระบบเปิด (ภาพที่ 3) มีการใช้งานกันมานานแล้ว โดยวิธีการนี้มีข้อดีตรงที่มีค่าใช้จ่ายในการออกแบบที่ต่ำ แต่ในปัจจุบันการผลิตชิ้นงานต่างๆ ต้องการความผิดพลาดในการทำงานที่ต่ำ ดังนั้นตัวควบคุมที่ใช้ต้องมีความน่าเชื่อถือของการทำงานที่มาก วิธีการนี้จึงไม่เหมาะกับการใช้งานในปัจจุบัน ส่งผลให้มีการนำการควบคุมแบบป้อนกลับมาใช้กันมากขึ้น



ภาพที่ 3 การออกแบบตัวควบคุมด้วยระบบเปิด (เมื่อ u_r = สัญญาณตัวควบคุม, P = ระบบ, y_r = สัญญาณที่ออกจากระบบ, d = ค่าสิ่งรบกวน และ r = สัญญาณอ้างอิง)

เมื่อพิจารณาระบบเปิด (ภาพที่ 3) สามารถนำมาเขียนสมการได้ดังสมการที่ (1) และสมการที่ (2)

$$y_r = Pu_r + d \quad (1)$$

$$u_r = P^{-1}(y_r - d) \quad (2)$$

เมื่อ y_r = สัญญาณที่ออกจากระบบ, P = ระบบ, P^{-1} = ส่วนกลับของระบบ, u_r = สัญญาณควบคุม, d = ค่าสิ่งรบกวน และ r = สัญญาณอ้างอิง

สำหรับจุดมุ่งหมายของการออกแบบ คือ การออกแบบค่า y_r ให้เป็นไปตามที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบตัวควบคุมแบบระบบเปิดนี้ ไม่มีการวัดค่าสัญญาณขาออกของระบบ ด้วยเหตุดังกล่าวนี้นี้วิธีการออกแบบตัวควบคุมแบบนี้ จึงอาจเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (1) เราสามารถพิจารณาเหตุผลที่ทำให้การควบคุมแบบเปิดไม่เหมาะสมกับระบบที่ต้องการความน่าเชื่อถือในการทำงานสูง ดังนี้

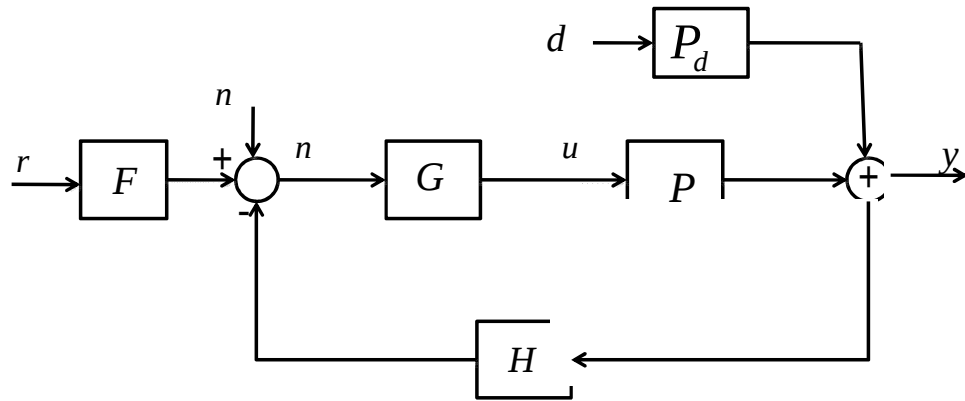
1. การไม่ทราบค่าที่แท้จริงสมการของระบบ (P) - ในการออกแบบระบบควบคุมด้วยวิธีนี้จะพิจารณาจากสมการของระบบพลศาสตร์ ซึ่งในความเป็นจริงนั้น การหาค่าสมการของระบบ (P) ทำได้ยากมาก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเราไม่สามารถสร้างสมการของระบบที่แท้จริงได้เลย จากสมการที่ (2) พบว่าสัญญาณควบคุม (u_r) มีค่าแปรผันตามส่วนกลับของระบบ (P^{-1}) แต่เมื่อเราไม่สามารถทราบสมการที่แท้จริงของ P^{-1} ได้ ส่งผลให้ค่าสัญญาณที่ออกจากระบบ (y_r) ที่ได้นั้นอาจเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น ซึ่งส่งผลให้ระบบเกิดความคลาดเคลื่อน และอาจก่อให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาดได้ ถึงแม้ว่าเราจะสามารถหาสมการของระบบที่แท้จริงได้ ถ้าระบบมีความไม่แน่นอนเกิดขึ้น ระบบก็จะเกิดความผิดพลาดเช่นกัน

2. การไม่ทราบค่าสิ่งรบกวน (d) - ในกระบวนการดำเนินการของระบบนั้นย่อมต้องเผชิญกับสิ่งรบกวนต่างๆ โดยเฉพาะสิ่งรบกวนจากภายใน และ ภายนอกต่างๆ ที่เราไม่ได้คาดคิด ซึ่งเราไม่สามารถทราบค่าสิ่งรบกวนต่างๆ เหล่านี้ได้เลย เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (2) แล้ว พบว่าค่า d นั้นมีผลต่อค่า u_r เมื่อเราไม่สามารถทราบค่า d ได้ ย่อมส่งผลให้ค่า u_r นี้ไม่สามารถสร้างสิ่งที่สามารถนำไปใช้เพื่อการชดเชยในส่วนที่ถูกรบกวนได้ ด้วยเหตุนี้ ส่งผลให้การทำงานของระบบเกิดการผิดพลาดขึ้นได้

3. การ Delay ของระบบ - ในการออกแบบโดยการพิจารณาจากสมการนั้น ถึงแม้ว่าเราสามารถทราบค่าที่แท้จริงของระบบสมการ (P) หรือทราบค่า d ได้ แต่ถ้าระบบเกิดการ Delay ขึ้น ย่อมส่งผลให้ระบบทำงานไม่สามารถทำงานได้ตรงตามความต้องการเช่นเดียวกัน

ด้วยข้อจำกัดต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น จึงมีการออกแบบตัวควบคุมแบบปิด/ป้อนกลับ มาใช้เพื่อแก้ปัญหาของระบบเปิดที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นได้

ระบบควบคุมแบบปิด/ป้อนกลับ สามารถแสดงได้ดัง ภาพที่ 4 ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อการใช้งานแทนระบบเปิด ซึ่งการควบคุมแบบระบบปิด/ป้อนกลับนี้เหมาะกับระบบที่ต้องการความแม่นยำและความละเอียดในการทำงานที่สูงขึ้น



ภาพที่ 4 กระบวนการออกแบบตัวควบคุมด้วย QFT (เมื่อ r = สัญญาณอ้างอิง, F = ตัวฟิลเตอร์, n = สัญญาณรบกวน, G = ตัวควบคุม, u = สัญญาณตัวควบคุม, P = ระบบ, y = สัญญาณที่ออกจากระบบ, H = ตัวเซ็นเซอร์, d = สิ่งรบกวนภายนอก, และ P_d = ระบบของสิ่งรบกวนภายนอก)

สำหรับการออกแบบการควบคุม (ภาพที่ 4) สามารถแสดงได้ดัง สมการที่ (3) และ (4) [โดย y = สัญญาณที่ออกจากระบบ, P = ระบบ, u = สัญญาณตัวควบคุม, P_d = ระบบของสิ่งรบกวนจากภายนอก, d = สิ่งรบกวนภายนอก, G = ตัวควบคุม, F = ตัวฟิลเตอร์, r = สัญญาณอ้างอิง, H = ตัวเซ็นเซอร์ และ n = สัญญาณรบกวน]

$$y = Pu + P_d d \quad (3)$$

$$u = G(Fr - Hy + n) \quad (4)$$

สำหรับกรณีที่ระบบที่นำมาทำการออกแบบตัวควบคุมเป็นแบบ Linear time invariant; LTI นั้น สามารถแทนค่า $L = PGH$ เข้าไปในสมการที่ (3) และ (4) ซึ่งส่งผลให้รูปของสมการเปลี่ยนแปลงไปตามสมการที่ (5) และ (6) [โดย y = สัญญาณที่ออกจากระบบ, I = เมตริกซ์เอกลักษณ์, P = ระบบ, G = ตัวควบคุม, F = ตัวฟิลเตอร์, r = สัญญาณอ้างอิง, n = สัญญาณรบกวน, P_d = ระบบของสิ่งรบกวนจากภายนอก, d = สิ่งรบกวนภายนอก, u = สัญญาณตัวควบคุม และ H = ตัวเซ็นเซอร์]

$$y = [I + L]^{-1} [PGFr + PGn + P_d d] \quad (5)$$

$$u = [I + PGH]^{-1} P[GFr + Gn - GHP_d d] \quad (6)$$

และเมื่อทำการแทนค่า $Hy_r = Fr$ และ $n = 0$ เมื่อ y_r เป็นค่าที่ต้องการ ลงในสมการที่ (5) แล้ว ทำให้ได้รูปสมการตามสมการที่ (7) [โดย y = สัญญาณที่ออกจากระบบ, I = เมตริกซ์เอกลักษณ์, P = ระบบ, G = ตัวควบคุม, H = ตัวเซ็นเซอร์, y = สัญญาณที่ออกจากระบบ, r = สัญญาณอ้างอิง และ d = สิ่งรบกวนภายนอก]

$$y = [I + L]^{-1} PGHy_r + [I + L]^{-1} d \quad (7)$$

เมื่อกำหนดค่าตัวควบคุม คือ $G \rightarrow \infty$ ทำให้ $L^{-1} = 0I$ และ $[I + L]^{-1} PGH \rightarrow I$ ซึ่งมีผลทำให้ $y \approx y_r$ แต่เนื่องจากค่า G ที่มีค่ามากเกินไปอาจส่งผลให้สัญญาณรบกวนมีค่ามากขึ้น และทำให้ระบบทำงานในช่วงความถี่สูง ความถี่ดังกล่าวอาจไปตรงกับความถี่การสั่นพ้องของระบบได้ นอกจากนี้ยังมีขีดจำกัดของปริมาณพลังงานป้อนที่ให้แก่ระบบ ถ้าพลังงานที่ป้อนให้ระบบมีค่าไม่จำกัด การป้อนพลังงานที่มากเกินไปส่งผลให้ระบบเกิดความเสียหายได้

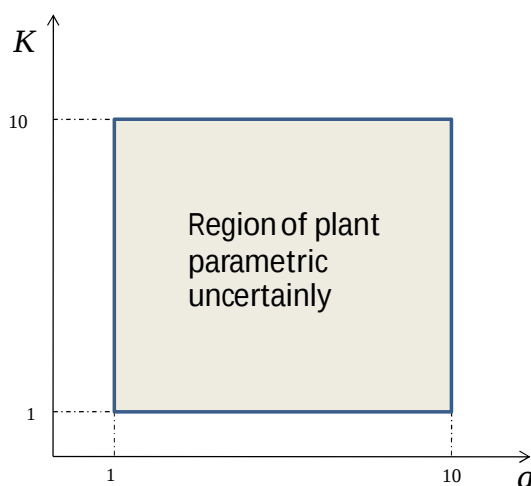
นอกจากปัญหาที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีปัญหาอีกประการหนึ่งคือ ความไม่แน่นอนของระบบพลศาสตร์ เช่น ค่าแรงต้านทานต่างๆ ที่เกิดจากการเสียดสี ค่าสัญญาณรบกวนเนื่องจากระบบไฟฟ้า การสั่นสะเทือนจากการหมุนของเครื่องจักรกล เป็นต้น หรือปัญหาที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความชื้นในอากาศ แรงสั่นสะเทือนจากภายนอก หรือแม้กระทั่งแรงอื่นๆ จากภายนอก เป็นต้น ซึ่งปัญหาต่างๆ ที่กล่าวมานี้ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในค่าของตัวแปรต่างๆ ในระบบ ทำให้ระบบเกิดความไม่แน่นอน และถ้าระบบที่ควบคุมนั้นมีความสำคัญมากๆ ปัจจัยเหล่านี้อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานของระบบได้

จากปัญหาต่างๆ ของการออกแบบตัวควบคุมไม่ว่าจะเป็นปัญหาในเรื่องความไม่แน่นอนของสิ่งรบกวนทั้งจากภายในและภายนอก ระบบ ปัญหาในส่วนของการพลังงานที่ป้อนให้แก่ระบบมากเกินไป หรือแม้กระทั่งปัญหาการ Delay ของระบบ เป็นต้น หลังจากที่ได้ทำการศึกษาถึงวิธีการในการออกแบบตัวควบคุมด้วย QFT แล้ว พบว่าทฤษฎีนี้สามารถแก้ปัญหาต่างๆ เหล่านี้ได้ ซึ่งกระบวนการในการออกแบบตัวควบคุมด้วย QFT นี้ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักๆ คือ การสร้าง Plant template จากความไม่แน่นอนของระบบ การสร้างขอบเขต (Bounds calculation) และการออกแบบตัวควบคุม (Loop shaping process)

การสร้าง Plant template จากความไม่แน่นอนของระบบ

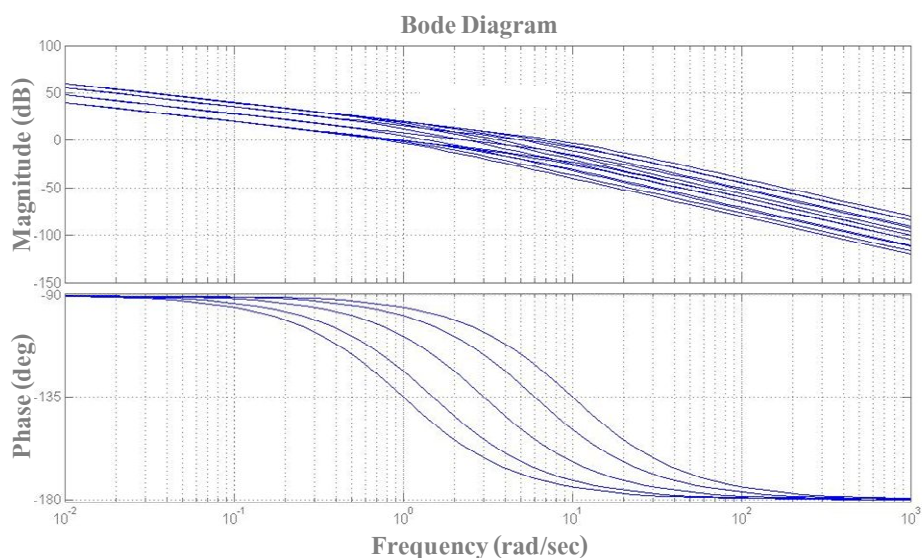
เนื่องจากทฤษฎี QFT นี้ มีการลักษณะของการออกแบบโดยการพิจารณาจากความไม่แน่นอนของระบบพลศาสตร์ ในกระบวนการออกแบบนั้นทำได้โดย การแทนระบบทั้งหมดที่ต้องการออกแบบด้วยเซตของฟังก์ชันถ่ายโอน $P = \{P_i\}$ เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$

โดย P_i คือระบบที่มีความไม่แน่นอน ซึ่งสามารถแปรผันได้ตามปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อระบบ ตัวอย่างเช่น ระบบที่มีสมการเป็น $P = \frac{K}{s(s+a)}$ เมื่อ a และ K มีค่าความไม่แน่นอนอยู่ในช่วง $[1, 10]$ จากตัวอย่างนี้ สามารถนำค่าต่างๆ มาเขียนให้อยู่ในรูปของระบบที่น่าสนใจในลักษณะของ Region of plant parametric uncertainty ได้ (ภาพที่ 5)



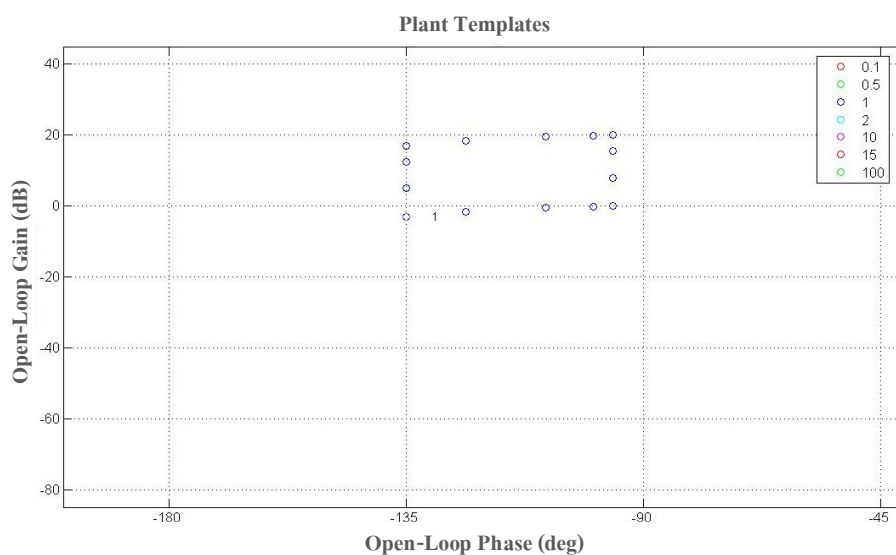
ภาพที่ 5 Region of plant parametric uncertainty

เมื่อนำช่วงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ ในระบบไปกำหนดจุดลงบน Bode diagram (ภาพที่ 6) พบว่า เมื่อค่าของตัวแปรเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้คุณสมบัติของระบบเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย จึงสรุปได้ว่า ถ้าทำการออกแบบตัวควบคุมโดยไม่คำนึงถึงความไม่แน่นอนตรงจุดนี้แล้ว อาจทำให้ได้ตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพในการทำงานไม่ดีเท่าที่ควร



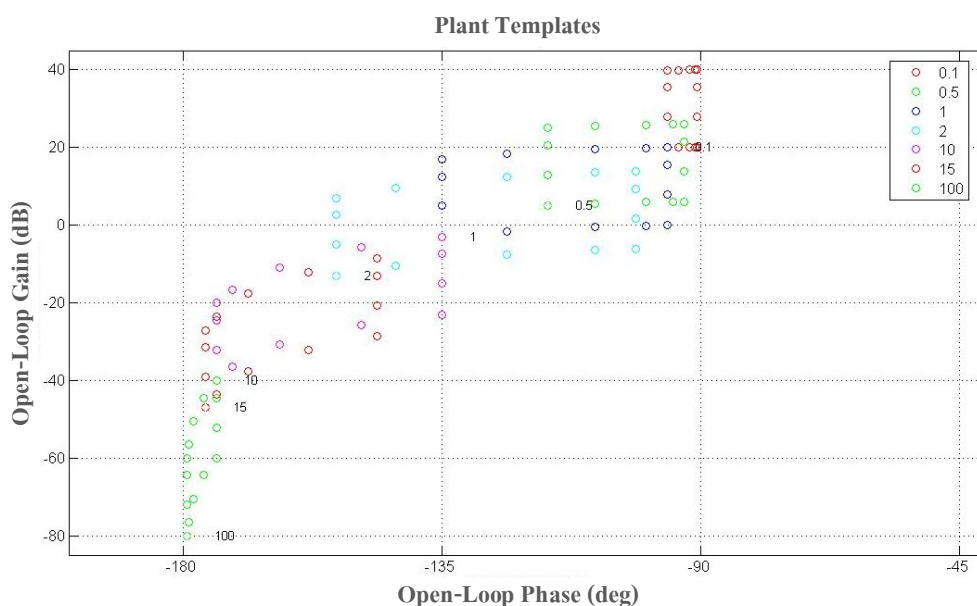
ภาพที่ 6 แสดง Bode diagram บนช่วงความเปลี่ยนแปลงในค่าตัวแปรต่างๆ ของระบบ

ในการออกแบบตัวควบคุมด้วย QFT ในขั้นตอนของการสร้าง Plant template นี้มีการดำเนินการบนแผนภูมินิโคลส์ ซึ่งในแต่ละค่าบน Region of plant parametric uncertainty นั้นสามารถนำมากำหนดจุดบนแผนภูมินิโคลส์ได้ โดยการกำหนดจุดต่างๆ นั้น ต้องสอดคล้องกับการเลือกความถี่ที่สนใจด้วย เนื่องจากความถี่ที่ระดับต่างกัน ย่อมส่งผลให้ได้จุดบนแผนภูมินิโคลส์ที่ต่างกันไปด้วย ซึ่งเราเรียกจุดในแต่ละความถี่เหล่านี้ว่า “Plant template” (ภาพที่ 7)



ภาพที่ 7 Plant template ที่ความถี่เท่ากับ 1 rad/s

ทั้งนี้ ระดับของความถี่ที่นำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมนั้น ไม่มีหลักเกณฑ์ในการเลือกที่ตายตัว โดยสามารถเลือกได้ตามความเหมาะสมกับระบบงานที่ต้องการออกแบบ ซึ่งในตัวอย่างนี้ เป็นการสร้าง Plant template ของระดับความถี่ที่ $\omega = [0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 10, 15, 100]$ rad/s (ภาพที่ 8)



ภาพที่ 8 Plant template ในทุกความถี่ที่สนใจ

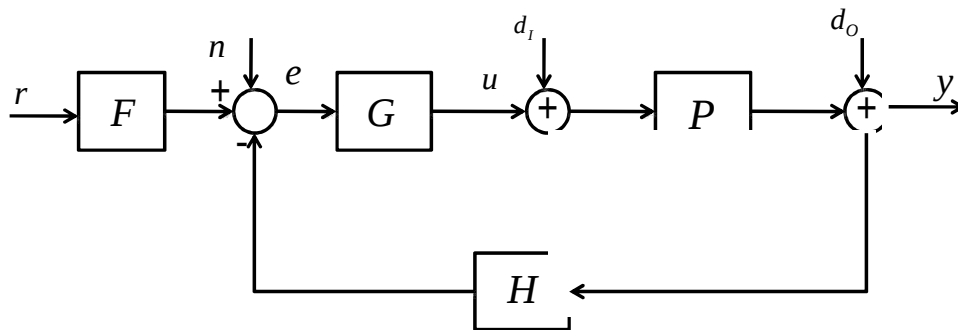
แต่อย่างไรก็ตาม การนำ Plant template ทั้งหมดไปทำการออกแบบตัวควบคุมเลยนั้น ทำได้ยากเนื่องจากตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณมีจำนวนมาก ดังนั้น จึงมีการกำหนดจุดอ้างอิงลงบน Plant template เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ โดยเรียกวิธีการกำหนดจุดอ้างอิงนี้ว่า Nominal point (L_0) ในการกำหนดจุดอ้างอิงนั้น สามารถเลือกจุดใดก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสม แต่โดยส่วนใหญ่แล้วมักทำการเลือกบริเวณที่จุดมุล่งซ้ายของ Plant template หลังจากที่ทำตามขั้นตอนต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ในขั้นตอนต่อไปนั้น เป็นขั้นตอนของการออกแบบและการสร้างขอบเขต (Bound) ในกระบวนการออกแบบด้วย QFT

การสร้างขอบเขต (Bounds calculation)

การสร้างขอบเขตของ QFT นี้ สามารถแสดงในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอนของปริมาณระหว่างสองตำแหน่งได้ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จาก Block diagram (ภาพที่ 9) เมื่อกำหนดให้

P = เซตของระบบ, G = ตัวควบคุม, H = เซ็นเซอร์, r = สัญญาณอ้างอิง, n = สัญญาณรบกวน, e = ค่าความผิดพลาด, u = สัญญาณตัวควบคุม และ y = สัญญาณขาออกของระบบ, d_i = ค่าสิ่งรบกวนในช่วงขาเข้าระบบ และ d_o = ค่าสิ่งรบกวนในช่วงขาออกจากระบบ

ในส่วนของ Block diagram ที่แสดง (ภาพที่ 9) นั้นสามารถเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า การออกแบบตัวควบคุมแบบ Two degree of freedom สาเหตุที่เรียกเช่นนี้เป็นเพราะ การควบคุมนี้มีเป้าหมายให้สัญญาณอ้างอิง (r) ทำงานอยู่ระหว่างระบบ 2 ระบบที่เรารู้ค่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ มีการกำหนดค่าขอบเขตบน และขอบเขตล่างให้กับสัญญาณอ้างอิงนั้นแล้ว



ภาพที่ 9 ภาพระบบการออกแบบตัวควบคุมด้วย QFT แบบ Multi input single output

การสร้างขอบเขตในทฤษฎี QFT นี้ ทำได้ด้วยการสร้างขอบเขตให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่ ซึ่งการสร้างขอบเขตที่นิยมใช้กันนั้น สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปของอสมการได้ 6 ชนิด ดังต่อไปนี้

1. Input disturbance rejection:

$$\left| \frac{y}{d_i} \right| = \left| \frac{P}{1 + PGH} \right| < \delta_{di} \quad (8)$$

2. Output disturbance rejection:

$$\left| \frac{y}{d_o} \right| = \left| \frac{1}{1 + PGH} \right| < \delta_{do} \quad (9)$$

3. Model matching:

$$\left| \frac{y}{r} - F_m \right| = \left| \frac{PGF}{1+PGH} - F_m \right| < \delta_m \quad (10)$$

4. Tracking:

$$\alpha \leq \left| \frac{PGF}{1+PGH} \right| \leq \beta \quad (11)$$

$$\left| \frac{y}{n} \right| = \left| \frac{PG}{1+PGH} \right| < \delta_n \quad (12)$$

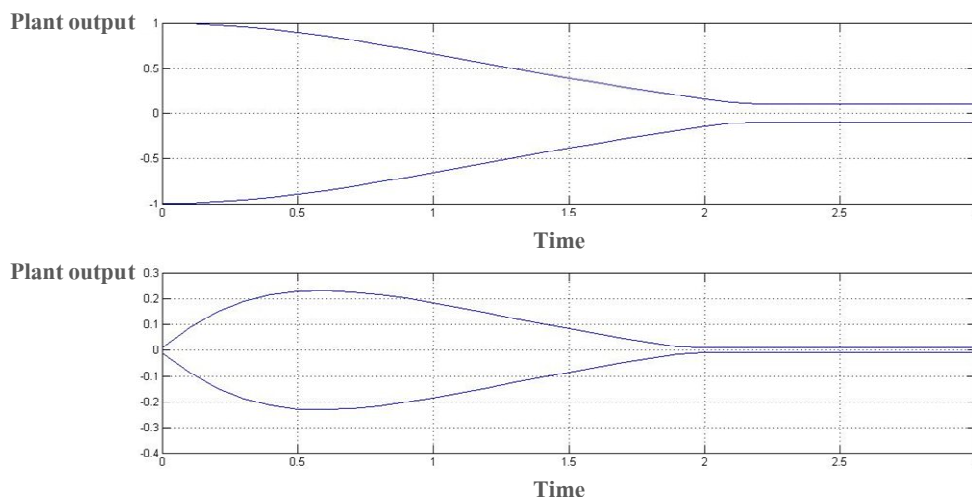
$$\left| \frac{u}{n} \right| = \left| \frac{G}{1+PGH} \right| < \delta_c \quad (13)$$

โดย P = เซตของระบบ, G = ตัวควบคุม, H = เซ็นเซอร์, r = สัญญาณอ้างอิง, n = สัญญาณรบกวน, F = ตัวฟิลเตอร์, F_m = Model matching, u = สัญญาณตัวควบคุม, y = สัญญาณขาออกของระบบ, d_i = ค่าสิ่งรบกวนในช่วงขาเข้าระบบ, d_o = ค่าสิ่งรบกวนในช่วงขาออกจากระบบ, β = ขอบเขตบน, α = ขอบเขตล่าง, δ_d = ปริมาณที่ใช้ออกแบบขอบเขตแบบ Input disturbance rejection, δ_{do} = ปริมาณที่ใช้ออกแบบขอบเขตแบบ Output disturbance rejection, δ_m = ปริมาณที่ใช้ออกแบบขอบเขตแบบ Model matching, δ_n = ปริมาณที่ใช้ออกแบบขอบเขตแบบ Noise rejection, และ δ_c = ปริมาณที่ใช้ออกแบบขอบเขตแบบ Controller effort

เมื่อพิจารณารูปของอสมการ Bounds ทั้ง 6 ชนิดแล้ว ยังสามารถแบ่งลักษณะการทำงานของ Bounds ได้ออกเป็นอีก 3 กลุ่ม ดังต่อไปนี้

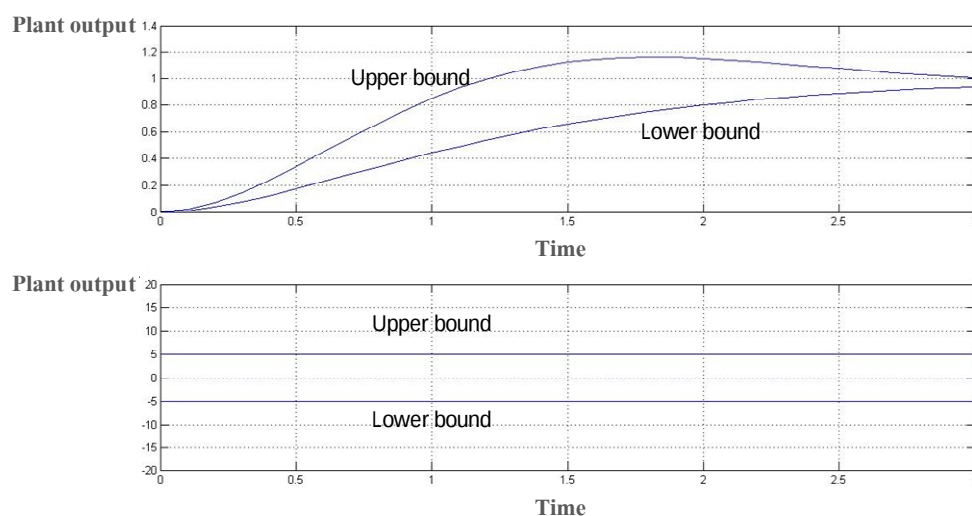
1. การลดสิ่งรบกวนในระบบ: ประกอบด้วย Input disturbance rejection [สมการที่ (8)] และ Output disturbance rejection [สมการที่ (9)] ในกลุ่มนี้เป็นการออกแบบตัวควบคุมแบบ Regulation system ซึ่งผลจากการกำหนดขอบเขตนี้ ทำให้ค่าสัญญาณขาออกของระบบ (y) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ส่งผลให้มีการกำหนดในส่วนของค่าเริ่มต้นที่ใส่เข้าไปในระบบ ต้องมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ (ภาพที่ 10) เมื่อทำการกำหนดคุณสมบัติในส่วนนี้แล้ว พบว่า สามารถลดสิ่งรบกวนของระบบลงได้ สำหรับการออกแบบคุณสมบัติของขอบเขตนี้ เราสามารถกำหนดคุณสมบัติของระบบในโดเมน

เวลาได้ แต่สำหรับการนำไปใช้นั้น จะมีการเปลี่ยนรูปแบบจากโดเมนเชิงเวลาไปเป็นโดเมนเชิงความถี่



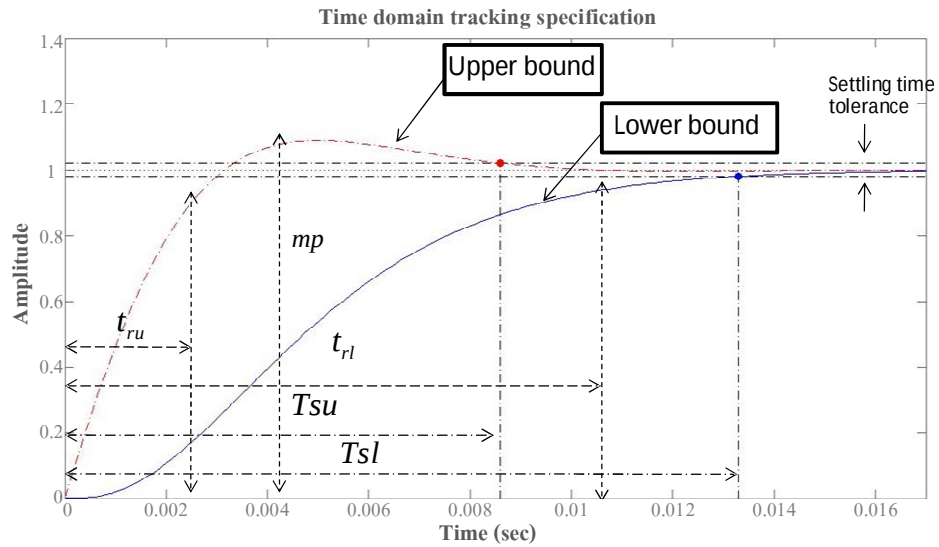
ภาพที่ 10 ภาพคุณสมบัติเชิงเวลาของระบบเมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นไม่เท่ากับศูนย์

2. การควบคุมการทำงานแบบ *Tracking* [สมการที่ (11)]: ซึ่งในการทำงานของระบบนั้น ถูกกำหนดด้วยค่าขอบเขตบน และขอบเขตล่าง (ภาพที่ 11) ซึ่งค่าต่างๆ ที่ถูกกำหนดนี้ มีลักษณะเป็น ฟังก์ชันของการถ่ายโอน ในส่วนของค่าขอบเขตบนเป็นค่า *Under damp* โดยส่วนใหญ่แล้วจะทำการประมาณค่าความหน่วงของระบบให้มีความอยู่ที่ประมาณ 0.7071 ($\zeta \approx 0.7071$) ในส่วนของค่าขอบเขตล่างนั้นจะกำหนดเป็นค่า *Critical damp* ทั้งนี้เราสามารถกำหนดคุณลักษณะของขอบเขตบน และขอบเขตล่างได้โดยตรง (ภาพที่ 12)



ภาพที่ 11 ค่าขอบเขตบน (Upper bound) ขอบเขตล่าง (Lower bound) และ Plant input ของระบบ

Step forcing function (ภาพที่ 12) เป็นการกำหนดค่าขอบเขตบน และขอบเขตล่างของระบบ ซึ่งค่า mp = Maximum over shoot, t_{ru} = Rise time ของขอบเขตบน, t_{rl} คือ Rise time ของขอบเขตล่าง, T_{su} คือ Settling time ของขอบเขตบน, T_{sl} คือ Settling time ของขอบเขตล่าง ในส่วนของการคำนวณนั้นได้ใช้วิธี Rise time ที่ 90% โดยที่ $T_s = \frac{4}{\xi\omega_n}$ (การออกแบบ Settling time ของระบบ) และแทนค่าความถี่ที่ระดับต่างๆ (ω_n) ลงในสมการที่ (14) และ (15)



ภาพที่ 12 Step forcing function ของ Upper bound และ Lower bound

$$T_{RU} = \frac{\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}(s+a)}{a} \quad (14)$$

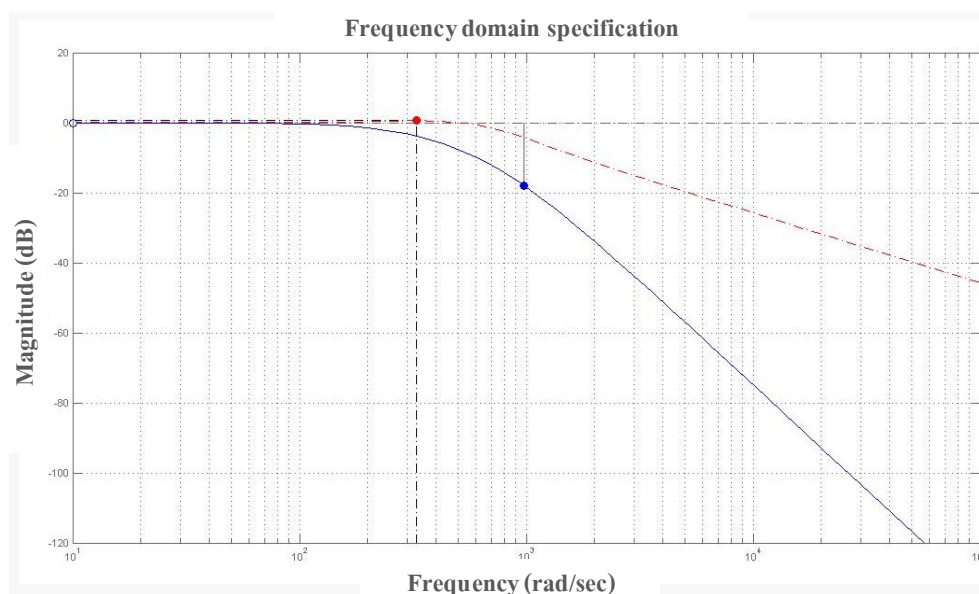
$$T_{RL} = \frac{K}{(s+a_1)(s+a_2)(s+a_3)} \quad (15)$$

$$T_{RL} = \frac{K}{(s+a_1)(s+a_2)(s+a_3)} \quad (15)$$

เมื่อ $T_{Ru} =$ ขอบเขตบน, $T_{RL} =$ ขอบเขตล่าง โดย $a \geq \omega_n$, $a_3 = \omega_n > a_2 = a_1 > |-\xi \omega_n|$
 และ $K = a_1 a_2 a_3$

ทำการเพิ่มค่าซีโรเข้าไปในสมการที่ (14) เพื่อให้ช่วงความถี่สูงนั้นๆ สามารถทำงานได้คล้ายกับระบบจริง ซึ่งการเพิ่มค่าซีโร เข้าไปในระบบนั้น ไม่มีผลกระทบต่อระบบในช่วงก่อน Crossover frequency เนื่องจากการเพิ่มค่านี้ส่งผลให้ระบบเกิดการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมากๆ

สำหรับส่วนของสมการที่ (15) นั้น มีการเพิ่มค่าโพลเข้าไปในระบบ ซึ่งผลที่ได้คือ ระบบในช่วงก่อน Crossover frequency เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก หรือแทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ สำหรับกรณีที่ต้องการใช้ขอบเขตแบบ Tracking เพื่อการออกแบบตัวควบคุมนั้น จำเป็นต้องทำการเปลี่ยนจากโดเมนของเวลา ไปเป็นโดเมนของความถี่ก่อน (ภาพที่ 13)



ภาพที่ 13 ภาพคุณสมบัติเชิงความถี่ของ Tracking specification (Bode plot ของ T_{Ru} และ T_{RL})

3. กลุ่มที่ช่วยแก้ปัญหาในการใช้พลังงานของตัวควบคุมและปัญหาสัญญาณรบกวนในระบบ: สำหรับการออกแบบตัวควบคุมโดยทั่วไปนั้น สามารถใช้สมการที่ (8) ถึงสมการที่ (11) มาใช้ได้เลย เพราะแค่ 4 ขอบเขตนี้ก็สามารถออกแบบระบบที่มีประสิทธิภาพที่ดีได้แล้ว แต่ถ้าต้องการระบบที่มีความเข้มข้นในการควบคุมในระดับที่สูงขึ้น ก็สามารถใช้สมการที่ (12) และ (13) เข้ามาช่วยในการออกแบบประกอบ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้แก่ระบบด้วยก็ได้

การออกแบบตัวควบคุม (Loop shaping process)

เป็นทักษะในการออกแบบตัวควบคุมในระบบเปิดบนแผนภูมิโคโลส ซึ่งเป็นการออกแบบที่มีลักษณะเป็น Nominal plant ที่มีความสอดคล้องกับขอบเขตชนิดต่างๆ ของทฤษฎี QFT แต่ทั้งนี้ การออกแบบทั้งหมดนี้ โดยการออกแบบทั้งหมดนั้นถูกทำออกแบบใน Toolbox ของโปรแกรม Matlab (Borghesani *et.al.*, 2003) ซึ่งฟังก์ชันการถ่ายโอนพื้นฐานที่นำมาใช้เพื่อการออกแบบ มีดังต่อไปนี้

1. Gain: K

2. Real pole, real zero: $\left(1 / \left(\frac{s}{p} + 1 \right) \right), \left(\frac{s}{z} + 1 \right)$

3. Complex pole: $\left(1 / \left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1 \right) \right)$

4. Complex zero: $\left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1 \right)$

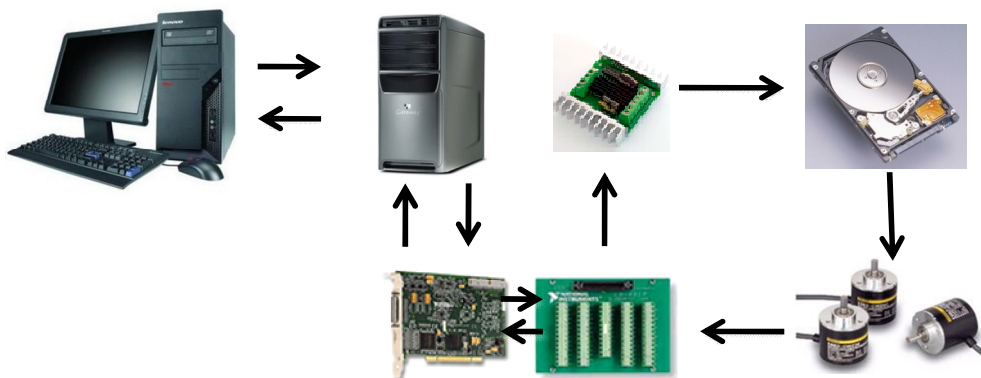
5. Lead or Lag: $\left(\frac{s}{z} + 1 \right) / \left(\frac{s}{p} + 1 \right)$

6. Notch: $\left(\left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi_1}{\omega_n} s + 1 \right) / \left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi_2}{\omega_n} s + 1 \right) \right)$

อุปกรณ์การทดลอง และ วิธีการ

อุปกรณ์

โปรแกรม Labview (ของบริษัท National instrument) และโปรแกรม Matlab ซึ่งทั้ง 2 โปรแกรมนี้ ถูกนำมาใช้ในการทดลองทั้งในสถานการณ์จริง และ สถานการณ์จำลอง สำหรับการ จัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลองนั้น ได้ใช้คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะจำนวน 2 ตัว ซึ่งถูกเรียกว่า Host computer และ Target computer โดยการควบคุมการทำงานนั้น ทำโดยการป้อนคำสั่งเข้าไปใน Host computer แล้วส่งผ่านไปยัง Target computer เพื่อทำการประมวลผล ควบคุมการสั่งงาน และ รับสัญญาณจากตัวเซ็นเซอร์ชนิดต่างๆ (ภาพที่ 14) ข้อดีของการแยกเครื่องสั่งงาน และเครื่อง ประมวลผลออกจากกัน คือ ทำให้การประมวลผลมีความเป็นอิสระ และไม่เกิดผลกระทบจาก โปรแกรมอื่นๆ ในขั้นตอนของการประมวลผล



ภาพที่ 14 ลักษณะของการต่ออุปกรณ์ในการทดลอง

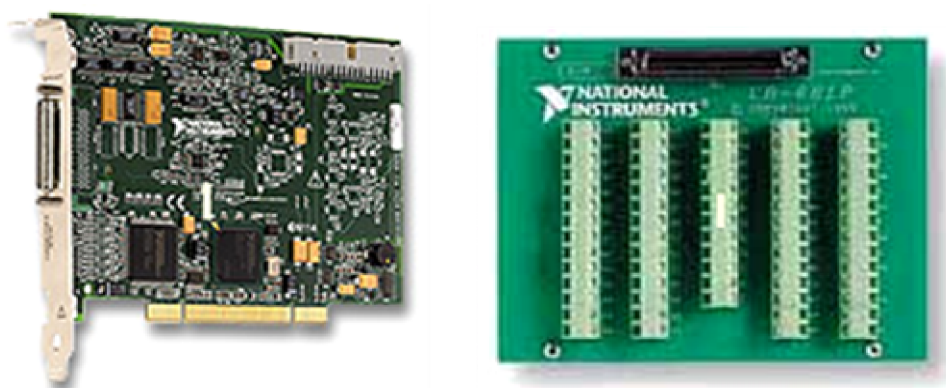
Host computer

Host computer หมายถึง เครื่องคอมพิวเตอร์ตัวหลัก ซึ่งมีหน้าที่ในการควบคุม สั่งการ ทำงาน และ แสดงผลการทำงาน ซึ่งการทำงานทั้งหมดนั้น เป็นการติดต่อ และส่งผ่านข้อมูลกับ Target computer ผ่านทางสายเคเบิล ซึ่งการส่งผ่านข้อมูลนี้ ได้มีการนำโปรแกรมต่างๆ มาใช้ โดย โปรแกรมต่างๆ ที่ถูกนำมาใช้ มีดังต่อไปนี้

1. โปรแกรมระบบปฏิบัติการ Windows XP professional service pack 2
2. โปรแกรม Matlab 7.0
3. โปรแกรม Labview version 8.20
4. โปรแกรม Labview control design 2.1
5. โปรแกรม Labview simulation toolset 8.2

Target computer

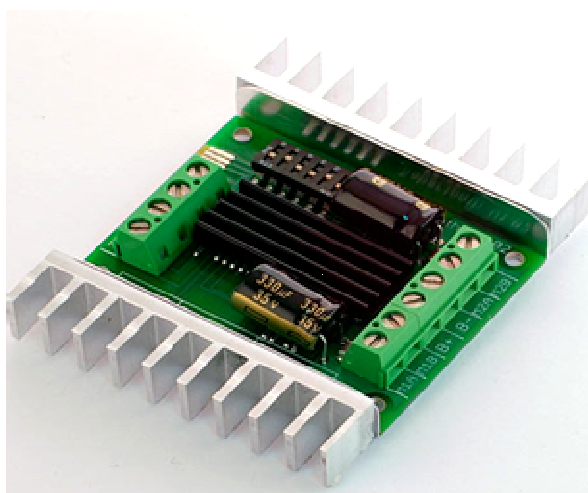
สำหรับการทดลองนี้ Target computer มีหน้าที่ในการประมวลผลการทำงาน รับสัญญาณจากเซ็นเซอร์ และ ส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่ง Target computer ประกอบด้วย Data acquisition card (DAQ) NI PCI 6221 (ภาพที่ 15) ซึ่งเป็นบอร์ดที่ใช้ในการรับ-ส่งสัญญาณควบคุม และเซ็นเซอร์ต่างๆ โดยมีโปรแกรม NI Daqmx 8.3.0 เป็นตัวสนับสนุนการทำงานของบอร์ดนี้ (NI PCI 6221)



ภาพที่ 15 Data acquisition card (DAQ) NI PCI 6221

วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (Power amplifier)

สำหรับการทดลองนี้ วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง (ภาพที่ 16) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยในการขยายสัญญาณ เนื่องจากสัญญาณควบคุมที่ส่งออกมาจากบอร์ด NI PCI 6221 มีปริมาณไม่พอต่อการควบคุมการทำงานของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องนำวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงมาใช้สำหรับการทดลองนี้ (Sabertooth2x10 เป็นรุ่นของวงจรขับมอเตอร์กระแสตรงที่นำมาใช้ในการทดลองนี้)



ภาพที่ 16 วงจรขับมอเตอร์กระแสตรง รุ่น Sabertooth2x10

เอนโคเดอร์เซ็นเซอร์ (Encoder sensor)

โดยทั่วไปแล้วเอนโคเดอร์เซ็นเซอร์ (ภาพที่ 17) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัดตำแหน่งของการเคลื่อนที่ ซึ่งมีการทำงานโดยการยิงลำแสงผ่านแถบมืดและแถบสว่าง โดยสัญญาณที่ออกมา นั้นอยู่ในรูปของระบบดิจิทัล สำหรับการทดลองนี้ได้ใช้เอนโคเดอร์เซ็นเซอร์เป็นตัววัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ โดยเอนโคเดอร์เซ็นเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ Omron รุ่น E6b2-cwz6c ซึ่งมีความละเอียดในการอ่านข้อมูลเท่ากับ 2,000 ครั้ง/รอบ



ภาพที่ 17 เอนโคเดอร์เซ็นเซอร์ (Encoder Sensor) ของบริษัท Omron รุ่น E6b2-cwz6c ชุดทดลองหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

ชุดทดลองหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ คือ ฮาร์ดดิสก์ขนาด 3.5 นิ้ว ของบริษัท Maxtor รุ่น Diamondmax plus 8 ขนาดความจุ 40 GB ซึ่งถูกนำมาดัดแปลงโดยทำการติดตั้งเอนโคเดอร์เซ็นเซอร์เข้าไปตรงแกนเพลลาของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ และทำการต่อแท่นขึ้นมาเพื่อยึดฮาร์ดดิสก์ไว้กับฐานที่เตรียมเอาไว้ (ภาพที่ 18) นอกจากนั้น ในการทดลองได้ทำการถอดแผ่น Platter ออก เพื่อให้สามารถเห็นการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ได้ชัดเจนขึ้น



ภาพที่ 18 ชุดทดลองหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (Maxtor รุ่น Diamondmax plus 8 ขนาดความจุ 40 GB)

วิธีการ

1. การหาสมการทางคณิตศาสตร์ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์
2. การออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค QFT
 - 2.1 การสร้าง Plant template จากเซตความไม่แน่นอนของระบบ
 - 2.2 การกำหนดคุณสมบัติของระบบ และ การสร้างขอบเขตของเทคนิค QFT
 - 2.3 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม และ การออกแบบตัวฟิลเตอร์
3. จำลองการทำงานของขอบเขตของเทคนิค QFT ที่มีผลต่อระบบ

การหาสมการทางคณิตศาสตร์ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำฮาร์ดดิสก์ขนาด 3.5 นิ้ว แบบ Single Actuator ของบริษัท Maxtor รุ่น Diamond Max plus8 ขนาดความจุ 40 GB มาใช้ในการทดลอง ในขั้นตอนของการทดลองนั้นได้ทำการดัดแปลงฮาร์ดดิสก์ใหม่ โดยทำการถอดแผ่น Platter ออก และติดเอ็น โคดเดอร์เซ็นเซอร์เข้าไปที่แกนเพลตา เพื่อใช้ในการวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ สำหรับขั้นตอนต่อไปเป็นขั้นตอนของการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ โดยใช้กฎของนิวตัน หลักในการสร้างสมการ คือ การพิจารณาไดอะแกรมการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (ภาพที่ 19) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่มีลักษณะคล้ายกับการเคลื่อนที่ของลูกตุ้มในแนวระดับ

หลังจากการพิจารณาไดอะแกรมการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (ภาพที่ 19) แล้วสามารถสร้างสมการการเคลื่อนที่โดยใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) ซึ่งรูปของสมการที่ได้เป็นดังสมการที่ (16) คือ

$$T - c\dot{\theta} - k\theta = J\ddot{\theta} \quad (16)$$

เมื่อ T = ค่าทอร์ก (Torque), c = ค่าความหน่วงของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์, θ = มุมของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์, k = ค่าคงที่ของสปริง และ J = ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์



ภาพที่ 19 Diagram ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

สำหรับค่าทอร์กที่มอเตอร์สร้างขึ้นจากการทดลองนี้ สามารถนำมาสร้างเป็นสมการได้ดังสมการที่ (17) และ (18)

$$K_d V = I R_m + K_b \dot{\theta} \quad (17)$$

$$T = K_m I \quad (18)$$

เมื่อ K_d = ค่า Motor drive constant, V = ค่าความดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์, I = กระแสในขดลวด, R_m = ความต้านทานของขดลวดในมอเตอร์, K_b = ค่า Back emf ของมอเตอร์, θ = มุมของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์, T = ค่าทอร์ก (Torque) และ K_m = ค่า Motor torque constant

ทำการรวมสมการที่ (17) และสมการที่ (18) เข้าด้วยกันจะได้รูปสมการใหม่ ดังสมการที่ (19) คือ

$$T = \frac{K_d K_m V}{R_m} - \frac{K_b K_m}{R_m} \dot{\theta} \quad (19)$$

หลังจากนั้น ทำการแทนค่า T ที่ได้จากสมการที่ (19) ลงในสมการที่ (16) จะได้รูปสมการดังสมการที่ (20) คือ

$$\frac{K_d K_m V}{R_m} - \frac{K_b K_m}{R_m} \theta - c \theta - k \theta = J \ddot{\theta} \quad (20)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ (20) ใหม่ ทำให้รูปสมการเป็นดังสมการที่ (21) คือ

$$V = \frac{J R_m}{K_d K_m} \ddot{\theta} + \frac{(c R_m + K_b K_m)}{K_d K_m} \dot{\theta} + \frac{k R_m}{K_d K_m} \theta \quad (21)$$

ทำการกำหนดค่าตัวแปร โดยกำหนดให้ $A = \frac{J R_m}{K_d K_m}$, $B = \frac{(c R_m + K_b K_m)}{K_d K_m}$ และ

$C = \frac{k R_m}{K_d K_m}$ หลังจากนั้น ทำการจัดรูปสมการใหม่ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ จะได้สมการดังสมการที่ (22) คือ

$$V = [\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta] \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} \quad (22)$$

สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สามารถนำวิธี Least square มาใช้เพื่อการหาค่านั้นๆ ได้ โดยที่กำหนดให้ค่า $Y = \Phi \Theta$ ทำให้รูปสมการเป็นดังสมการที่ (23) คือ

$$\Phi \in \mathbb{R}^{n \times 3} = \begin{bmatrix} \ddot{\theta} & \dot{\theta} & \theta \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \ddot{\theta} & \dot{\theta} & \theta \end{bmatrix}, \Theta \in \mathbb{R}^{3 \times 1} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, Y \in \mathbb{R}^{n \times 1} = \begin{bmatrix} V \\ \vdots \\ V \end{bmatrix} \quad (23)$$

เมื่อค่า $n =$ จำนวนข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ทำการ Minimize square error

$$E = \frac{(Y - \Phi \Theta)^2}{2}$$
 จะได้ดังสมการที่ (24) คือ

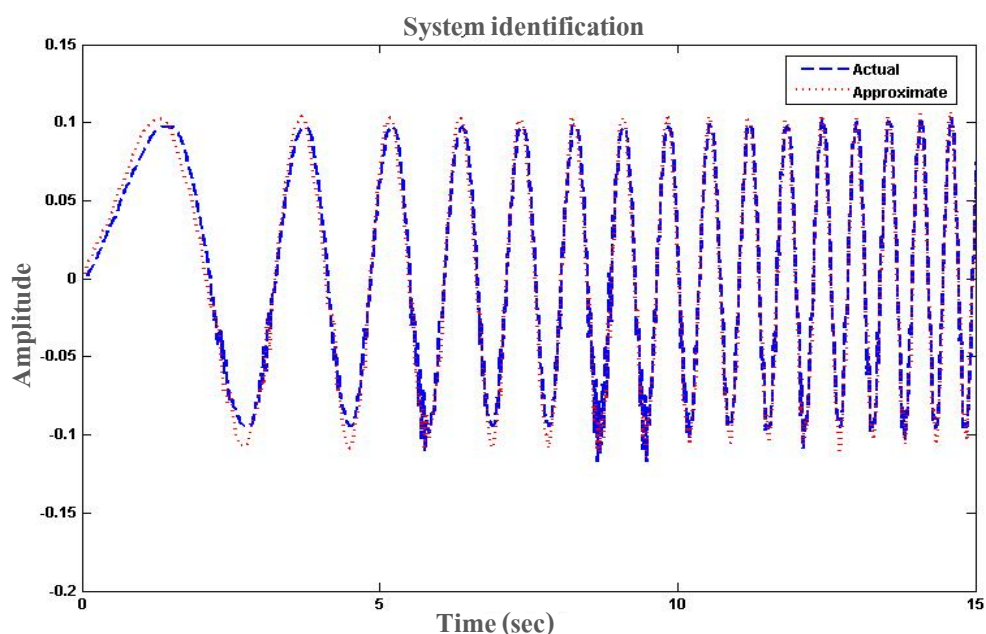
$$\hat{\Theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (24)$$

ขั้นตอนต่อไป คือ ทำการป้อนสัญญาณไฟฟ้าเข้าระบบโดยเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณที่มีขนาดตั้งแต่ 0.1 ถึง 4.0 Hz ในระยะเวลา 60 วินาที ที่ Amplitude 0.15 Volt สัญญาณที่วัดได้จากระบบคือ θ และนำค่า θ ที่ได้นี้ไปทำการหาอนุพันธ์โดยการเลือกใช้วิธี Finite difference ซึ่งการทดลองทั้งหมด 32 ครั้งนี้ ทำให้ทราบถึงช่วงของความไม่แน่นอนในแต่ละตัวแปร ดังต่อไปนี้ $A=[0.0007]$, $B=[0.0673, 0.0715]$, $C=[3.0144, 3.104]$ และเมื่อนำสมการที่ (24) มาทำการเขียนฟังก์ชันถ่ายโอน ทำให้รูปสมการที่ได้เป็นไปตามสมการที่ (25) ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า V (Volt) ที่ป้อนให้กับระบบ และค่า θ ที่สามารถวัดได้

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{1}{As^2 + Bs + C} \quad (25)$$

เมื่อ $\theta =$ มุมของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์, $V =$ ค่าความดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์, $A=[0.0007]$, $B=[0.0673, 0.0715]$ และ $C=[3.0144, 3.104]$

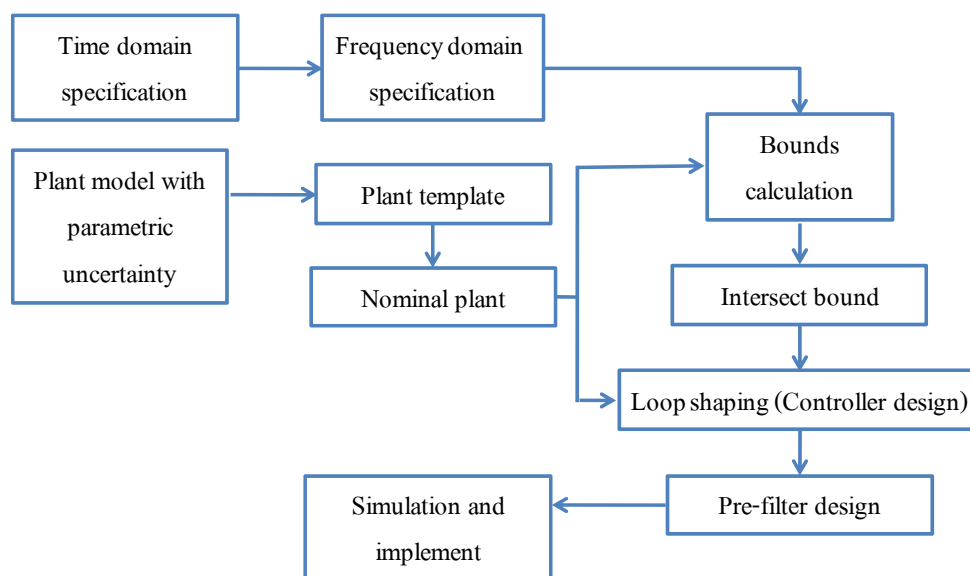
หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าเอกลักษณ์ของระบบระหว่างค่าจริง และค่าที่ได้จากการประมาณ (ภาพที่ 20)



ภาพที่ 20 ผลการเปรียบเทียบค่าเอกลักษณ์ของระบบ (System identification) ที่เป็นค่าจริง (เส้นประ) กับค่าที่ได้จากการประมาณ (เส้นจุด)

การออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค QFT

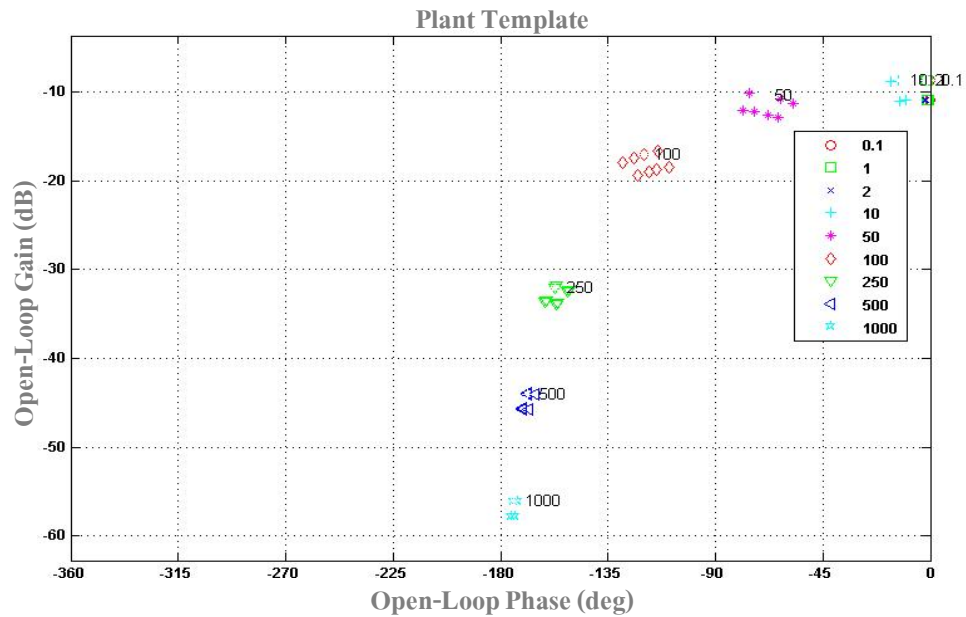
จากพื้นฐานของเทคนิค QFT นี้ ทำให้สามารถทำการสรุปขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมได้ (ภาพที่ 21) โดยการออกแบบนั้น เริ่มจากการกำหนดคุณสมบัติในโดเมนของเวลาก่อน แล้วทำการเปลี่ยนคุณสมบัติเชิงเวลาให้เป็นคุณสมบัติเชิงความถี่ หลังจากนั้น นำค่าที่ได้มาสร้างเป็นขอบเขตของ QFT ร่วมกับ Nominal plant สำหรับส่วนของการสร้าง Plant template นี้ สร้างได้จากเซตของความไม่แน่นอนของระบบ ซึ่งการออกแบบได้นำเซตนี้มาทำการกำหนดจุดลงบนแผนภูมินิโคลส์ ซึ่งเราเรียกกลุ่มของจุดต่างๆ ที่อยู่บนแผนภูมินิโคลส์ว่า “Plant template” และในขั้นตอนของการสร้าง Plant template ได้มีการกำหนดจุด Nominal plant เพื่อเป็นจุดอ้างอิงสำหรับการออกแบบ และขั้นตอนสุดท้าย คือ การนำ Nominal plant และ ขอบเขตที่สร้าง มาทำการออกแบบรวมกัน โดยเราเรียกขั้นตอนนี้ว่า “Loop shaping process” หรือ “การออกแบบตัวควบคุม” นั้นเอง เมื่อออกแบบตัวควบคุมได้แล้วขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นขั้นตอนของการออกแบบตัวฟีดแบ็ค



ภาพที่ 21 กระบวนการในการออกแบบตัวควบคุมด้วย QFT

1. การสร้าง Plant template จากความไม่แน่นอนของระบบ

ในขั้นตอนนี้ได้นำช่วงของความไม่แน่นอนในแต่ละตัวแปรที่ใช้กับสมการที่ (25) มาทำการเพิ่มเปอร์เซ็นต์สำหรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เข้าไปอีก 10% ซึ่งทำให้ได้ช่วงความไม่แน่นอนใหม่ดังต่อไปนี้ $A = [0.00063 \quad 0.00077]$, $B = [0.0617 \quad 0.00077]$, และ $C = 2.713 \quad 3.5269]$ เมื่อทำการกำหนดช่วงความไม่แน่นอนได้แล้ว จึงนำช่วงความไม่แน่นอนเหล่านี้ไปสร้าง Plant template สำหรับขั้นตอนต่อไปเป็นการกำหนด Nominal plant เพื่อเป็นจุดอ้างอิงในการออกแบบ ในที่นี้กำหนดให้จุด $A = 0.0007$, $B = 0.0673$ และ $C = 3.0144$



ภาพที่ 22 Plant template ที่ถูกสร้างขึ้นจากทุกความถี่ที่สนใจ

2. การกำหนดคุณสมบัติของระบบ และการสร้างขอบเขตของเทคนิค QFT

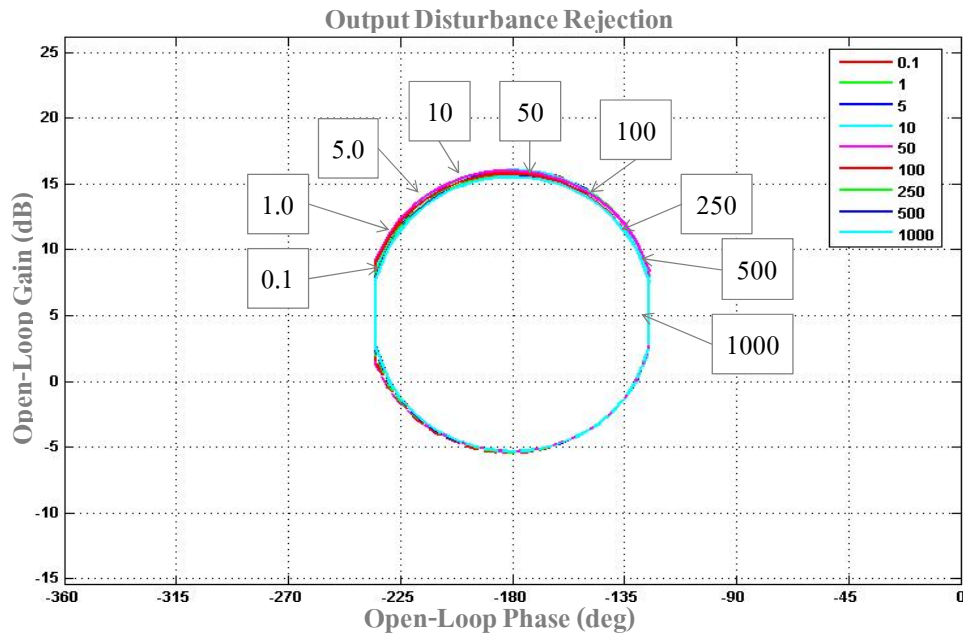
ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ขอบเขตทั้งหมด 2 ขอบเขต คือ Output disturbance rejection และ Tracking ซึ่งรายละเอียดในแต่ละขอบเขตได้อธิบายไว้ ดังนี้

2.1 ขอบเขตแบบ Output disturbance rejection

หลังจากใช้สมการที่ (9) ซึ่งมีรูปสมการ คือ มาพิจารณา Nyquist criterion เมื่อ

$$\left| \frac{1}{1+L} \right| < \delta_s \text{ พบว่า ระบบนี้เป็นการออกแบบด้วย QFT แบบ Single input single output (SISO)}$$

โดยที่ค่าของ $\delta_s = \delta_{do}$ และเป็นระบบที่มีการกระจายตัวของความไม่แน่นอนไม่มากนัก ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการกำหนดค่า $\delta_{do} = 4dB$ หลังจากการทดลองทำให้ได้ค่าต่างๆ ที่สามารถนำมากำหนดจุดบนแผนภูมิไนควิสต์ได้ (ภาพที่ 23)



ภาพที่ 23 ผลลัพธ์ที่เกิดจากการนำค่าต่างๆ ที่ได้จากการออกแบบด้วย QFT มากำหนดจุดบน แผนภูมิโคตส์ ในขั้นตอนของการกำหนดขอบเขตแบบ Output disturbance rejection

2.2 ขอบเขตแบบ Tracking

เป็นการออกแบบให้ระบบมีการทำงานอยู่ระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอน 2 ฟังก์ชันที่ได้

กำหนดขึ้น เราสามารถสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนนี้ได้ตามสมการที่ (14) คือ $T_{RU} = \frac{\omega_n^2 (s+a)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$

และ สมการที่ (15) คือ $T_{RL} = \frac{K}{(s+a_1)(s+a_2)(s+a_3)}$ สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ทำการกำหนดค่าของ

ตัวแปรต่างๆ ให้มีค่าดังต่อไปนี้

$$\omega_n = 605 \text{ rad / s}$$

$$a = 650 \text{ rad / s}$$

$$a_1 = 600 \text{ rad / s}$$

$$a_2 = 600 \text{ rad / s}$$

$$a_3 = 650 \text{ rad / s}$$

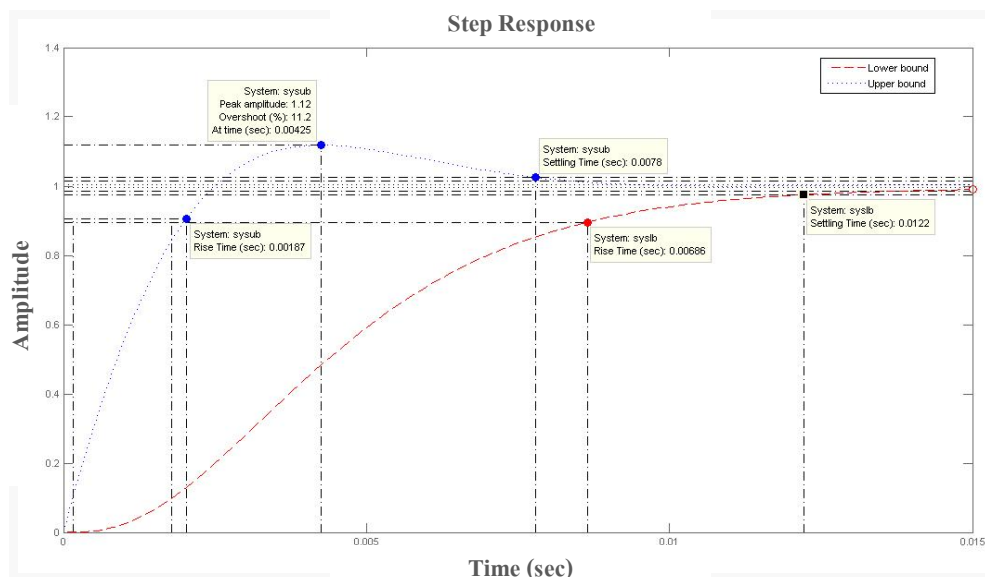
$$\zeta = 0.7071$$

(26)

แทนค่าของตัวแปรต่างๆ เข้าไปในสมการที่ (14) และสมการที่ (15) แล้ว ส่งผลให้ทราบค่าของขอบเขตบน ซึ่งรายละเอียดเป็นดังสมการที่ (27) และ (28) หลังจากได้ค่า T_{RU} และ T_{RL} แล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การนำค่าต่างๆ นี้ไปทดสอบดูค่าผลการตอบสนองเชิงเวลา (ภาพที่ 24)

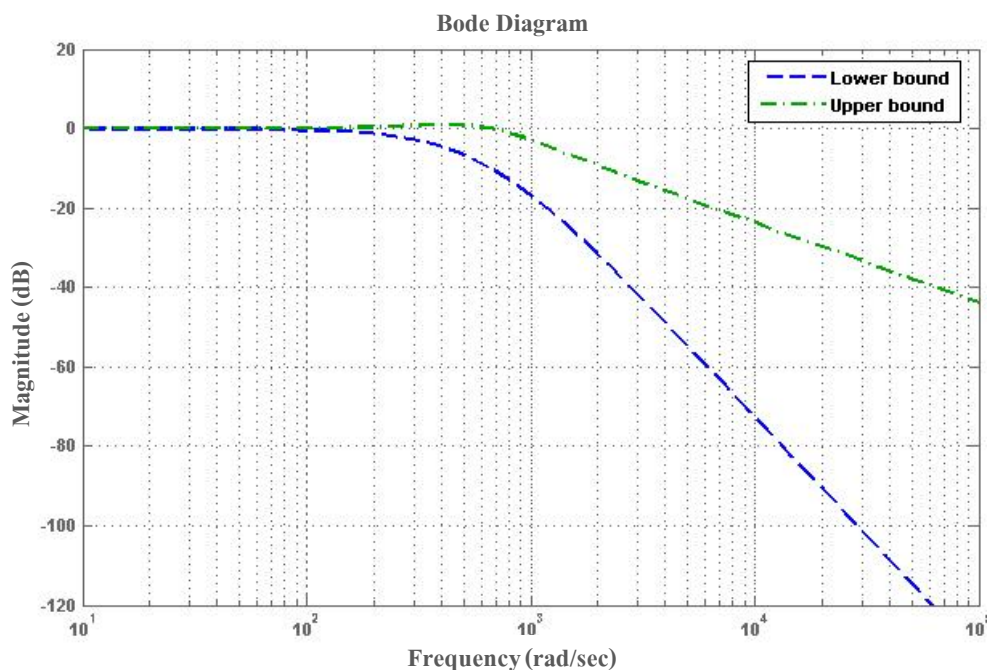
$$T_{ru} = \frac{650s + 422500}{s^2 + 910s + 422500} \quad (27)$$

$$T_{RL} = \frac{2.34 \times 10^8}{s^3 + 1850s^2 + 1.14 \times 10^6 s + 2.34 \times 10^8} \quad (28)$$



ภาพที่ 24 ผลของการตอบสนองเชิงเวลาที่เกิดจากการนำค่า T_{RU} และ T_{RL} มาทดสอบ

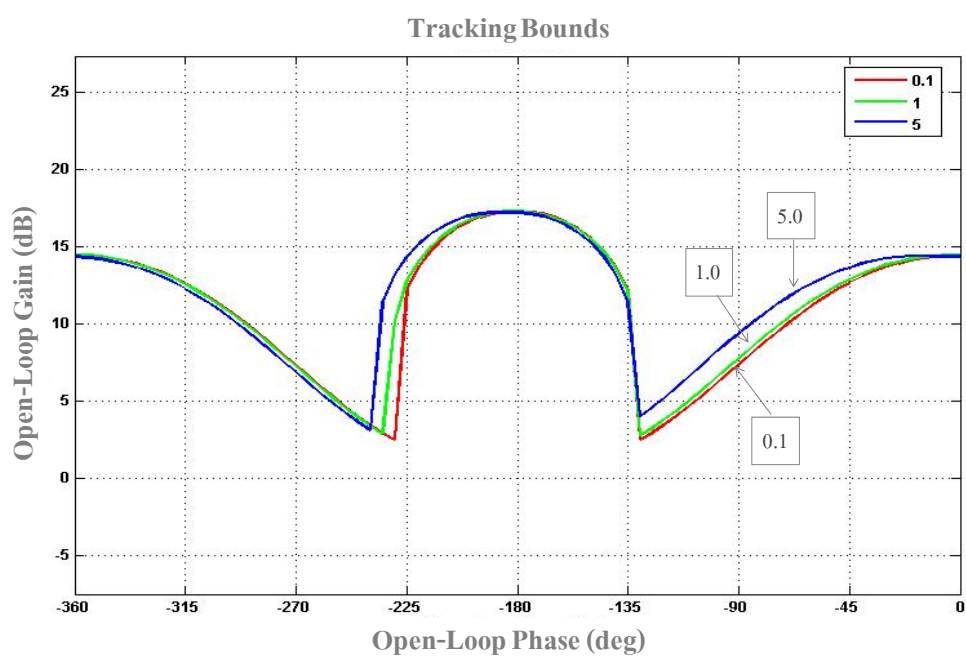
จากผลตอบสนองเชิงเวลาที่ได้นั้นค่า Settling time ของขอบเขตบน อยู่ที่ประมาณ 8 ms และค่า Over shoot ประมาณ 12% ในส่วนของขอบเขตล่างนั้นมีลักษณะเป็น Critical damp ซึ่งค่า Settling time ที่ได้ประมาณ 14 ms และเมื่อนำค่าต่างๆ ที่ได้จาก Tracking specification นี้ มากำหนดจุดบน Bode diagram (ภาพที่ 25) ส่งผลให้ได้ค่า Settling time ของขอบเขตแบบ Tracking อยู่ในช่วง 8-14 ms ซึ่งค่าที่ได้นี้ เป็นช่วงของ Seek time ของฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบัน



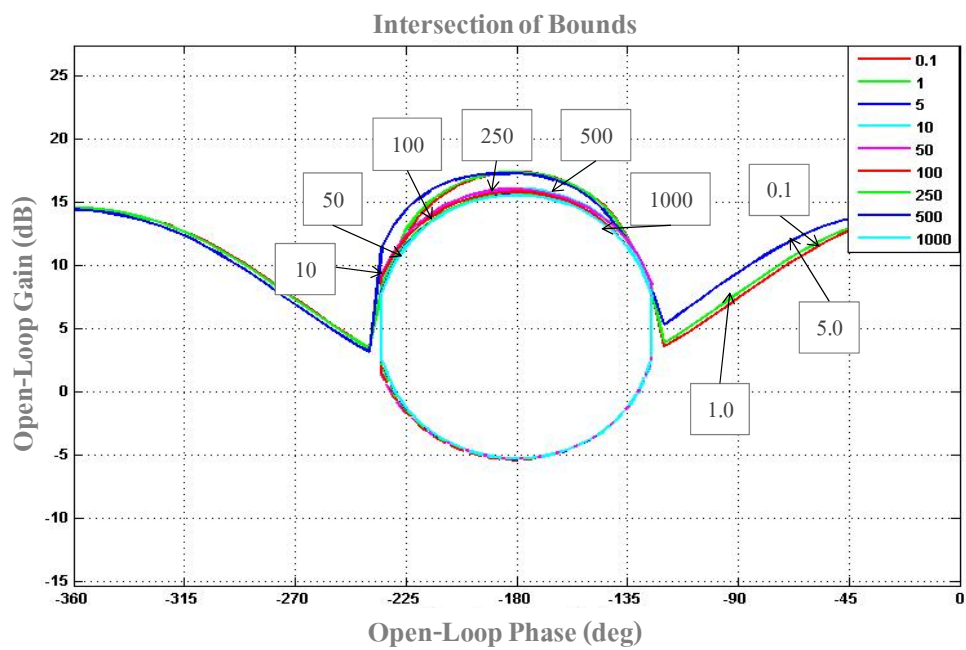
ภาพที่ 25 Bode diagram ของขอบเขตแบบ Tracking ทั้งในส่วนขอบเขตบนและขอบเขตล่าง

หลังจากที่ทำการกำหนดคุณสมบัติเชิงเวลาของระบบได้แล้ว ในขั้นต่อไปเป็นการนำค่าที่ได้กำหนดเหล่านั้นไปทำการสร้างขอบเขต ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค QFT ในส่วนของขอบเขตแบบ Tracking นี้ เป็นการทำงานในที่มีความถี่ต่ำๆ ซึ่งการทดลองนี้ได้ทำการเลือกที่ความถี่ $\omega = [0.05, 0.1, 1.0, 2.0]$ แล้วก็นำค่าต่างๆ เหล่านี้มากำหนดจุดลงบนแผนภูมิโนลิส (ภาพที่ 26)

เมื่อทำการสร้างขอบเขตทั้งหมดที่ได้ทำการเลือกได้แล้ว ขั้นต่อไปเป็นการรวมขอบเขตทั้งหมด และนำมาออกแบบร่วมกับ Nominal plant ที่ได้ถูกกำหนดมาจากรุ่นการสร้าง Plant template (ภาพที่ 27) โดยถ้ามีการซ้อนทับกันของขอบเขต ก็จะทำการรวมขอบเขตทั้งหมดก่อนนำมาออกแบบตัวควบคุมร่วมกัน



ภาพที่ 26 ผลของขอบเขตแบบ Tracking ที่ความถี่ต่างๆ ที่เลือก



ภาพที่ 27 การนำขอบเขตทั้งหมดที่สร้างขึ้นมารวมให้อยู่ภายในรูปเดียวกัน และทำการรวมขอบเขตทั้งหมดเข้าด้วยกัน

3. การออกแบบตัวควบคุมและการออกแบบตัวฟีดเตอร์

3.1 การออกแบบตัวควบคุม

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค QFT นั้น คือ การจัดรูปของ Nominal plant หรือ Loop shaping process ให้สอดคล้องกับขอบเขตทั้งหมด (ภาพที่ 28) ซึ่งในส่วนของการ Tracking นั้นต้องทำการจัดรูปของ Nominal plant ให้อยู่ในช่วงความถี่ที่เหมือนกับความถี่ที่ใช้ในการสร้างขอบเขตแบบ Tracking กล่าวคือ ต้องให้ความถี่นั้นๆ อยู่เหนือเส้นของ Tracking ที่มีความถี่ตรงกัน เช่น ที่ระดับความถี่ 0.05 ในการออกแบบนั้น ต้องจัดรูปให้ Nominal plant ที่ความถี่เท่ากับ 0.05 ไปอยู่บนเส้นขอบเขตของ Tracking ที่มีความถี่เท่ากับ 0.05 เช่นเดียวกัน

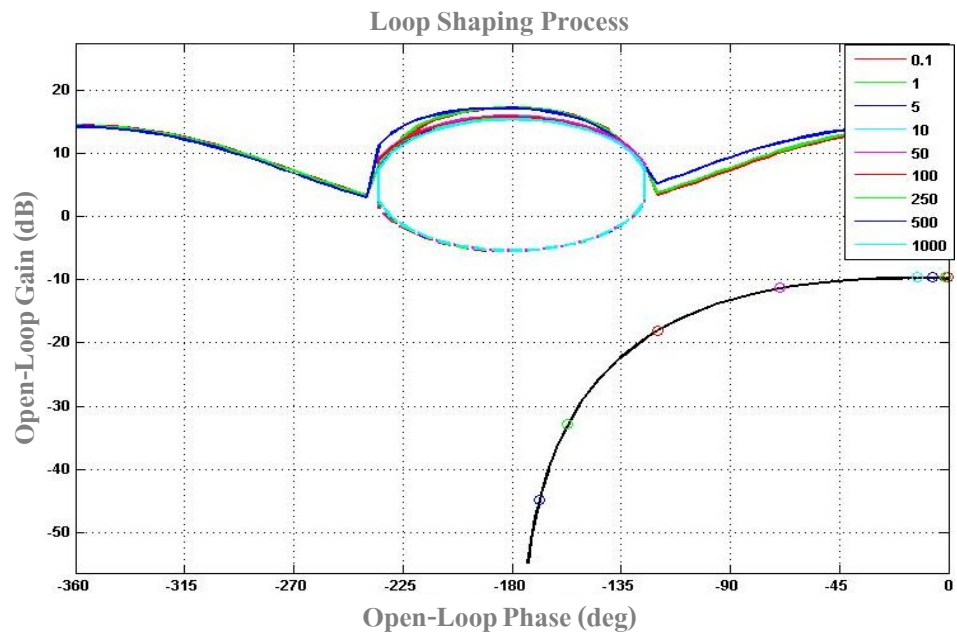
สำหรับส่วนของการออกแบบให้ระบบสอดคล้องกับขอบเขตแบบ Output disturbance rejection โดยการจัดรูปแบบของ Nominal plant ไม่ให้เข้าไปในขอบเขตที่ได้สร้างขึ้น และทำการออกแบบให้ระบบทำงานอย่างมีเสถียรภาพ (Stability) ซึ่งทำได้โดยการออกแบบให้เส้นของ Nominal plant เคลื่อนที่จากทางขวามือลงมาทางซ้ายล่าง สำหรับงานวิจัยนี้สามารถแบ่งขั้นตอนของการออกแบบตัวควบคุม ได้ดังนี้

1. ทำการเพิ่มค่า Gain (K) ให้กับ Nominal plant เพื่อให้ Nominal plant สอดคล้องกับ Tracking สำหรับการทดลองนี้ ได้กำหนดให้ Gain (K) ที่เพิ่มนั้น มีค่าเท่ากับ 18.68 และเมื่อ Nominal plant สอดคล้องกับ Tracking

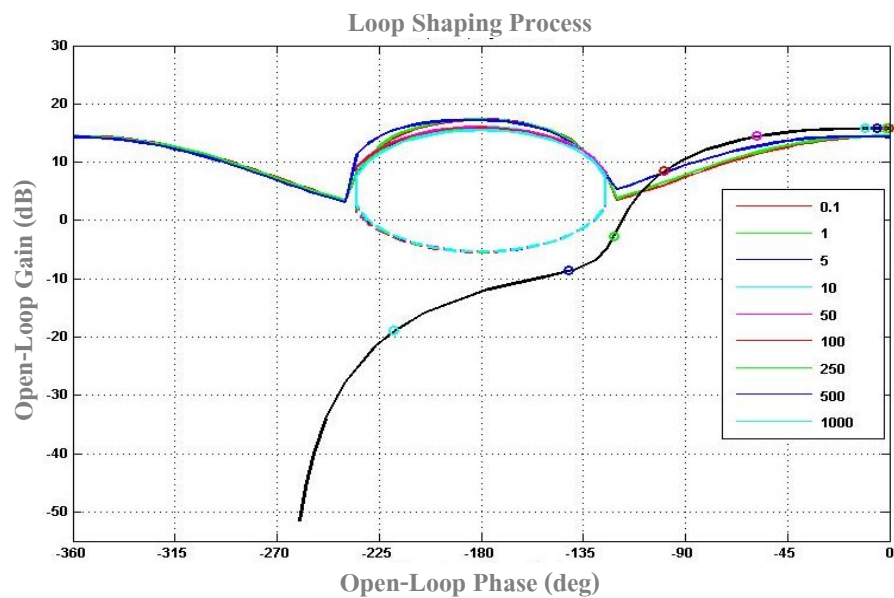
2. การจัดรูปให้ Nominal plant สอดคล้องกับ Output disturbance rejection สำหรับการทดลองนี้ ทำให้เกิดการสอดคล้องกันโดยการเพิ่มค่า Zero เท่ากับ 210 เข้าไปในระบบ เพื่อให้เฟสในช่วงความถี่สูงของ Nominal plant เคลื่อนที่มาอยู่ประมาณ -90 องศา

3. การจัดให้ Nominal plant มีความเสถียรภาพ โดยทำการจัดรูปร่างของ Nominal plant ให้ส่วนที่เป็น High frequency อยู่ในช่วงที่ Phase น้อยกว่า -180 องศา สำหรับการทดลองนี้ ได้ทำการใส่ค่า Complex pole เท่ากับ $\frac{1}{s^2 + 611s + 6.055 \times 10^5}$ ให้กับระบบ เมื่อทำการจัดรูปให้ Nominal plant สอดคล้องกับขอบเขตทั้งหมดแล้ว (ภาพที่ 29) ส่งผลให้ได้ตัวควบคุมเสร็จสมบูรณ์ตามสมการที่ (29)

$$G = \frac{56597.9094(s + 210)}{s^2 + 611s + 6.055 \times 10^5} \quad (29)$$



ภาพที่ 28 ลักษณะของ Nominal plant กับขอบเขตทั้งหมดก่อนการออกแบบตัวควบคุม

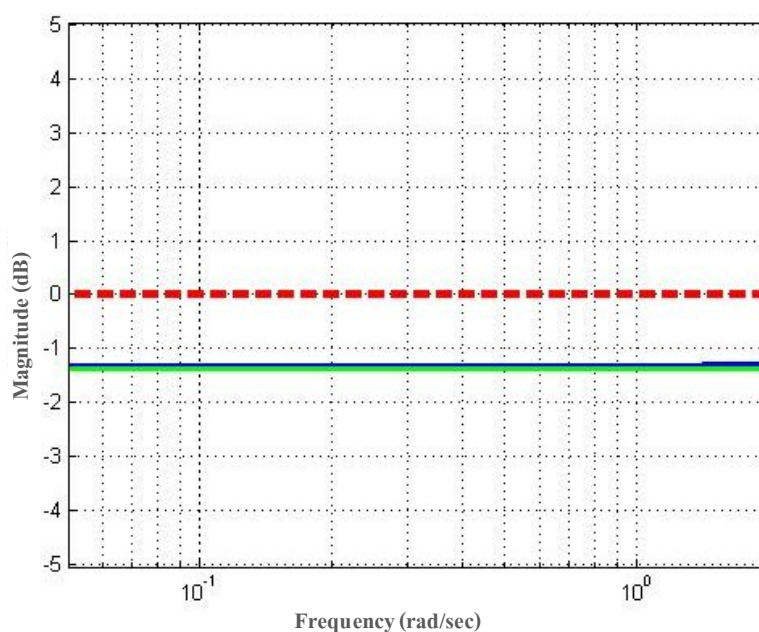


ภาพที่ 29 การจัด Nominal plant ให้สอดคล้องกับขอบเขตทั้งหมด (การออกแบบเสร็จสมบูรณ์)

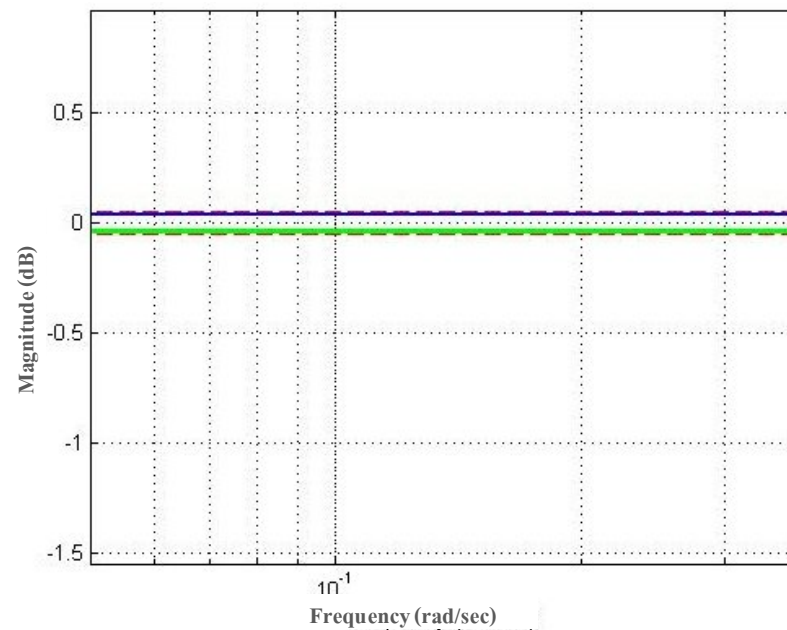
3.2 การออกแบบตัวฟิเตอร์

หลังจากที่ได้ตัวควบคุมมาแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นขั้นตอนของการออกแบบตัวฟิเตอร์ (Prefilter design) ซึ่งการออกแบบตัวฟิเตอร์นั้น เป็นการออกแบบให้ระบบทั้งหมดทำงานภายใต้ขอบเขตที่ได้กำหนดไว้ โดยการออกแบบตัวฟิเตอร์นี้ เป็นการออกแบบให้ระบบที่มีตัวควบคุม ทำงานในช่วงของขอบเขตที่ต้องการ โดยการกำหนดจุดบน Bode diagram (ภาพที่ 30) ซึ่งการออกแบบตัวฟิเตอร์ได้ทำการออกแบบที่ช่วงความถี่ต่ำ (เช่นเดียวกับความถี่ที่ใช้ในการออกแบบขอบเขตแบบ Tracking) โดยการออกแบบนี้ได้ทำการเพิ่มค่า Gain เท่ากับ 1.167 [ดังสมการที่ (30)] เข้าไปในระบบ ซึ่งส่งผลให้ระบบทั้งหมดได้เข้าไปอยู่ภายใต้ขอบเขตที่ต้องการ เมื่อทำได้ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น ส่งผลให้การออกแบบตัวฟิเตอร์เสร็จสมบูรณ์ (ภาพที่ 31)

$$F(s)=1.167 \quad (30)$$



ภาพที่ 30 ผลของการออกแบบตัวฟิเตอร์โดยการกำหนดจุดบน Bode diagram ให้ความถี่ของตัวควบคุมอยู่ในภายใต้ขอบเขตที่ต้องการ



ภาพที่ 31 การออกแบบตัวฟิลเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว

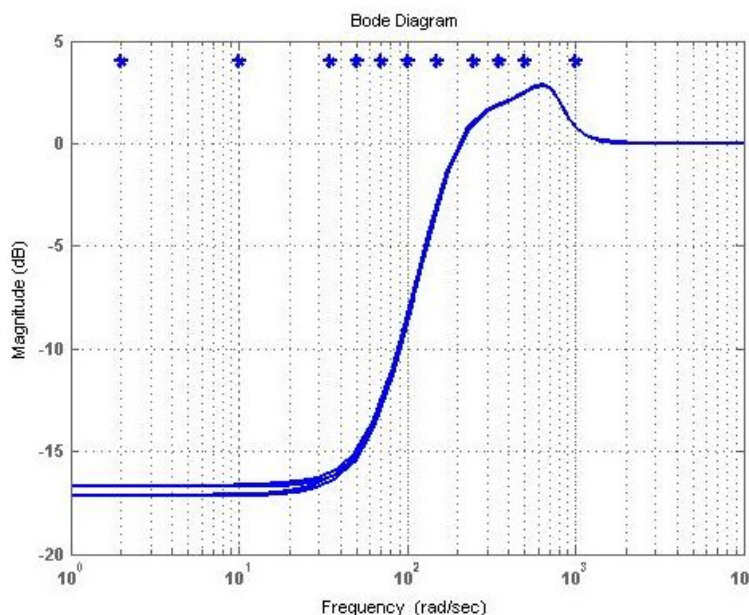
จำลองผลการทำงานของขอบเขตที่มีผลต่อระบบ

เมื่อทำการออกแบบตัวควบคุมและตัวฟิลเตอร์เสร็จสิ้นลงแล้ว ขั้นตอนสุดท้ายเป็นขั้นตอนของการตรวจสอบสนองของระบบกับขอบเขตต่างๆ ที่ได้กำหนดขึ้น ทั้งในส่วนของโดเมนเชิงความถี่ และโดเมนเชิงเวลาของ ทั้งในส่วนขอบเขตแบบ Output disturbance rejection และ Tracking

1. การจำลองผลการทำงานในโดเมนเชิงความถี่ของ Output disturbance rejection

สำหรับการพิจารณานี้ ได้ทำการกำหนดค่าของขอบเขตให้อยู่ในช่วง $\left| \frac{1}{1+PGH} \right| < \delta_{do}$

เมื่อ δ_{do} มีค่าเท่ากับ 4 dB หลังจากทำการจำลองการทำงานในโดเมนเชิงความถี่แล้ว (ภาพที่ 32) พบว่า การดำเนินการของระบบที่ได้จากการออกแบบนั้น ไม่เกินขอบเขตที่ได้ตั้งไว้ คือ 4 dB



ภาพที่ 32 ผลการทดสอบการทำงานใน โดเมนเชิงความถี่ของ Output disturbance rejection
(ดอกจันเป็นจุดที่แสดงตำแหน่งของขอบเขตที่ได้กำหนดค่าไว้ โดยมีค่าเท่ากับ 4 dB)

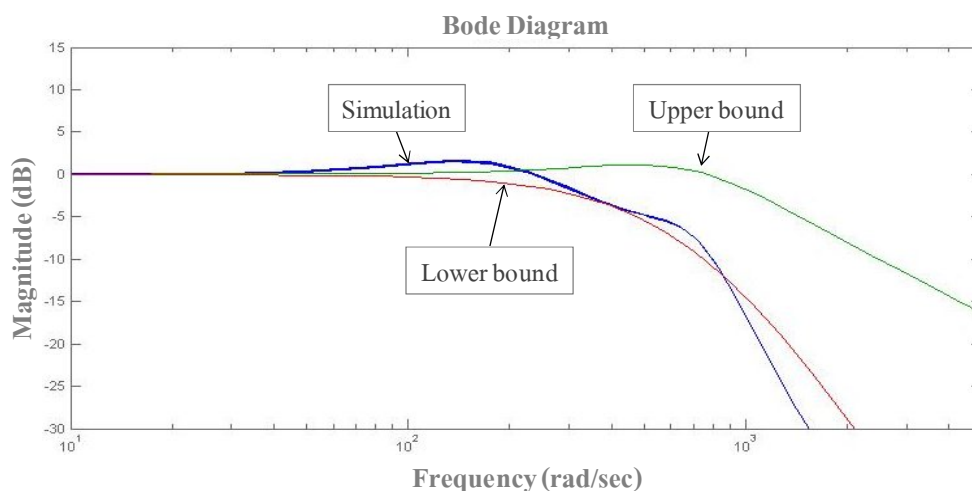
2. การจำลองการทำงานใน โดเมนเชิงความถี่ของ Tracking specification

ในขั้นตอนการจำลองนี้ ได้มีการกำหนดขอบเขตการทำงานของระบบให้อยู่ในช่วง

$$\alpha < \left| \frac{PGF}{1+PGH} \right| < \beta \quad \text{โดยที่ที่กำหนดให้ } \beta = \frac{650s + 422500}{s^2 + 910s + 422500} \quad \text{และค่าของ}$$

$$\alpha = \frac{2.34 \times 10^8}{s^3 + 1850s^2 + 1.14 \times 10^6 s + 2.34 \times 10^8} \quad \text{ซึ่งผลของการจำลองโดเมนความถี่ในส่วน}$$

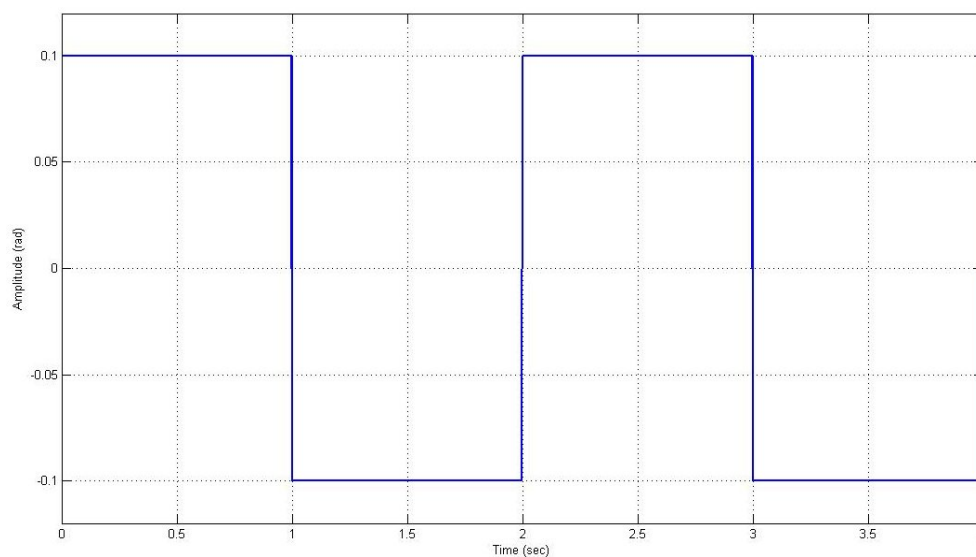
ขอบเขตแบบ Tracking นี้เป็นผลโดยตรงที่เกิดจากการออกแบบตัวฟิลเตอร์ (ภาพที่ 33) โดยที่ค่า β คือ ขอบเขตบนของระบบ และ α คือ ขอบเขตล่างของระบบ หลังจากทำการจำลองการทำงานของระบบแล้ว พบว่า ในช่วงที่มีความถี่สูงๆ ระบบมีการทำงานออกนอกขอบเขตที่ได้กำหนดไว้ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า การออกแบบตัวฟิลเตอร์นั้นได้มีการดำเนินการออกแบบในช่วงความถี่ต่ำ ที่ความถี่สูงๆ ไม่ได้ทำการออกแบบไว้



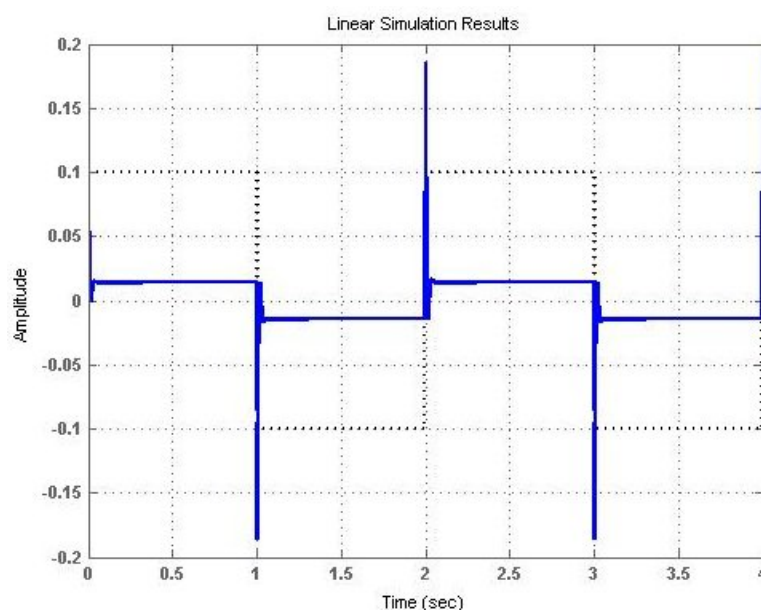
ภาพที่ 33 ผลการจำลองการทำงานในโดเมนเชิงความถี่ของขอบเขตแบบ Tracking (Upper bound คือค่า β หรือขอบเขตบนของระบบ Lower bound คือค่า α หรือขอบเขตล่างของระบบ และ Simulation คือเซตของระบบทั้งหมดที่ได้ทำการกำหนดไว้)

3. การจำลองการทำงานในโดเมนเชิงเวลาของ *Output distribution rejection*

ในส่วนของโดเมนเชิงเวลาของ *Output distribution rejection* นั้น มีผลทำให้ระบบมีการเคลื่อนที่ตาม Square wave โดยเคลื่อนที่ในที่มีความถี่เท่ากับ 0.5 Hz และ Amplitude เท่ากับ 0.1 rad (ภาพที่ 34) จากนั้นทำการจำลองการทำงาน และดูผลการตอบสนองที่มีต่อขอบเขตทั้งหมดที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งการจำลองมีลักษณะคล้ายกับการจำลองในโดเมนความถี่ แต่ต่างกันตรงที่การเคลื่อนที่ของโดเมนเวลามีลักษณะเป็นการเคลื่อนที่ตาม Square wave ที่ได้สร้างขึ้น (ภาพที่ 35)



ภาพที่ 34 ผลของเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบเพื่อใช้ดูผลตอบสนองใน โดเมนเชิงเวลาของ ขอบเขตต่างๆ ที่มีผลต่อระบบ

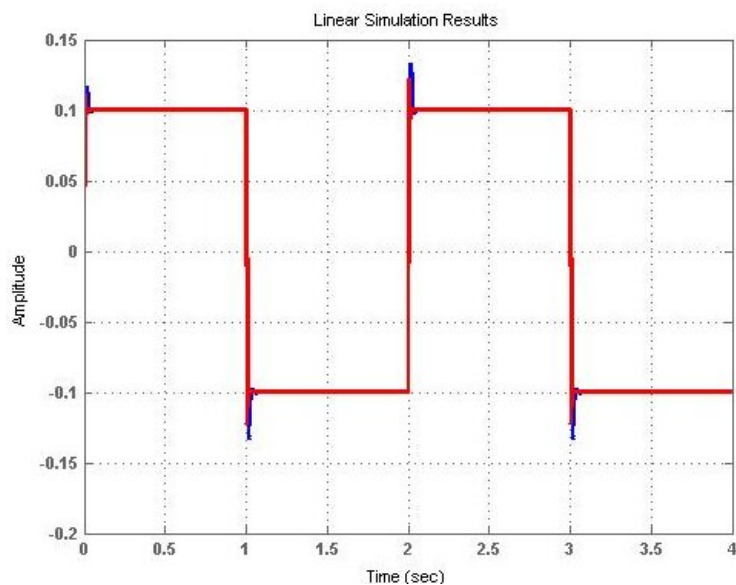


ภาพที่ 35 ผลการจำลองผลการตอบสนองของระบบในโดเมนของ Output disturbance rejection

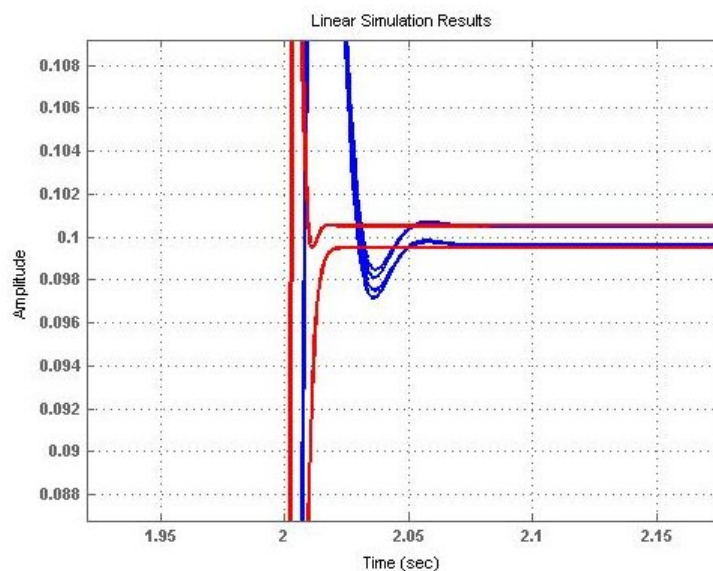
4. การจำลองการทำงานของระบบในโดเมนเชิงเวลาของขอบเขตแบบ Tracking

การจำลองมีลักษณะเป็น การกำหนดให้ระบบทำงานอยู่ภายใต้ขอบเขตที่ได้สร้างไว้ (ภาพที่ 36) หลังจากการทดสอบแล้ว พบว่า ระบบมีการดำเนินการภายใต้ขอบเขตที่ได้กำหนดไว้ได้

ดี แต่ตรงส่วนแรกของ Square wave มีการออกนอกขอบเขตไปบ้าง และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของระบบใกล้ๆ ทำให้เห็นภาพการทำงานของระบบได้ชัดเจนขึ้น (ภาพที่ 37)



ภาพที่ 36 ผลการจำลองการทำงานในโดเมนเวลาของ Tracking specification (เส้นสีน้ำเงินคือระบบทั้งหมด และเส้นสีแดงคือขอบเขตบนและขอบเขตล่างที่กำหนดไว้)



ภาพที่ 37 ผลการจำลองโดเมนเวลาของ Tracking specification โดยการพิจารณาในระยะใกล้ๆ (เส้นสีน้ำเงินคือระบบทั้งหมด และเส้นสีแดงคือขอบเขตที่กำหนดไว้)

ผลและวิจารณ์

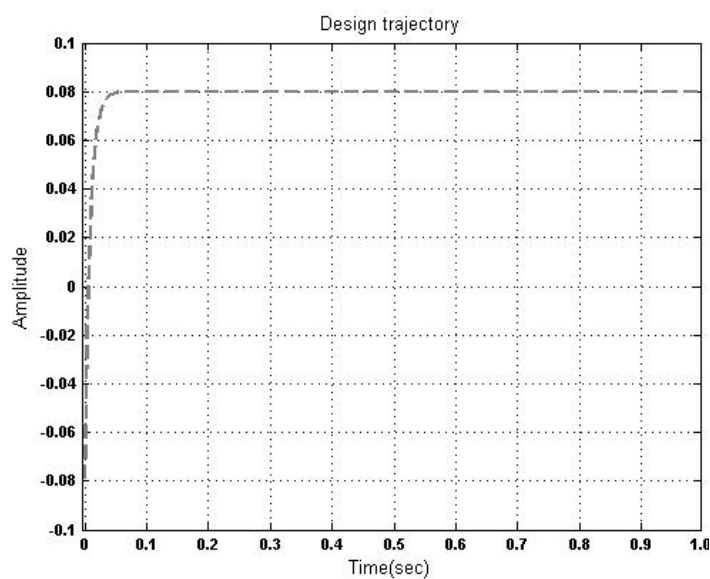
ผล

สำหรับการทดลองเรื่องการควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณสำหรับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์นี้ สามารถทำการแบ่งการสรุปผลการทดลองได้เป็น 3 ข้อ ดังต่อไปนี้

1. ผลที่ได้จากการทดลองแบบ Track seek เป็นการทดลองแบบ Point to point โดยมีการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ให้กับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์
2. ผลที่ได้จากการทดลองให้หัวอ่านฮาร์ดดิสก์เคลื่อนที่ตาม Smooth square wave ที่มีความถี่เท่ากับ 0.5 Hz และมี Amplitude เท่ากับ 0.1 rad
3. ผลที่ได้จากการทดลองให้หัวอ่านฮาร์ดดิสก์เคลื่อนที่ตาม Smooth square wave ที่มีความถี่เท่ากับ 0.5 Hz และมี Amplitude เท่ากับ 0.1 rad ที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PID

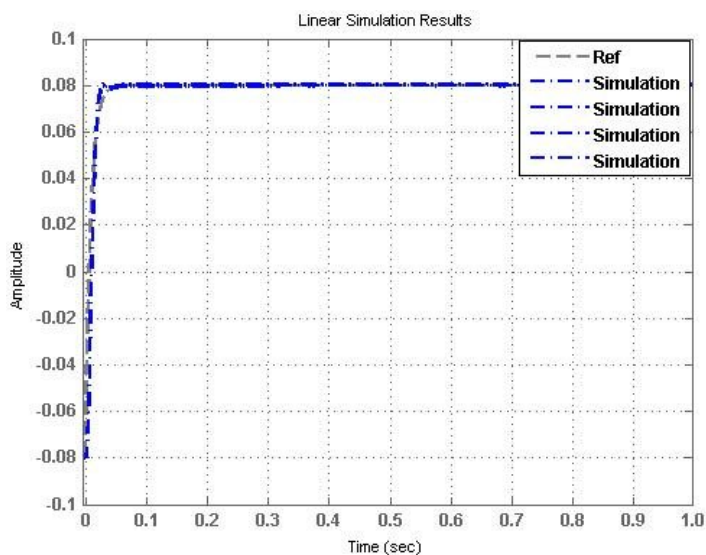
ผลที่ได้จากการทดลองแบบ Track seek

การทดลองแบบ Track seek นี้ มีผลทำให้ระบบมีการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง (Point to point) โดยทำการทดลองบริเวณ $1/3$ ของมุมที่หัวอ่านฮาร์ดดิสก์สามารถกวาดไปได้ ซึ่งมีค่าการเคลื่อนที่อยู่ที่ประมาณ 0.16 rad ในการทดลองนี้ได้ทำการกำหนดช่วงการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ให้อยู่ในช่วง $-0.08 \text{ rad} - 0.08 \text{ rad}$ และในส่วน of เส้นทางการเคลื่อนที่นั้น ได้ใช้ฟังก์ชันถ่ายโอน $\frac{1}{(s + 115)}$ มาประกอบการออกแบบ (ภาพที่ 38)



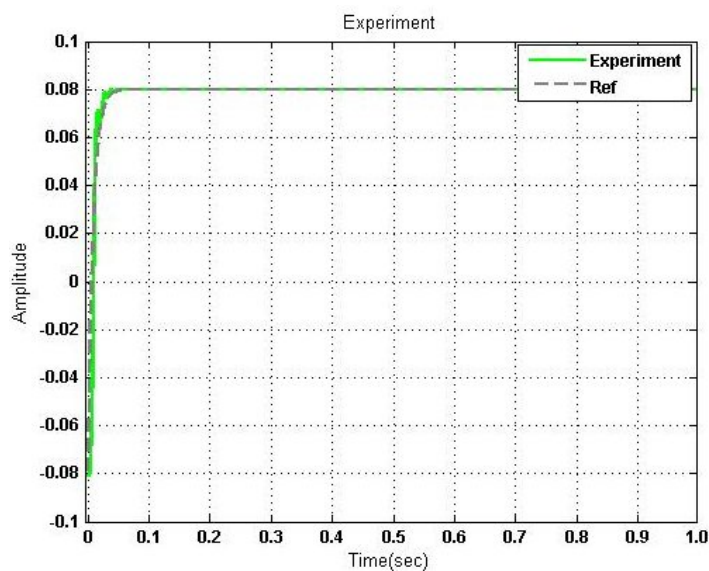
ภาพที่ 38 ผลของการออกแบบการเคลื่อนที่แบบ Point to point ที่มีการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ร่วมกับฟังก์ชันถ่ายโอนที่ $\frac{1}{(s + 115)}$

เมื่อทำการจำลองการเคลื่อนที่ของหัวอ่านตามเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ได้ออกแบบไว้แล้ว (ภาพที่ 39) พบว่า หัวอ่านฮาร์ดดิสก์สามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางได้ดี

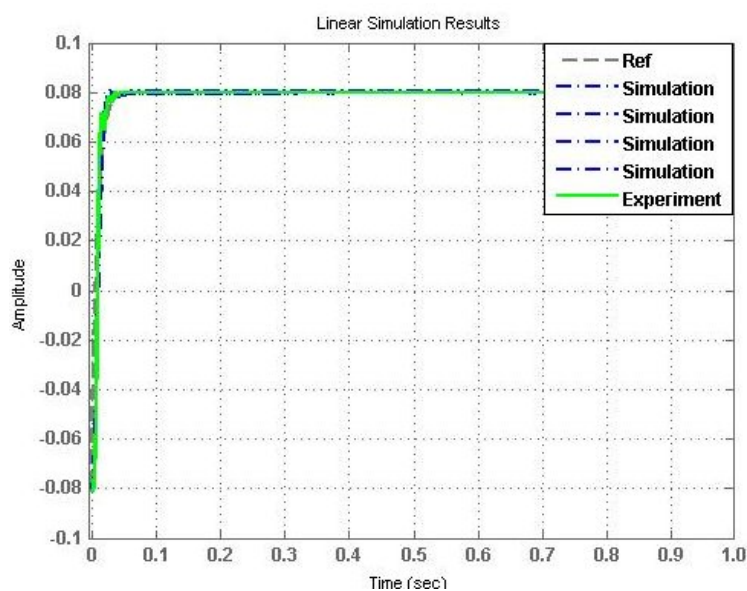


ภาพที่ 39 ผลของการจำลองการทำงานของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ในการทดลองแบบ Track seek (เส้นประจุด)

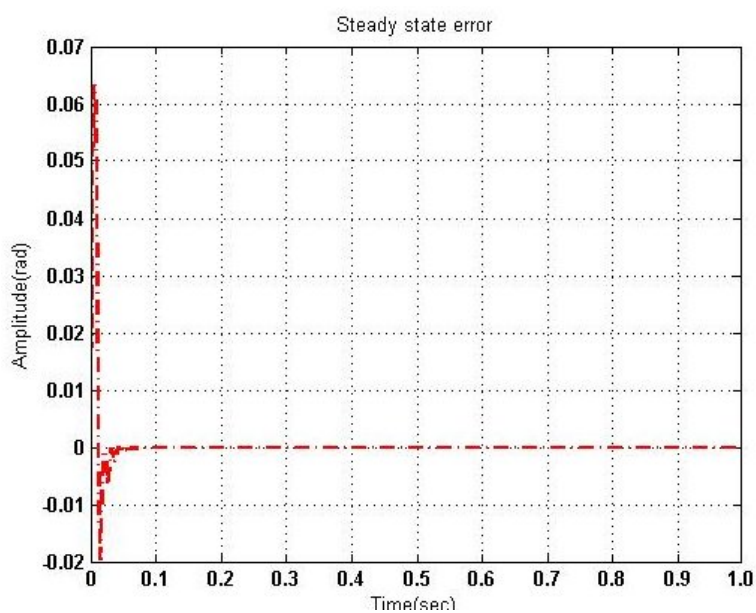
จากผลการทดลอง เมื่อทำการกำหนดค่าความผิดพลาดที่ $\pm 0.5\%$ ทำให้ค่า Seek time ที่ได้ ในโหมด Track seek นี้ อยู่ที่ประมาณ 45.3 ms ส่วนค่าความแม่นยำที่ได้ในโหมด Track following มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ $1.1 \times 10^{-4}\text{ rad}$ (ภาพที่ 40-43)



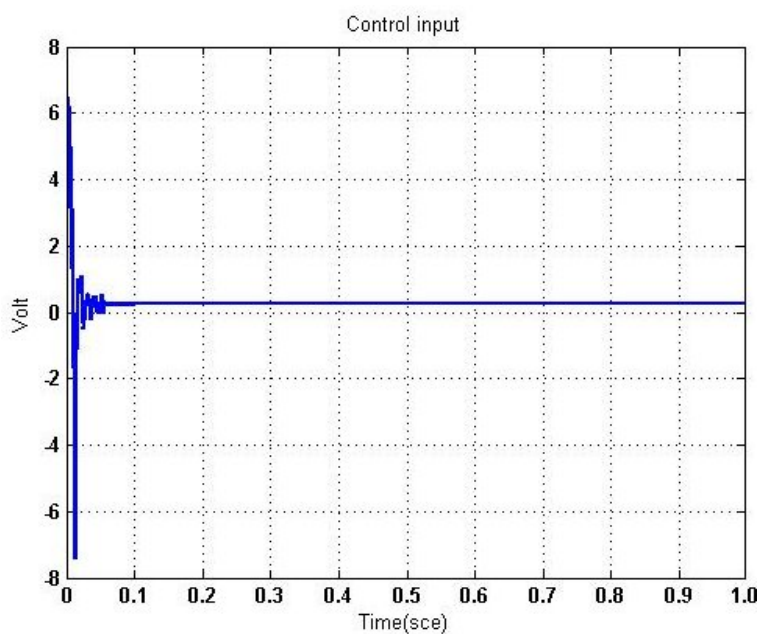
ภาพที่ 40 ผลการทดลองจริงของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ในการทดลองแบบ Track seek (เส้นทึบ)



ภาพที่ 41 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการทำงาน (เส้นประจุด) และผลที่ได้จากการทดลองจริง (เส้นทึบ) ในการทดลองแบบ Track seek



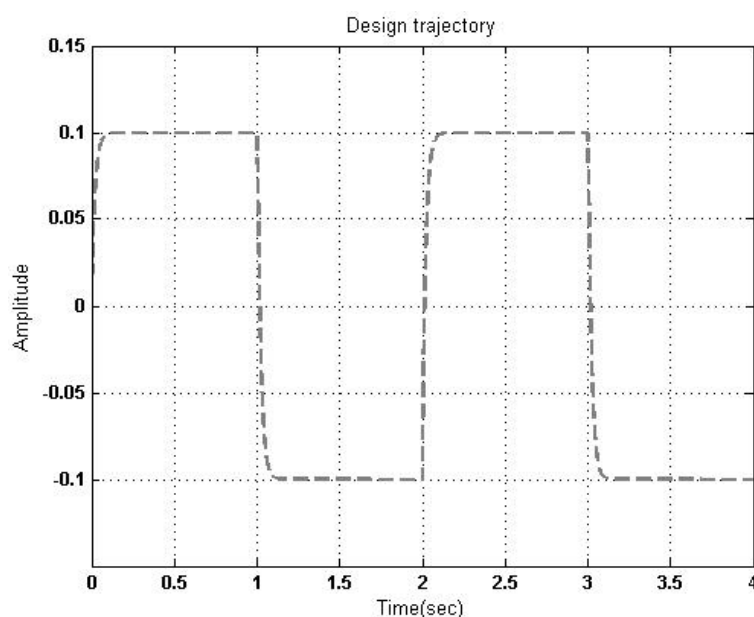
ภาพที่ 42 ค่าความผิดพลาดของระบบที่เกิดขึ้นจากการทดลองจริง ในการทดลองแบบ Track seek



ภาพที่ 43 ค่าของตัวควบคุมที่ป้อนให้กับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ในการทดลองแบบ Track seek
ที่มีการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ให้กับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

การทดลองให้หัวอ่านฮาร์ดดิสก์เคลื่อนที่ตาม Smooth square wave

ในขั้นตอนของการทดลองนี้ มีการกำหนดการเคลื่อนที่ให้กับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ โดยให้เคลื่อนที่ตาม Smooth square wave ที่ความถี่ 0.5 Hz และ Amplitude 0.1 rad นอกจากนี้ยังได้นำฟังก์ชันถ่ายโอนที่ $\frac{1}{(s + 50)}$ มาใช้ประกอบในการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ด้วย (ภาพที่ 44)

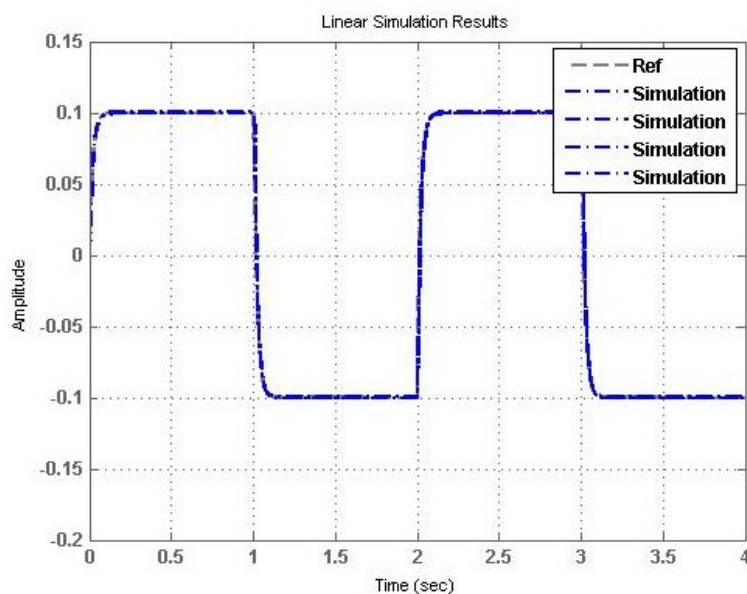


ภาพที่ 44 เส้นทางการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ตาม Smooth square wave ที่เกิดจากการออกแบบการเคลื่อนที่ร่วมกับฟังก์ชันถ่ายโอน $\frac{1}{(s + 50)}$

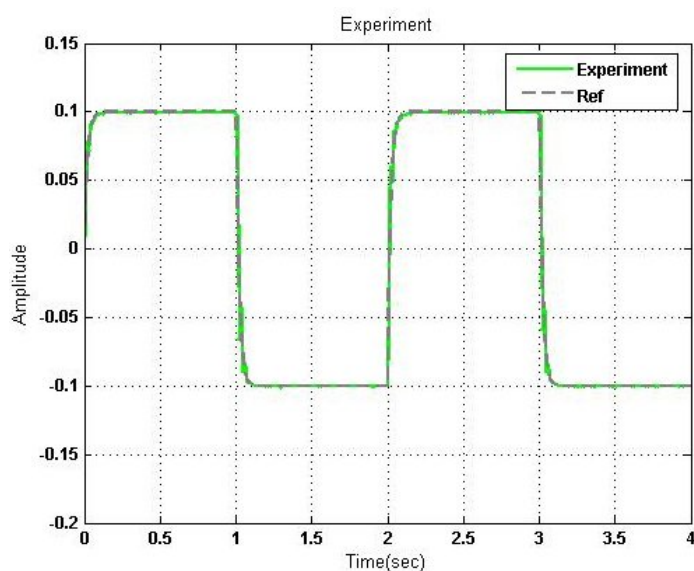
สำหรับการทดลองในส่วนนี้ ได้ใช้หลักของการหาค่าเฉลี่ยกำลังสองตามสมการที่ (31) ในการหาค่าความผิดพลาดทั้งหมดที่เกิดขึ้น เมื่อกำหนดให้ $X = \{X_1, X_2, X_3 \dots X_N\}$ และ $N =$ จำนวนสมาชิกในเซตของ X

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2} \quad (31)$$

การทดลองถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์ - เป็นการนำค่าขอบเขตที่มุมทั้งหมดของ Plant template มาจำลองการทำงาน (ภาพที่ 45) และส่วนของการทดลองจริง (ภาพ 46)

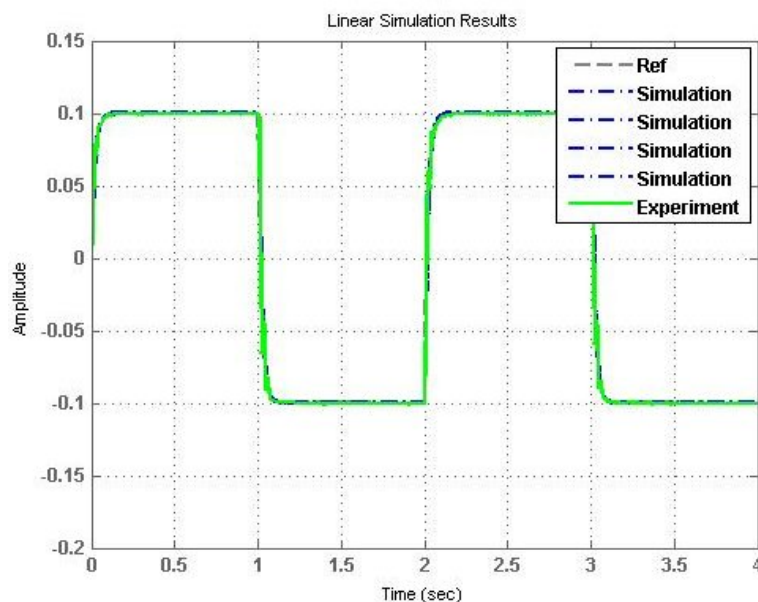


ภาพที่ 45 การนำค่าขอบเขตที่มุมทั้งหมดของ Plant template มาจำลองการทำงานในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่มีการเคลื่อนที่ตาม Smooth square wave



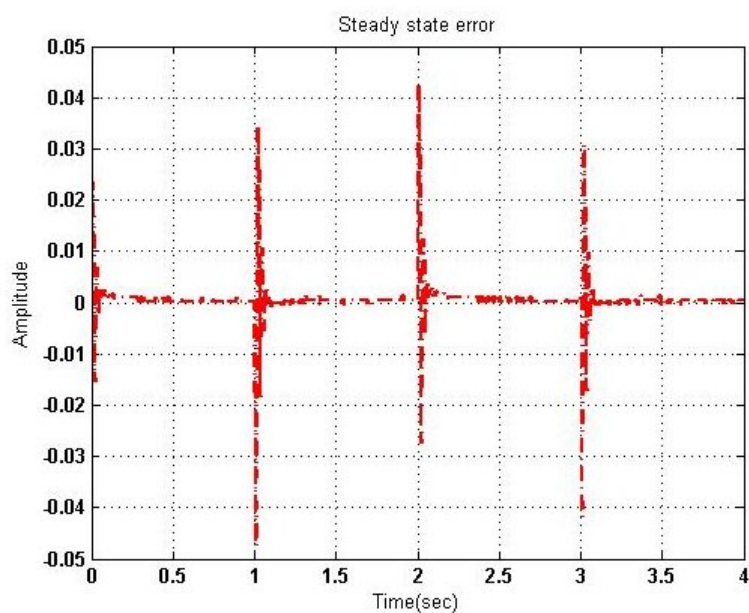
ภาพที่ 46 ผลการทดลองจริงของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่มีการเคลื่อนที่ตาม Smooth square wave

เมื่อนำผลที่ได้จากการทดลองจริง และผลที่ได้จากการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์ มาเขียนกราฟรวมกัน (ภาพที่ 47) พบว่า ค่าเฉลี่ยกำลังสองที่ได้จากการจำลอง และค่าที่ได้จากการทดลองจริงนั้น มีค่าที่ใกล้เคียงกัน

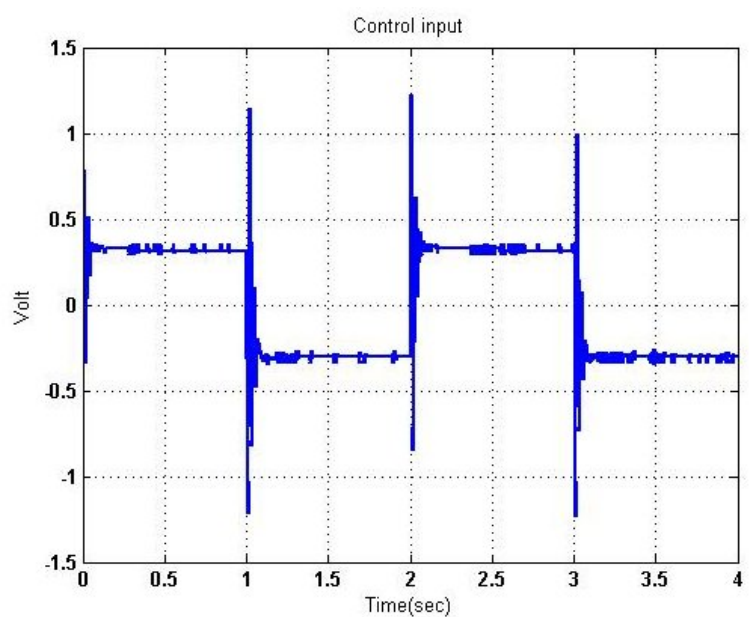


ภาพที่ 47 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองจริง (เส้นสีเขียว) และผลที่ได้จากการจำลอง (เส้นสีน้ำเงิน) ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่มีการเคลื่อนที่ตาม Smooth square wave

สำหรับค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการทดลองจริง (ภาพที่ 48) พบว่า ในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่มีค่าความผิดพลาดที่สูง อันเนื่องมาจากค่าความต้านทานต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการในการดัดแปลงฮาร์ดดิสก์นั่นเอง



ภาพที่ 48 ค่าความผิดพลาดของระบบที่เกิดจากการทดลองจริงของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่มีการเคลื่อนที่ตาม Smooth square wave

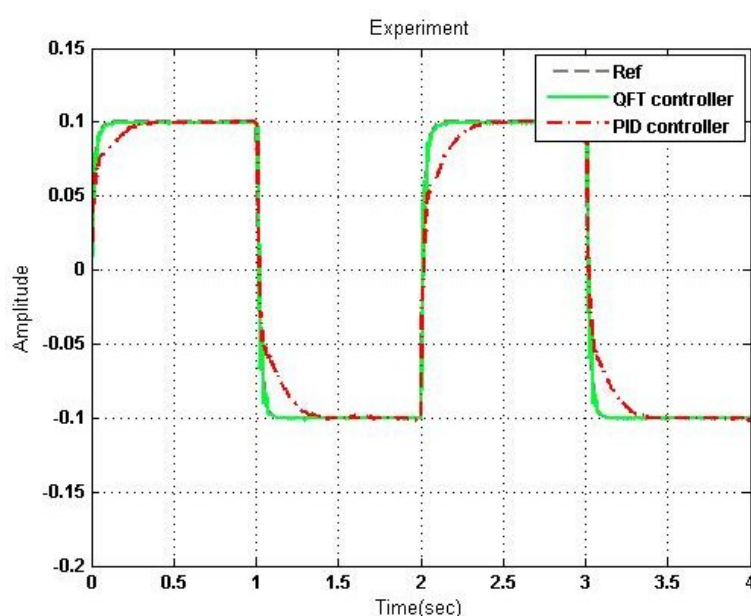


ภาพที่ 49 การป้อนค่าของตัวควบคุมต่างๆ ให้กับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่มีการเคลื่อนที่ตาม Smooth square wave

เมื่อทำการกำหนดให้ระบบมีการเคลื่อนที่ตาม Smooth square wave แล้วพบว่า ระบบสามารถเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงได้ดี และมีค่าความผิดพลาด 0.0048 rad

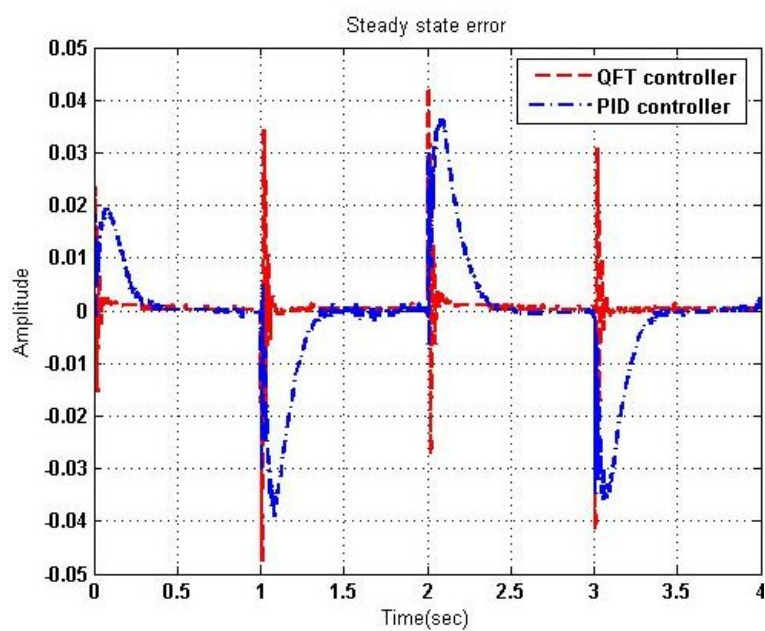
การทดลองให้หัวอ่านฮาร์ดดิสก์เคลื่อนที่ตาม Smooth square wave (เมื่อใช้การออกแบบตัวควบคุมแบบ PID และ QFT)

สำหรับการทดลองนี้ ได้มีการกำหนดให้หัวอ่านฮาร์ดดิสก์มีการเคลื่อนที่ตาม Smooth square wave ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนเท่ากับ $\frac{1}{(s+50)}$ ที่ค่า Amplitude 0.1 rad และค่าความถี่ 0.5 Hz นอกจากนี้ เพื่อให้หัวอ่านฮาร์ดดิสก์มีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้แล้วข้างต้น ในกระบวนการทดลองจำเป็นต้องทำการปรับค่า Gain (K_p), ค่า Differentiator (K_d) และค่า Integrator (K_i) ก่อนเริ่มการทดลอง

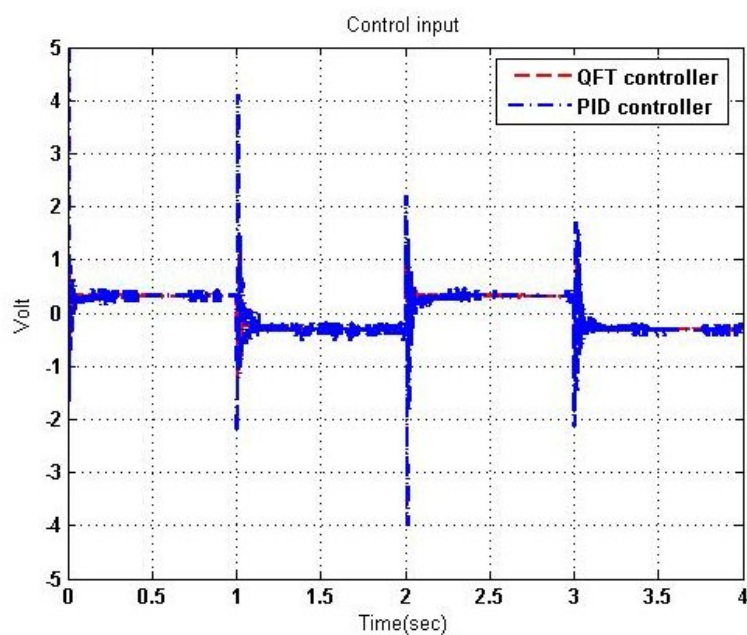


ภาพที่ 50 เปรียบเทียบผลการทดลองการทำงานของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่มีการออกแบบตัวควบคุมแบบ PID (เส้นประจุด) ตัวควบคุมแบบ QFT (เส้นทึบ) และตัวควบคุมอ้างอิง (เส้นประ)

หลังจากที่ได้ทำการทดลองแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการหาค่าความผิดพลาดโดยใช้วิธีกำลังสองเฉลี่ยดังสมการที่ (31) ในการคำนวณ ผลที่ได้พบว่า เมื่อใช้ QFT ในการออกแบบตัวควบคุม ทำให้ได้ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (ภาพที่ 50-51) ของการเคลื่อนที่ตาม Smooth square wave อยู่ที่ 0.0048 rad และผลของการทดลองเมื่อใช้ PID เพื่อการออกแบบตัวควบคุม ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0122 rad



ภาพที่ 51 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของระบบที่เกิดขึ้นจากการทดลองที่ใช้ ตัวควบคุมแบบ PID (เส้นประจุด) และตัวควบคุมแบบ QFT (เส้นประ)



ภาพที่ 52 ค่าของตัวควบคุมที่ป้อนให้กับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ระหว่างตัวควบคุมที่ได้จากการ ออกแบบด้วย PID (เส้นประจุด) และ QFT (เส้นประ)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ในขั้นตอนของการออกแบบตัวควบคุมนั้น สามารถทำการกำหนดคุณลักษณะของระบบให้อยู่ในช่วงที่ต้องการได้ ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมนี้ สามารถมองเห็นภาพของตัวควบคุมที่มีผลต่อระบบได้โดยตรงเลย มีผลทำให้ได้ตัวควบคุมที่มีความเหมาะสม

ส่วนของการทดลองแบบ Track seek และ Track following นี้ ระดับของขีดความสามารถที่ทำได้นั้น ยังไม่เท่ากับฮาร์ดดิสก์ที่ขายกันตามท้องตลาด เนื่องจากแรงเสียดทานต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนของการดัดแปลง และการติดตั้งตัวเซ็นเซอร์ในฮาร์ดดิสก์ นอกจากนั้นเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดมุมการเคลื่อนยังมีความละเอียดไม่เพียงพอ (2,000 ครั้ง/รอบ)

สำหรับการทดลองให้หัวอ่านฮาร์ดดิสก์เคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิง ผลที่ได้พบว่า หัวอ่านฮาร์ดดิสก์สามารถเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงได้ดี นอกจากนั้นผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการจำลองในคอมพิวเตอร์ และเมื่อนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกัน โดยทำการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี และ QFT พบว่า ตัวควบคุมแบบ QFT มีค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่าแบบพีไอดี กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ ตัวควบคุมแบบ QFT สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี

ข้อเสนอแนะ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดมุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ไม่ควรทำให้ระบบพลศาสตร์ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์เกิดการเปลี่ยนแปลง และความสามารถในการวัดตำแหน่งควรมีความละเอียดที่สูงเพื่อการรองรับการทำงานที่ละเอียดมากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. 2548. การควบคุมระบบพลศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- Bailey, F.N. and C.H. Hui. 1991. Loop Gain Phase Shaping for Single Input Single Output Robust Controllers, pp. 93-101. *In IEEE Control Systems Magazine*.
- Borghesani, C., Y. Chait and O. Yaniv. 2003. **The QFT Frequency Domain Control Design Toolbox User's Guide**. Terasoft Inc.
- Chatlatanagulchai, W., B. Inseemeeesak and W. Siwakosit. 2007. Quantitative Feedback Control of a Pendulum with Uncertain Payload. **Journal of Research in Engineering and technology** 4 (4): 347-367.
- Dammers, D., B. Patiice, P. Georg and V.M. Lars. 2001. Motor Modeling Based on Basic Physical Effect Models, pp. 78-83. *In IEEE Workshop Behavioral Modeling and Simulation*.
- David, F.T. and G.G. Kremer. 1997. Quantitative Feedback Design for a Variable-Displacement Hydraulic Vane Pump. *In Proceedings of the American Control Conference Albuquerque, New Mexico*.
- Herrmann, G., G.S. Shuzhi, and G. Guoxiao. 2005. Practical Implementation of a Neural Network Controller in a Hard Disk Drive. **IEEE Transactions on Control System Technology** 13 (1): 146-154.
- Horowitz, I. 1984. History of personal Involvement in Feedback Control Theory. **IEEE Control Systems Magazine**: 22-23.

- Houpis, S.J. and S. Gracia. 2005. **Quantitative Feedback theory: Fundamentals and Applications**. CRC Press. United State of America.
- Jianyi, W., Y. Wang, and G. Guo. 2000. A Nonlinear Trackfollowing Controller for Hard Disk Drives. **IEEE Control Systems**: MP1801-02.
- Jinying, Y.K. and J. Cao. 2005. Application of One-Degree-of-Freedom QFT Tracking Controller to Hydraulic Simulator Design. **IEEE Control Systems** vol (no.): 545-548.
- Maj, S., N. Phillips, M. Pachter, C.H. Houpis and C.S.J. Rasmusse. 1998. A QFT Subsonic Envelope Flight Control System Design. **International Journal of Robust and Nonlinear Control** 7 (6): 581-589.
- Mamun, A.A. and S.S. Ge. 2005. Precision Control of Hard Disk Drive. **IEEE Control systems Magazine** 25 (4): 14-19.
- Mamun, A.A., G. Guo and C. Bi 2007. **Hard Disk Drive: Mechatronics and Control**. CRC Press. United State of America.
- Muhammad, A.H. and A.A. Masoud. 2006. A Nonlinear PID Servo Controller for Computer Hard Disk Drives. **IEEE Control Systems Magazine**: 672-676.
- Monahadas, K.P., K.K. Sivadasan, and G. Guo. 2000. Fuzzy Logic Controllers for Hard Disk Drives. **IEEE Control Systems**. Accession no. GR-03.
- Norman, S.N. 2000. **Control System Engineering**. 3rd ed. John Willey & Sons Inc. United State of America.
- Oded, Y. 1999. Quantitative Feedback Design of Linear and Nonlinear Control Systems. **Kulwer Academy Publishers**, United State of America.

Ying, L., G. Guo and Y. Wang. 2004. A Nonlinear Control Scheme for Fast Settling in Hard Disk Drives. **IEEE Transaction on Magnetics** 40 (4): 2086-2088.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

รูปแบบ ขนาด และการพัฒนาของฮาร์ดดิสก์

รูปแบบ ขนาด และการพัฒนาของฮาร์ดดิสก์

ขนาดของฮาร์ดดิสก์ในยุคแรกมีอยู่ 2 ขนาด คือ

- ขนาดความหนา 8 นิ้ว: 9.5 นิ้ว×4.624 นิ้ว×14.25 นิ้ว (241.3 มม.×117.5 มม.×362 มม.)
- ขนาดความหนา 5.25 นิ้ว: 5.75 นิ้ว×1.63 นิ้ว×8 นิ้ว (146.1 มม.×41.4 มม.×203 มม.)

ในปัจจุบัน (ภายในปี 2551) ได้มีการพัฒนาขนาดของฮาร์ดดิสก์ มากมาย ดังนี้

- ขนาดความหนา 3.5 นิ้ว: 4 นิ้ว×1 นิ้ว×5.75 นิ้ว (101.6 มม.×25.4 มม.×146 มม.) เป็นฮาร์ดดิสก์สำหรับคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ หรือคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ โดย Server ความเร็วในการหมุนจานเท่ากับ 10,000 RPM 7,200 RPM และ 5,400 RPM ตามลำดับ ความจุในปัจจุบันมีตั้งแต่ 80 GB-1 TB

- ขนาดความหนา 2.5 นิ้ว: 2.75 นิ้ว×0.374-0.59 นิ้ว×3.945 นิ้ว (69.85 มม.×9.5-15 มม.×100 มม.) เป็นฮาร์ดดิสก์สำหรับคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Notebook, Laptop หรือ UMPC) อุปกรณ์มัลติมีเดียแบบพกพา โดยมีความเร็วในการหมุนจานเท่ากับ 5,400 RPM และมีความจุในปัจจุบันตั้งแต่ 60 GB-320 GB

- ขนาดความหนา 1.8 นิ้ว: 54 มม.×8 มม.×71 มม.

- ขนาดความหนา 1 นิ้ว: 42.8 มม.×5 มม.×36.4 มม.

- ขนาดความหนา 0.85 นิ้ว: 24 มม.×5 มม.×32 มม.



(ก)

(ข)

ภาพผนวกที่ ก1 ฮาร์ดดิสก์ชนิดต่างๆ (ก) และฮาร์ดดิสก์แบบ SSD (ข)



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ก2 องค์ประกอบภายในฮาร์ดดิสก์ในปี 1997 (ก) และในปัจจุบัน (ข)



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ก3 ขนาดฮาร์ดดิสก์แบบเก่า (ก) และขนาดฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบัน (ข) ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 8 นิ้ว 5.25 นิ้ว 3.5 นิ้ว 2.5 นิ้ว 1.8 นิ้ว และ 1 นิ้ว

การเชื่อมต่อแบบ IDE (Integrated drive electronics) เป็นการเชื่อมต่อแบบเก่า มีข้อจำกัดเรื่องการรองรับการทำงานของฮาร์ดดิสก์ได้แค่ 528 MB ส่วนแบบ E-IDE (Enhanced integrated drive electronics) คือ พัฒนาการของ IDE นั้นเอง สามารถรองรับการเชื่อมต่อในระดับ GB ปัจจุบันการเชื่อมต่อของฮาร์ดดิสก์ นิยมใช้แบบ E-IDE



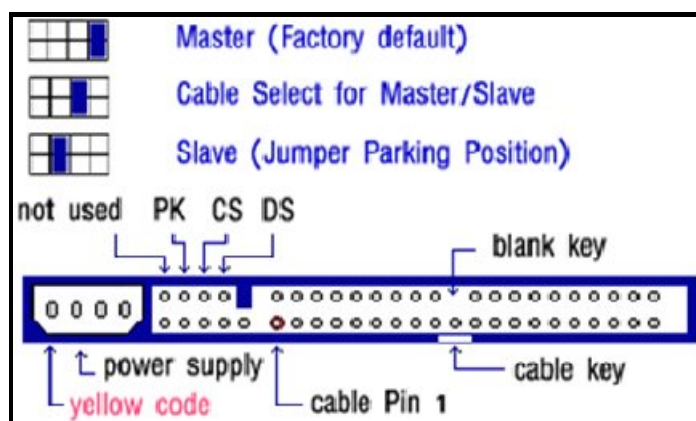
(ก)



(ข)

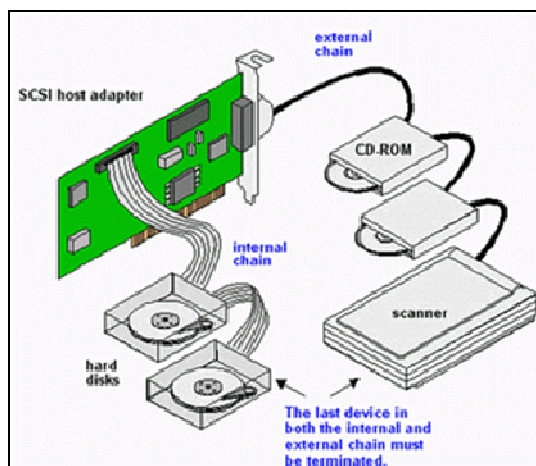


(ค)

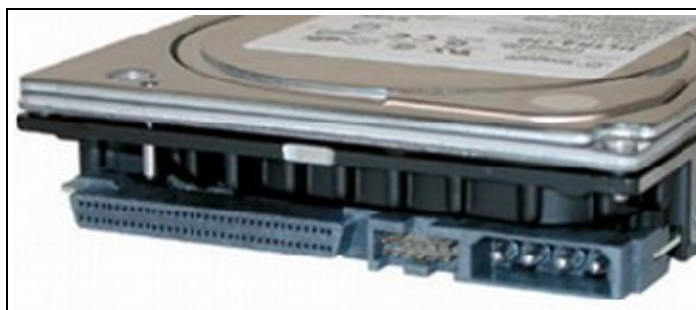


(ง)

ภาพผนวกที่ ก4 ลักษณะของฮาร์ดดิสก์ (ก) (ข) และ (ค) และการเชื่อมต่อแบบ IDE และ E-IDE (ง)



(ก)

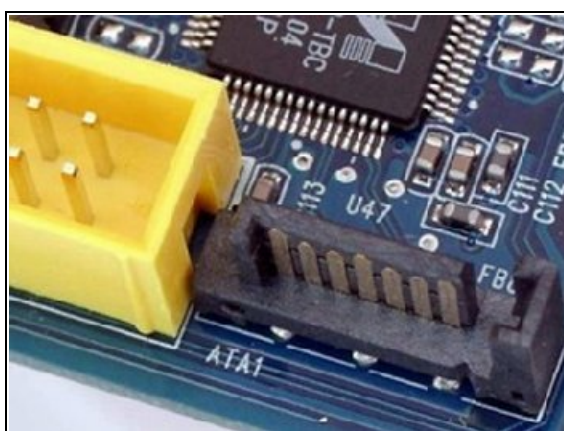


(ข)

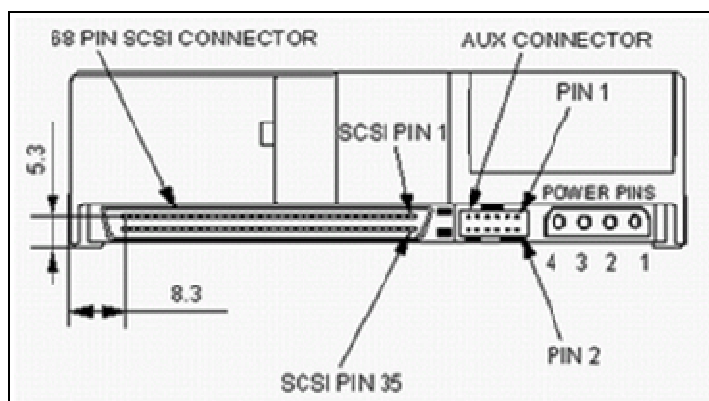
ภาพผนวกที่ ก5 ลักษณะ (ข) และการเชื่อมต่อฮาร์ดดิสก์แบบ SCSI (ก)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพผนวกที่ ๓6 ลักษณะและการเชื่อมต่อของฮาร์ดดิสก์แบบ Serial ATA (ก) (ข) และ (ค)



(ก)

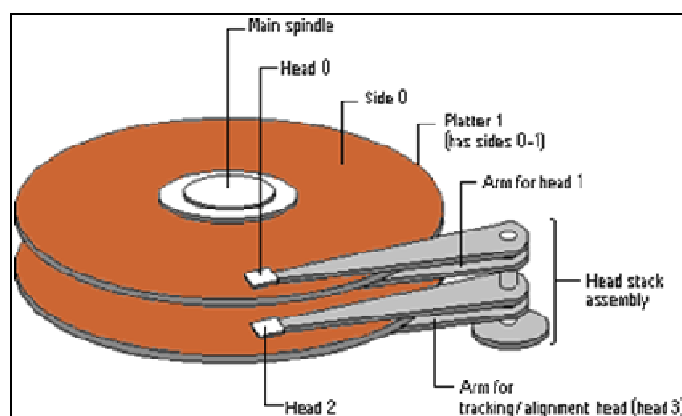


(ข)



(ค)

ภาพผนวกที่ ก7 ลักษณะของฮาร์ดดิสก์จากภายใน (ก) และ (ข) สู่ลักษณะภายนอก (ค)



ภาพผนวกที่ ก8 ส่วนประกอบของฮาร์ดดิสก์

ภาคผนวก ข

การหาความไม่แน่นอนของระบบและการสร้าง Plant template

การหาความไม่แน่นอนของระบบโดยการหา System identification และการสร้าง plant template

เมื่อทำการสร้างสมการเชิงอนุพันธ์การเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์จากการหาเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้วิธี Least square จาก Finite different เมื่อทำการหาค่าของตัวแปรต่างๆ (ตารางผนวกที่ 1) การเก็บค่าทั้งหมดนั้น ทำการเก็บทั้งจำนวน 32 ครั้ง จากตารางผนวกที่ 1 พบว่าค่าตัวแปรที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากการทดลอง มีดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} A &= [0.0007] \\ B &= \begin{bmatrix} 0.0686 & 0.07165 \end{bmatrix}, \\ C &= \begin{bmatrix} 3.0144 & 3.206 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

เมื่อทำการแปลงลาปลาซ ให้อยู่ในรูปความความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมมองสาที่เปลี่ยนไป กับ ค่าความดันที่ป้อนให้กับระบบ ทำให้ได้รูปของความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2) คือ

$$P_i(s) = \frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{1}{As^2 + Bs + C} \quad (2)$$

ตารางผนวกที่ ข1 ผลค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้มาจากการหาเอกลักษณ์ของระบบ

ลำดับ	ค่าตัวแปร A	ค่าตัวแปร B	ค่าตัวแปร C	Resnorm
1	0.0007	0.0706	3.2063	15.9590
2	0.0007	0.0699	3.1489	16.0582
3	0.0007	0.0699	3.1276	15.5420
4	0.0007	0.0715	3.1471	17.8291
5	0.0007	0.0704	3.1276	17.1395
6	0.0007	0.0704	3.1275	17.0158
7	0.0007	0.0705	3.1139	18.1320
8	0.0007	0.0716	3.0981	21.0866
9	0.0007	0.0696	3.0875	21.2669
10	0.0007	0.0701	3.1040	18.8890
11	0.0007	0.0702	3.0965	17.9756
12	0.0007	0.0701	3.0612	18.4298
13	0.0007	0.0698	3.0675	17.5602
14	0.0007	0.0693	3.0695	18.0184
15	0.0007	0.0705	3.0741	19.1142
16	0.0007	0.0695	3.0620	20.0662
17	0.0007	0.0695	3.0608	20.9784
18	0.0007	0.0697	3.0763	17.9555
19	0.0007	0.0697	3.0380	17.5776
20	0.0007	0.0697	3.0303	19.6625
21	0.0007	0.0697	3.0356	17.9452
22	0.0007	0.0673	3.0144	13.8756
23	0.0007	0.0691	3.0340	17.0519
24	0.0007	0.0696	3.0449	17.1304
25	0.0007	0.0689	3.0414	16.1314
26	0.0007	0.0686	3.0271	15.5671
27	0.0007	0.0704	3.0965	18.8890
28	0.0007	0.0705	3.0612	17.9756
29	0.0007	0.0716	3.0675	18.4298
30	0.0007	0.0696	3.0695	17.5602
31	0.0007	0.0702	3.0741	18.0184
32	0.0007	0.0701	3.0620	19.1142

เมื่อทำการแทนค่า $s = j\omega$ ลงในสมการที่ (2) ทำให้รูปแบบของสมการเป็นดังสมการที่ (3) และสมการที่ (4) ตามลำดับ

$$P_i(j\omega) = \frac{1}{A(j\omega)^2 + B(j\omega) + C} \quad (3)$$

$$P_i(j\omega) = \frac{1}{(C - A\omega^2) + B\omega j} \quad (4)$$

ทำการจัดรูปสมการใหม่โดยการนำ $(C - A\omega^2) - B\omega j$ คูณทั้งข้างและบน

$$P_i(j\omega) = \frac{1}{(C - A\omega^2) + B\omega j} \times \frac{(C - A\omega^2) - B\omega j}{(C - A\omega^2) - B\omega j} \quad (5)$$

$$P_i(j\omega) = \frac{(C - A\omega^2)}{\left((C - A\omega^2)^2 + (B\omega)^2\right)} - \frac{(B\omega)}{\left((C - A\omega^2)^2 + (B\omega)^2\right)} j \quad (6)$$

เมื่อทำการแบ่งในรูปเชิงซ้อนในสมการที่ Error! Reference source not found. ทำให้ได้ส่วนประกอบ 2 ส่วน คือ

$$(1) \text{ ส่วนจริง คือ } \frac{(C - A\omega^2)}{\left((C - A\omega^2)^2 + (B\omega)^2\right)} \text{ และ}$$

$$(2) \text{ ส่วนจินตภาพที่ได้ คือ } \frac{-(B\omega)}{\left((C - A\omega^2)^2 + (B\omega)^2\right)}$$

หลังจากนั้นทำการหาขนาด Magnitude ของ $P_i(j\omega)$ ทำให้ได้ $LmP_i = 20 \log |P_i(j\omega)| = 20 \log \sqrt{Re^2 + Im^2}$ เมื่อ LmP_i คือ ขนาด Magnitude ของระบบที่จุดต่างๆ และ $\angle P_i$ คือ มุมของระบบที่จุดต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้เป็นดังสมการที่ (7), (8) และ (9) ตามลำดับ

$$LmP_i = 20 \log \sqrt{\left(\frac{(C - A\omega^2)}{((C - A\omega^2)^2 + (B\omega)^2)} \right)^2 + \left(\frac{(B\omega)}{((C - A\omega^2)^2 + (B\omega)^2)} \right)^2} \quad (7)$$

ทำการหาค่ามุมของแต่ละจุดบน Plant template ทำให้ได้ $\angle P_i = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}}{\text{RE}} \right)$ เป็นดัง สมการที่ (8) และ (9) ตามลำดับ ดังนี้

$$\angle P_i = \tan^{-1} \left(\frac{\left(\frac{(B\omega)}{((C - A\omega^2)^2 + (B\omega)^2)} \right)}{\left(\frac{(C - A\omega^2)}{((C - A\omega^2)^2 + (B\omega)^2)} \right)} \right) \quad (8)$$

$$\angle P_i = \tan^{-1} \left(\frac{-B\omega}{(C - A\omega^2)} \right) \quad (9)$$

นำช่วงของค่าตัวแปรที่ได้จากสมการที่ (1) แทนค่าลงในสมการที่ (6) และ สมการที่ (8) แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ไปกำหนดจุดบนแผนภูมิโพลัสที่ความถี่ค่าหนึ่ง ส่งผลให้ได้ Plant template มา ค่าหนึ่ง ซึ่งความถี่ที่ได้ทำการเลือกมานี้เป็นการเลือกตามความเหมาะสม

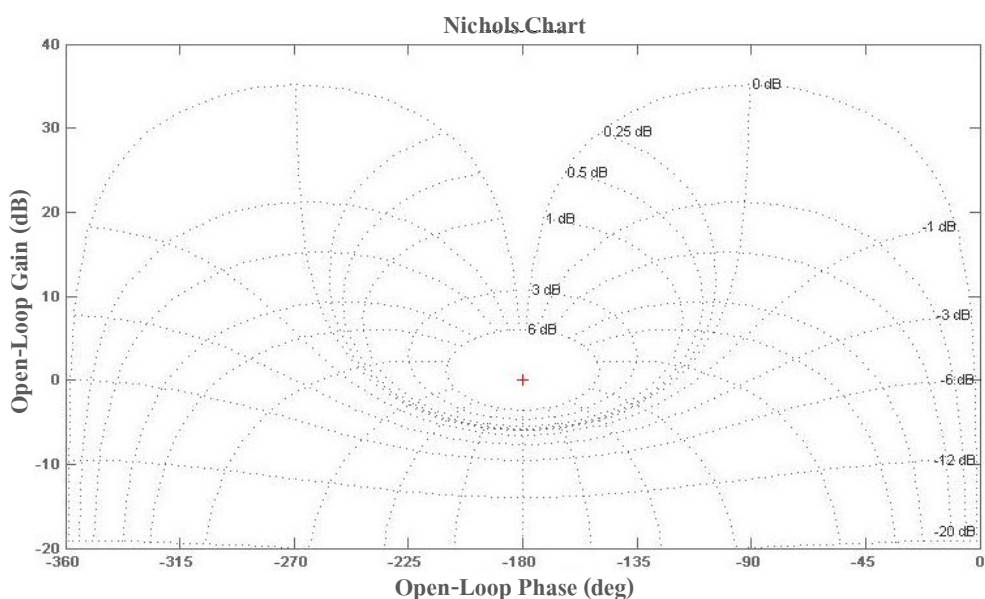
ภาคผนวก ค
การสร้างขอบเขตของ QFT

การสร้างขอบเขตของ QFT

ในส่วนขอบเขตที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ขอบเขต คือ Output disturbance rejection

$$\left| \frac{1}{1+GPH(j\omega)} \right| < \delta_s(\omega) \quad \text{และ Tracking} \quad \alpha(\omega) < \left| \frac{FGP(j\omega)}{1+GPH(j\omega)} \right| < \beta(\omega) \quad \text{แม้ว่าในการ}$$

สร้างขอบเขตของเทคนิค QFT ที่ทำการออกแบบบนแผนภูมิไนโคลส์นี้ เป็นการออกแบบการควบคุมแบบระบบเปิด แต่ผลลัพธ์ที่ได้หลังจากการออกแบบแล้วนั้น มีความสอดคล้องกับระบบควบคุมแบบปิด ทำการพิจารณาบนแผนภูมิไนโคลส์ (ภาพที่ 1) เมื่อทำการเขียนตารางสามารถแสดงให้เห็นคุณสมบัติแบบป้อนกลับซึ่งแสดงได้โดยเส้นปะ ในการสร้างขอบเขตของเทคนิค QFT นี้ได้ทำการแบ่งคุณสมบัติของการออกแบบเป็น 2 หัวข้อ คือ ส่วนของคุณสมบัติแบบ Output disturbance rejection และส่วนของคุณสมบัติแบบ Tracking



ภาพผนวกที่ ค1 ตารางแผนภูมิไนโคลส์

1. คุณสมบัติแบบ Output disturbance rejection มีขั้นตอนการสร้างดังต่อไปนี้

1.1 ทำการเลือกความถี่ที่เราสนใจให้อยู่ในช่วง $[0, \infty)$ เมื่อทำการเลือกความถี่ที่เราสนใจได้แล้วให้กำหนดความถี่ที่เลือกให้อยู่ในเซตของ $\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_n\}$

1.2 ทำการเลือกความไม่แน่นอนของระบบ โดยที่ $P = \{P_1, \dots, P_n\}$

1.3 ทำการเลือกมุมเฟสของตัวควบคุมในเซตที่กำหนดไว้ ตัวอย่างเช่น $\Phi = \{0, 5, \dots, 360\}$ เป็นต้น

1.4 ทำการเลือกความถี่จากข้อ 1.1 ในเซตของ Ω มาหนึ่งค่า

1.5 ทำการเลือกมุม Φ ของตัวควบคุมในหัวข้อ 1.3 มาค่าหนึ่ง

1.6 ขั้นต่อไปเป็นการกำหนดจุดของความไม่แน่นอนทั้งหมด (Plant template) ที่ความถี่ และ มุมที่ทำการเลือก ในขั้นตอนนี้เป็นการพิจารณาค่า สูงสุดและค่าต่ำสุด ของความไม่แน่นอนทั้งหมด เพื่อให้สอดคล้องกับคุณสมบัติที่กำหนดขึ้น เมื่อความไม่แน่นอนสอดคล้องกับคุณสมบัติที่กำหนดขึ้นแล้วก็ทำการกำหนดจุดที่จุด Nominal plant ที่ได้ทำการเลือกเอาไว้ ซึ่งใน 1 ความถี่ และ 1 มุมของตัวควบคุมจะได้จุด 1 จุด

1.7 ทำซ้ำตั้งแต่หัวข้อ 1.5 ถึงหัวข้อ 1.6 ในทุกค่ามุมของตัวควบคุมที่กำหนดไว้ในเซตของ Φ

1.8 ทำซ้ำตั้งแต่หัวข้อ 1.4 ถึง 1.6 ในทุกค่ามุมของตัวที่กำหนดไว้ในเซตของ Ω

2. คุณสมบัติแบบ Tracking

$$\alpha(\omega) < \left| \frac{FGP(j\omega)}{1 + GPH(j\omega)} \right| < \beta(\omega) \quad (10)$$

จากคุณสมบัติของ Tracking ในสมการที่ (10) สามารถนำมาเขียนรูปแบบใหม่ ซึ่งผลที่ได้เป็นดังสมการที่ (11) คือ

$$\begin{aligned} \log \alpha(\omega) - \min_{p \in \{P\}} \log \left| \frac{PG(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| &\leq \log |F(j\omega)|, \text{ and} \\ \log \beta(\omega) - \max_{p \in \{P\}} \log \left| \frac{PG(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| &\geq \log |F(j\omega)| \end{aligned} \quad (11)$$

จากสารการที่ (11) สามารถทำการจัดรูปแบบสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (12) ดังนี้

$$\max_{p \in \{P\}} \log \left| \frac{PG(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| - \min_{p \in \{P\}} \log \left| \frac{PG(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| \leq \log \frac{\beta(\omega)}{\alpha(\omega)} \quad (12)$$

เมื่อได้สมการที่ (12) มาแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการนำสมการ Tracking นี้ มาสร้างเป็นขอบเขตต่างๆ ดังนี้

2.1 ทำการเลือกความถี่ที่เราสนใจ โดยกำหนดให้อยู่ในช่วง $[0, \infty)$ และเมื่อทำการเลือกความถี่ที่เราสนใจได้แล้ว ให้ทำการกำหนดความถี่ที่เลือกให้อยู่ในเซตของ $\Omega = \{\omega_1, \dots, \omega_n\}$ ซึ่งความถี่ที่ใช้ในขอบเขตแบบ Tracking นี้ ส่วนมากเป็นการทำงานที่ความถี่ต่ำๆ

2.2 ทำการเขียน Plant template ลงบนแผนภูมิโนลิสต์ และทำการเลือก Nominal point จาก Plant template

2.3 ทำการเลือกมุมเฟส (ϕ) ของตัวควบคุมในเซตที่กำหนดไว้ ตัวอย่างเช่น $\Phi = \{0, 5, \dots, 360\}$ เป็นต้น

2.4 ทำการเลือกมุมเฟส (ϕ) และทำการเลื่อน Plant template ในแนวระดับ

จน $\max_{p \in \{P\}} \log \left| \frac{PG(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| - \min_{p \in \{P\}} \log \left| \frac{PG(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| = \log \frac{\beta(\omega)}{\alpha(\omega)}$ กำหนดจุดบนนี้ไว้ วังการออกแบบนั้นค่าตัวควบคุมของเราจะต้องเป็น $G(j\omega) = \phi$ และ $|G(j\omega)| > zdB$ (Open loop) ซึ่ง

ค่าที่ออกแบบได้นั้นจะสอดคล้องกับระบบป้อนกลับ (Closed loop) ที่ความถี่เดียวกันกับในหัวข้อที่

$$(2.1) \quad \max_{P \in \{P\}} \log \left| \frac{PG(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| - \min_{P \in \{P\}} \log \left| \frac{PG(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| \leq \log \frac{\beta(\omega)}{\alpha(\omega)}$$

2.5 ทำซ้ำในหัวข้อที่ 2.3 จนมุมทั้งหมดครบ 360 องศา

2.6 ทำซ้ำตั้งแต่หัวข้อ 2.1 จนถึงหัวข้อที่ 2.5

ภาคผนวก ง

การเปรียบเทียบผลของการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง
กับการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่ต่ำ

การเปรียบเทียบผลของการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูงกับการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่ต่ำ

ขอบเขตที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้มีสมรรถนะที่สูงมาก ทำให้การออกแบบฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูงให้สามารถอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ทำได้ยาก ดังนั้นเมื่อต้องการทำการออกแบบให้ฟิลเตอร์ทำงานอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดไว้ จำเป็นต้องทำการออกแบบขอบเขตแบบ Tracking ใหม่เพราะการออกแบบขอบเขตนี้สามารถออกแบบตัวฟิลเตอร์ในย่านที่มีความถี่สูงได้ ดังนั้นตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบขอบเขตแบบ Tracking คือ

$$\begin{aligned}
 \omega_n &= 450 \text{ rad / s} \\
 a &= 450 \text{ rad / s} \\
 a_1 &= 400 \text{ rad / s} \\
 a_2 &= 400 \text{ rad / s} \\
 a_3 &= 450 \text{ rad / s} \\
 \zeta &= 0.7071
 \end{aligned} \tag{13}$$

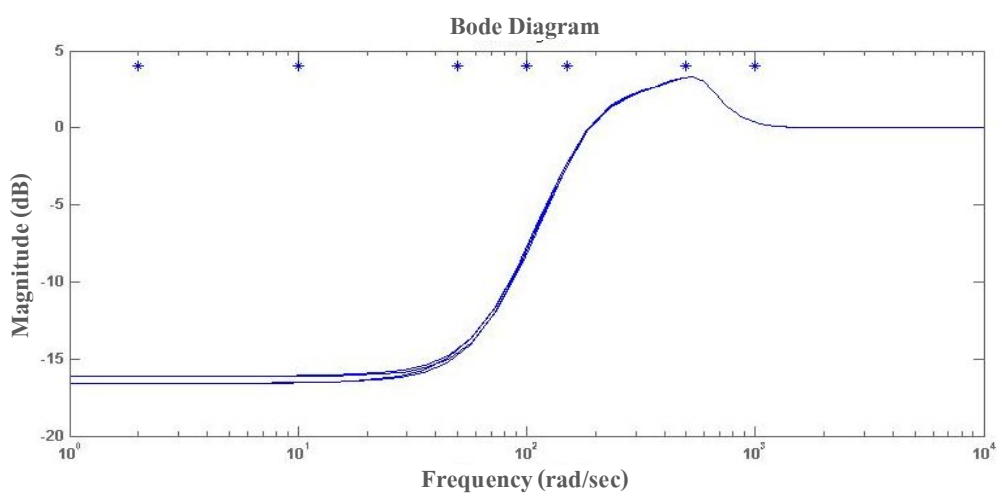
เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขอบเขตแบบ Tracking แล้ว ตัวควบคุมและตัวฟิลเตอร์จะต้องออกแบบใหม่ให้สอดคล้องกับขอบเขตใหม่ที่ได้สร้างขึ้น สำหรับสมการตัวควบคุม [สมการที่ (14)] และสมการตัวฟีดแบ็ค [สมการที่ (15)] ที่ใช้ในการออกแบบมีดังนี้

$$G = \frac{36572.2399(s + 200)}{(s^2 + 520s + 4.225 \times 10^5)} \tag{14}$$

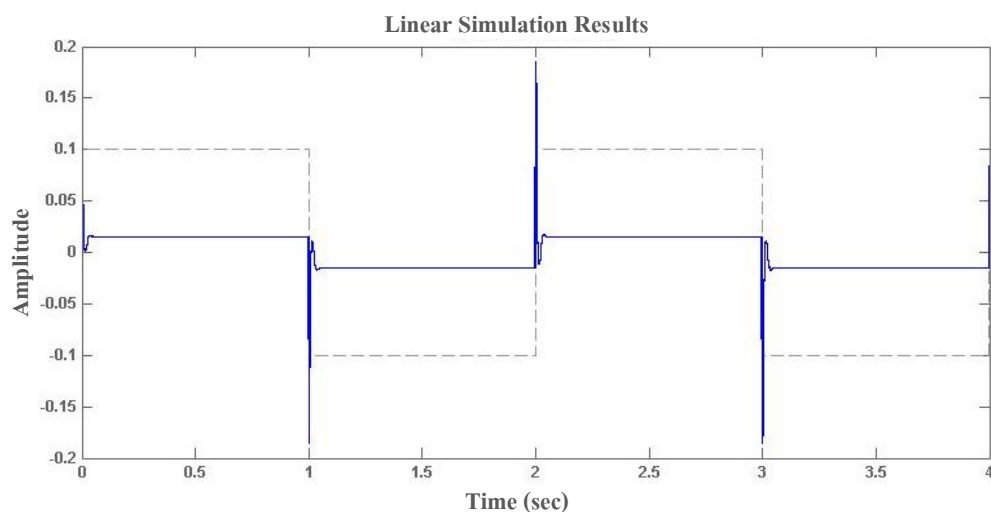
$$F = \frac{0.5982(s + 293.1)}{(s + 148.6)} \tag{15}$$

การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานในโดเมนเชิงความถี่

เมื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองใน โดเมนเชิงความถี่ พบว่าคุณสมบัติในส่วนนี้มีลักษณะที่ตรงกัน คือสามารถลดถึงรบกวนจากภายนอกของระบบได้ตามที่ตั่งคุณสมบัติไว้ที่ 4 dB

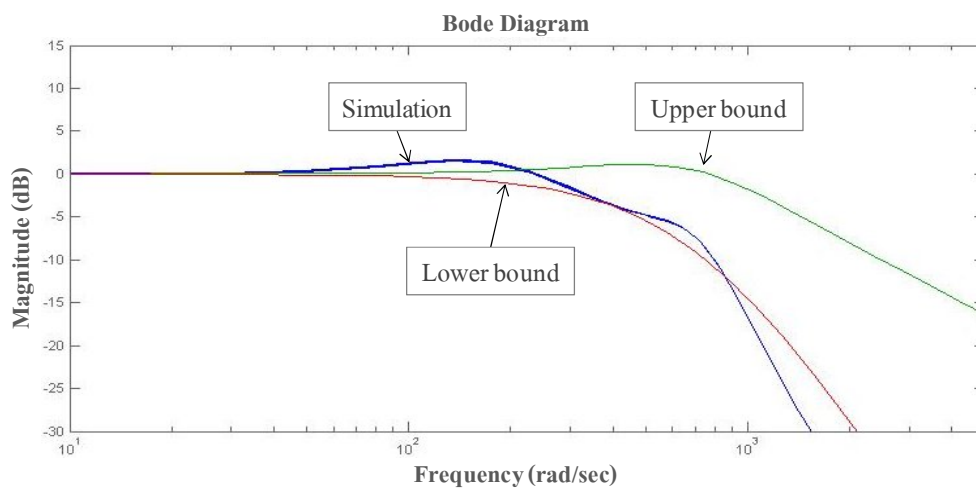


ภาพผนวกที่ ง1 ขอบเขตแบบ Output disturbance rejection เมื่อไม่ทำการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง

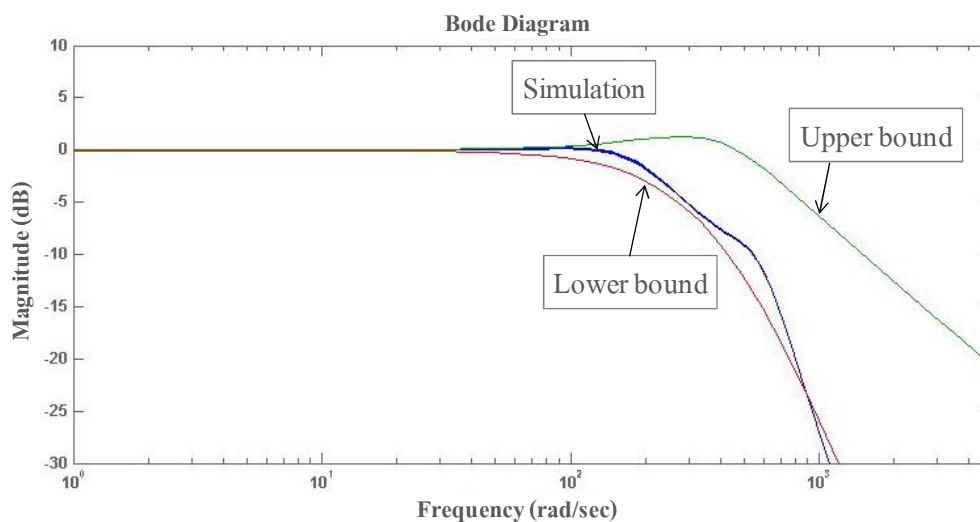


ภาพผนวกที่ ง2 ขอบเขตแบบ Output disturbance rejection เมื่อทำการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง

เมื่อนำระบบทั้งหมดมาพิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่ต่อขอบเขตที่สร้างขึ้นใน Bode diagram พบว่า เมื่อมีการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูงระบบทั้งหมดจะทำงานอยู่ในขอบเขตที่ต้องการ



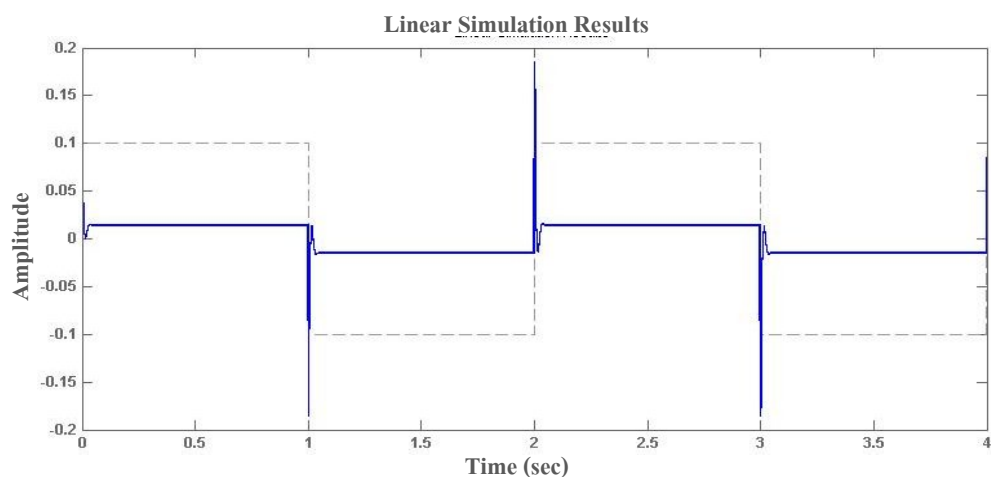
ภาพผนวกที่ ง3 ขอบเขตแบบ Tracking เมื่อไม่ทำการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง



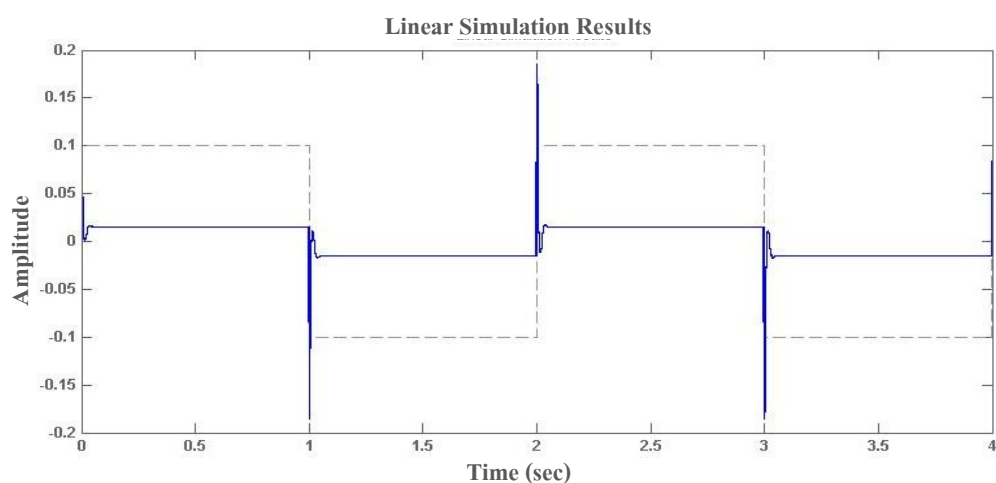
ภาพผนวกที่ ง4 ขอบเขตแบบ Tracking เมื่อทำการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง

การเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานในโดเมนเชิงเวลา

เมื่อให้สิ่งรบกวนของระบบเป็นสัญญาณ Square wave ที่ความถี่ 0.5 Hz ที่ Amplitude เท่ากับ 0.1 rad พบว่าทั้งการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง และการไม่ออกแบบฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง ระบบสามารถลดสัญญาณรบกวนได้ และมีการทำงานเป็นไปในลักษณะเดียวกัน

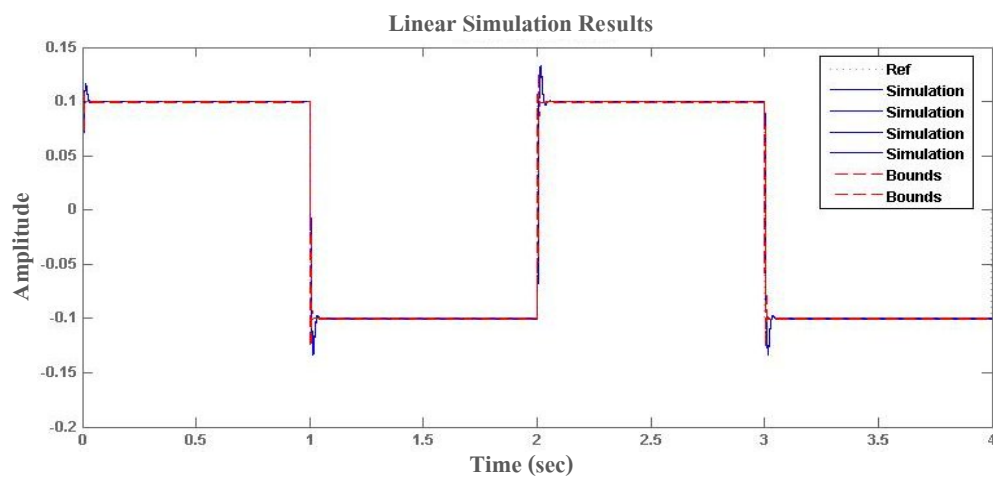


ภาพผนวกที่ ๓5 ขอบเขตแบบ Output disturbance rejection เมื่อไม่ทำการออกแบบตัวฟิลเตอร์ ที่ช่วงความถี่สูง

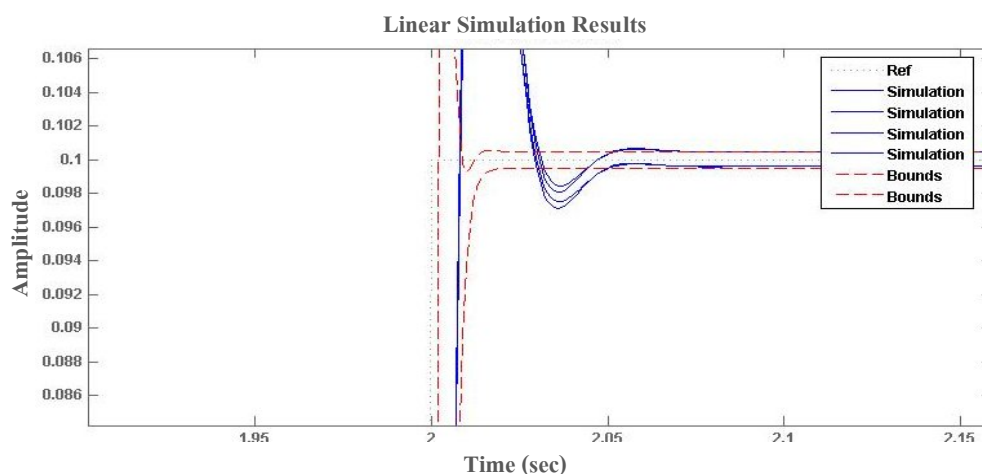


ภาพผนวกที่ ๓6 ขอบเขตแบบ Output disturbance rejection เมื่อทำการออกแบบตัวฟิลเตอร์ ที่ช่วงความถี่สูง

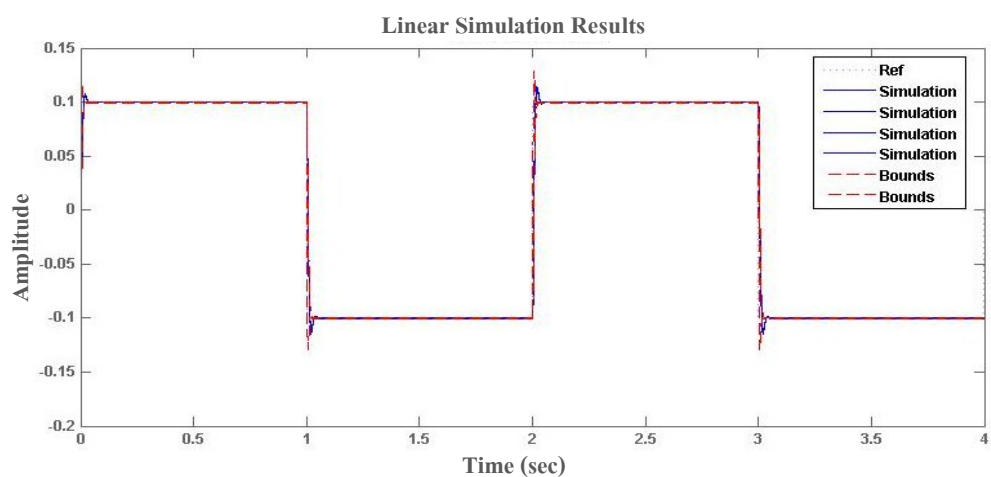
เมื่อให้ระบบเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิง พบว่าทั้งการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง และการไม่ออกแบบฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง ระบบเคลื่อนที่ตามสัญญาณอ้างอิงได้ดี และแนวโน้มในสถานการณ์จำลองของการออกแบบทั้งสองแบบเป็นไปในทิศทางเดียวกัน



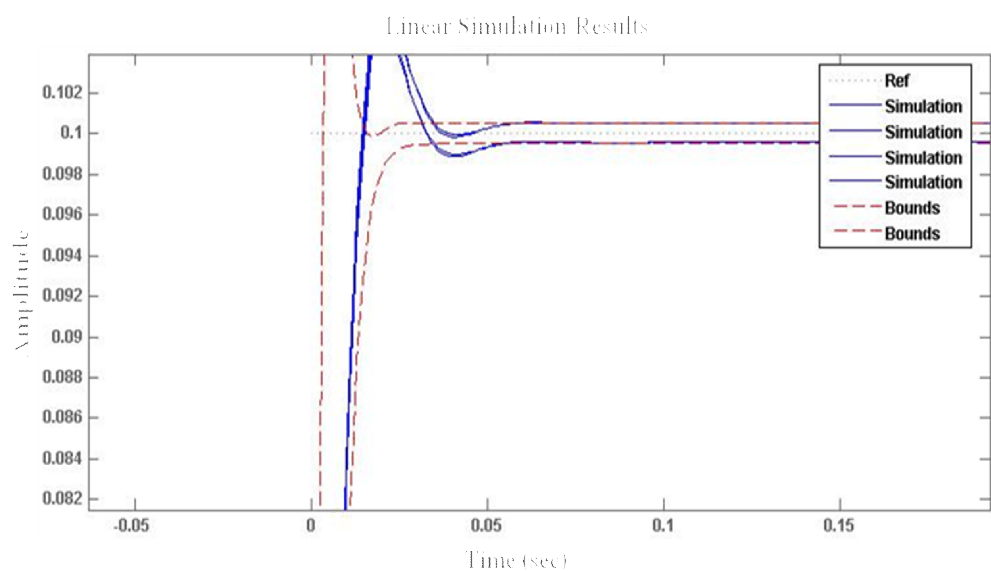
ภาพผนวกที่ ง7 ขอบเขตแบบ Tracking เมื่อไม่ทำการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง



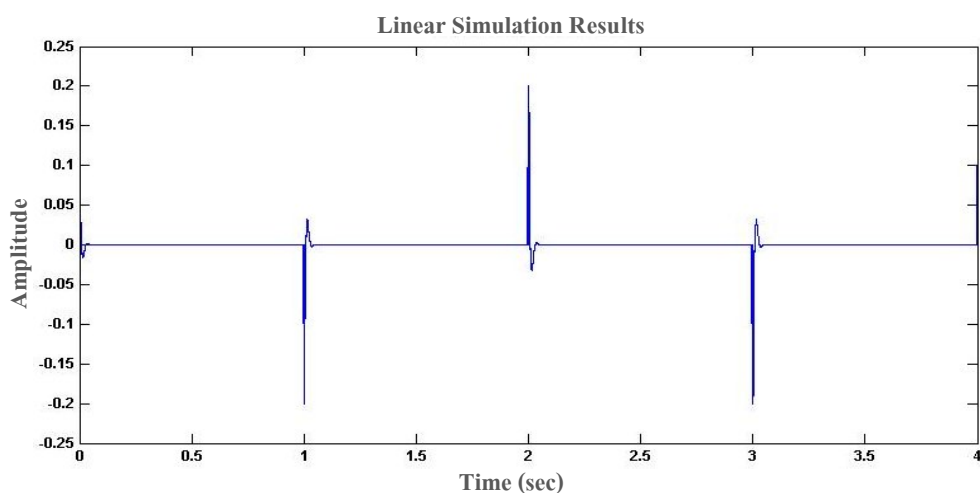
ภาพผนวกที่ ง8 ขอบเขตแบบ Tracking เมื่อไม่ทำการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง ซึ่งทำการขยายภาพเพื่อให้เห็นการทำงานภายใต้ขอบเขตที่กำหนด



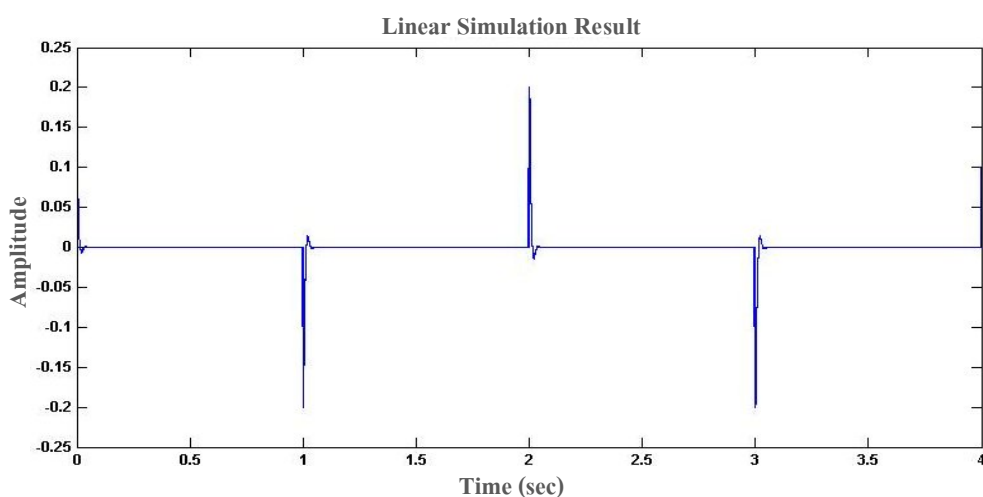
ภาพผนวกที่ ๙ ขอบเขตแบบ Tracking เมื่อทำการออกแบบตัวฟีดแบ็คในช่วงความถี่สูง



ภาพผนวกที่ ๑๐ ขอบเขตแบบ Tracking เมื่อทำการออกแบบตัวฟีดแบ็คในช่วงความถี่สูง ซึ่งทำการขยายภาพเพื่อให้เห็นการทำงานภายใต้ขอบเขตที่กำหนด



ภาพผนวกที่ 11 ค่าความผิดพลาดในสถานการณ์จำลองเมื่อไม่มีการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง



ภาพผนวกที่ 12 ค่าความผิดพลาดจากสถานการณ์จำลองเมื่อมีการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง

จากผลการจำลองการทำงานในโดเมนเวลาของขอบเขตแบบ tracking พบว่าค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของการออกแบบตัวฟิลเตอร์ในช่วงความถี่สูง และไม่ออกแบบตัวฟิลเตอร์ที่ความถี่สูง ซึ่งค่าความผิดพลาดของการจำลองการทำงานเมื่อให้ระบบเคลื่อนที่ตาม Square wave ที่ความถี่เท่ากับ 0.5 Hz และ Amplitude เท่ากับ 0.1 rad ในส่วนของการไม่ออกแบบตัวฟิลเตอร์ที่ย่านความถี่สูงค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย ที่ได้อยู่ที่ 0.0138 rad เมื่อเปรียบเทียบกับในส่วนของ

การไม่ได้ออกแบบฟิลเตอร์ที่ย่านความถี่สูงแล้ว พบว่าค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่ทำได้อยู่ที่ 0.0120 rad ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน

ดังนั้น การออกแบบตัวฟิลเตอร์ถ้าต้องการออกแบบในส่วนในช่วงความถี่สูง ต้องทำการลดความเข้มข้นของการสร้างขอบเขตแบบ Tracking ลงเพื่อให้ในช่วงความถี่สูงสามารถออกแบบให้ระบบอยู่ภายในขอบเขต แต่ถ้าเราต้องการความเข้มข้นของขอบเขตแบบ Tracking ก็สามารถออกแบบตัวฟิลเตอร์เฉพาะในช่วงความถี่ต่ำอย่างเดียวได้

ภาคผนวก จ

Matlab program code

โค้ดโปรแกรม Matlab

โค้ดการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนของหัวอ่าน

```

clear
close all
%sampling period
ts = 0.001;
f = 1/2; %frequency in Hz
amp = 0.1; %amplitude
tend = 300; %end time in seconds
t = 0:ts:tend;
r = square(2*pi*f*t);
figure(1), plot(t(1:2/f/ts), r(1:2/f/ts))
sys = tf(1,[1 50]);
rnew = lsim(sys,r,t);
rnew2 = amp/max(rnew)*rnew;
figure(2), plot(t(1:2/f/ts), rnew2(1:2/f/ts))
%write to files
fid=fopen('refpos1.txt','w');
fprintf(fid,'%5.5f\n',rnew2);
status=fclose(fid);

```

การออกแบบ Tracking specification

```
%Tracking specification

clear

close all

zeta = 0.7;%choice damping ratio

wn = 650;%design setting time

a = 650;% a more than wn

a1 = 600;%a1 less than wn

a2 = a1;

a3 = wn;

syslb = 0.995*tf(a1*a2*a3,[1 a1])*tf(1,[1 a2])*tf(1,[1 a3]);

sysub = 1.005*tf(((wn^2)/a)*[1 a],[1 2*zeta*wn wn^2]);

figure(1),step(syslb,'r--'),hold on

step(sysub,'b:'),hold off

grid
```

การหาเอกลักษณ์ของระบบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

```

clear

close all

%load data
V = load('C:\moomaster\store\V3.txt');
theta = load('C:\moomaster\store\theta3.txt');

%sampling period
ts = 0.01;

thetad = diff(theta)/ts;
thetadd = diff(thetad)/ts;

%plot data from system identification
figure(1),
subplot(221),plot(theta)
subplot(222),plot(thetad)
subplot(223),plot(thetadd)
subplot(224),plot(V)

% perform liner least-square
[x,resnorm] = lsqlin([thetadd, thetad(1:length(thetadd)),...
    theta(1:length(thetadd))],V(1:length(thetadd)),...
    [],[],[],[0;0;0],[+inf;+inf;+inf])

%Simulation
t = 0:ts:(length(V)-1)*ts;
thetam = lsim(tf(1,[x(1),x(2),x(3)]),V,t,0);
figure(2),plot(t,theta),hold on,plot(t,thetam,'r'),hold off

```

การออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค QFT ผ่านทาง Toolbox ของโปรแกรม Matlab ประกอบกับการ
จำลองผลตอบสนองของระบบตาม Bounds ที่กำหนดขึ้น

```
clear
close all
%square wave
ts = 0.001; %sampling period
f = 1/2;%frequency in Hz
amp = 0.1; %amplitude
tend = 4; %end time in seconds
t = 0:ts:tend;
rs = 0.1*square(2*pi*0.5*t);
figure(1), plot(t,rs),hold on
sys = tf(1,[1 50]);
rnew = lsim(sys,rs,t);
rnew2 = amp/max(rnew)*rnew;
%given parameter of tracking
zeta = 0.7;%choice damping ratio
wn = 650;%design setting time
a = 650;% a more than wn
a1 = 600;%a1 less than wn
a2 = a1;
a3 = wn;
%lower bound (critically damped case)
syslb = 0.995*tf(a1*a2*a3,[1 a1])*tf(1,[1 a2])*tf(1,[1 a3]);
rslb = lsim(syslb,rs,t);
figure(1),plot(t,rslb,'r'),hold on
%upper bound (underdamped case)
sysub = 1.005*tf(((wn^2)/a)*[1 a],[1 2*zeta*wn wn^2]);
rsub = lsim(sysub,rs,t);
figure(1),plot(t,rsub,'g'),hold off
```

การออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค QFT ผ่านทาง Toolbox (ต่อ)

```

%for smooth square wave
figure(2), plot(t(1:2/f/ts), rnew2(1:2/f/ts)),hold on
% lower bound
syslb1 = 0.995*tf(a1*a2*a3,[1 a1])*tf(1,[1 a2])*tf(1,[1 a3]);
rslb1 = lsim(syslb,rnew2,t);
figure(2),plot(t,rslb1,'r'),hold on
%upper bound (underdamped case)
sysub1 = 1.005*tf(((wn^2)/a)*[1 a],[1 2*zeta*wn wn^2]);
rsub1 = lsim(sysub,rnew2,t);
figure(2),plot(t,rsub1,'g'),hold off
%*****Specs& Frequencies vectors*****
ws1 = 1.2; % for stability
ws11 = 10^(4/20);
wbd = [0.05 0.1 1 2]; %for tracking bounds;
wh = [10 35 50 70 100 150 250 350 500 1000];
w = sort([wbd,wh]); %for stability bounds;
wl = logspace(-1,3.5); %for loop shaping;
wbdh = [1 5 10 35 50];
%get plant template
c=1;
for A = [0.0007]
    for B = [0.0686 0.0716]
        for C = [3.0144 3.2063]
            p(1,1,c) = tf(1,[A B C]);
            c = c+1;
        end
    end
end
end
%choice nominal plate

```

การออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค QFT ผ่านทาง Toolbox (ต่อ)

```

nompt = 1;

%plot planttemplate
plottmpl(w,p(1,1,:),nompt);

%*****Bound of QFT *****

%*****Tracking specification*****

bds_tr11 = sisobnds(7,wbd,[sysub;syslb],p(1,1,:),[],nompt);
plotbnds(bds_tr11);

%stability bound
bds_st = sisobnds(1,w,ws1,p(1,1,:),[],nompt);
plotbnds(bds_st);

%combine all bounds of QFT
bdb = grpbnds(bds_tr11,bds_st);
plotbnds(bdb);

%intersection of bounds
ubdb = sectbnds(bdb);
plotbnds(ubdb);

%controller design
%g1 = tf(278584.3268*[1 135.8],conv([1 3022],[1 702.4]));
g1 = tf(56597.9094*[ 1 200],[1 611 6.055e5]);
%g1=tf(22255.4793*[1 210],[1 392.6 2.5e5]);
lpshape(w1,ubdb,p(1,1,nompt),g1);
g1d = tf(c2d(g1,ts))

% Design prefilter
f11 = tf(1.167,1);
%f11 = tf(1.1665,1);

%pfshape(7,wbd,[sysub;syslb],p(1,1,:),[],g1,[],f11);
f11d = tf(c2d(f11,ts))

%frequency domain simulation
clss = 1*inv(1+g1*p(1,1,:));

```

การออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค QFT ผ่านทาง Toolbox (ต่อ)

```

figure(99),bodemag(cls)...
    ,hold on,plot(w,20*log10(ws11*ones(1,length(w))),'*'), hold off
%stability
cls = g1*p(1,1,:)*inv(1+g1*p(1,1,:));
figure(100),bodemag(cls),hold on...
    ,plot(w,20*log10(ws1*ones(1,length(w))),'*'), hold off
%tracking
clt = fl1*g1*p(1,1,:)*inv(1+g1*p(1,1,:));
figure(101),bodemag(clt),hold on...
    ,bodemag(sysub),hold on,bodemag(syslb),hold off
cls1 = 1*inv(1+g1*p(1,1,:));
%time domain simulation
%output disturbance rejection
figure(102),lsim(cls1,rs,t)
%tracking
figure(103),lsim(clt,rs,t),hold on...
    ,plot(t,rsub,'r'),hold on,plot(t,rslb,'r'),hold off
%Tracking of smooth square wave
figure(104),lsim(clt,rnew2,t),hold on...
    ,plot(t,rsub1,'r'),hold on ,plot(t,rslb1,'r'),hold off

```

ผลการทดลองที่ได้ในโหมด Track seek

```

clear

close all

%design trajectory

%square wave

ts = 0.001; %sampling period

f = 1/2;%frequency in Hz

amp = 0.08; %amplitude

tend = 4; %end time in seconds

t = 0:ts:tend;

rs = 0.08*square(2*pi*0.5*t);

figure(1), plot(t,rs),hold on

sys = tf(1,[1 115]);

rnew = lsim(sys,rs,t);

rnew2 = amp/max(rnew)*rnew;

%given parameter of tracking

zeta = 0.7;%choice damping ratio

wn = 650;%design setting time

a = 650;% a more than wn

a1 = 600;%a1 less than wn

a2 = a1;

a3 = wn;

%lower bound (critically damped case)

syslb = 0.992*tf(a1*a2*a3,[1 a1])*tf(1,[1 a2])*tf(1,[1 a3]);

rslb = lsim(syslb,rs,t);

%figure(1),plot(t,rslb,'r'),hold on

%upper bound (underdamped case)

sysub = 1.008*tf(((wn^2)/a)*[1 a],[1 2*zeta*wn wn^2]);

rsub = lsim(sysub,rs,t);

%figure(1),plot(t,rsub,'g'),hold off

```

ผลการทดลองที่ได้ในโหมด Track seek (ต่อ)

```

%for smooth square wave
figure(2), plot(t(1:2/f/ts), rnew2(1:2/f/ts)),hold on
% lower bound
syslb1 = 0.995*tf(a1*a2*a3,[1 a1])*tf(1,[1 a2])*tf(1,[1 a3]);
rslb1 = lsim(syslb,rnew2,t);
figure(2),plot(t,rslb1,'r'),hold on
%upper bound (underdamped case)
sysub1 = 1.005*tf(((wn^2)/a)*[1 a],[1 2*zeta*wn wn^2]);
rsub1 = lsim(sysub,rnew2,t);
figure(2),plot(t,rsub1,'g'),hold off
%get plant template
c=1;
for A = [0.0007]
    for B = [0.0686 0.0716]
        for C = [3.0144 3.2063]
            p(1,1,c) = tf(1,[A B C]);
            c = c+1;
        end
    end
end
%given controller from desing process
g1 = tf(56597.9094*[ 1 200],[1 611 6.055e5]);
%given prefilter desing from design process
f11 = tf(1.1665,1);
clt = f11*g1*p(1,1,:)*inv(1+g1*p(1,1,:));
%load data
V = load('C:\moomaster\store\V118.txt');
theta1 = load('C:\moomaster\store\theta118.txt');
theta = theta1';

```

ผลการทดลองที่ได้ในโหมด Track seek (ต่อ)

```

t1 = 0:ts:(length(V)-1)*ts;

%tracking
figure(3),lsim(clt,rnew2,t),hold on...
    ,plot(t1(1:4000),theta(1:4000),'g'),hold off

%simulation of track seek
figure(4),lsim(clt,rnew2,t)

%Expriment and referance
figure(5),plot(t1(1:4000),theta(1:4000),'g'),hold on,...
    plot(t1(1:4000),rnew2(1:4000)),hold off

%steady state error of nonsmooth square wave
y = rs(1:4000)-theta(1:4000);
figure(6),plot(t1(1:4000),y(1:4000),'r')

%Controller effort of track seek nonsmooth square wave
figure(7),plot(t1(1:4000),V(1:4000))

```

การทดลองการเคลื่อนที่ตามสัญญาณควบคุม

```

%following the trajectory square wave

clear

close all

%design trajectory

%square wave

ts = 0.001; %sampling period

f = 1/2;%frequency in Hz

amp = 0.1; %amplitude

tend = 4; %end time in seconds

t = 0:ts:tend;

rs = 0.1*square(2*pi*0.5*t);

figure(1), plot(t,rs),hold on

sys = tf(1,[1 50]);

rnew = lsim(sys,rs,t);

rnew2 = amp/max(rnew)*rnew;

%given parameter of tracking

zeta = 0.7;%choice damping ratio

wn = 650;%design setting time

a = 650;% a more than wn

a1 = 600;%a1 less than wn

a2 = a1;

a3 = wn;

%lower bound (critically damped case)

syslb = 0.992*tf(a1*a2*a3,[1 a1])*tf(1,[1 a2])*tf(1,[1 a3]);

rslb = lsim(syslb,rs,t);

%figure(1),plot(t,rslb,'r'),hold on

%upper bound (underdamped case)

sysub = 1.008*tf(((wn^2)/a)*[1 a],[1 2*zeta*wn wn^2]);

rsub = lsim(sysub,rs,t);

```

การทดลองการเคลื่อนที่ตามสัญญาณควบคุม (ต่อ)

```

%figure(1),plot(t,rsub,'g'),hold off
%for smooth square wave
figure(2), plot(t(1:2/f/ts), rnew2(1:2/f/ts)),hold on
% lower bound
syslb1 = 0.995*tf(a1*a2*a3,[1 a1])*tf(1,[1 a2])*tf(1,[1 a3]);
rslb1 = lsim(syslb,rnew2,t);
figure(2),plot(t,rslb1,'r'),hold on
%upper bound (underdamped case)
sysub1 = 1.005*tf(((wn^2)/a)*[1 a],[1 2*zeta*wn wn^2]);
rsub1 = lsim(sysub,rnew2,t);
figure(2),plot(t,rsub1,'g'),hold off
%get plant template
c=1;
for A = [0.0007]
    for B = [0.0686 0.0716]
        for C = [3.0144 3.2063]
            p(1,1,c) = tf(1,[A B C]);
            c = c+1;
        end
    end
end
%given controller from desing process
g1 = tf(56597.9094*[ 1 200],[1 611 6.055e5]);
%given prefilter desing from design process
f11 = tf(1.1665,1);
clt = f11*g1*p(1,1,:)*inv(1+g1*p(1,1,:));
%load data
V = load('C:\moomaster\store\V114.txt');
theta1 = load('C:\moomaster\store\theta114.txt');

```

การทดลองการเคลื่อนที่ตามสัญญาณควบคุม (ต่อ)

```

theta = theta1';
t1 = 0:ts:(length(V)-1)*ts;
%tracking of simulation and experiment
figure(3),lsim(clt,rnew2,t),hold on...
    ,plot(t1(1:4000),theta(1:4000),'g'),hold off
%simulation of track seek
figure(4),lsim(clt,rnew2,t)
%Experiment and reference
figure(5),plot(t1(1:4000),theta(1:4000),'g'),hold on,...
    plot(t1(1:4000),rnew2(1:4000)),hold off
%steady state error of nonsmooth square wave
y = rnew2(1:4000)-theta1(1:4000);
figure(6),plot(t1(1:4000),y(1:4000),'r')
%Controller effort of track seek nonsmooth square wave
figure(7),plot(t1(1:4000),V(1:4000))

```

ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอดี

```

%result of PID and QFT controller square wave

clear

close all

%Load data

V = load('C:\moomaster\store\V114.txt');

theta = load('C:\moomaster\store\theta114.txt');

%square wave

ts = 0.001; %sampling period

f = 1/2; %frequency in Hz

amp = 0.1; %amplitude

tend = (length(V)-1)*ts; %end time in seconds

t = 0:ts:tend;

rs = 0.1*square(2*pi*f*t);

sys = tf(1,[1 50]);

rnew = lsim(sys,rs,t);

rnew2 = amp/max(rnew)*rnew;

figure(1), plot(t(1:4000), rnew2(1:4000),'r'),hold on

plot(t(1:4000),theta(1:4000),'b'),hold on

%Load data

V1 = load('C:\moomaster\store\V115.txt');

theta1 = load('C:\moomaster\store\theta115.txt');

tend1 = (length(V1)-1)*ts;

t1 = 0:ts:(length(V1)-1)*ts;

plot(t1(1:4000),theta1(1:4000),'g');

y = rnew2-theta;

yp = rnew2(1:4000)-theta1(1:4000);

figure(2),plot(t1(1:4000)',y(1:4000),'r'),hold on

plot(t1(1:4000),yp(1:4000)),hold off

figure(3),plot(t(1:4000),V(1:4000),'r'),hold on

```

ผลการทดลองตัวควบคุมแบบพีไอดี (ต่อ)

```

plot(t1(1:4000),V1(1:4000),''),hold off
%for PID controller
figure(4),plot(t1(1:4000),theta1(1:4000)),hold on,...
    plot(t1(1:4000),rnew2(1:4000)),hold off
figure(5),plot(t1(1:4000),yp(1:4000))
figure(6),plot(t1(1:4000),V1(1:4000))

```

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายภูวดล โพธิ์แดง
เกิดวันที่	1 กันยายน 2524
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือผลงานทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-