



ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้สำหรับการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์
ตามแนวข้อมูล

Adaptive Control System for Track-Following HDD Head Positioning

เกียรติศักดิ์ เสงช่วย

Kiattisak Sengchuai

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University**

2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้สำหรับการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์
ตามแนวข้อมูล

Adaptive Control System for Track-Following HDD Head Positioning

เกียรติศักดิ์ เสงช่วย

Kiattisak Sengchuai

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Prince of Songkla University**

2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้สำหรับการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียน
 ฮาร์ดดิสก์ตามแนวข้อมูล
 ผู้เขียน นายเกียรติศักดิ์ เส็งช่วย
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ัญญา จินดาเพ็ชร)

.....ประธานกรรมการ
 (ดร. วุทธิ วิชกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
 (รองศาสตราจารย์ ดร. พุทธิกร สมิตไมตรี)

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร. พุทธิกร สมิตไมตรี)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชีรยุทธ ชาติชนะยืนยง)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กุศลาลัย เฉลิมยานนท์)

.....กรรมการ
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ัญญา จินดาเพ็ชร)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น
 ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
 วิศวกรรมไฟฟ้า

.....
 (รองศาสตราจารย์ ดร. ชีระพล ศรีชนะ)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วน
เกี่ยวข้องกับทุกท่านไว้ ณ ที่นี้

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณิชฐา จินดาเพชร)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายเกียรติศักดิ์ เส็งช่วย)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายเกียรติศักดิ์ เส็งช่วย)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้สำหรับการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ตามแนวข้อมูล
ผู้เขียน	นายเกียรติศักดิ์ เสงี่ยม
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในการเคลื่อนที่ไปตามแนวข้อมูลโดยใช้วิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียน และลดค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากการรบกวน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสัญญาณค่าความผิดพลาดที่เกิดจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำ และใช้วิธีการหาค่ากำลังสองเฉลี่ยต่ำสุดในการปรับอัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ และตัวควบคุมอนุพันธ์ ของตัวควบคุมพีไอดี สำหรับการทดสอบตัวควบคุม ใช้การจำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB Simulink ทั้งการควบคุมแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน แล้วพิจารณาผลตอบสนองของระบบและค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากการรบกวน นอกจากนี้ได้นำวิธีการควบคุมที่นำเสนอ ไปออกแบบตัวควบคุมดิจิทัลจริงบนตัวประมวลผล FPGA จากผลการจำลองการทำงานของระบบพบว่าการควบคุมแบบขั้นตอนเดียว ตัวควบคุมที่นำเสนอมีผลตอบสนองของระบบที่ดีขึ้นและสามารถลดค่าความผิดพลาดของตำแหน่งได้ร้อยละ 59.6 เมื่อเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตราขยายคงที่ ส่วนการควบคุมแบบสองขั้นตอน มีผลตอบสนองของระบบที่ดีขึ้นและสามารถลดค่าความผิดพลาดของตำแหน่งได้ร้อยละ 31.6 เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบขั้นตอนเดียว และผลการทดสอบบนฮาร์ดแวร์จริงบนตัวประมวลผล FPGA พบว่ามีผลตอบสนองของระบบและค่าความผิดพลาดของตำแหน่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานทั้งการควบคุมแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน การทดสอบนี้เป็นที่ยืนยันได้ว่าตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถถูกนำไปประยุกต์ใช้งานกับฮาร์ดดิสก์จริงได้

คำสำคัญ การควบคุมตำแหน่งตามแนวข้อมูล ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ การควบคุมแบบขั้นตอนเดียว การควบคุมแบบสองขั้นตอน FPGA

Thesis Title	Adaptive Control System for Track-Following HDD Head Positioning
Author	Mr.Kiattisak Sengchuai
Major Program	Electrical Engineering
Academic Year	2012

ABSTRACT

This thesis presents a head positioning in the track following control of hard disk drives using an adaptive PID controller for improving the accuracy of head positioning and reducing the effect of disturbances. The study concerns the position error signal (PES) effect of the repeatable runout (RRO) disturbance. The adaptive PID controller uses the least mean squares (LMS) algorithm to adjust the proportional gain (K_p), integral gain (K_i) and derivative gain (K_d) of the PID controller. In simulation, MATLAB Simulink was used to verify both the single-stage and the dual-stage control. The system response and the PES effect of the disturbance were considered. The simulation results show that the proposed method can improve the system response and can reduce the PES. In the single-stage control, the proposed controller can reduce the position error in track following control by 59.6% compared to the conventional PID controller. In the dual-stage control, the system response was further improved and can reduce the position error by 31.6% compared to the single-stage control. Finally, the proposed controller was implemented on an FPGA and the hardware-in-loop verification proved that the system response and PES results are the same as the simulation results of both the single-stage and the dual-stage control. This verification guarantees that the proposed controller can be realized for the real hard disk drives.

Keywords Track following, positioning control, hard disk drive, adaptive PID controller, single-stage control, dual-stage control, FPGA

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐา จินดาเพ็ชร ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาให้คำปรึกษา แนะนำเอกสาร และข้อมูลต่างๆในการทำวิจัย รวมถึงการช่วยเหลือแก้ไขปัญหาและอุปสรรคต่างๆในการทำวิจัย ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พฤทธิกร สมิตไมตรี กรรมการที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย รวมถึงการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ดร.วฤทธิ์ วิชกุล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย รวมถึงการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรยุทธ ชาติชนะยืนยง ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก ที่ได้กรุณาอุทิศเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และวิจารณ์ผลงานวิจัย รวมถึงการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุสุมาลย์ เฉลิมยานนท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และวิจารณ์ผลงานวิจัย รวมถึงการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยและให้ความช่วยเหลือด้านการประสานงานต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาและให้ความช่วยเหลือด้านการประสานงานต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ บุคลากร และนักศึกษาปริญญาโทภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกคน รวมถึงเพื่อน พี่ น้อง ในภาควิชา ที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดามารดาและครอบครัว ที่ส่งเสริมสนับสนุน ให้กำลังใจ และทุนทรัพย์แก่ข้าพเจ้าตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

เกียรติศักดิ์ เล็งช่วย

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 การตรวจสอบเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
1.3 วัตถุประสงค์	9
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	10
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	10
1.6 แผนการดำเนินการวิจัย	12
2. ทฤษฎีและหลักการ	13
2.1 ความเป็นมาของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	13
2.2 ระบบเซอร์โวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	14
2.2.1 ส่วนประกอบภายในของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	14
2.2.2 ตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	15
2.2.3 การควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนตามแนวข้อมูล	16
2.3 มอเตอร์ขดลวดเสียง	17
2.4 ตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริก	19
2.5 การหาเอกลักษณ์ของระบบ	20
2.6 การวัดประสิทธิภาพของการควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	21
2.6.1 การวัดผลตอบสนองของหัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปตามแนวข้อมูล	21
2.6.2 การวัดผลตอบสนองของสัญญาณรบกวน	22
2.7 การควบคุมแบบพีไอดี	23
2.8 วิธีการค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. การควบคุมหัวอ่าน/เขียนตามแนวข้อมูลแบบขั้นตอนเดียว	27
3.1 แบบจำลองของตัวขับเคลื่อน VCM	27
3.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้	28
3.2.1 กฎการควบคุม (Control law)	29
3.2.2 กฎการปรับตัว (Adaptive law)	30
3.2.3 แบบจำลองอ้างอิง (Model reference)	30
3.2.4 ตัวควบคุมช่วย (Subservience controller)	31
3.3 การจำลองสัญญาณรบกวน	31
3.4 ผลการจำลองการทำงาน	33
3.4.1 ผลตอบสนองของระบบ	33
3.4.2 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแบบจำลองอ้างอิง	35
3.4.3 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวน	36
3.5 สรุป	38
4. การควบคุมหัวอ่าน/เขียนตามแนวข้อมูลแบบสองขั้นตอน	39
4.1 แบบจำลองของตัวขับเคลื่อน PZT	39
4.2 การออกแบบระบบควบคุมแบบสองขั้นตอน	40
4.3 การควบคุมตัวขับเคลื่อน PZT	42
4.4 ผลการจำลองการทำงาน	43
4.4.1 ผลตอบสนองของระบบ	43
4.4.2 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวน	45
4.5 สรุป	48
5. การออกแบบตัวควบคุมดิจิทัล	49
5.1 การแปลงตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่องเป็นตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง	49
5.2 การออกแบบตัวควบคุมดิจิทัลบนชิพ FPGA	51
5.3 ผลการจำลองการทำงานตัวควบคุมดิจิทัล	52
5.3.1 การควบคุมแบบขั้นตอนเดียว	53
5.3.2 การควบคุมแบบสองขั้นตอน	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4 ผลการทดสอบจริงบน FPGA	57
5.4.1 การควบคุมแบบขั้นตอนเดียว	60
5.4.2 การควบคุมแบบสองขั้นตอน	62
5.5 สรุป	64
6. บทสรุปและข้อเสนอแนะ	65
6.1 สรุป	65
6.2 ปัญหา	66
6.3 ข้อเสนอแนะ	67
บรรณานุกรม	68
ภาคผนวก ก	70
ภาคผนวก ข	78
ประวัติผู้เขียน	83

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 แผนการดำเนินการวิจัย	12
3-1 ประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบขั้นตอนเดียว	34
4-1 ประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบสองขั้นตอน	44
5-1 ประสิทธิภาพของตัวควบคุมดิจิทัล	53
5-2 ประสิทธิภาพของตัวควบคุมระบบ	60
5-3 ประสิทธิภาพของตัวควบคุมระบบ	62

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1-1 ส่วนประกอบภายในของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	1
1-2 การควบคุมแบบ LQG ที่เพิ่มการควบคุมแบบปรับตัว Q เข้าไป [2]	3
1-3 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ CDM [4]	5
1-4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม [5]	5
1-5 บล็อกไดอะแกรมของวิธีการควบคุมที่นำเสนอ [7]	6
1-6 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ [9]	7
1-7 บล็อกไดอะแกรมของการปรับตัวได้ในการกำจัดสัญญาณความถี่ธรรมชาติ [10]	7
1-8 โครงสร้างของระบบควบคุมที่มีตัวกรอง [11]	8
1-9 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบหลายอินพุตหนึ่งเอาต์พุต [12]	8
1-10 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมระบบแบบสองขั้นตอน [13]	9
1-11 ขั้นตอนการวิจัย	11
2-1 อัตราการเจริญเติบโตของเทคโนโลยีความจุร์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์	13
2-2 โครงสร้างภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [1]	14
2-3 ลักษณะภายในของแผ่นจานดิสก์ [1]	15
2-4 รูปแบบของ Servo burst [1]	15
2-5 สัญญาณที่ตำแหน่ง 0 [1]	16
2-6 สัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ [1]	16
2-7 ระบบการควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [1]	17
2-8 ลักษณะของตัวขับเคลื่อน VCM [1]	17
2-9 วงจรสมมูลของตัวขับเคลื่อน VCM [1]	19
2-10 เพียโซอิเล็กทริกที่ติดอยู่ปลายแขนของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [12]	20
2-11 การวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ [1]	20
2-12 ผลตอบสนองแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย	21
2-13 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบพีไอดี [15]	23
3-1 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวขับเคลื่อน VCM	27
3-2 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้	28
3-3 สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำแบบที่ 1 (RRO1)	32

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3-4 สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำแบบที่ 2 (RRO2)	32
3-5 สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำแบบที่ 3 (RRO3)	32
3-6 ผลตอบสนองของระบบ	33
3-7 ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้	34
3-8 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนค่า ω_n	35
3-9 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนค่า ζ	35
3-10 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวน	36
3-11 ฮิสโทแกรมของค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง	37
3-12 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนต่างๆ ของตัวควบคุมพีไอดี	37
3-13 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนต่างๆ ของตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้	38
4-1 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวขับเคลื่อน PZT	40
4-2 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบสองขั้นตอน	40
4-3 ผลตอบสนองวงปิดของตัวขับเคลื่อน PZT	42
4-4 ผลตอบสนองของระบบ	43
4-5 ผลตอบสนองของระบบแบบสองขั้นตอน	44
4-6 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนแบบที่ 1 (RRO1)	45
4-7 ฮิสโทแกรมค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของสัญญาณรบกวนแบบที่ 1 (RRO1)	46
4-8 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนแบบที่ 2 (RRO2)	46
4-9 ฮิสโทแกรมค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของสัญญาณรบกวนแบบที่ 2 (RRO2)	47
4-10 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนแบบที่ 3 (RRO3)	47
4-11 ฮิสโทแกรมค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของสัญญาณรบกวนแบบที่ 3 (RRO3)	48
5-1 บล็อกไดอะแกรมบนหน้าต่าง Xilinx System Generator	51
5-2 Resource Utilization	52
5-3 ผลความเร็วในการทำงานของวงจร	52
5-4 ผลตอบสนองของระบบแบบขั้นตอนเดียว	53
5-5 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนแบบขั้นตอนเดียว	54
5-6 ฮิสโทแกรมของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งแบบขั้นตอนเดียว	54

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

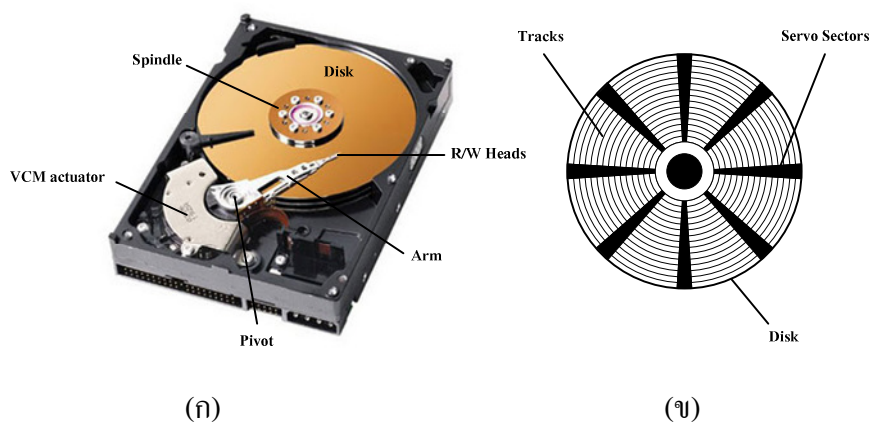
ภาพประกอบ	หน้า
5-7 ผลตอบสนองของระบบเมื่อระบบที่ควบคุมเปลี่ยนไป	55
5-8 ผลตอบสนองของระบบแบบสองขั้นตอน	56
5-9 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนแบบสองขั้นตอน	56
5-10 ฮิสโทแกรมของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งแบบสองขั้นตอน	57
5-11 บล็อกไดอะแกรมของการทดสอบแบบ Hardware-in-Loop	57
5-12 บล็อกไดอะแกรมของการทดสอบจริงบน FPGA	58
5-13 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวขับเคลื่อน VCM	59
5-14 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดสอบวิธีการควบคุม	59
5-15 ผลตอบสนองของระบบแบบขั้นตอนเดียว	60
5-16 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนแบบขั้นตอนเดียว	61
5-17 ฮิสโทแกรมของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งแบบขั้นตอนเดียว	61
5-18 ผลตอบสนองของระบบแบบสองขั้นตอน	62
5-19 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนแบบสองขั้นตอน	63
5-20 ฮิสโทแกรมของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งแบบสองขั้นตอน	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive: HDD) เป็นอุปกรณ์อย่างหนึ่งที่อยู่ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีบทบาทมากในชีวิตประจำวันปัจจุบัน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำหน้าที่ในการเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ โดยภายในจะประกอบไปด้วยแผ่นดิสก์ (Disk) เป็นส่วนที่เก็บข้อมูล หัวอ่าน/เขียน (Read/Write heads) จะทำหน้าที่ในการอ่านและเขียนข้อมูลบนแผ่นดิสก์ แขนของหัวอ่าน/เขียน (Arm) เป็นส่วนที่ยึดหัวอ่าน/เขียนให้ลอยอยู่บนแผ่นดิสก์ ตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ขดลวดเสียง (Voice Coil Motor: VCM) ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนให้หัวอ่าน/เขียนไปยังตำแหน่งที่ต้องการ และมอเตอร์ Spindle เป็นมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนให้แผ่นดิสก์หมุน ดังแสดงในภาพประกอบ 1-1 (ก) สำหรับแผ่นดิสก์แต่ละแผ่นภายในพื้นผิวของจานดิสก์จะถูกแบ่งออกเป็นวงๆ เรียกว่าแนวข้อมูล (Track) และในแต่ละแนวข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็น Sectors เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูล และบอกตำแหน่งให้กับหัวอ่าน/เขียน ดังแสดงในภาพประกอบ 1-1 (ข)



ภาพประกอบ 1-1 ส่วนประกอบภายในของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ในปัจจุบันเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ถูกพัฒนาอย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ โดยเฉพาะความจุข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้นและขนาดที่ลดลง สำหรับการเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ทำได้โดยการเพิ่มความหนาแน่นของจำนวนแนวข้อมูล (Track per Inch: TPI) ในการบันทึกข้อมูลของแผ่นดิสก์ นั่นคือทำให้ความกว้างของแนวข้อมูล (Track width) มีขนาดลดลง

และในกระบวนการอ่าน/เขียนข้อมูลจะต้องใช้หัวอ่าน/เขียนที่มีขนาดเล็กกลงไปด้วย จึงทำให้จำเป็นต้องเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีความแม่นยำมากขึ้น

ในกระบวนการอ่าน/เขียนข้อมูล แขนของหัวอ่าน/เขียนจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยใช้การตรวจสอบจากตำแหน่งของแนวข้อมูล จากนั้นจึงทำการหาถึงกลางของแนวข้อมูล เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการอ่าน/เขียนข้อมูล โดยในการหาถึงกลางของแนวข้อมูลจะใช้เทคนิคของ Burst signal [1] เพื่อให้การหาตำแหน่งถึงกลางของแนวข้อมูลที่ถูกต้องแม่นยำและจะส่งผลให้กระบวนการอ่าน/เขียนข้อมูลมีความถูกต้องแม่นยำตามไปด้วย แต่เนื่องจากความกว้างของแนวข้อมูลที่มีขนาดลดลง จึงทำให้มีการพัฒนาวิธีการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนตามแนวข้อมูล (Track following control) ให้มีความแม่นยำของตำแหน่งมากขึ้น

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้การเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนมีความผิดพลาดตำแหน่ง (Position Error Signal: PES) คือ การรบกวน (Disturbance) ซึ่งสัญญาณรบกวนต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบเซอร์โว (Servo system) ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะประกอบด้วย การสั่นสะเทือนที่เกิดจาก flexible cable การสั่นสะเทือนจากภายนอก ตัวรบกวนเชิงกล (Mechanical disturbance) สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (Electrical noise) และสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำ (Repeatable Run Out: RRO) ซึ่งเป็นผลมาจากการหมุนของมอเตอร์หมุนแผ่นจานดิสก์ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากการรบกวนต่างๆ เหล่านี้ทำให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งถึงกลางของแนวข้อมูล ส่งผลให้กระบวนการอ่านและเขียนข้อมูลมีความถูกต้องแม่นยำลดลง ดังนั้นในการควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนไปตามแนวข้อมูลจะต้องออกแบบตัวควบคุม เพื่อให้ปัญหาที่เกิดขึ้นข้างต้นมีผลกระทบต่อตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนน้อยที่สุด จากวิธีการควบคุมแบบดั้งเดิมที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เช่น ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) [1] เป็นต้น เป็นตัวควบคุมที่ไม่สามารถตอบสนองต่อปัญหาที่ได้กล่าวไปข้างต้นได้ จึงได้มีการนำวิธีการควบคุมแบบต่างๆ มากมายมาใช้ในการแก้ปัญหา เช่น ตัวควบคุมแบบ adaptive-Q [2] ตัวควบคุมพีไอดีแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear PID control) [3] ตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบอัตราขยายโดยใช้วิธีการแผนภาพสัมประสิทธิ์ (Coefficient diagram method) [4] ตัวควบคุมเหมาะสมที่สุด H_2 (Optimal H_2 controller) [5] การควบคุมแบบทำนาย (Predictive control) [6] ตัวควบคุมวงหน่ววิธีการจัดสรรฐานวงรอบ (Robust loop shaping) [7], [8] นอกจากนี้ยังมีการนำตัวกรองแบบปรับตัวได้ (Adaptive filter) มาใช้ร่วมกับตัวควบคุมพีไอดี [9]-[11] เพื่อกรองสัญญาณรบกวนต่างๆ ที่เกิดขึ้น เป็นต้น จากวิธีการควบคุมต่างๆ ที่กล่าวไปสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีความแม่นยำมากขึ้นได้ แต่ในการออกแบบตัวควบคุมจะมีความซับซ้อนมากขึ้น

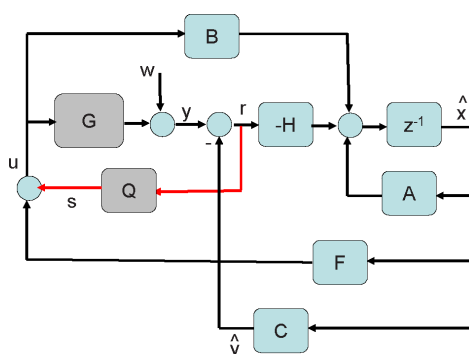
ด้วยเหตุนี้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ (Adaptive PID control: APID) ซึ่งมีโครงสร้างที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โดยตัวควบคุมสามารถปรับค่าอัตราขยายให้เหมาะสมกับความไม่แน่นอนของระบบที่เกิดขึ้น ซึ่งจะเน้นไปที่การควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนไปตามแนวข้อมูล และสนใจเฉพาะสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการหมุนของมอเตอร์หมุนแผ่นจานดิสก์ของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

1.2 การตรวจสอบเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การตรวจสอบเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะเน้นไปที่การควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนไปตามแนวข้อมูล สามารถแบ่งลักษณะการควบคุมออกเป็น การควบคุมขั้นตอนเดียว (Single stage) [2]-[11] และสองขั้นตอน (Dual stage) [12]-[13] ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.2.1 Experimental Study of Adaptive-Q Control for Disk Drive Track-Following Servo Problem [2]

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมแบบปรับตัว Q (Adaptive-Q Control) เพื่อลดค่าความผิดพลาดของตำแหน่งสำหรับการเคลื่อนที่ตามแนวข้อมูล ที่เกิดจากการรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำ ซึ่งวิธีการควบคุมแบบปรับตัว Q ที่ได้นำเสนอเป็นวิธีการที่ได้ปรับปรุงการควบคุมแบบ LQG (Linear Quadratic Gaussian) โดยการเพิ่มขยายการควบคุมแบบปรับตัว Q เข้าไป ดังแสดงในภาพประกอบ 1-2 วิธีการควบคุมแบบปรับตัว Q จะใช้รูปแบบ FIR (Finite Impulse Response)



ภาพประกอบ 1-2 การควบคุมแบบ LQG ที่เพิ่มการควบคุมแบบปรับตัว Q เข้าไป [2]

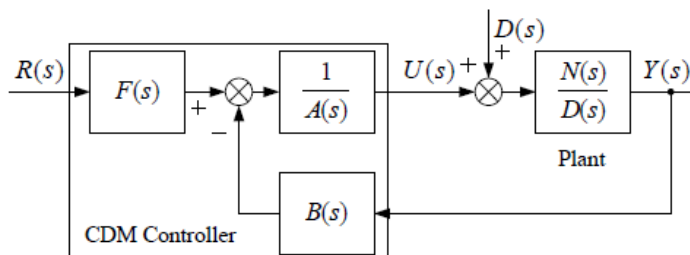
สำหรับการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการควบคุมแบบปรับตัว Q จะใช้ควบคุมเฉพาะตัวขับเคลื่อน VCM โดยใช้วิธีการ LMS (Least Mean Squares) และ RLS (Recursive Least Squares) ในการปรับตัวของการควบคุมแบบปรับตัว Q ในการทดลองใช้ฮาร์ดดิสก์ที่มีความจุ 25 kTPI ความเร็วในการหมุนของแผ่นดิสก์ 7200 rpm และใช้ตัวประมวลผลของ Texas Instruments TMS320C67 DSP ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 168 MHz การคำนวณ 32-bit floating-point number ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าวิธีการควบคุมแบบปรับตัว Q ที่ใช้วิธีการ RLS ให้ค่า 3σ ที่ดีที่สุด และให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งลดลง 15% เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบ LQG ธรรมดา

1.2.2 A Nonlinear PID Control Scheme for Hard Disk Drive Servo Systems [3]

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมพีไอดีแบบไม่เชิงเส้นในการควบคุมระบบเซอร์โวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยเป็นวิธีการที่ได้พัฒนามาจากการควบคุมพีไอดีแบบเดิม วิธีการควบคุมพีไอดีแบบไม่เชิงเส้นอัตราขยายแต่ละตัวสามารถปรับค่าได้ มีการคำนวณจากสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในการทดสอบได้จำลองสมการของระบบ VCM ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุ 60 kTPI โดยใช้โปรแกรม MATLAB จากการจำลองการทำงานพบว่าวิธีการที่นำเสนอทำให้ค่าเวลาเข้าที่ (Settling time) ที่น้อยลง และไม่มีค่าพุ่งเกิน (Overshoot) เมื่อเทียบกับวิธีการควบคุมพีไอดี แต่มีความซับซ้อนกว่า ดังนั้นการปรับปรุงวิธีการควบคุมให้มีความซับซ้อนลดลงจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ

1.2.3 The Design of PID Controller for Track Following Control of Hard Disk Drive using Coefficient Diagram Method [4]

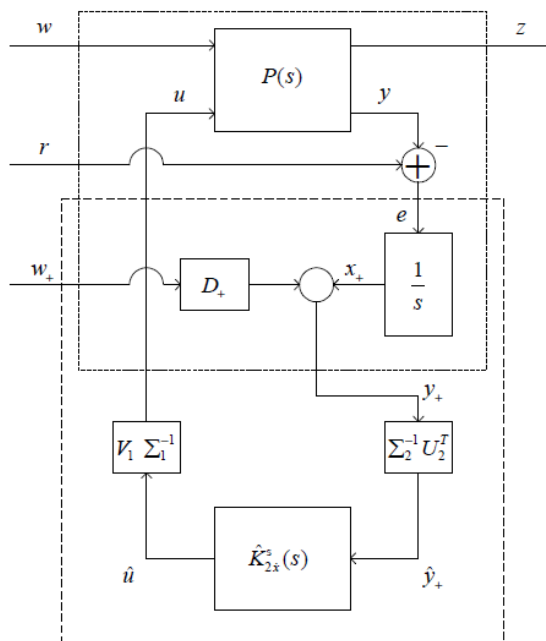
บทความนี้ได้เสนอการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนไปตามแนวข้อมูล โดยใช้การควบคุมพีไอดีที่ออกแบบอัตราขยายด้วยวิธีการแผนภาพสัมประสิทธิ์ (Coefficient Diagram Method: CDM) ดังแสดงในภาพประกอบ 1-3 จำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งได้จำลองสมการของระบบ VCM ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุ 100 kTPI และจำลองสัญญาณรบกวนจากแรงบิด จากเซนเซอร์ การสั่นสะเทือน สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำ จากผลการจำลองการทำงานพบว่าวิธีการที่นำเสนอให้ค่า 3σ ของค่าความผิดพลาดตำแหน่งที่เกิดจากสัญญาณรบกวนน้อยกว่าการควบคุมพีไอดีแบบธรรมดา



ภาพประกอบ 1-3 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบ CDM [4]

1.2.4 Following Control of Hard Disk Drive Using Derivative State Constrained Optimal H_2 Controls [5]

บทความนี้ได้แนะนำการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนไปตามแนวข้อมูล โดยใช้วิธีการควบคุมเหมาะสมที่สุด H_2 (Optimal H_2 controller) ที่ออกแบบโดยใช้การหาอนุพันธ์ของตัวแปรสถานะ (Derivative state) จำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งได้จำลองสมการของระบบ VCM ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุ 100 kTPI และจำลองสัญญาณรบกวนจากแรงบิด จากเซนเซอร์ การสั่นสะเทือน สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำ จากผลการจำลองการทำงานพบว่าค่า 3σ ของค่าความผิดพลาดตำแหน่งที่เกิดจากสัญญาณรบกวนยังมีค่าสูงอยู่เมื่อเทียบกับความกว้างของแนวข้อมูล



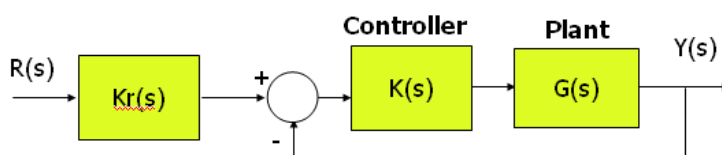
ภาพประกอบ 1-4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม [5]

1.2.5 Track Following Problem of a VCM Actuator Servo System for Hard Disc Drives using Predictive Control [6]

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมตัวขับเคลื่อน VCM ของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนตามแนวข้อมูล ซึ่งใช้การควบคุมแบบทำนาย (Predictive control method) ด้วยวิธีการทำนายแบบจำลองของระบบ (Model Predictive Control: MPC) โดยแบบจำลองของระบบ VCM ที่ใช้ในการจำลองการทำงานมีความจุ 25 kTPI จากผลการจำลองการทำงานพบว่าผลตอบสนองของระบบยังมีค่าเวลาเข้าที่ที่สูง และยังมีค่าพุ่งเกินอยู่

1.2.6 High Performance HDD Servo System using GA Based Fixed Structure Robust Loop Shaping Control [7], [8]

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมวงวน loop shaping โดยใช้วิธีการ genetic algorithm (GA) ดังแสดงในภาพประกอบ 1-5 .ในการทดสอบใช้แบบจำลอง VCM จากฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ที่มีความจุ 25 kTPI จากผลการทดสอบพบว่าวิธีการที่นำเสนอให้ค่าเวลาเข้าที่ และค่าพุ่งเกินที่ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดีและการควบคุมวงวน loop shaping แบบธรรมดา



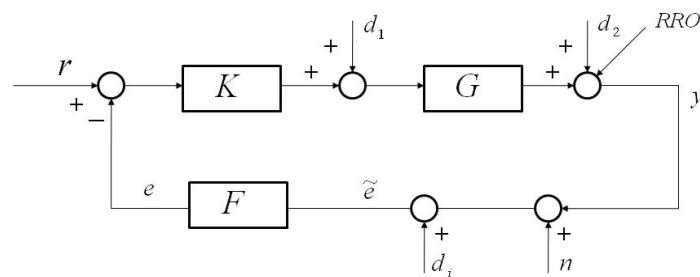
ภาพประกอบ 1-5 บล็อกไดอะแกรมของวิธีการควบคุมที่นำเสนอ [7]

1.2.7 Saturation-Induced Instability and Its Avoidance in Adaptive Control of Hard Disk Drives [9]

บทความนี้ได้เสนอการออกแบบและการนำไปใช้งานจริงของตัวควบคุมแบบปรับตัวได้เพื่อลดค่าความแปรปรวนของตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนตามแนวข้อมูล ที่เกิดจากการรบกวน โดยออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ที่เหมาะสมในการกำจัดสัญญาณที่มีความถี่สูง และออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ที่ใช้ในการปรับอัตราขยาย (Gain) ของตัวควบคุม ระบบควบคุมที่ได้นำเสนอแสดงดังในภาพประกอบ 1-6 สำหรับในการทดลองได้ออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัวได้โดยใช้รูปแบบ FIR และใช้วิธีการ QR-RLS Algorithm ในการปรับตัวของตัวควบคุม จากผลการทดลองพบว่าวิธีการที่นำเสนอให้ค่า 3σ ประมาณร้อยละ 4.7 ของความกว้างแนวข้อมูล

1.2.9 Impulsive Disturbance Rejection in Hard Disk Drives [11]

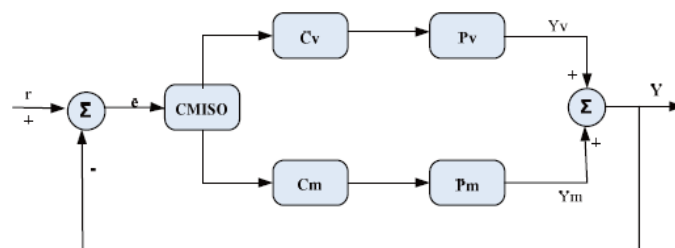
บทความนี้เป็นการนำเสนอวิธีการกำจัดสัญญาณที่เกิดจากการรบกวน โดยถูกกระตุ้นอย่างทันทีทันใด (Impulsive Disturbance) ในการควบคุมหัวอ่าน/เขียนของฮาร์ดดิสก์ ซึ่งได้นำเสนอโดยการเพิ่มตัวกรองแบบปรับตัวได้เข้าไปในระบบการควบคุม ดังแสดงในภาพประกอบ 1-8 ในการทดลองได้ทำการออกแบบตัวกรองแบบปรับตัวได้โดยวิธีการ LMS เปรียบเทียบผลการทดลองกับวิธีการทำนาย (Interpolation method) ซึ่งพบว่าทั้งสองวิธีก็สามารถกำจัดสัญญาณที่เกิดจากการรบกวนที่ถูกกระตุ้นอย่างทันทีทันใด ในการควบคุมหัวอ่าน/เขียนของฮาร์ดดิสก์ได้



ภาพประกอบ 1-8 โครงสร้างของระบบควบคุมที่มีตัวกรอง [11]

1.2.10 GA based Reduced Order Robust Loop Shaping Controller Design for HDD Servo System with Dual Stage Actuator [12]

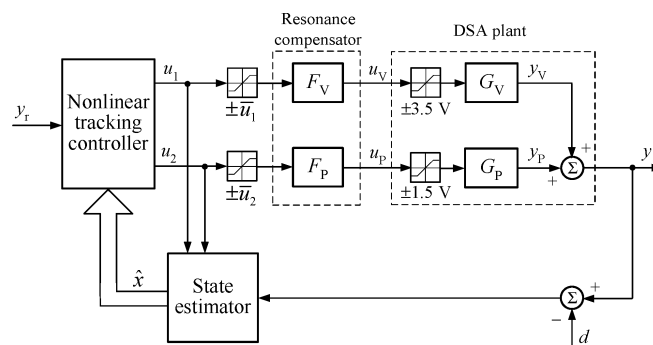
บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมระบบเซอร์โวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบสองขั้นตอน คือ ในระบบมีทั้ง VCM และเพียโซอิเล็กทริก (PZT) ส่วนในการควบคุมจะเป็นการควบคุมแบบหลายอินพุตหนึ่งเอาต์พุต ดังแสดงในภาพประกอบ 1-9 สำหรับการควบคุมใช้วิธีการควบคุมคงทน loop shaping โดยใช้วิธีการ GA จากการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอพบว่าลำดับของตัวควบคุมมีจำนวนลดลงจาก 35 ลำดับ (Order 35) เหลือ 4 ลำดับ (Order 4) เมื่อเทียบกับการควบคุมคงทน loop shaping แบบธรรมดา



ภาพประกอบ 1-9 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบหลายอินพุตหนึ่งเอาต์พุต [12]

1.2.11 Nonlinear Tracking Control for a Hard Disk Drive Dual-Stage Actuator System [13]

บทความนี้ได้นำเสนอการควบคุมระบบเซอร์โวมอเตอร์ดิสก์ไดรฟ์แบบสองขั้นตอน โดยในการควบคุมตัวขับเคลื่อน VCM และ PZT ใช้วิธีการควบคุมแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Control) ดังแสดงในภาพประกอบ 1-10 สำหรับการทดสอบการควบคุมระบบในการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนตามแนวข้อมูล พบว่าการควบคุมแบบสองขั้นตอนจะให้ค่าค่าเวลาเข้าที่ ค่าพุ่งเกินลดลง และค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง (PES) ลดลง 14 % เมื่อเทียบกับการควบคุมแบบขั้นตอนเดียว



ภาพประกอบ 1-10 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมระบบแบบสองขั้นตอน [13]

การตรวจสอบเอกสาร บทความ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าสามารถสรุปออกมาเป็นประเด็นวิจัยในงานวิจัยนี้ได้ คือ นำการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้มาใช้ในการควบคุม VCM สำหรับการควบคุมควบคุมแบบขั้นตอนเดียวและแบบสองขั้นตอนในการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนตามแนวข้อมูล โดยใช้กับระบบฮาร์ดดิสก์ที่มีความจุข้อมูลที่สูง (TPI)

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษา ออกแบบ และพัฒนาวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้สำหรับการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

1.3.2 เพื่อนำวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้มาใช้ในการลดค่าความผิดพลาดตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สำหรับการเคลื่อนที่ไปตามแนวข้อมูล

1.3.3 เพื่อนำวิธีการการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้สำหรับการควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ไปประยุกต์ใช้จริงบนตัวประมวลผล

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาวิธีการควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ และนำการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้มาใช้แทนการควบคุมแบบพีไอดีธรรมดา

1.4.2 ใช้วิธีการค่ากำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด (LMS algorithm) ในการปรับตัวค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้

1.4.3 ออกแบบและจำลองการทำงานของตัวควบคุมที่ใช้การควบคุมแบบปรับตัวได้ โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink แล้วเปรียบเทียบผลกับการควบคุมแบบพีไอดีธรรมดา ทั้งการควบคุมแบบขั้นตอนเดียว และการควบคุมแบบสองขั้นตอน

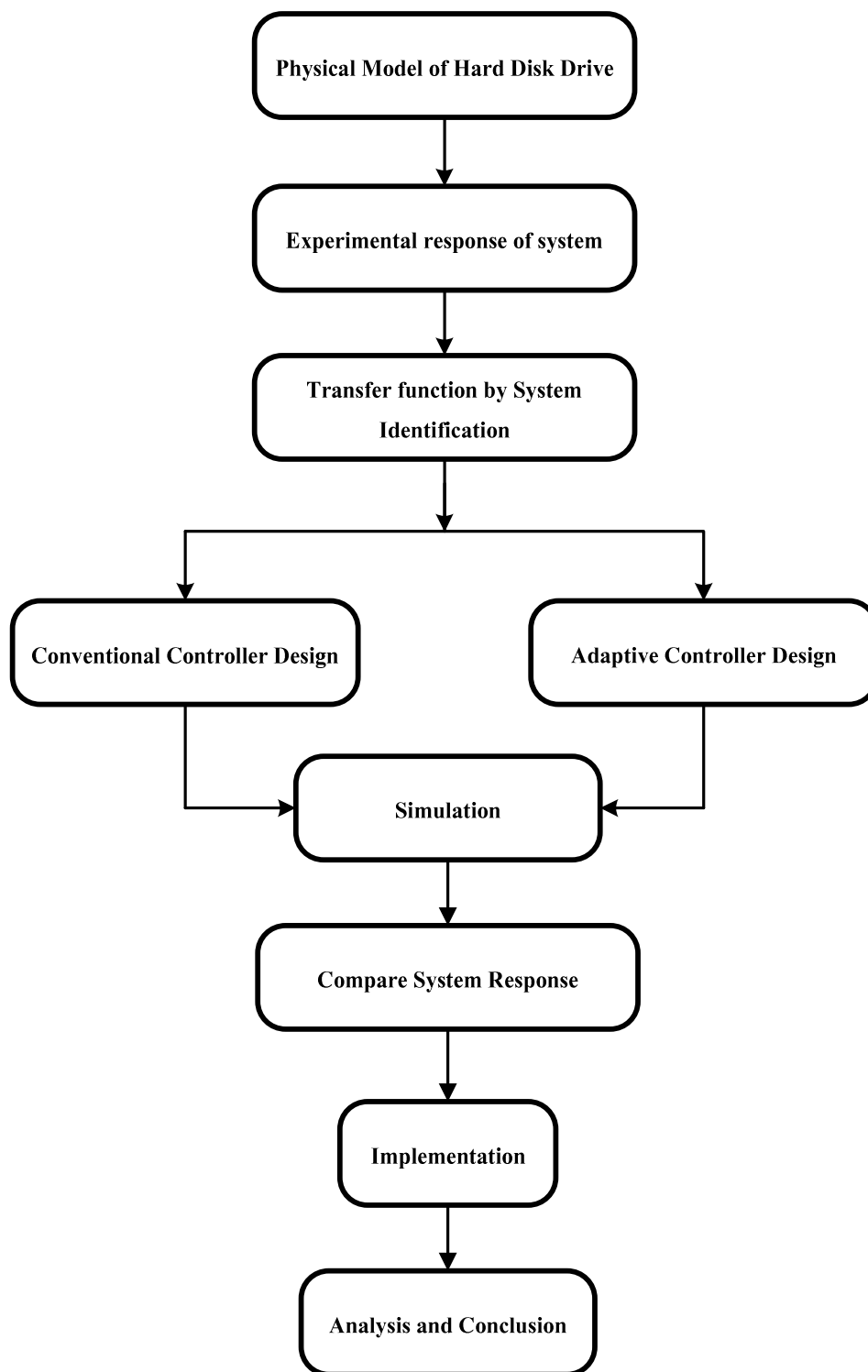
1.4.4 ระบบฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟที่ใช้สำหรับการจำลองการทำงานของตัวควบคุมมีความหนาแน่นของแนวข้อมูลต่อนิ้ว 230 kTPI (ความกว้างของแนวข้อมูล 0.1 μm) และความเร็วรอบ 7200 rpm

1.4.5 ผลตอบสนองของระบบในการจำลองการทำงานของตัวควบคุม มีค่าต่างๆ ดังนี้ คือ Overshoot น้อยกว่า 5%, Settling time น้อยกว่า 1 ms และค่า 3σ น้อยกว่า 10% ของความกว้างแนวข้อมูล หรือน้อยกว่า 0.01 μm

1.4.6 นำวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ในการควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟตามแนวข้อมูล ไปประยุกต์ใช้งานจริงบนตัวประมวลผล FPGA ตระกูล Xilinx Spartan 3

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

สำหรับวิธีการดำเนินการวิจัยเริ่มต้นจากการนำผลตอบสนองของระบบควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟที่ได้จากการวัดจากของจริง แล้วนำมาหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ (Transfer function) จากนั้นก็ออกแบบตัวควบคุม แล้วเปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่างตัวควบคุมแบบพีไอดีธรรมดากับตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ ทั้งการควบคุมแบบขั้นตอนเดียว และการควบคุมแบบสองขั้นตอน เพื่อดูประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ หลังจากนั้นก็นำตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ไปประยุกต์ใช้งานจริงบนตัวประมวลผล และต่อมาก็ทำการปรับปรุงระบบควบคุมให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น โดยมีขั้นตอนดังแสดงในภาพประกอบ 1-11



ภาพประกอบ 1-11 ขั้นตอนการวิจัย

1.6 แผนการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 1-1 แผนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	เดือนที่					
	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-18
1.ศึกษาวิธีการควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในการเคลื่อนที่ตามแนวข้อมูล						
2.ศึกษาวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้และวิธีการ LMS ที่ใช้ในการปรับตัว						
3.ออกแบบและจำลองการทำงานของตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ในโปรแกรม MATLAB Simulink และเปรียบเทียบผลกับการควบคุมแบบพีไอดีธรรมดา						
4.นำวิธีการการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ไปประยุกต์ใช้งานจริงในการควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ทั้งการควบคุมแบบขั้นตอนเดียว และการควบคุมแบบสองขั้นตอน						
5.นำวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ที่ออกแบบไปประยุกต์ใช้งานจริงบนตัวประมวลผล FPGA						
6.วิเคราะห์ผล สรุปและเขียนรายงานวิทยานิพนธ์						

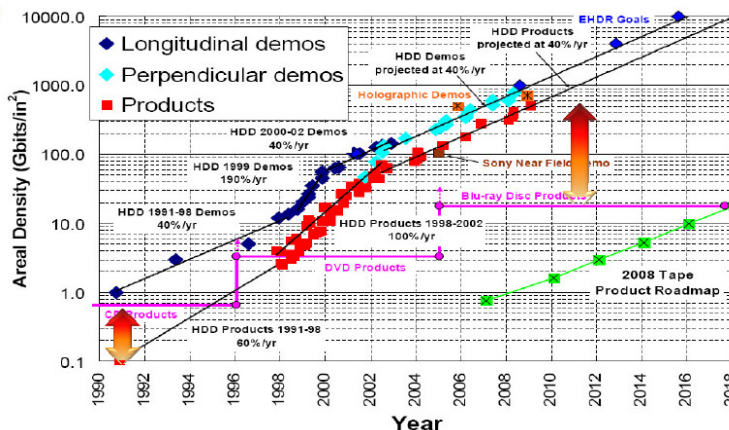
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในการออกแบบและพัฒนาการควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อให้ค่าผิดพลาดตำแหน่งมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นจำเป็นต้องทำการศึกษาและทำความเข้าใจในความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ประกอบด้วย ลักษณะภายในของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การทำงานในการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียน การควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนในรูปแบบต่างๆ วิธีการควบคุมแบบดั้งเดิม วิธีการวัดประสิทธิภาพของตัวควบคุม ซึ่งสิ่งเหล่านี้ถือเป็นสิ่งสำคัญที่จะนำไปสู่การออกแบบและพัฒนาการควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

2.1 ความเป็นมาของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

เทคโนโลยีของฮาร์ดดิสก์ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยความสามารถในการเพิ่มความจุได้มากขึ้นในขณะเดียวกันขนาดและราคาลดลงเมื่อเทียบกับจำนวนไบต์ โดยมีค่าหนึ่งที่ใช้ในการความจุ คือ ความหนาแน่นต่อหน่วยพื้นที่ (Areal density) เป็นจำนวนที่ใช้เก็บข้อมูลบนแผ่นดิสก์ในขนาด 1 ตารางนิ้ว การปรับปรุงเพื่อเพิ่มความหนาแน่นในการเก็บข้อมูลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปีดังแสดงในภาพประกอบ 2-1 โดยเริ่มต้นจากปี 1990 เทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์มีความหนาแน่นข้อมูล 2000 bit/in² พอในปี 2000 มีความหนาแน่นข้อมูลถึง 100 Gbit/in² หลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาและเพิ่มความหนาแน่นข้อมูลขึ้นเรื่อยๆ จนถึงปัจจุบันที่มีความหนาแน่นข้อมูลถึง 1Tbit/in²



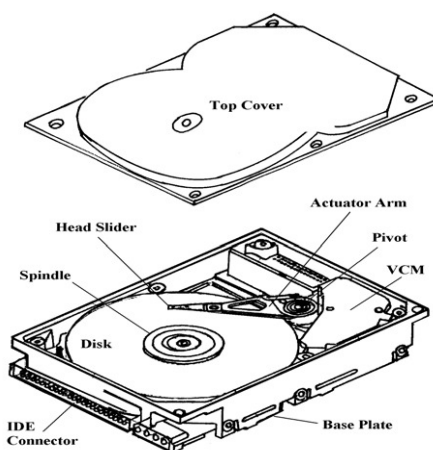
ภาพประกอบ 2-1 อัตราการเจริญเติบโตของเทคโนโลยีความจุฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

2.2 ระบบเซอร์โวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

2.2.1 ส่วนประกอบภายในของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ลักษณะภายในของฮาร์ดดิสก์ดังแสดงในภาพประกอบ 2-2 ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

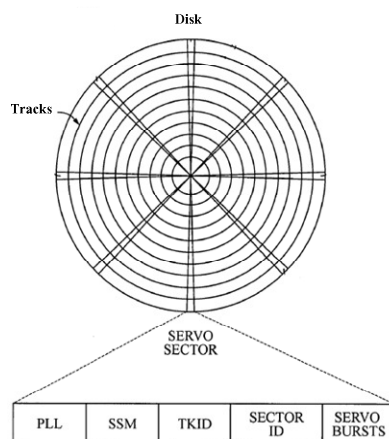
- Top Cover เป็นส่วนที่เป็นฝาครอบของตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อป้องกันไม่ให้ฝุ่นเข้าไปภายในตัวฮาร์ดดิสก์
- Base Plate เป็นฐานของตัวฮาร์ดดิสก์เพื่อรองรับชิ้นส่วนต่างๆ ภายในฮาร์ดดิสก์
- Disk เป็นแผ่นดิสก์ที่ใช้ในการเก็บบันทึกข้อมูล
- Spindle เป็นมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนให้แผ่นจานดิสก์หมุนในขณะที่มีการอ่านและเขียนข้อมูลลงบนแผ่นจานดิสก์
- Head Slider เป็นที่อยู่ของหัวอ่าน/เขียนที่วิ่งลอยอยู่บนแผ่นจานดิสก์ทำหน้าที่ในการอ่านและเขียนบันทึกข้อมูล
- Actuator Arm เป็นแขนที่ยึดหัวอ่าน/อ่านเขียนกับตัว VCM
- Pivot เป็นจุดหมุนของแขนของหัวอ่าน/เขียนเพื่อให้หัวอ่าน/เขียนลอยเคลื่อนที่ไปบนแผ่นจานดิสก์
- VCM เป็นตัวขับเคลื่อนให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นจานดิสก์



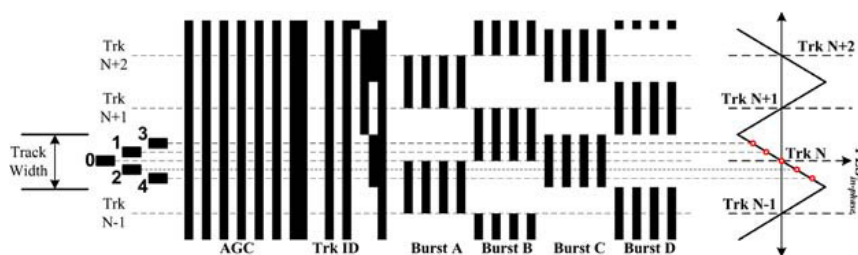
ภาพประกอบ 2-2 โครงสร้างภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [1]

2.2.2 ตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์

ภายในแผ่นจานดิสก์เป็นส่วนที่ใช้ในการเก็บบันทึกข้อมูลต่างๆ ซึ่งจะแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-3 ประกอบด้วยส่วนที่แบ่งออกเป็นวงๆ เรียกว่า แนวข้อมูล (Track) เป็นส่วนที่ใช้ในการเก็บบันทึกข้อมูล และส่วนที่แบ่งในแนวรัศมีในแต่ละแนวข้อมูล เรียกว่า Servo Sectors เป็นส่วนที่ใช้เก็บข้อมูลตำแหน่งที่อยู่ของข้อมูลเพื่อให้ตัวควบคุมรู้ว่าขณะนี้หัวอ่านอยู่ที่ตำแหน่งใด ภายใน Servo Sectors ก็จะประกอบด้วย TKID, SECTORID, SERVO BURST โดย TKID เป็นส่วนที่ระบุหมายเลขตำแหน่งของแนวข้อมูล SECTORID เป็นส่วนที่ระบุหมายเลขตำแหน่งของ sector และ SERVO BURST เป็นส่วนที่บอกตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนบนแนวข้อมูลว่าอยู่ที่ตำแหน่งใด ดังแสดงในภาพประกอบ 2-4



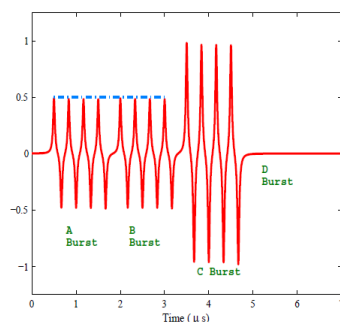
ภาพประกอบ 2-3 ลักษณะภายในของแผ่นจานดิสก์ [1]



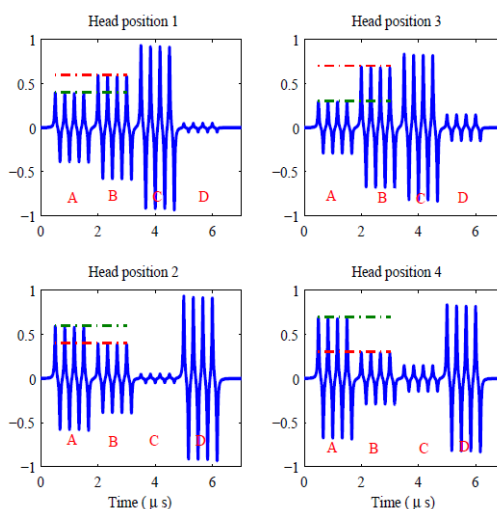
ภาพประกอบ 2-4 รูปแบบของ Servo burst [1]

Burst signal เป็นสัญญาณที่หัวอ่านอ่านมาได้จาก Burst ต่างๆ ใน Servo burst เมื่อหัวอ่าน/เขียนอยู่ที่ตำแหน่ง 0 ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของแนวข้อมูล สัญญาณที่อ่านได้จาก burst C จะมีค่าสูงสุด burst D จะมีค่าเป็นศูนย์ ส่วน burst A,B จะมีค่าเท่ากันแต่น้อยกว่า burst C ดังแสดงใน

ภาพประกอบ 2-5 ถ้าหากหัวอ่าน/เขียนไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่ง 0 สัญญาณที่อ่านได้จาก burst signal จะมีลักษณะที่แตกต่างกันไป ดังแสดงในภาพประกอบ 2-6 ดังนั้นตำแหน่งที่หัวอ่าน/เขียนห่างจากกึ่งกลางของแนวข้อมูลสามารถคำนวณได้จาก burst signal เหล่านี้ ซึ่งระยะห่างของหัวอ่าน/เขียนกับกึ่งกลางของแนวข้อมูล เรียกว่า Position Error Sensing (PES) Signal



ภาพประกอบ 2-5 สัญญาณที่ตำแหน่ง 0 [1]

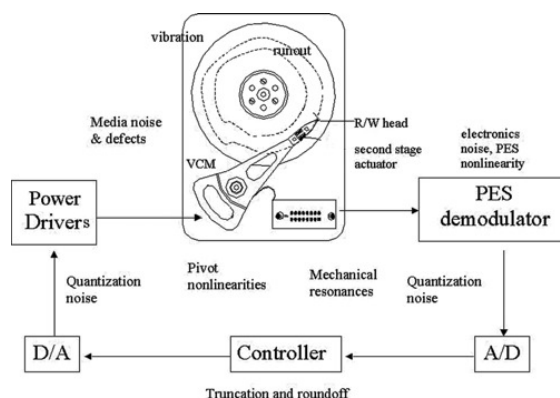


ภาพประกอบ 2-6 สัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ [1]

2.2.3 การควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนตามแนวข้อมูล

กระบวนการของการอ่าน/เขียนข้อมูลลงแผ่นจานดิสก์เมื่อต้องการไปที่แนวข้อมูลที่ต้องการ จะเริ่มจากกระบวนการหาตำแหน่งของแนวข้อมูล ซึ่งกำหนดโดย TKID หลังจากนั้นเมื่อพบแนวข้อมูลที่ต้องการแล้ว จึงพยายามทำให้หัวอ่าน/เขียนอยู่กึ่งกลางแนวข้อมูลโดยอ้างอิงจากค่า PES โดยกระบวนการดังกล่าวแสดงดังภาพประกอบ 2-7 ในกระบวนการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/

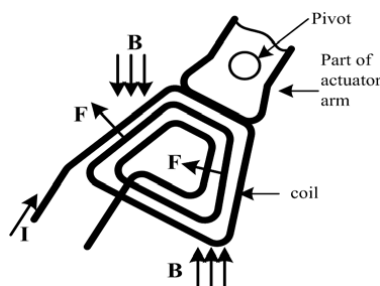
เขียนให้อยู่กึ่งกลางแนวข้อมูลจะอ่านค่า PES เข้ามา แล้วแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล (ADC) เพื่อให้ตัวควบคุมได้รับรู้ว่าหัวอ่าน/เขียนอยู่ตำแหน่งไหน จากนั้นตัวควบคุมจะส่งสัญญาณควบคุมที่เป็นดิจิทัลไปแปลงเป็นอนาล็อกไปเข้าวงจรขับ (Power drive) มอเตอร์ขดลวดเสียง (Voice coil motor: VCM) เพื่อปรับให้หัวอ่าน/เขียนอยู่กึ่งกลางแนวข้อมูลหรือใกล้เคียงกึ่งกลางแนวข้อมูลมากที่สุดจึงเริ่มอ่าน/เขียนข้อมูล



ภาพประกอบ 2-7 ระบบการควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [1]

2.3 มอเตอร์ขดลวดเสียง

มอเตอร์ขดลวดเสียง (Voice Coil Motor: VCM) เป็นตัวขับเคลื่อนให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นดิสก์ ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในภาพประกอบ 2-8 ประกอบด้วยขดลวดที่ใช้ในการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงบิด (Torque) ที่จะขับให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ เมื่อมีการป้อนกระแสให้กับขดลวด (Coil current)



ภาพประกอบ 2-8 ลักษณะของตัวขับเคลื่อน VCM [1]

แรงที่เกิดขึ้นที่ขดลวดส่งผลให้เกิดแรงบิด (T) รอบจุดหมุน ทำให้หัวอ่าน/เขียนเกิดการเคลื่อนที่ โดยแรงที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนที่ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านขดลวด ทำให้สามารถควบคุมแรงที่เกิดขึ้นได้จากการปรับแอมพลิจูด และขั้วของกระแสไฟฟ้า แรงบิดที่เกิดขึ้นสามารถเขียนได้ดังสมการ (2-1)

$$T = K_t I \quad (2-1)$$

โดยที่ K_t คือ ค่าคงที่แรงบิด และ I คือกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในขดลวด

เมื่อชุดแกนหัวอ่าน/เขียนเกิดการเคลื่อนที่ที่สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ตามกฎข้อที่สองของนิวตันได้ดังสมการ (2-2)

$$\ddot{\theta} = \frac{K_t}{J} I(t) \quad (2-2)$$

โดยที่ $\ddot{\theta}$ คือ ความเร่งเชิงมุมเมื่อชุดแกนหัวอ่าน/เขียนเกิดการเคลื่อนที่ และ J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของชุดแกนหัวอ่าน/เขียน และสามารถเขียนเป็นสมการเชิงเส้นได้ดังสมการ (2-3)

$$\ddot{y} = D_{trk} L \ddot{\theta} \quad (2-3)$$

เมื่อแทนสมการ (2-2) ลงในสมการ (2-3) จะได้ดังสมการ (2-4)

$$\ddot{y} = \frac{D_{trk} L K_t}{J} I(t) \quad (2-4)$$

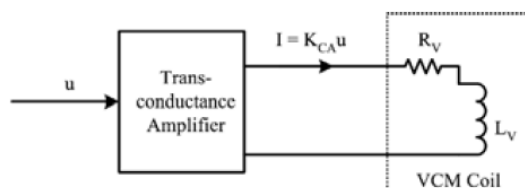
เมื่อแปลงลาปลาซจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ดังสมการ (2-5)

$$G_{VCM}(s) = \frac{Y(s)}{I(s)} = \frac{D_{trk} L K_t}{J s^2} = \frac{K_{VCM}}{s^2} \quad (2-5)$$

$$K_{VCM} = \frac{D_{trk} L K_t}{J} \quad (2-6)$$

เมื่อ L คือ ระยะห่างระหว่างจุดหมุนและหัวอ่าน/เขียน และ D_{trk} คือ ความหนาแน่นของแนวข้อมูลต่อตารางนิ้ว (TPI)

ถ้าตัวขับ VCM เป็นวงจรถวายกระแส (Transconductance amplifier) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-9 โดยสัญญาณขาออกเป็นกระแส (I) ที่ไหลเข้าขดลวดของ VCM และสัญญาณขาเข้าเป็นแรงดันซึ่งเป็นสัญญาณควบคุม (u) ที่มาจากตัวควบคุม มีสัมพันธ์กันดังสมการ (2-7)



ภาพประกอบ 2-9 วงจรสมมูลของตัวขับเคลื่อน VCM [1]

$$I(s) = K_{CA}U(s) \quad (2-7)$$

แทนสมการ (2-7) ลงในสมการ (2-5) จะได้สมการ (2-8)

$$G_{VCM}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_{VCM} K_{CA}}{s^2} \quad (2-8)$$

แต่ในระบบตัวขับเคลื่อน VCM จะประกอบด้วยความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างๆ ด้วย ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวขับเคลื่อน VCM จะแสดงสมการ (2-9)

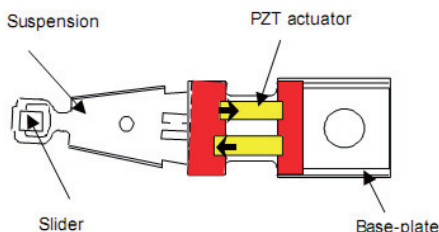
$$G_{VCM}(s) = \frac{K_{VCM} K_{CA}}{s^2} \prod_{i=1}^N G_{V,r,i}(s) \quad (2-9)$$

$$G_{V,r,i}(s) = \frac{a_i s^2 + b_i s + \omega_i^2}{s^2 + 2\xi_i \omega_i s + \omega_i^2} \quad (2-10)$$

เมื่อ N คือ จำนวนของความถี่เรโซแนนซ์ และ i คือ ลำดับของความถี่เรโซแนนซ์ ส่วน $a_i, b_i, \xi_i, \omega_i$ คือ สัมประสิทธิ์ของความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ต่างๆ

2.4 ตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริก

ตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric: PZT) เป็นตัวขับเคลื่อนขนาดเล็กทำมาจากวัสดุ Lead-Zirconium-Titanate โดยปรากฏการณ์ของเพียโซอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นมีการเกี่ยวข้องกันระหว่างไฟฟ้าและคุณสมบัติทางกลในการทำงาน เมื่อให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าไปยังวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ เรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบย้อนกลับ (Inverse piezoelectric effect) โดยในการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟจะใช้ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบย้อนกลับในการทำงานเพื่อให้ตัวทำงานที่ติดอยู่ปลายแขนของหัวอ่าน/เขียนเกิดการเคลื่อนที่ซ้ายขวา (Swaying) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-10 ส่วนฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวขับเคลื่อน PZT แสดงสมการ (2-11)



ภาพประกอบ 2-10 เพียโซอิเล็กทริกที่ติดอยู่ปลายแขนของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [12]

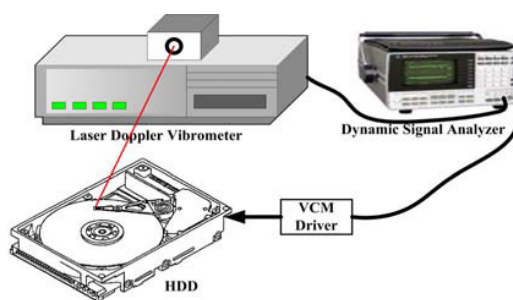
$$G_{PZT}(s) = 0.5 \prod_{i=1}^N G_{P,r,i}(s) \tag{2-11}$$

$$G_{P,r,i}(s) = \frac{a_i s^2 + b_i s + \omega_i^2}{s^2 + 2\xi_i \omega_i s + \omega_i^2} \tag{2-12}$$

การควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนโดยใช้ตัวทำงานเพียโซอิเล็กทริก เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ละเอียดมากขึ้นในแนวสายเข้าออกได้ ซึ่งพบว่าจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการเข้าถึงข้อมูลได้มากกว่าการควบคุมด้วยตัวขับเคลื่อน VCM อย่างเดียว

2.5 การหาเอกลักษณ์ของระบบ

การหาเอกลักษณ์ของระบบ (System identification) เป็นการจำลองฟังก์ชันถ่ายโอน ของตัวขับเคลื่อน VCM และตัวทำงาน PZT โดยใช้ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ด้วยเครื่อง LDV (Laser Dropper Vibrometer) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-11



ภาพประกอบ 2-11 การวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบ [1]

การจำลองฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ($G(s)$) โดยใช้วิธีการของ Gauss-Newton [14] ซึ่งให้ค่าฟังก์ชันความผิดพลาด (E_G) น้อยที่สุด ดังแสดงในสมการ (2-13) และ (2-14)

$$G(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_1s^i + b_2s^{i-1} + \dots + b_{i+1}}{a_1s^j + a_2s^{j-1} + \dots + a_{j+1}} \quad (2-13)$$

$$E_G = \sum_{k=1}^n \omega t(k) \left| h(k) - \frac{B(\omega(k))}{A(\omega(k))} \right|^2 \quad (2-14)$$

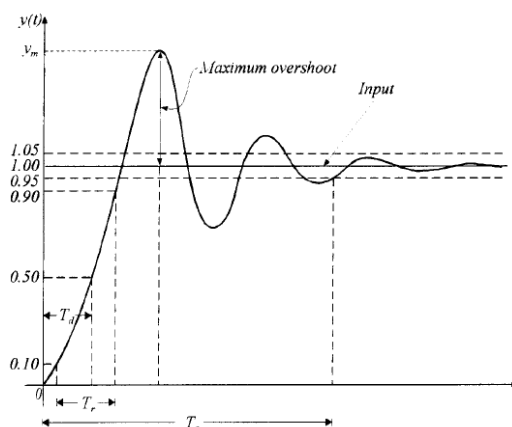
เมื่อ $A(\omega(k))$ และ $B(\omega(k))$ เป็นผลการแปลงฟูเรียร์ของพหุนาม a และ b ตามลำดับ $\omega(k)$ เป็นค่าความถี่เชิงมุม n เป็นจำนวนจุดของความถี่ $h(k)$ เป็นค่าเชิงซ้อนของผลตอบสนองเชิงความถี่ที่วัดได้จริง i และ j เป็นค่าอันดับพหุนาม $B(s)$ และ $A(s)$ ตามลำดับ ซึ่งค่าอันดับพหุนามสามารถเลือกให้เหมาะสมและใกล้เคียงกับข้อมูลจริงในช่วงความถี่ที่สนใจ

2.6 การวัดประสิทธิภาพของการควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการออกแบบตัวควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ เป็นสิ่งที่จะชี้วัดว่าระบบใดที่มีความถูกต้อง แม่นยำ และรวดเร็วในการเข้าถึงตำแหน่งที่ต้องการ โดยมีวิธีการทดสอบประสิทธิภาพของการควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ 2 วิธี ได้แก่

2.6.1 การวัดผลตอบสนองของหัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปตามแนวข้อมูล

เป็นการทดสอบประสิทธิภาพโดยให้หัวอ่านเคลื่อนที่ไปตามแนวข้อมูลที่กำหนด ซึ่งใช้วิธีการทดสอบผลตอบสนองขั้นบันได (Step Response) จากผลการทดสอบจะเปรียบเทียบผลของ ค่าพุ่งเกิน (Overshoot) ค่าเวลาขาขึ้น (Rise time) และค่าเวลาเข้าที่ (Settling time) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-12



ภาพประกอบ 2-12 ผลตอบสนองแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

- Overshoot หาได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าสูงสุดของผลตอบสนอง (Maximum value: y_m) และค่าสถานะคงตัว (Steady state value: y_{ss}) ค่า overshoot ที่ได้จะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ หาได้จากสมการ (2-15)

$$\text{overshoot}(\%) = \left(\frac{y_m - y_{ss}}{y_{ss}} \right) \times 100 \quad (2-15)$$

- Rise time (t_r) เป็นช่วงเวลาของผลตอบสนองที่เพิ่มขึ้นจาก 10 เปอร์เซ็นต์ ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ของค่าสถานะคงตัว

- Settling time (t_s) เป็นช่วงเวลาที่ผลตอบสนองเริ่มต้นจนถึงค่าผลตอบสนองอยู่ที่ 2-5 เปอร์เซ็นต์ ของสถานะคงตัว

2.6.2 การวัดผลตอบสนองของสัญญาณรบกวน

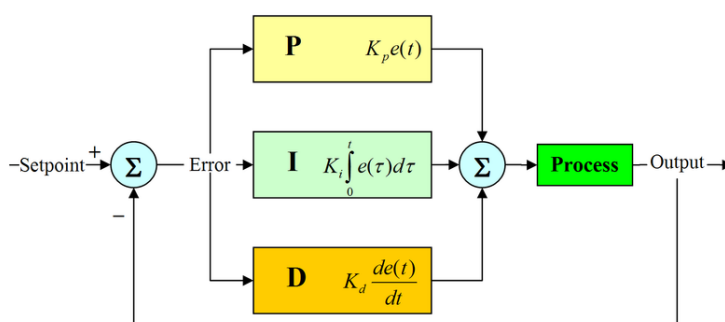
ในการทำงานจริงของฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟจะมีสัญญาณรบกวน โดยเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำ และสัญญาณรบกวนที่ไม่เกิดขึ้นซ้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุให้หัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์เคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งที่ต้องการ สัญญาณที่เกิดขึ้นซ้ำเป็นผลมาจากการหมุนของมอเตอร์หมุนแผ่นจานดิสก์ที่หลายๆ ความถี่รวมกัน ส่วนสัญญาณที่ไม่เกิดขึ้นซ้ำเป็นผลมาจาก 3 ส่วนหลัก ได้แก่ การสั่นสะเทือนอย่างรุนแรง (Vibration shocks) ตัวรบกวนเชิงกล (Mechanical disturbance) และสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (Electrical noise) สัญญาณที่ไม่เกิดขึ้นซ้ำเป็นผลมาจากการลุ่มและไม่สามารถคาดคะเนได้ไม่เหมือนกับสัญญาณที่เกิดขึ้นซ้ำ ดังนั้นระบบควบคุมหัวอ่าน/เขียนจะต้องสามารถกำจัดได้ทั้งสัญญาณที่เกิดขึ้นซ้ำและไม่เกิดขึ้นซ้ำได้ ในการทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมสามารถวัดได้จากค่า TMR (Track Misregistration) โดยจะใช้สัญญาณที่เกิดขึ้นซ้ำเป็นสัญญาณรบกวนโดยให้หัวอ่าน/เขียนอยู่ที่ตำแหน่ง 0 และผลตอบสนองของสัญญาณค่าความผิดพลาดที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ในรูปของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ_{PES}) ที่ความน่าเชื่อถือร้อยละ 99.73 ($3\sigma_{PES}$) และผลตอบสนองสัญญาณค่าความผิดพลาดที่ดีควรมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 10 ของความกว้างแนวข้อมูล ค่า σ_{PES} หาได้จากสมการ (2-16)

$$\sigma_{pes} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_{pes}(i)^2} \quad (2-16)$$

เมื่อ N คือ จำนวนตัวอย่างข้อมูลของสัญญาณค่าความผิดพลาด และ y_{PES} คือ สัญญาณค่าความผิดพลาด (PES)

2.7 การควบคุมแบบพีไอดี

การควบคุมแบบพีไอดี เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-13



ภาพประกอบ 2-13 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมแบบพีไอดี [15]

วิธีคำนวณของ PID ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือค่าสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งพ่วงผ่านไป และค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการ ดังแสดงในสมการ (2-17)

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2-17)$$

เมื่อ K_P คือ ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน (Proportional gain)

K_I คือ ค่าอัตราขยายปริพันธ์ (Integral gain)

K_D คือ ค่าอัตราขยายอนุพันธ์ (Derivative gain)

e คือ ค่าความผิดพลาด (Error)

u คือ ค่าสัญญาณควบคุม (Control signal)

t คือ ค่าเวลา (Time)

โดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาด ค่าพุ่งเกิน และ ค่าแกว่งของระบบ (Oscillation) วิธี PID ไม่รับประกันได้ว่าจะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอน

ตัวควบคุมแบบสัดส่วน จะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาด การตอบสนองของสัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p หรือที่เรียกว่า อัตราขยายแบบสัดส่วน ดังแสดงในสมการ (2-18)

$$P(t) = K_p e(t) \quad (2-18)$$

ผลอัตราขยายแบบสัดส่วนที่สูงค่าความผิดพลาดก็จะเปลี่ยนแปลงมากเช่นกัน แต่ถ้าสูงเกินไประบบจะไม่เสถียรได้ ในทางตรงกันข้าม ผลอัตราขยายสัดส่วนที่ต่ำ ระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองต่อกระบวนการน้อยตามไปด้วย ดังนั้นตัวควบคุมแบบสัดส่วนจะมีข้อดีคือ ทำให้ระบบมีการตอบสนองที่รวดเร็ว

ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้ออฟเซตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้า ความผิดพลาดสะสมจะถูกคูณโดยอัตราขยายปริพันธ์ ขนาดของผลของเทอมปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตราขยายปริพันธ์ K_I ดังแสดงในสมการ (2-19)

$$I(t) = K_I \int e(t) dt \quad (2-19)$$

เทอมปริพันธ์ จะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการและขจัดความผิดพลาดที่เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วน แต่อย่างไรก็ตาม เทอมปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงสามารถทำให้เกิดค่าพุ่งเกินได้

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการ โดยคำนวณหาจากความชันของความผิดพลาดทุกๆเวลา (เป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งสัมพันธ์กับเวลา) และคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์ K_D ขนาดของผลของเทอมขึ้นกับอัตราขยายอนุพันธ์ ดังแสดงในสมการ (2-20)

$$D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2-20)$$

เทอมอนุพันธ์จะชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของระบบควบคุมและด้วยผลนี้จะช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ ดังนั้นเทอมอนุพันธ์จะใช้ในการลดขนาดของค่าพุ่งเกินที่เกิดจาเทอมปริพันธ์และทำให้เสถียรภาพของการรวมกันของระบบควบคุมดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอนุพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายในระบบควบคุมจะไวมากต่อการรบกวนในเทอมของความผิดพลาดและสามารถทำให้กระบวนการไม่เสถียรได้ถ้าสัญญาณรบกวนและอัตราขยายอนุพันธ์มีขนาดใหญ่เพียงพอ

2.8 วิธีการค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด

วิธีการค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด (Least Mean Square error: LMS) เป็นวิธีการที่นิยมใช้ในการปรับค่าน้ำหนักของสัมประสิทธิ์ ($W(n)$) เพื่อให้สัญญาณขาออก ($y(n)$) มีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณขาออกที่ต้องการ ($d(n)$) เมื่อป้อนสัญญาณขาเข้า ($x(n)$)

$$y(n) = \sum_{k=0}^p W_n(k)x(n-k) \quad (2-21)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2-22)$$

ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุดแสดงในสมการ (2-23) เป็นการหาค่าเฉลี่ย (Expected value) ของค่าความผิดพลาด

$$\varepsilon(n) = E\{e(n)^2\} = e(n)^2 \quad (2-23)$$

จากวิธีการ steepest descent สามารถเขียนสมการปรับค่าน้ำหนักได้ดังสมการ (2-24)

$$W(n) = W(n-1) - \mu \nabla \varepsilon(n) \quad (2-24)$$

เมื่อแทนสมการ (2-23) ลงในสมการ (2-24) จะได้

$$W(n) = W(n-1) - \mu \frac{\partial e(n)^2}{\partial W(n)} \quad (2-25)$$

เมื่อค่า μ คือ อัตราการเรียนรู้ เป็นค่าที่กำหนดการเพิ่มค่าหรือลดค่าของค่าน้ำหนักในแต่ละรอบ โดยถ้าค่า μ มีค่าสูงก็จะทำให้ค่าน้ำหนักเข้าสู่ค่าที่ต้องการได้เร็วกว่าค่า μ ที่มีค่าน้อย แต่ถ้าค่า μ มีค่าน้อยจะทำให้ค่าน้ำหนักคงที่กว่าค่า μ ที่มีค่าสูงเมื่อเข้าสู่ค่าที่ต้องการ

$$\begin{aligned}
\frac{\partial e(n)^2}{\partial W(n)} &= 2e(n) \frac{\partial e(n)}{\partial W(n)} \\
&= 2e(n) \frac{\partial (d(n) - y(n))}{\partial W(n)} \\
&= -2e(n) \frac{\partial y(n)}{\partial W(n)} \\
&= -2e(n)x(n)
\end{aligned}
\tag{2-26}$$

ดังนั้นจะได้สมการปรับค่าน้ำหนักดังแสดงในสมการ (2-27)

$$W(n) = W(n-1) + 2\mu e(n)x(n) \tag{2-27}$$

ค่าสัญญาณ $y(n)$ ถูกประมาณได้จากการคูณค่าน้ำหนักกับสัญญาณอินพุต $x(n)$ ค่าน้ำหนักจะถูกปรับทุกๆรอบ ค่าน้ำหนักปัจจุบัน $W(n)$ ได้จากผลบวกของค่าน้ำหนักก่อนหน้า $W(n-1)$ กับค่าผลคูณของค่าคงที่ μ กับค่าผลคูณของสัญญาณความผิดพลาดและค่าอินพุตปัจจุบัน

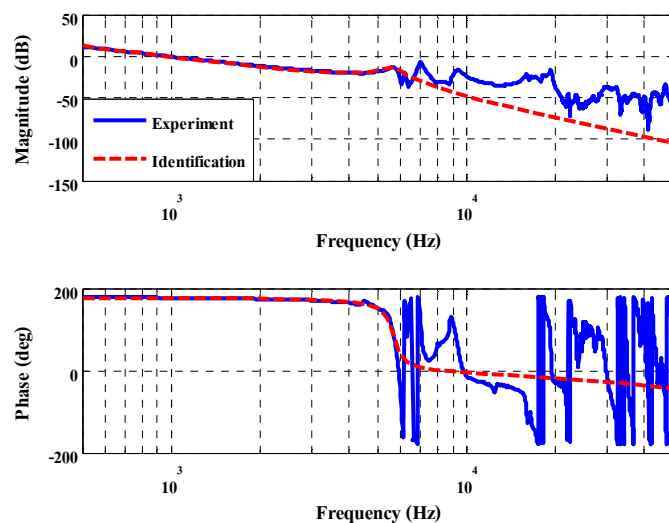
บทที่ 3

การควบคุมหัวอ่าน/เขียนตามแนวข้อมูลแบบขั้นตอนเดียว

บทนี้กล่าวถึงการควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ตามแนวข้อมูลแบบขั้นตอนเดียว โดยใช้วิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ในการควบคุมตัวขับเคลื่อน VCM เพื่อให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปตามแนวข้อมูล ในการออกแบบตัวควบคุมเริ่มจากการหาแบบจำลองของตัวขับเคลื่อน VCM แล้วออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ หลังจากนั้นก็จำลองการทำงานของระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้กับตัวควบคุมพีไอดีแบบธรรมดา

3.1 แบบจำลองของตัวขับเคลื่อน VCM

การจำลองการทำงานของระบบควบคุมจะต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวขับเคลื่อน VCM ที่จะควบคุม โดยการหาเอกลักษณ์ของระบบจากผลการทดสอบจริงตามที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.5 ผลการทดสอบจริงได้วัดผลตอบสนองของระบบจากฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟขนาด 3.5 นิ้ว มีความจุข้อมูล 230 kTPI และแผ่นจานดิสก์หมุนที่ความเร็ว 7200 rpm ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 500 Hz ถึง 50 kHz แต่ในการหาเอกลักษณ์ของระบบสนใจในช่วงความถี่ตั้งแต่ 500 Hz ถึง 7 kHz เนื่องจากตัวขับเคลื่อน VCM ทำงานที่ความถี่ไม่สูงมาก ซึ่งได้ผลการหาเอกลักษณ์ของระบบเทียบกับผลการทดสอบจริงดังแสดงในภาพประกอบ 3-1 โดยที่ความถี่ 5.7 kHz เป็นผลมาจาก flex cable [14] และได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวขับเคลื่อน VCM ดังแสดงในสมการ (3-1)

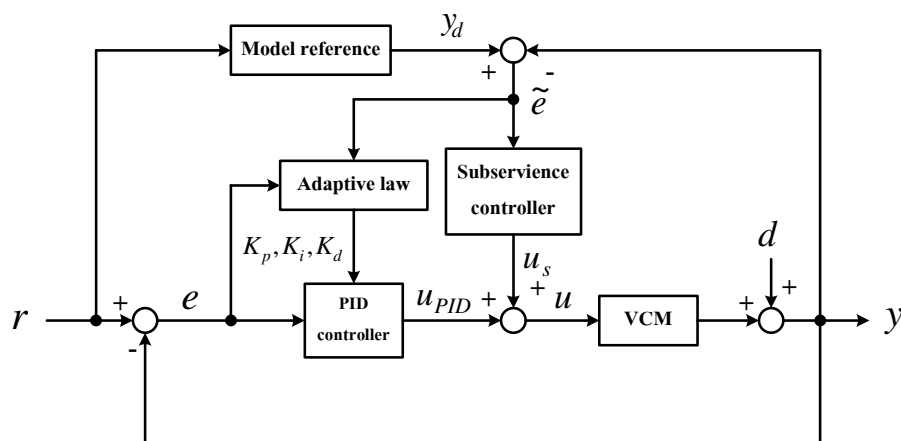


ภาพประกอบ 3-1 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวขับเคลื่อน VCM

$$G_{VCM}(s) = \frac{-1.2066 \times 10^{11} s + 4.0296 \times 10^{16}}{s^4 + 3.9226 \times 10^3 s^3 + 1.2746 \times 10^9 s^2 - 7.3736 \times 10^{10} s + 3.7874 \times 10^{15}} \quad (3-1)$$

3.2 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้

วิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ดังแสดงในภาพประกอบ 3-2 ซึ่งประกอบด้วย ตัวควบคุมพีไอดี (PID controller) ตัวควบคุมช่วย (Subservience controller) ระบบที่ต้องการควบคุม (VCM) กฎการปรับตัว (Adaptive law) อัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดี (K_p, K_i, K_d) แบบจำลองอ้างอิง (Model reference) และสัญญาณรบกวน (d)



ภาพประกอบ 3-2 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้

การทำงานของระบบควบคุมพีไอดีแบบปรับตัว เมื่อมีสัญญาณอ้างอิง (r) เข้ามาก็จะไปลบกับสัญญาณขาออก (y) และไปเข้าแบบจำลองอ้างอิงเพื่อสร้างสัญญาณขาออกที่ต้องการ (y_d) สัญญาณความผิดพลาด (e) ก็จะไปเข้าตัวควบคุมพีไอดีเพื่อสร้างสัญญาณควบคุม (u_{PID}) โดยอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีจะมีการปรับตัวจนกว่าสัญญาณขาออกมีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณขาออกที่ต้องการมากที่สุดซึ่งมาจากการคำนวณของกฎการปรับตัว สำหรับกฎการปรับตัวก็จะนำสัญญาณความผิดพลาด e และ \tilde{e} เข้ามาคำนวณค่าอัตราขยาย K_p, K_i, K_d ส่วนสัญญาณควบคุม (u) จะเกิดจากสัญญาณควบคุมที่มาจากตัวควบคุมพีไอดีรวมกับสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมช่วย (u_s) แล้วไปเข้าระบบตัวขับเคลื่อน VCM

จากบล็อกไดอะแกรมในภาพประกอบ 3-2 สามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบปิด (Close loop transfer function: G_{cl}) เมื่อไม่มีสัญญาณรบกวน ($d = 0$) ได้ดังสมการ (3-5)

$$\begin{aligned} Y(s) &= U(s)G_{VCM}(s) \\ &= U_{PID}(s)G_{VCM}(s) + U_S(s)G_{VCM}(s) \end{aligned} \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned} U_{PID}(s) &= E(s)G_{PID}(s) \\ &= R(s)G_{PID}(s) - Y(s)G_{PID}(s) \end{aligned} \quad (3-3)$$

$$\begin{aligned} U_S(s) &= \tilde{E}(s)G_S(s) \\ &= [Y_d(s) - Y(s)]G_S(s) \\ &= R(s)G_M(s)G_S(s) - Y(s)G_S(s) \end{aligned} \quad (3-4)$$

แทนสมการ (3-3) และ(3-4) ลงในสมการ (3-2) จะได้

$$G_{cl}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_M(s)G_S(s)G_{VCM}(s) + G_{PID}(s)G_{VCM}(s)}{1 + G_S(s)G_{VCM}(s) + G_{PID}(s)G_{VCM}(s)} \quad (3-5)$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวลดสัญญาณรบกวน (Disturbance rejection transfer function: G_{dr}) เมื่อสัญญาณอ้างอิงเป็นศูนย์ ($r = 0$) ได้แสดงดังสมการ (3-6)

$$G_{dr}(s) = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{1}{1 + G_S(s)G_{VCM}(s) + G_{PID}(s)G_{VCM}(s)} \quad (3-6)$$

สมการคุณลักษณะ (Characteristic equation) ของระบบ คือ

$$1 + G_S(s)G_{VCM}(s) + G_{PID}(s)G_{VCM}(s) = 0 \quad (3-7)$$

3.2.1 กฎการควบคุม (Control law)

จากบล็อกไดอะแกรมในภาพประกอบ 3-2 สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ในการควบคุมระบบ และส่วนที่ทำหน้าที่ในการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดี โดยสัญญาณควบคุม (u) จะเกิดจากสัญญาณควบคุมที่มาจากตัวควบคุมพีไอดีรวมกับสัญญาณควบคุมจากตัวควบคุมช่วย ดังแสดงในสมการ (3-8)

$$u = u_{PID} + u_s \quad (3-8)$$

$$u_{PID} = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (3-9)$$

$$u_s = K_2 \tilde{e} + K_1 \int \tilde{e} dt + \frac{d\tilde{e}}{dt} \quad (3-10)$$

โดย

$$e = r - y \quad (3-11)$$

$$\tilde{e} = y_d - y \quad (3-12)$$

3.2.2 กฎการปรับตัว (Adaptive law)

สำหรับการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดี จะใช้วิธีการค่ากำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด (LMS algorithm) ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.8 จะเห็นว่าการปรับค่าน้ำหนักจะใช้ค่าความผิดพลาดและค่าอินพุท ดังนั้นในการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดี ก็จะใช้ค่าความผิดพลาด \tilde{e} และค่าอินพุทของอัตราขยายแต่ละตัวเหมือนกัน โดยอัตราขยายแบบสัดส่วน (K_p) ค่าอินพุทจะเป็นค่าความผิดพลาด e อัตราขยายปริพันธ์ (K_i) ค่าอินพุทจะเป็นค่าปริพันธ์ของความผิดพลาด e และอัตราขยายอนุพันธ์ (K_d) ค่าอินพุทจะเป็นค่าอนุพันธ์ ของความผิดพลาด e ซึ่งได้แสดงในสมการ (3-13)

$$\begin{aligned} K_p(t) &= K_p(t-1) + 2\mu_p \tilde{e}(t)e(t) \\ K_i(t) &= K_i(t-1) + 2\mu_i \tilde{e}(t) \int e(t) dt \\ K_d(t) &= K_d(t-1) + 2\mu_d \tilde{e}(t) \frac{de(t)}{dt} \end{aligned} \quad (3-13)$$

เมื่อ μ_p, μ_i, μ_d เป็นอัตราการเรียนรู้ (Learning rate) ของอัตราขยายแต่ละตัว โดยจะต้องออกแบบค่าอัตราการเรียนรู้ให้เหมาะสม ถ้าออกแบบค่าอัตราการเรียนรู้ไม่เหมาะสมจะทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ เนื่องจากค่าอัตราการเรียนรู้เป็นตัวกำหนดการปรับค่าอัตราขยายว่าจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงครั้งละเท่าไร ถ้าค่าอัตราการเรียนรู้มากเกินไปก็จะทำให้ค่าอัตราขยายที่ปรับได้มีค่าสูงเกินไปแล้วทำให้ระบบลู่ออกได้ แต่ถ้าค่าอัตราการเรียนรู้น้อยเกินไปก็จะทำให้ระบบลู่เข้าช้า

จากสมการการปรับค่าอัตราขยายจะเห็นว่าค่าอัตราขยายในปัจจุบันจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราขยายในอดีตรวมกับผลคูณของค่าคงที่ μ ค่าอินพุทและค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

3.2.3 แบบจำลองอ้างอิง (Model reference)

ในส่วนของแบบจำลองอ้างอิง ออกแบบโดยใช้รูปแบบของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบปิด ดังแสดงในสมการ (3-14) ซึ่ง ω_n เป็นความถี่ธรรมชาติของระบบปิด และ ξ เป็นค่าความหน่วง (Damping ratio) ของระบบ

$$G(s)_{\text{model}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3-14)$$

$$\omega_n = \frac{4}{\xi t_s} \quad (3-15)$$

$$\xi = -\frac{\ln\left(\frac{\%OS}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2\left(\frac{\%OS}{100}\right)}} \quad (3-16)$$

ในการออกแบบแบบจำลองอ้างอิงจะขึ้นอยู่กับผลตอบสนองของระบบที่ต้องการ โดยจะคำนึงถึงค่าพุงเกิน (%OS) และเวลาเข้าที่ (t_s)

3.2.4 ตัวควบคุมช่วย (Subservience controller)

ตัวควบคุมช่วยมีหน้าที่ในการควบคุมให้ระบบมีเสถียรภาพ แต่อาจจะไม่ทำให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ ซึ่งจะช่วยสนับสนุนการควบคุมให้กับตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัว ได้ให้สามารถควบคุมระบบอยู่ได้ในช่วงที่ตัวควบคุมกำลังปรับค่าอัตราขยาย สำหรับการออกแบบตัวควบคุมช่วยสามารถพิจารณาจากสมการ (3-10) และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนได้ตามสมการ (3-17)

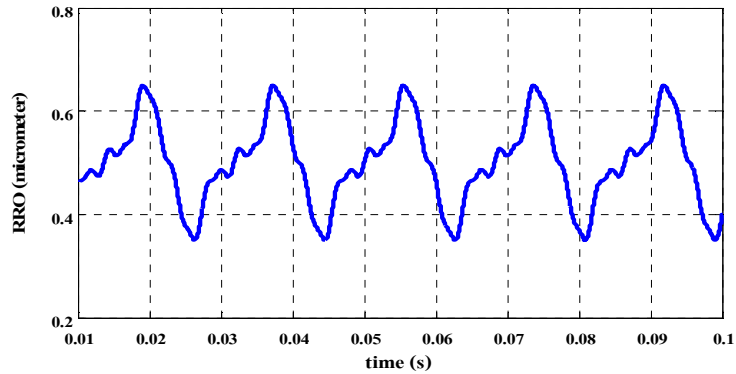
$$G_s(s) = \frac{s^2 + K_2 s + K_1}{s} \quad (3-17)$$

เมื่อ K_1 และ K_2 เป็นค่าคงที่ที่ทำให้สมการ $s^2 + K_2 s + K_1 = 0$ มีรากของสมการอยู่ทางด้านซ้ายในพิกัดเชิงซ้อน [16]-[18] ซึ่งสามารถเลือกให้ $K_1 = \omega_n^2$ และ $K_2 = 2\xi\omega_n$

3.3 การจำลองสัญญาณรบกวน

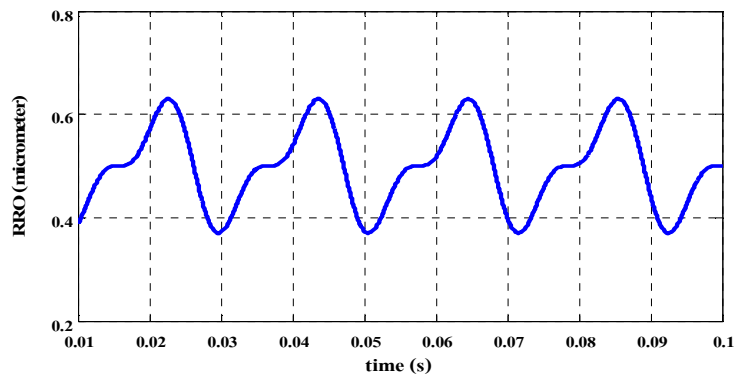
สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนไปตามแนวข้อมูลมาจากหลายแหล่งกำเนิด ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจในส่วนของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำสำหรับในการจำลองสัญญาณรบกวนเป็นการรวมกันของสัญญาณไซน์ที่ฮาร์มอนิกต่างๆ [19], [3], [4] ดังแสดงในสมการ (3-18), (3-19) และ (3-20) และสัญญาณรบกวนที่ได้จำลองขึ้นแสดงในภาพประกอบ 3-3, ภาพประกอบ 3-4 และภาพประกอบ 3-5 ตามลำดับ

$$d_{RRO1}(t) = 0.5 + 0.1\cos(110\pi t) + 0.05\sin(220\pi t) + 0.02\sin(440\pi t) + 0.01\sin(880\pi t) \text{ } \mu\text{m} \quad (3-18)$$



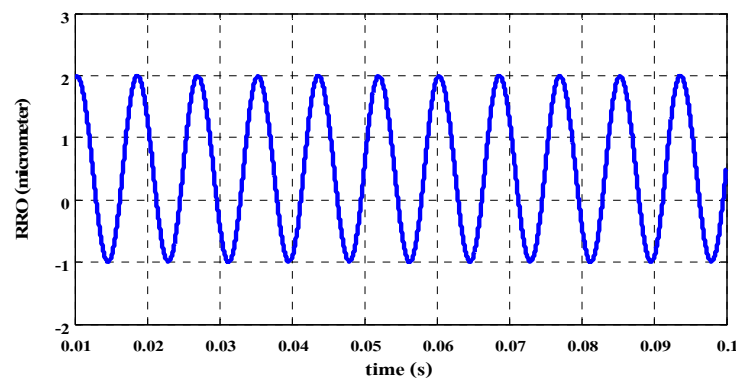
ภาพประกอบ 3-3 สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำแบบที่ 1 (RRO1)

$$d_{RRO2}(t) = 0.5 + 0.1\cos(300t) + 0.05\sin(600t) \text{ } \mu\text{m} \quad (3-19)$$



ภาพประกอบ 3-4 สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำแบบที่ 2 (RRO2)

$$d_{RRO3}(t) = 0.5 + 1.5\sin(240\pi t) + 0.03\sin(480\pi t) + 0.006\sin(720\pi t) \text{ } \mu\text{m} \quad (3-20)$$



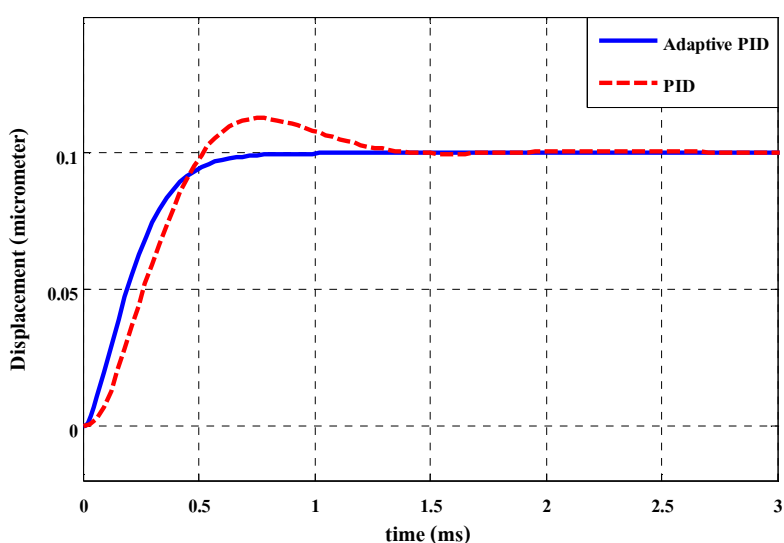
ภาพประกอบ 3-5 สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำแบบที่ 3 (RRO3)

3.4 ผลการจำลองการทำงาน

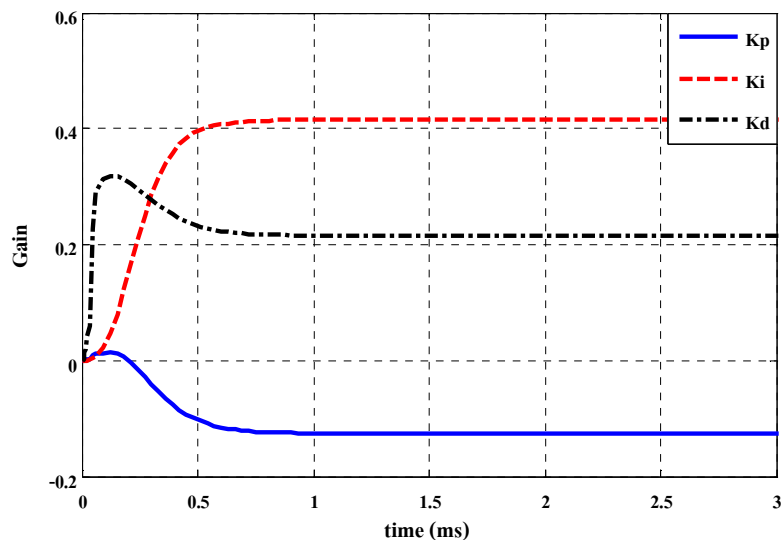
การจำลองการทำงานของระบบควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ได้รฟตามแนวข้อมูล โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ซึ่งจะทดสอบตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ในส่วนของผลตอบสนองของระบบและผลตอบสนองสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งเมื่อหัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปตามแนวข้อมูล

3.4.1 ผลตอบสนองของระบบ

การทดสอบผลตอบสนองของระบบจะใช้ตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้เปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตราขยายคงที่ โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตราขยายคงที่หาได้จากวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ (Ziegler-nichols) ซึ่งได้ค่า $K_p = 0.0262$, $K_i = 10.06$, $K_d = 6.52e-6$ และ $K = 25$ ส่วนการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ต้องการให้มีผลตอบสนองที่ต้องการ คือ มีค่าพุ่งเกินน้อยกว่า 5% (%OS < 5%) และเวลาเข้าที่น้อยกว่า 1 ms ($t_s < 1$ ms) เมื่อสัญญาณอ้างอิงเท่ากับ $0.1 \mu\text{m}$ ($r = 0.1 \mu\text{m}$) ดังนั้นพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กล่าวในหัวข้อ 3.2 มีดังต่อไปนี้ เลือกให้ค่า $\mu_p = 0.1$, $\mu_i = 1$, $\mu_d = 0.01$ ค่าเริ่มต้น $K_p(0) = K_i(0) = K_d(0) = 0$ ค่า $K_1 = 1e8$ ค่า $K_2 = 20000$ ค่า $\omega_n = 10$ krad/s และค่า $\xi = 1$ ซึ่งได้ผลตอบสนองของระบบดังแสดงในภาพประกอบ 3-6 และภาพประกอบ 3-7 และประสิทธิภาพของตัวควบคุมดังแสดงในตารางที่ 3-1



ภาพประกอบ 3-6 ผลตอบสนองของระบบ



ภาพประกอบ 3-7 ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้

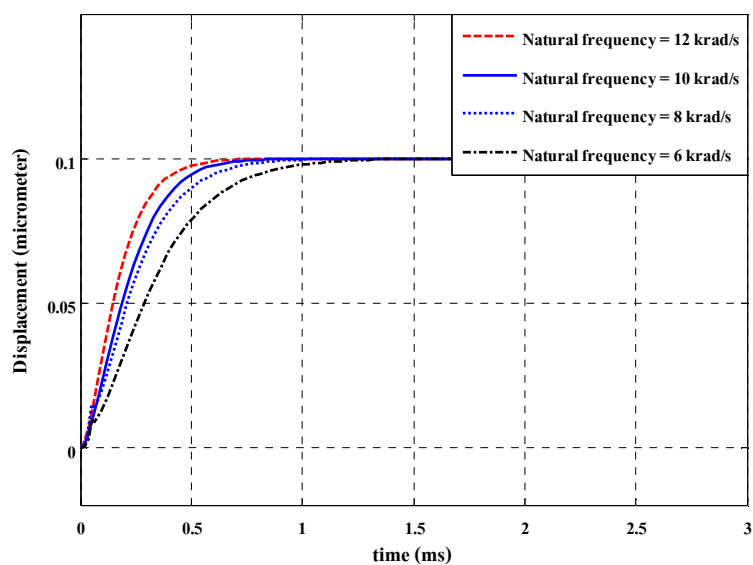
ตารางที่ 3-1 ประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบขั้นตอนเดียว

Controller	Rise time (ms)	Settling time (ms)	Overshoot (%)
PID	0.34	1.3	12.7
Adaptive PID	0.35	0.60	0

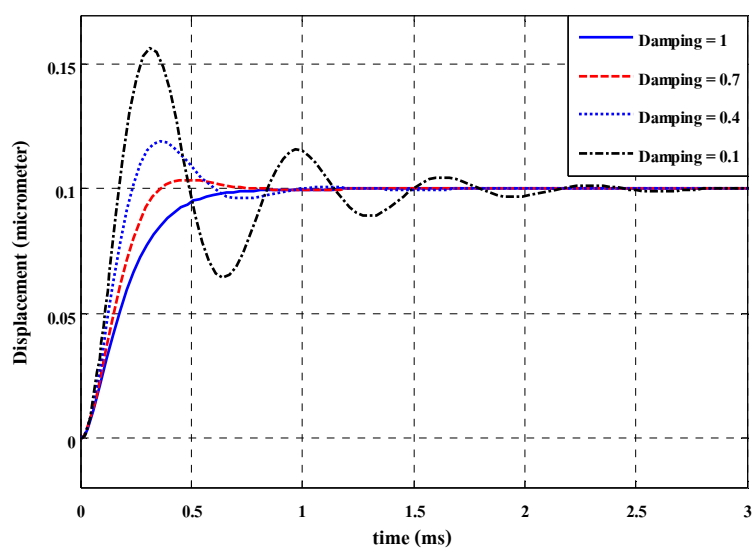
จากผลการจำลองการทำงานในภาพประกอบ 3-6 พบว่าตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ให้ผลตอบสนองของระบบที่ดีกว่าตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตราขยายคงที่ ทั้งค่าพุงเกินที่ลดลง และค่าเวลาเข้าที่ที่เร็วขึ้นดังแสดงในตารางที่ 3-1 เนื่องจากอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้พยายามปรับตัวเองเพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามแบบจำลองอ้างอิง และในภาพประกอบ 3-7 พบว่าค่าอัตราขยายตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวแต่ละตัวให้ค่าที่แตกต่างกันโดยค่าอัตราขยายแบบสัดส่วนจะเพิ่มขึ้นแล้วค่อยๆลดลงเนื่องจากระบบที่ควบคุมมีการตอบสนองที่เร็วอยู่แล้วและไม่ต้องการให้มีค่าพุงเกิน ค่าอัตราขยายแบบปริพันธ์จะค่อยๆเพิ่มขึ้นเนื่องจากระบบต้องลู่เข้าค่าที่ต้องการ และค่าอัตราขยายแบบอนุพันธ์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากต้องการลดค่าพุงเกินและเพิ่มความหน่วงให้กับระบบ

3.4.2 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแบบจำลองอ้างอิง

สำหรับในการทดสอบผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแบบจำลองอ้างอิง เพื่อทดสอบว่าตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้สามารถเปลี่ยนไปตามแบบจำลองอ้างอิงที่เปลี่ยนไปได้หรือไม่ โดยทำการเปลี่ยนค่า ω_n และ ξ ของแบบจำลองอ้างอิง ซึ่งได้ผลการทดสอบดังแสดงในภาพประกอบ 3-8 และภาพประกอบ 3-9



ภาพประกอบ 3-8 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนค่า ω_n



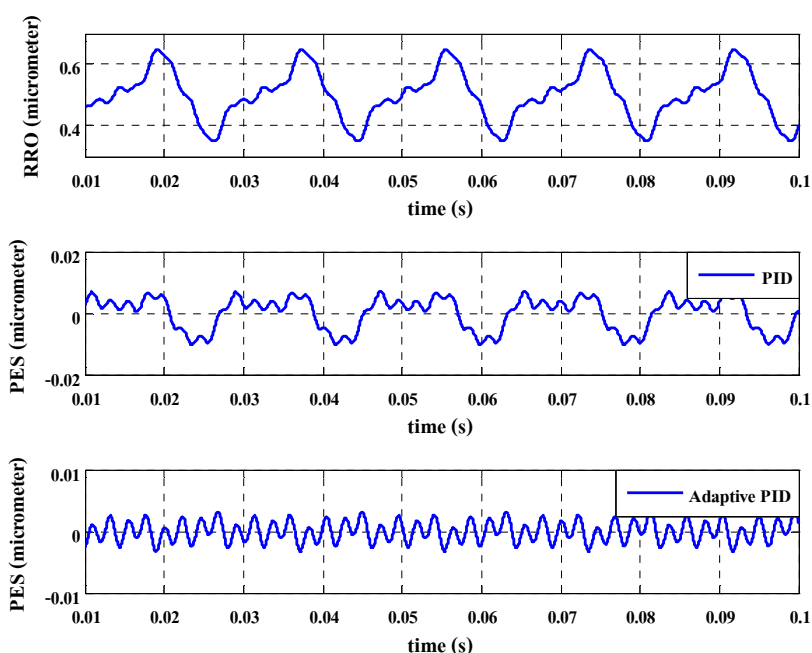
ภาพประกอบ 3-9 ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนค่า ξ

จากผลการทดสอบเปลี่ยนค่า ω_n และ ξ ของแบบจำลองอ้างอิงพบว่าตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้สามารถควบคุมให้สัญญาณขาออกของระบบเปลี่ยนไปตามสัญญาณขาออกของแบบจำลองอ้างอิงได้เนื่องจากตัวควบคุมจะมีการปรับค่าอัตราขยายจนสัญญาณขาออกมีค่าตามที่ต้องการ โดยการทดสอบเปลี่ยนค่า ω_n จะกำหนดให้ค่า $\xi = 1$ และการทดสอบเปลี่ยนค่า ξ จะกำหนดให้ค่า $\omega_n = 10 \text{krad/s}$

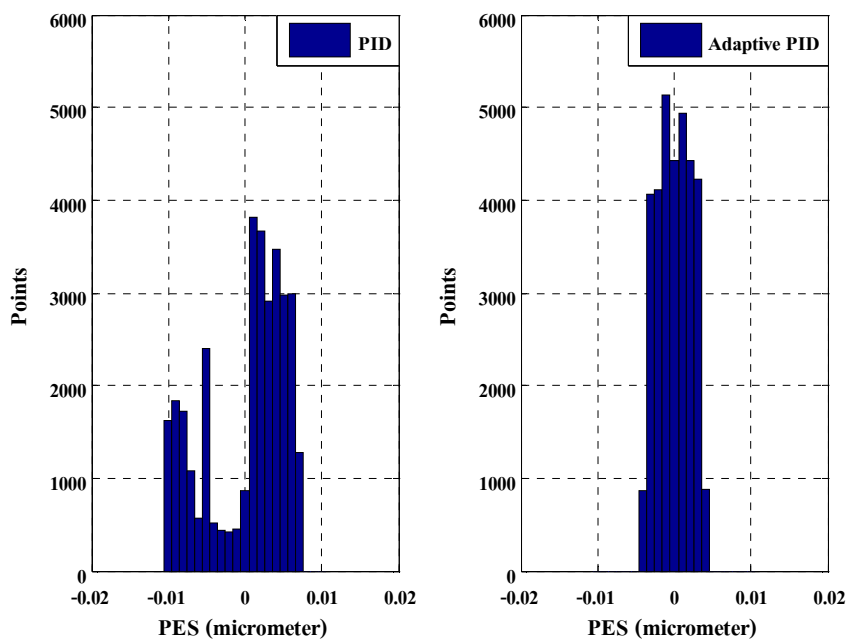
3.4.3 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวน

การทดสอบผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวน จะทดสอบโดยการให้สัญญาณอ้างอิงมีค่าเท่ากับศูนย์ ($r=0$) แล้วป้อนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำที่กล่าวในหัวข้อ 3.3 ที่สัญญาณขาออก (y) ของระบบ ซึ่งจะดูค่าความผิดพลาดตำแหน่ง (PES) ของหัวอ่าน/เขียนว่ามีการเคลื่อนที่ออกจากกึ่งกลางของแนวข้อมูลไปมากน้อยเท่าไร แล้วนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์ในรูปของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (3σ) ได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

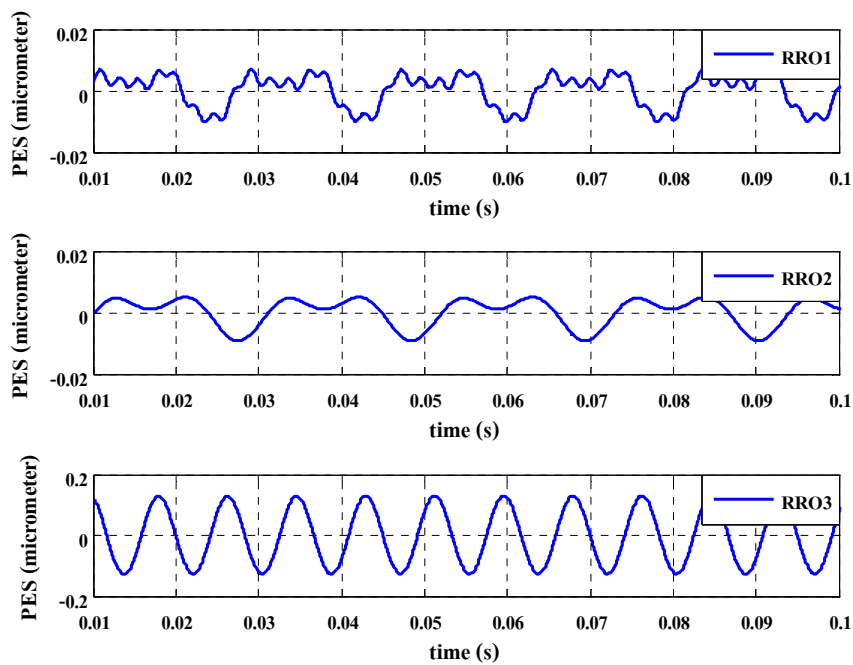
จากผลการทดสอบในภาพประกอบ 3-10 และภาพประกอบ 3-11 พบว่าตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ทำให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งมีค่าน้อยกว่าตัวควบคุมพีไอดีแบบธรรมดา โดย $3\sigma_{APID} = 6.3372 \% \text{ of Track}$ และ $3\sigma_{PID} = 15.696 \% \text{ of Track}$ (เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที)



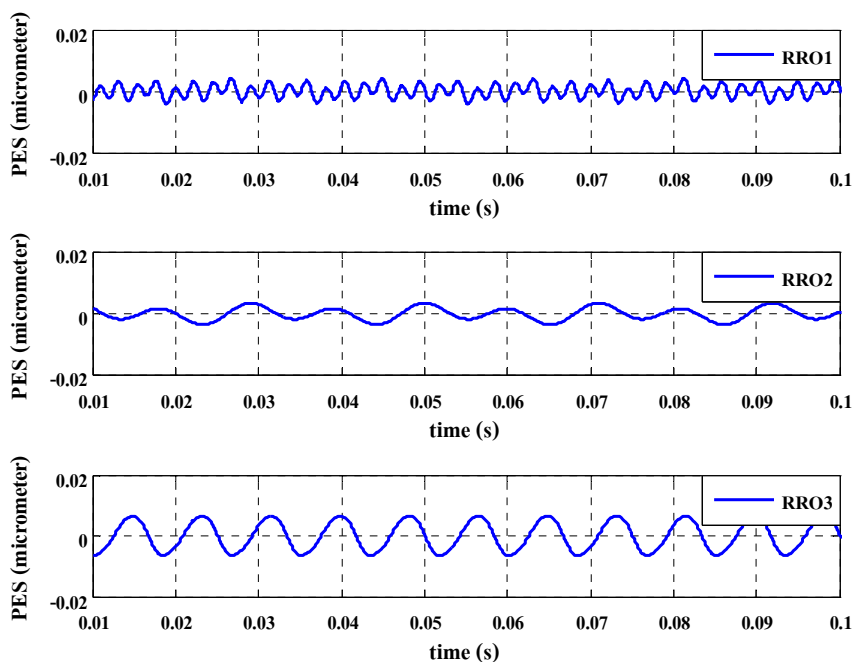
ภาพประกอบ 3-10 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวน



ภาพประกอบ 3-11 ฮิสโทแกรมของค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง



ภาพประกอบ 3-12 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนต่างๆ ของตัวควบคุมพีไอดี



ภาพประกอบ 3-13 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนต่างๆ ของตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้

จากผลการทดสอบในภาพประกอบ 3-12 และ ภาพประกอบ 3-13 เป็นผลการทดสอบตัวควบคุมเมื่อถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนต่างๆ จะเห็นว่าตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ยังรักษาให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่อยู่บนแนวข้อมูลได้ดีกว่าตัวควบคุมพีไอดีธรรมดา โดยเห็นได้ชัดจากผลของสัญญาณรบกวนในแบบที่ 3 (RRO3) เป็นสัญญาณรบกวนที่มีแอมพลิจูดสูงสุด แต่ตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ยังรักษาให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่อยู่บนแนวข้อมูลได้ ในขณะที่ตัวควบคุมพีไอดีแบบธรรมดาไม่สามารถควบคุมให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่อยู่บนแนวข้อมูลได้

3.5 สรุป

จากผลการจำลองการทำงานของระบบแบบขั้นตอนเดียว พบว่าในการทดสอบผลตอบสนองของตัวควบคุม ตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้สามารถลดค่าพุงเกิน และค่าเวลาเข้าที่ของระบบได้ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตราขยายคงที่ และส่วนการทดสอบค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากการรบกวน พบว่าตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ทำให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งลดลงร้อยละ 59.6 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตราขยายคงที่ เนื่องจากตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้สามารถปรับอัตราขยายเพื่อให้สัญญาณขาออกมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณอ้างอิง ดังนั้นวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไปตามแนวข้อมูลได้

บทที่ 4

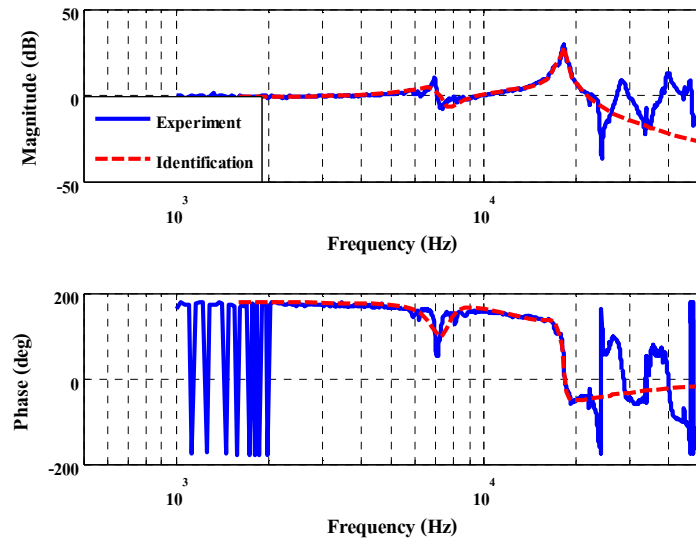
การควบคุมหัวอ่าน/เขียนตามแนวข้อมูลแบบสองชั้นตอน

บทนี้กล่าวถึงการควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ตามแนวข้อมูลแบบสองชั้นตอน โดยใช้วิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ (Adaptive PID: APID) ในการควบคุมตัวขับเคลื่อน VCM ร่วมกับตัวขับเคลื่อน PZT เพื่อให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปตามแนวข้อมูลที่มีความละเอียดและแม่นยำมากขึ้น ในการจำลองการทำงานเริ่มจากการหาแบบจำลองของระบบทั้งตัวขับเคลื่อน VCM และ PZT แล้วจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink โดยให้ตัวขับเคลื่อนทั้งสองทำงานร่วมกัน แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้กับการควบคุมหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ตามแนวข้อมูลแบบชั้นตอนเดียว

4.1 แบบจำลองของตัวขับเคลื่อน PZT

การจำลองการทำงานของระบบควบคุมแบบสองชั้นตอน จะต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งของตัวขับเคลื่อน VCM และตัวขับเคลื่อน PZT ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวขับเคลื่อน VCM ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.1 ส่วนในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวขับเคลื่อน PZT ซึ่งจะใช้หลักการเดียวกับการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวขับเคลื่อน VCM โดยการหาเอกลักษณ์ของระบบจากผลการทดสอบจริงตามที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.5 เนื่องจากตัวขับเคลื่อน PZT ทำงานที่ความถี่สูงโดยความถี่เรโซแนนซ์อยู่ที่ 18 kHz จึงสนใจความถี่ในช่วงตั้งแต่ 500 Hz ถึง 20 kHz ได้ผลการหาเอกลักษณ์ของระบบเทียบกับผลการทดสอบจริงดังแสดงในภาพประกอบ 4-1 และได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวขับเคลื่อน VCM ดังแสดงในสมการ (4-1)

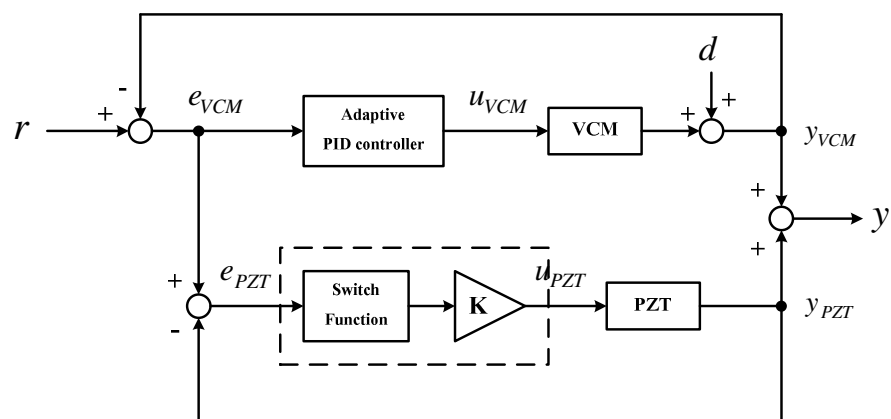
$$G_{PZT}(s) = \frac{- \left\{ \begin{array}{l} 3.8819 \times 10^9 s^6 \\ + 6.3373 \times 10^{14} s^5 + 1.2740 \times 10^{20} s^4 + 9.6552 \times 10^{24} s^3 \\ + 1.0469 \times 10^{30} s^2 + 2.1428 \times 10^{34} s + 1.7039 \times 10^{39} \end{array} \right\}}{\left\{ \begin{array}{l} s^8 + 8.0321 \times 10^4 s^7 + 3.4921 \times 10^{10} s^6 \\ + 2.1691 \times 10^{15} s^5 + 4.0822 \times 10^{20} s^4 + 1.6759 \times 10^{25} s^3 \\ + 1.7577 \times 10^{30} s^2 + 2.8063 \times 10^{34} s + 1.9824 \times 10^{39} \end{array} \right\}} \quad (4-1)$$



ภาพประกอบ 4-1 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวขับเคลื่อน PZT

4.2 การออกแบบระบบควบคุมแบบสองชั้นตอน

การออกแบบระบบควบคุมแบบสองชั้นตอน เป็นการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนที่ใช้การทำงานร่วมกันระหว่างตัวขับเคลื่อน VCM และตัวขับเคลื่อน PZT ดังแสดงในภาพประกอบ 4-2 โดยตัวขับเคลื่อน VCM ใช้วิธีการควบคุม APID ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 3.2 และตัวขับเคลื่อน PZT ใช้วิธีการควบคุมแบบฟังก์ชันสวิตช์ดังที่จะกล่าวในหัวข้อ 4.3



ภาพประกอบ 4-2 บล็อกโตะอะแกรมของระบบควบคุมแบบสองชั้นตอน

จากภาพประกอบ 4-2 เป็นการควบคุมแบบสองชั้นตอนที่เรียกว่า dual feedback loop เป็นการควบคุมที่ใช้สัญญาณขาออกของตัวขับเคลื่อนแต่ละตัวเป็นสัญญาณป้อนกลับเพื่อให้ตัวควบคุมของตัวขับเคลื่อนแต่ละตัวทำงานได้พร้อมกันแบบขนาน แล้วนำสัญญาณขาออกของแต่ละตัวมารวมกันเป็นสัญญาณขาออกของระบบ การควบคุมแบบนี้ระบบจะมีเสถียรภาพได้ก็ต่อเมื่อวงปิดย่อยของแต่ละตัวขับเคลื่อนมีเสถียรภาพในตัวเอง และสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบปิดได้ดังนี้

$$Y(s) = Y_{VCM}(s) + Y_{PZT}(s) \quad (4-2)$$

$$\begin{aligned} Y_{VCM}(s) &= U_{VCM}(s)G_{VCM}(s) \\ &= \frac{R(s)G_{APID}(s)G_{VCM}(s)}{1 + G_{APID}(s)G_{VCM}(s)} \end{aligned} \quad (4-3)$$

$$\begin{aligned} Y_{PZT}(s) &= U_{PZT}(s)G_{PZT}(s) \\ &= \frac{R(s)G_{SF}(s)G_{PZT}(s)}{[1 + G_{SF}(s)G_{PZT}(s)][1 + G_{APID}(s)G_{VCM}(s)]} \end{aligned} \quad (4-4)$$

แทนสมการ (4-3) และ(4-4) ลงในสมการ (4-2) จะได้

$$G_{cl}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_{APID}(s)G_{VCM}(s) + G_{SF}(s)G_{PZT}(s) + G_{APID}(s)G_{VCM}(s)G_{SF}(s)G_{PZT}(s)}{[1 + G_{APID}(s)G_{VCM}(s)][1 + G_{SF}(s)G_{PZT}(s)]} \quad (4-5)$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวลดสัญญาณรบกวนแสดงดังสมการ (4-6)

$$G_{dr}(s) = \frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{1}{[1 + G_{APID}(s)G_{VCM}(s)][1 + G_{SF}(s)G_{PZT}(s)]} \quad (4-6)$$

สมการคุณลักษณะ (Characteristic equation) ของระบบ คือ

$$[1 + G_{APID}(s)G_{VCM}(s)][1 + G_{SF}(s)G_{PZT}(s)] = 0 \quad (4-7)$$

จากสมการคุณลักษณะจะเห็นได้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพได้ก็ต่อเมื่อวงปิดของแต่ละตัวจะต้องมีเสถียรภาพในตัวเอง ดังนั้นในการออกแบบการควบคุมระบบสามารถแยกกันออกแบบได้

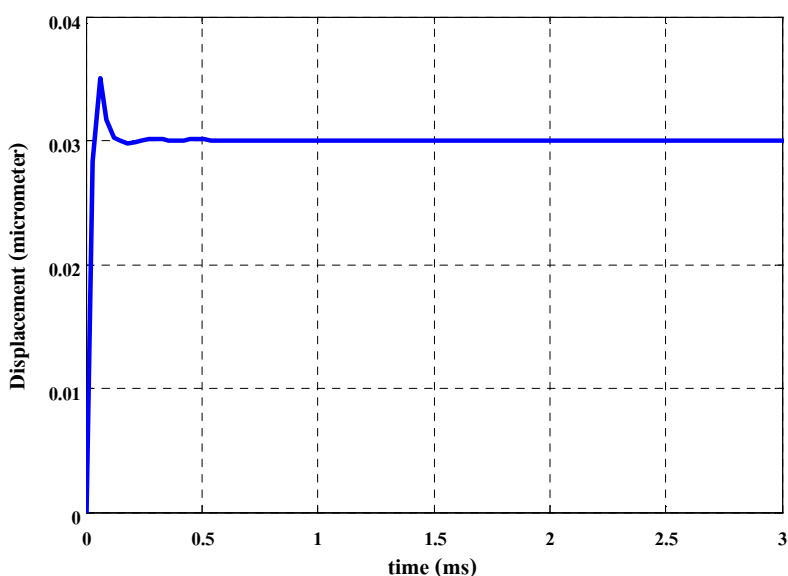
4.3 การควบคุมตัวขับเคลื่อน PZT

ตัวขับเคลื่อน PZT เป็นตัวขับเคลื่อนที่เคลื่อนที่ในระดับไมโครเมตร โดยตัวขับเคลื่อน PZT จะทำงานเมื่อค่าความผิดพลาด e_{PZT} น้อยกว่าหรือเท่ากับความกว้างของแนวข้อมูล ($0.1 \mu\text{m}$) เมื่อ r คือ ตำแหน่งที่ต้องการ y_{VCM} และ y_{PZT} คือ สัญญาณป้อนกลับวงจรปิดของตัวขับเคลื่อน VCM และตัวขับเคลื่อน PZT ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงฟังก์ชันสวิตซ์ได้ดังสมการ (4-8)

$$u_{PZT} = \begin{cases} 0 & \text{when } |e_{PZT}| > 10^{-7} \\ Ke_{PZT} & \text{when } |e_{PZT}| \leq 10^{-7} \end{cases} \quad (4-8)$$

$$e_{PZT} = r - y_{VCM} - y_{PZT} \quad (4-9)$$

เนื่องจากตัวขับเคลื่อน PZT มีการตอบสนองที่คล้ายกับค่าคงที่เมื่อทำการควบคุมวงปิดดังแสดงในภาพประกอบ 4-3 เพราะตัวขับเคลื่อน PZT เคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถใช้ตัวขยายสัญญาณ (K) เพื่อให้ได้ค่าสัญญาณที่เหมาะสมเมื่อทำงานร่วมกับตัวขับเคลื่อน VCM โดยตัวขยายสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับระบบที่ได้จากการจำลองการทำงานพบว่ามีค่าเท่ากับ -0.5



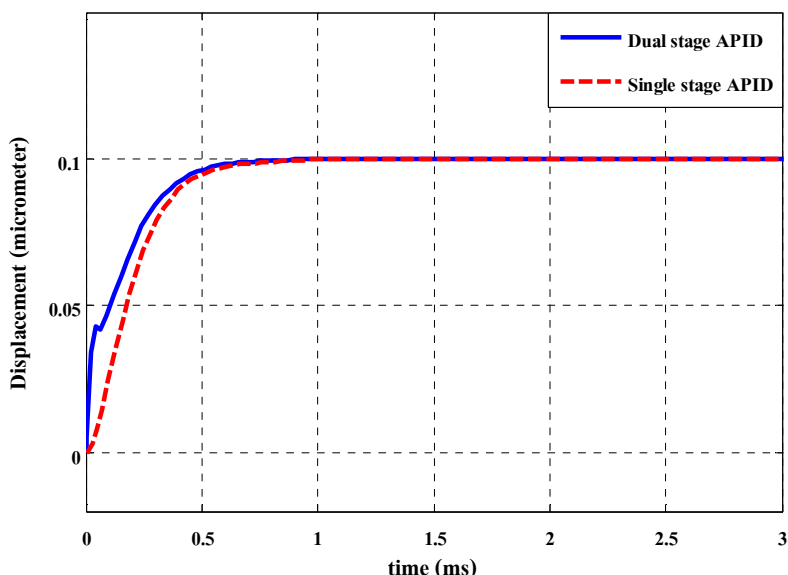
ภาพประกอบ 4-3 ผลตอบสนองวงปิดของตัวขับเคลื่อน PZT

4.4 ผลการจำลองการทำงาน

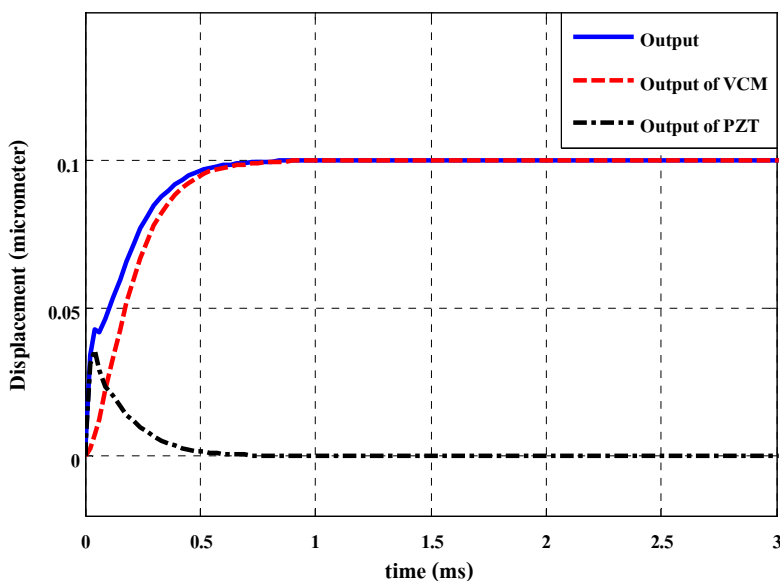
การจำลองการทำงานของระบบควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ได้รฟตามแนวข้อมูลแบบสองชั้นตอน โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ซึ่งจะทดสอบผลตอบสนองของระบบและผลตอบสนองสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งเมื่อหัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปตามแนวข้อมูล แล้วเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานระหว่างการควบคุมแบบชั้นตอนเดียวกับการควบคุมแบบสองชั้นตอน

4.4.1 ผลตอบสนองของระบบ

การจำลองการทำงานของระบบด้วยการควบคุมแบบสองชั้นตอน สำหรับตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ที่ใช้ในการควบคุมตัวขับเคลื่อน VCM ใช้พารามิเตอร์ต่างๆ ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 3.4.1 ส่วนตัวควบคุมฟังก์ชันสวิทช์ที่ใช้ในการควบคุมตัวขับเคลื่อน PZT ใช้อัตราขยาย $K = -0.5$ และความกว้างของแนวข้อมูลเท่ากับ $0.1 \mu\text{m}$ ซึ่งได้ผลตอบสนองของระบบดังแสดงในภาพประกอบ 4-4 และภาพประกอบ 4-5 และประสิทธิภาพของตัวควบคุมดังแสดงในตารางที่ 4-1



ภาพประกอบ 4-4 ผลตอบสนองของระบบ



ภาพประกอบ 4-5 ผลตอบสนองของระบบแบบสองขั้นตอน

ตารางที่ 4-1 ประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบสองขั้นตอน

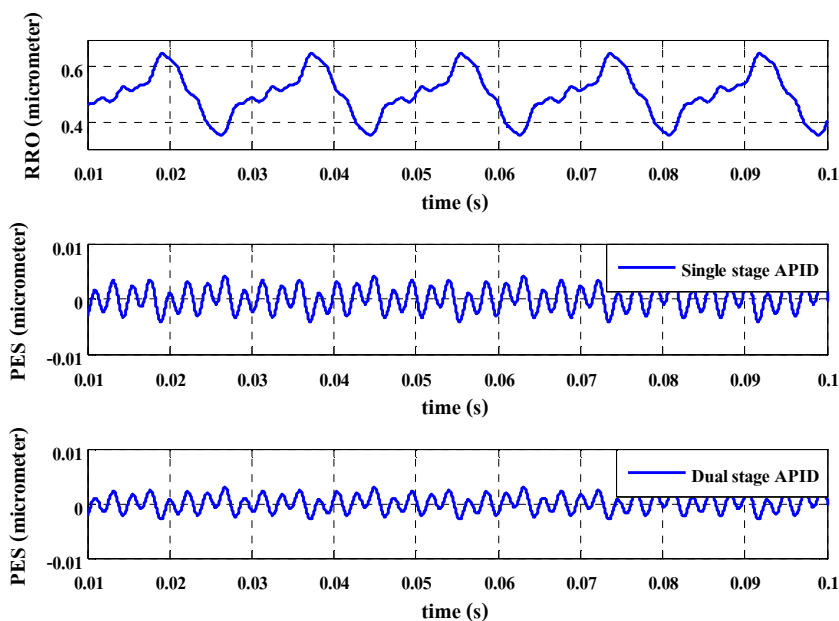
Controller	Rise time (ms)	Settling time (ms)	Overshoot (%)
Single stage APID	0.35	0.60	0
Dual stage APID	0.33	0.56	0

จากผลการจำลองการทำงานของระบบแบบสองขั้นตอน พบว่าการควบคุมแบบสองขั้นตอนให้ผลตอบสนองของระบบที่ดีกว่าการควบคุมแบบขั้นตอนเดียว ทั้งค่าเวลาเข้าที่และค่าเวลาขึ้นที่เร็วขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4-1 เนื่องจากการควบคุมแบบสองขั้นตอนเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างตัวขับเคลื่อน VCM กับตัวขับเคลื่อน PZT ซึ่งตัวขับเคลื่อน PZT มีการตอบสนองที่เร็วมากทำให้ในช่วงเริ่มต้นของระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้นไปด้วย จากภาพประกอบ 4-5 เป็นผลตอบสนองของตัวขับเคลื่อน VCM และตัวขับเคลื่อน PZT ซึ่งจะเห็นว่าผลตอบสนองของระบบเกิดจากการรวมกันของสัญญาณที่ได้จากตัวขับเคลื่อน VCM และตัวขับเคลื่อน PZT

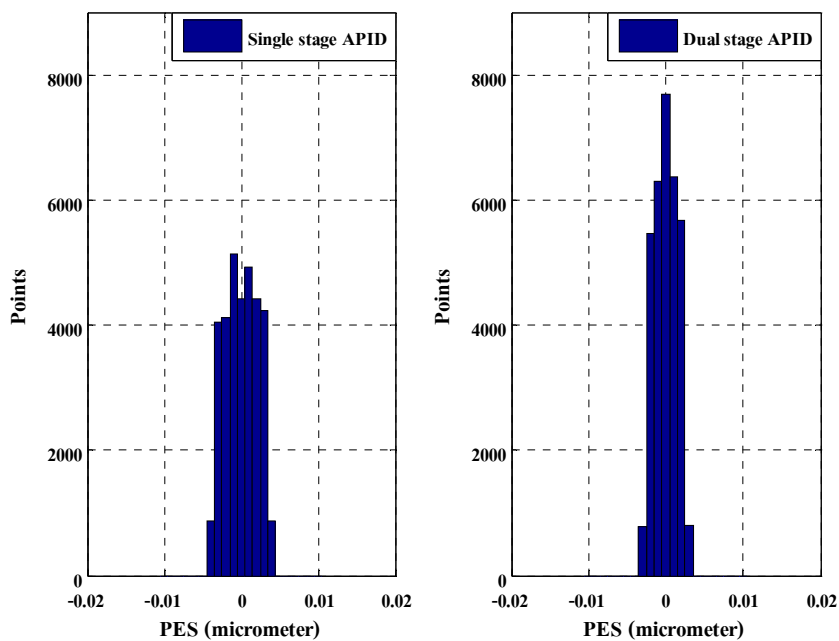
4.4.2 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวน

การทดสอบผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนของระบบแบบสองขั้นตอนนี้จะเหมือนกับระบบแบบขั้นตอนเดียวที่ได้กล่าวในหัวข้อ 3.4.3 ซึ่งได้ผลการทดสอบดังแสดงในภาพประกอบ 4-6 พบว่าการควบคุมแบบสองขั้นตอนนี้ทำให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งมีค่าน้อยกว่าการควบคุมแบบขั้นตอนเดียวเนื่องจากการควบคุมแบบสองขั้นตอนนี้มีตัวขับเคลื่อน PZT ทำงานร่วมอยู่ด้วยจึงทำให้การเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนไปตามแนวข้อมูลมีความละเอียดมากขึ้นกว่าใช้ตัวขับเคลื่อน VCM เพียงตัวเดียว ดังนั้นหัวอ่าน/เขียนจึงเคลื่อนที่อยู่กึ่งกลางของแนวข้อมูลมากขึ้น ซึ่งเห็นได้จากภาพประกอบ 4-7 ตำแหน่งส่วนใหญ่ของหัวอ่าน/เขียนจะอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ โดยค่า $3\sigma_{\text{Single stage APID}} = 6.3372 \%$ of Track และ $3\sigma_{\text{Dual stage APID}} = 4.3333 \%$ of Track (เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที)

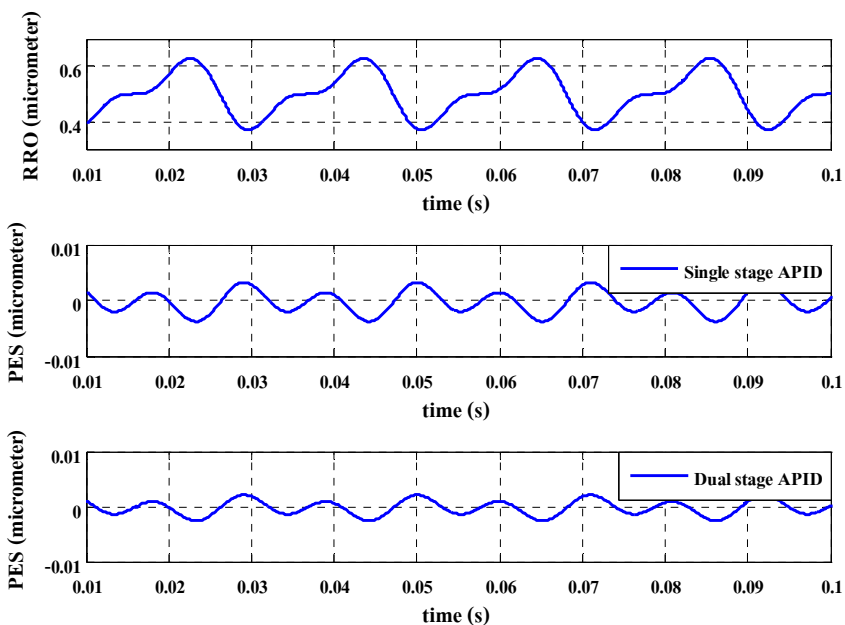
จากผลการทดสอบในภาพประกอบ 4-6 ถึง ภาพประกอบ 4-11 เป็นผลการทดสอบตัวควบคุมเมื่อถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวนต่างๆ จะเห็นว่าทั้งการควบคุมแบบขั้นตอนเดียว และสองขั้นตอนนี้ยังรักษาให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่อยู่บริเวณกึ่งกลางแนวข้อมูลได้ แต่การควบคุมแบบสองขั้นตอนนี้ให้ค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่า



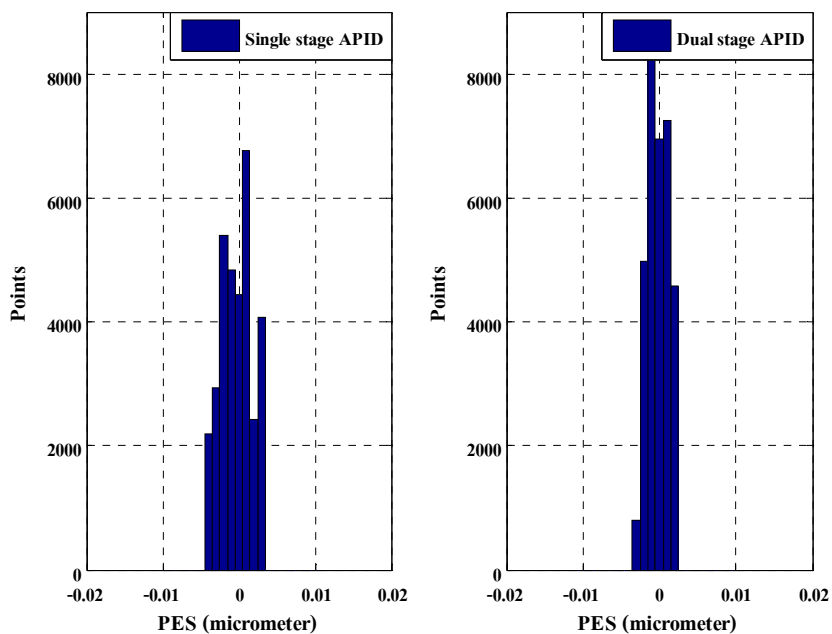
ภาพประกอบ 4-6 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนแบบที่ 1 (RRO1)



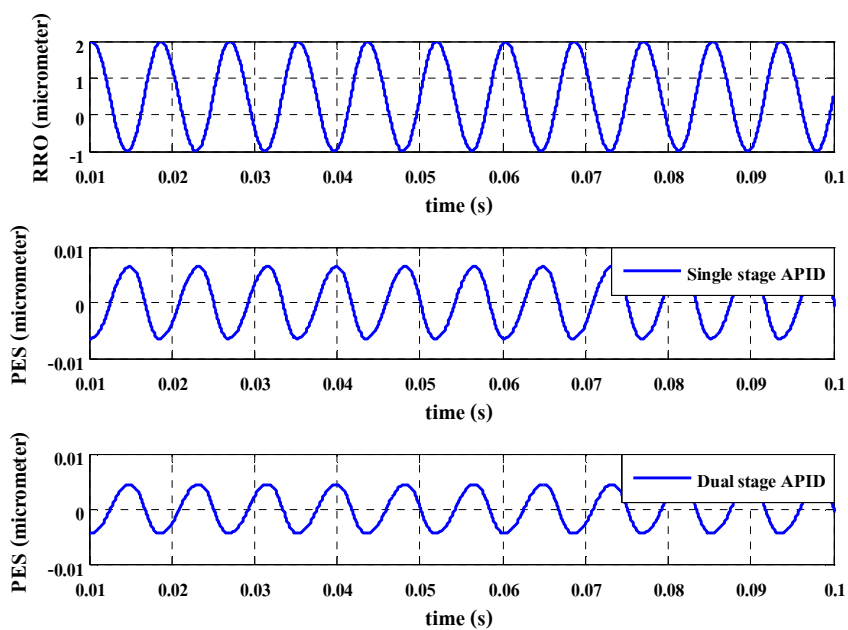
ภาพประกอบ 4-7 ฮิสโทแกรมค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของสัญญาณรบกวนแบบที่ 1 (RRO1)



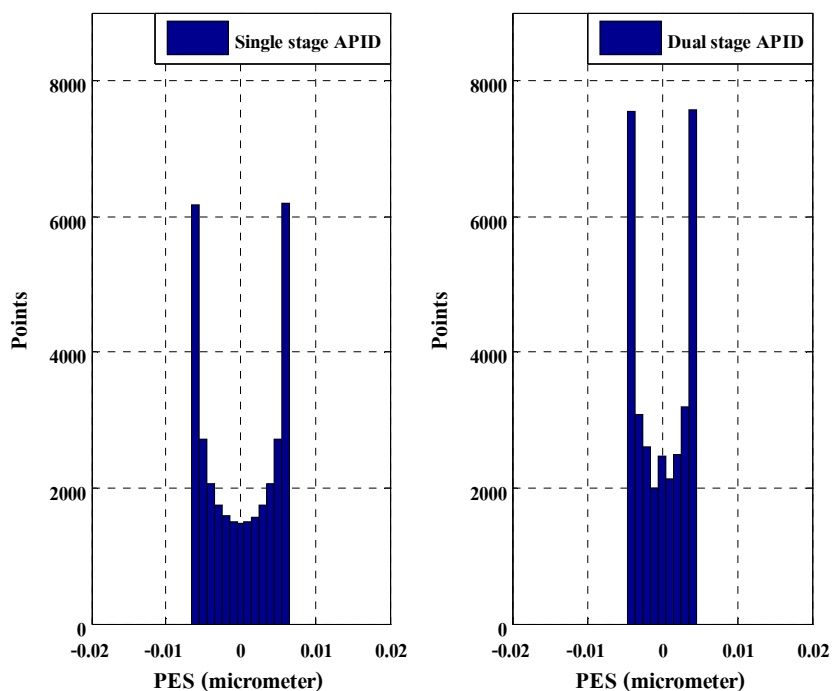
ภาพประกอบ 4-8 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนแบบที่ 2 (RRO2)



ภาพประกอบ 4-9 ฮิสโทแกรมค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของสัญญาณรบกวนแบบที่ 2 (RRO2)



ภาพประกอบ 4-10 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนแบบที่ 3 (RRO3)



ภาพประกอบ 4-11 ฮิสโทแกรมค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของสัญญาณรบกวนแบบที่ 3 (RRO3)

4.5 สรุป

จากผลการจำลองการทำงานของระบบแบบสองขั้นตอน พบว่าผลตอบสนองของการควบคุมแบบสองขั้นตอนให้ผลตอบสนองที่เร็วกว่าระบบควบคุมแบบขั้นตอนเดียว และส่งผลให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากการรบกวนลดลงร้อยละ 31.6 เมื่อเทียบกับระบบควบคุมแบบขั้นตอนเดียว นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของสัญญาณรบกวนรูปแบบต่างๆ พบว่าการควบคุมแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน สามารถควบคุมให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปตามแนวข้อมูลทำงานอยู่ได้ ดังนั้นวิธีการควบคุมแบบสองขั้นตอนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไปตามแนวข้อมูลได้

บทที่ 5

การออกแบบตัวควบคุมดิจิทัล

บทนี้กล่าวถึงการนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมดิจิทัลสำหรับการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนให้เคลื่อนที่ไปตามแนวข้อมูลบนฉิพ FPGA (Field Programmable Gate Array) ดังนั้นในการทดสอบวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้จะต้องทำให้ตัวควบคุมที่ออกแบบเป็นตัวควบคุมดิจิทัล ทั้งการควบคุมแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน แล้วเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบและค่าความผิดพลาดของตำแหน่งกับผลการจำลองการทำงาน

5.1 การแปลงตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่องเป็นตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

เนื่องจากการจำลองการทำงานในบทที่ 3 และบทที่ 4 เป็นตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่อง (Continuous time) ดังนั้นจะต้องเปลี่ยนตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่องไปเป็นตัวควบคุมแบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete time) จากตัวควบคุมที่ออกแบบเป็นตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ ซึ่งประกอบไปด้วยตัวควบคุมเชิงสัดส่วน ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ ดังนั้นสามารถแยกออกเป็นส่วนต่างๆ และแสดงในรูปแบบสมการเวลาไม่ต่อเนื่อง ได้ดังสมการ (5-1), (5-2) และ(5-3)

ตัวควบคุมเชิงสัดส่วน

$$u_p(k) = K_p e(k) \quad (5-1)$$

ตัวควบคุมแบบปริพันธ์

$$u_i(k) = u_i(k-1) + K_i T_s e(k) \quad (5-2)$$

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

$$u_d(k) = \frac{K_d}{T_s} [e(k) - e(k-1)] \quad (5-3)$$

เมื่อ T_s คือ เวลาในการชักตัวอย่าง (Sample time) สามารถหาได้จากสมการ (5-4) โดย N คือ จำนวน sector และ rpm คือ ความเร็วรอบของแผ่นจานดิสก์

$$T_s = \frac{60}{N \times rpm} \quad (5-4)$$

จากสมการ (5-1), (5-2) และ(5-3) จะเห็นว่าเอาที่พุดของตัวควบคุมเชิงสัดส่วนเกิดจากค่าอัตราขยายคูณกับค่าความผิดพลาด ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ใช้วิธีการหาพื้นที่ใต้กราฟของค่าความผิดพลาด ส่วนตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ใช้วิธีการหาความชันของค่าความผิดพลาด และเมื่อทำการแปลงแซด (z-transform) สมการข้างต้นจะได้

$$U_p(z) = K_p E(z) \quad (5-5)$$

$$U_i(z) = \frac{K_i T_s}{1 - z^{-1}} E(z) \quad (5-6)$$

$$U_d(z) = \frac{K_d(1 - z^{-1})}{T_s} E(z) \quad (5-7)$$

$$G_c(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = K_p + K_i T_s \frac{1}{1 - z^{-1}} + \frac{K_d}{T_s} (1 - z^{-1}) \quad (5-8)$$

$$u(k) = u(k-1) + (K_p + K_i T_s + \frac{K_d}{T_s})e(k) + (-K_p - 2\frac{K_d}{T_s})e(k-1) + \frac{K_d}{T_s}e(k-2) \quad (5-9)$$

จากสมการ (5-8) เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอดีในรูปแบบสมการเวลาไม่ต่อเนื่อง และในสมการ (5-9) เป็นสัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมพีไอดีในรูปแบบสมการเวลาไม่ต่อเนื่อง

สำหรับการปรับค่าอัตราขยาย K_p, K_i, K_d ก็สามารถเปลี่ยนจากสมการ (3-13) ให้อยู่ในรูปแบบสมการเวลาไม่ต่อเนื่องได้ดังสมการ (5-10) ซึ่งจะเห็นว่าในการปรับค่าอัตราขยาย K_p สมการยังมีรูปแบบเหมือนเดิม ค่าอัตราขยาย K_i ในสมการจะมีส่วนของการหาพื้นที่ใต้กราฟของค่าความผิดพลาด และค่าอัตราขยาย K_d ในสมการจะมีส่วนของวิธีการหาความชันของค่าความผิดพลาด

$$\begin{aligned} K_p(k) &= K_p(k-1) + 2\mu_p \tilde{e}(k)e(k) \\ K_i(k) &= K_i(k-1) + 2\mu_i \tilde{e}(k)[e_i(k-1) + T_s e(k)] \\ K_d(k) &= K_d(k-1) + 2\mu_d \tilde{e}(k) \left[\frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \right] \end{aligned} \quad (5-10)$$

Device Utilization Summary				[X]
Logic Utilization	Used	Available	Utilization	Note(s)
Number of Slice Flip Flops	256	7,168	3%	
Number of 4 input LUTs	2,481	7,168	34%	
Logic Distribution				
Number of occupied Slices	1,477	3,584	41%	
Number of Slices containing only related logic	1,477	1,477	100%	
Number of Slices containing unrelated logic	0	1,477	0%	
Total Number of 4 input LUTs	2,832	7,168	39%	
Number used as logic	2,481			
Number used as a route-thru	351			
Number of bonded IOBs	81	97	83%	
Number of MULT18x18s	15	16	93%	
Number of BUFGMUXs	1	8	12%	
Number of RPM macros	19			

ภาพประกอบ 5-2 Resource Utilization

Timing Summary:

Speed Grade: -4

Minimum period: 80.597ns (Maximum Frequency: 12.407MHz)
 Minimum input arrival time before clock: 80.699ns
 Maximum output required time after clock: 177.276ns
 Maximum combinational path delay: 177.378ns

ภาพประกอบ 5-3 ผลความเร็วในการทำงานของวงจร

จากภาพประกอบ 5-2 เป็นผลการใช้ทรัพยากร (Resource) ในการออกแบบวงจร ตัวควบคุมแบบดิจิทัลเพื่อทดสอบการทำงานบนฮาร์ดแวร์จริงลงบนชิพ FPGA ซึ่งจะเห็นว่ามี resource เพียงพอที่จะใช้ในการออกแบบตัวควบคุมที่นำเสนอ ส่วนในภาพประกอบ 5-3 เป็นผลความเร็วในการทำงานของวงจรตัวควบคุมแบบดิจิทัล จะเห็นว่าวงจรทำงานใช้เวลารวมทั้งหมด 177.378 ns หรือความถี่ 5.637 MHz ซึ่งเป็นความถี่สูงสุดในการกำหนดสัญญาณนาฬิกาให้กับระบบ

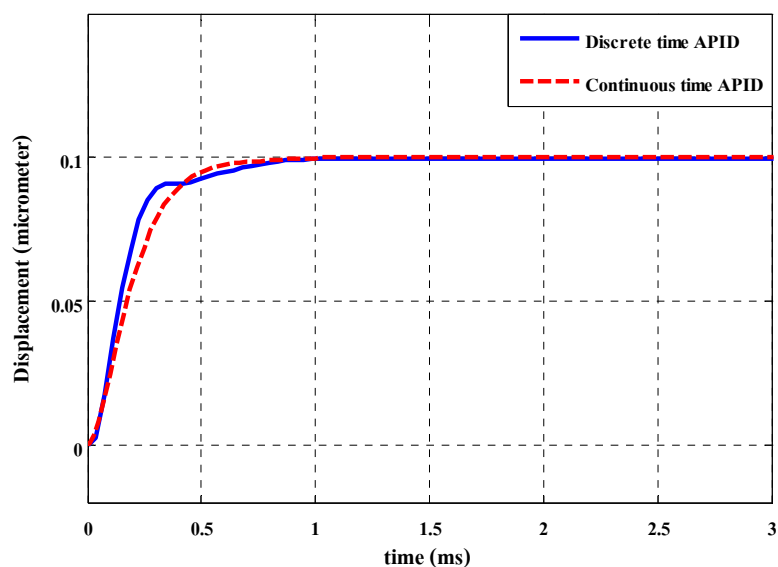
5.3 ผลการจำลองการทำงานตัวควบคุมดิจิทัล

การจำลองการทำงานของตัวควบคุมดิจิทัลจะต้องเปลี่ยนตัวควบคุมที่เป็นเวลาต่อเนื่องดังที่ได้กล่าวในบทที่ 3 และบทที่ 4 ให้เป็นตัวควบคุมเวลาไม่ต่อเนื่อง โดยใช้เวลาในการชักตัวอย่าง (T_s) เท่ากับ 3.7879×10^{-5} s [4] และในการจำลองการทำงานมีทั้งการควบคุมแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ซึ่งได้ผลการจำลองการทำงานดังนี้

5.3.1 การควบคุมแบบขั้นตอนเดียว

ในการควบคุมแบบขั้นตอนเดียวจะใช้ตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ที่ได้กล่าวในบทที่ 3 โดยเปลี่ยนเป็นรูปแบบตัวควบคุมดิจิทัลและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ยังคงเหมือนเดิม ซึ่งในการจำลองการทำงานจะพิจารณาในส่วนของผลตอบสนองของระบบ และผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวน

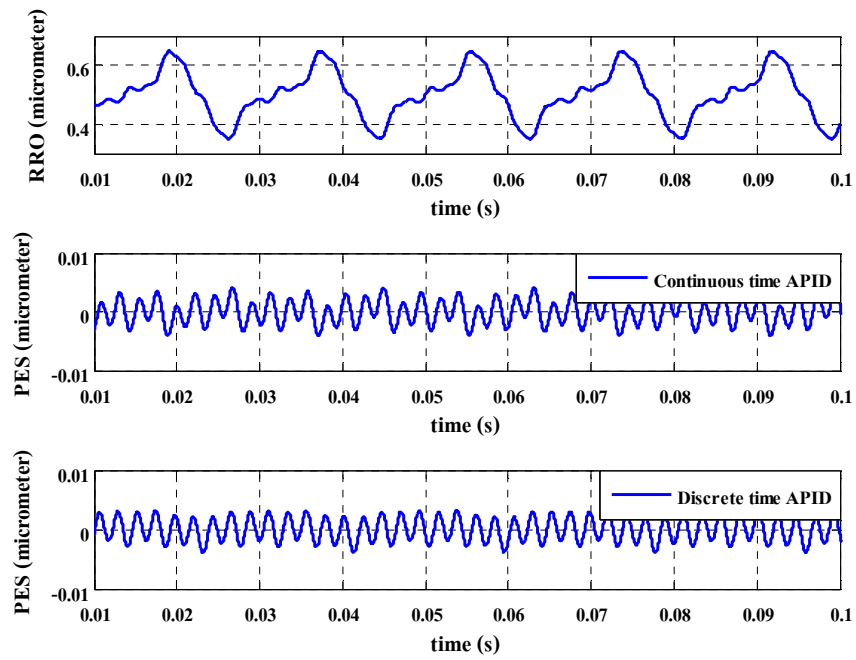
จากภาพประกอบ 5-4 เป็นผลตอบสนองของระบบของตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ที่เป็นดิจิทัล ซึ่งพบว่ามีลักษณะใกล้เคียงกับตัวควบคุมที่เป็นเวลาต่อเนื่อง โดยมีค่าพุ่งเกิด 0 % ค่าเวลาขาขึ้น 0.27 ms และค่าเวลาเข้าที่ 0.78 ms และในภาพประกอบ 5-5 เป็นผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวน โดยมีค่า $3\sigma = 5.9482$ % of Track



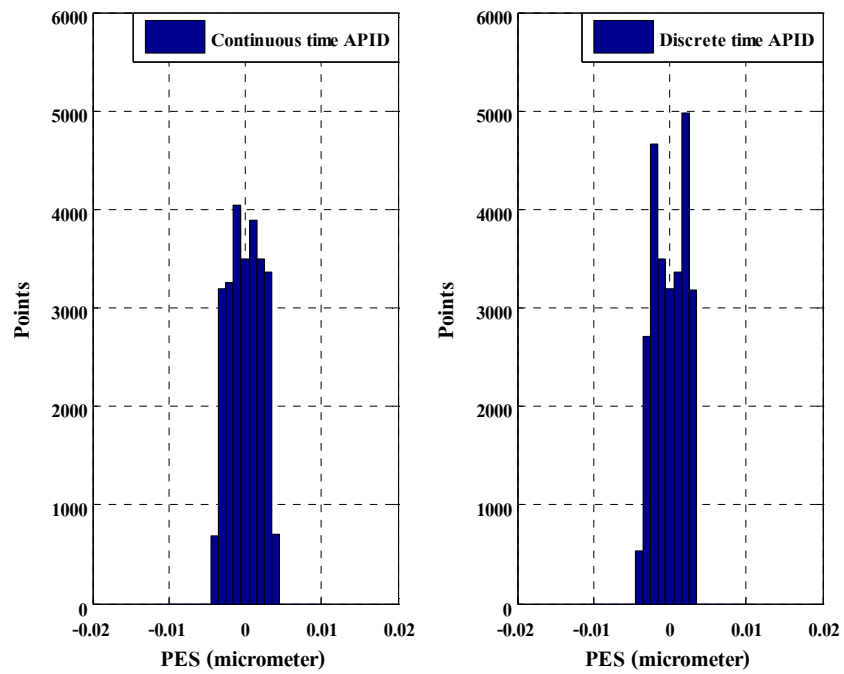
ภาพประกอบ 5-4 ผลตอบสนองของระบบแบบขั้นตอนเดียว

ตารางที่ 5-1 ประสิทธิภาพของตัวควบคุมดิจิทัล

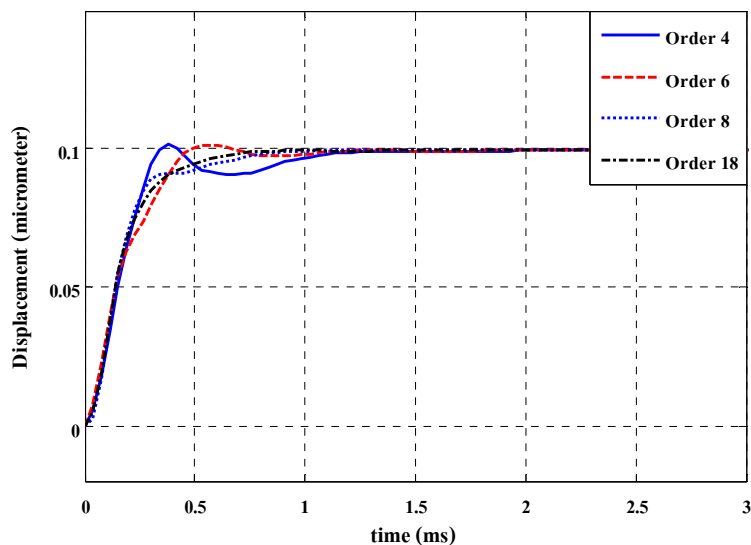
Controller	Rise time (ms)		Settling time (ms)		Overshoot (%)	
	Con.	Dis.	Con.	Dis.	Con.	Dis.
Single stage APID	0.35	0.27	0.60	0.78	0	0
Dual stage APID	0.33	0.25	0.56	0.72	0	0



ภาพประกอบ 5-5 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนแบบขั้นตอนเดียว



ภาพประกอบ 5-6 ฮิสโทแกรมของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งแบบขั้นตอนเดียว



ภาพประกอบ 5-7 ผลตอบสนองของระบบเมื่อระบบที่ควบคุมเปลี่ยนไป

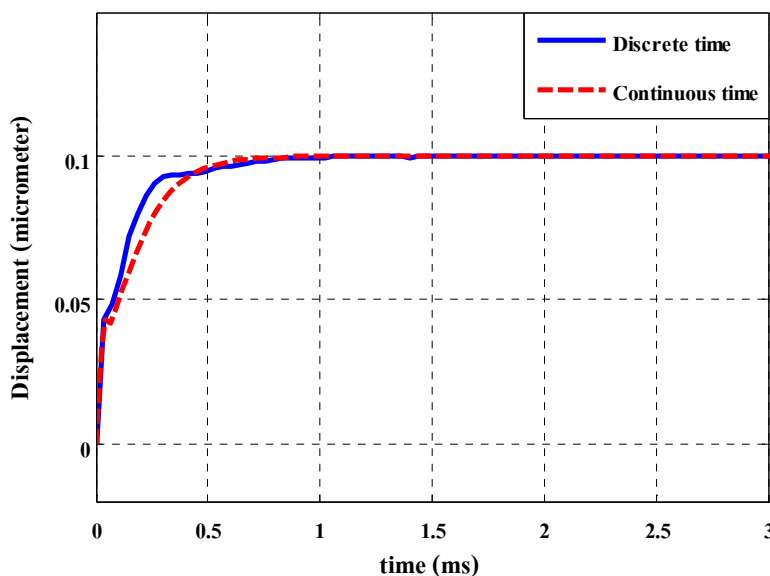
นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้กับระบบตัวขับเคลื่อน VCM ที่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนลำดับ (Order) ซึ่งหมายถึงระบบที่ควบคุมมีการเปลี่ยนแปลงไป ทำการทดสอบโดยการเพิ่มจำนวนลำดับของระบบไปจนถึงลำดับที่ 18 ได้ผลการทดสอบดังแสดงในภาพประกอบ 5-7 จะพบว่าตัวควบคุมที่นำเสนอยังสามารถควบคุมให้ระบบตอบสนองตามที่ต้องการได้ เนื่องจากตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้สามารถปรับตัวเองได้เพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ แต่ผลตอบสนองในแต่ละลำดับมีความแตกต่างกัน เนื่องจากในแต่ละลำดับความถี่ที่สนใจมีความแตกต่างกัน โดยความถี่ที่สนใจไม่เกินความถี่ในการชักตัวอย่าง คือ 26.4 kHz

5.3.2 การควบคุมแบบสองขั้นตอน

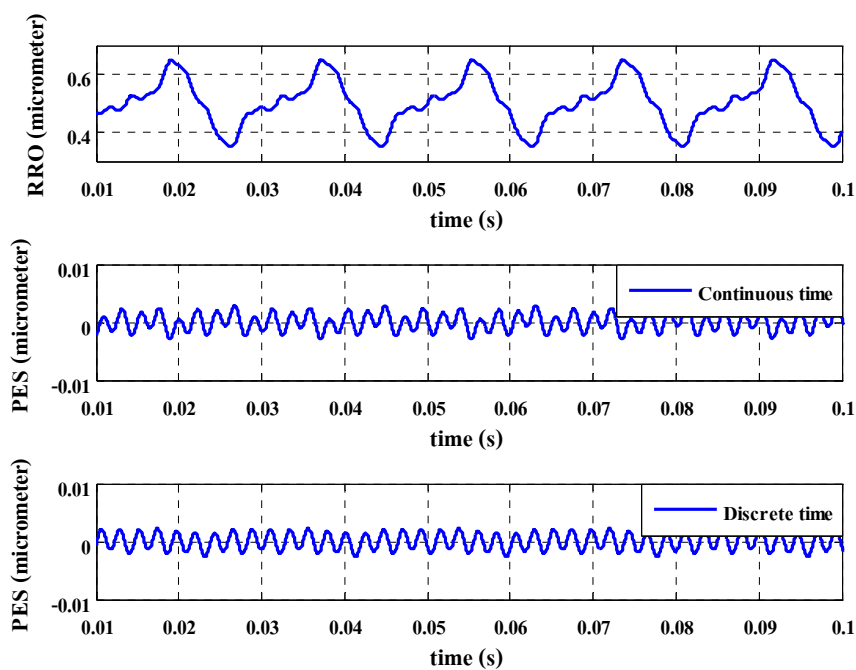
สำหรับการควบคุมแบบสองขั้นตอนก็เหมือนกันค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ก็เหมือนกันกับบทที่ 4 แต่เปลี่ยนตัวควบคุมที่เป็นเวลาต่อเนื่องเป็นรูปแบบตัวควบคุมดิจิทัล ส่วนในการจำลองการทำงานจะพิจารณาในส่วนของผลตอบสนองของระบบ และผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวน

จากภาพประกอบ 5-8 เป็นผลตอบสนองของระบบของการควบคุมแบบสองขั้นตอนที่ตัวควบคุมเป็นตัวควบคุมดิจิทัล ซึ่งพบว่ามีความพุ่งเกิด 0 % ค่าเวลาขาขึ้น 0.25 ms และค่าเวลาเข้าที่ 0.72 ms และในภาพประกอบ 5-9 เป็นผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวน โดยมีค่า $3\sigma = 4.1609 \% \text{ of Track}$ แล้วเมื่อเทียบผลตอบสนองของระบบและผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนกับตัวควบคุมที่เวลาต่อเนื่องจะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีเวลาในการชักตัวอย่างเข้า

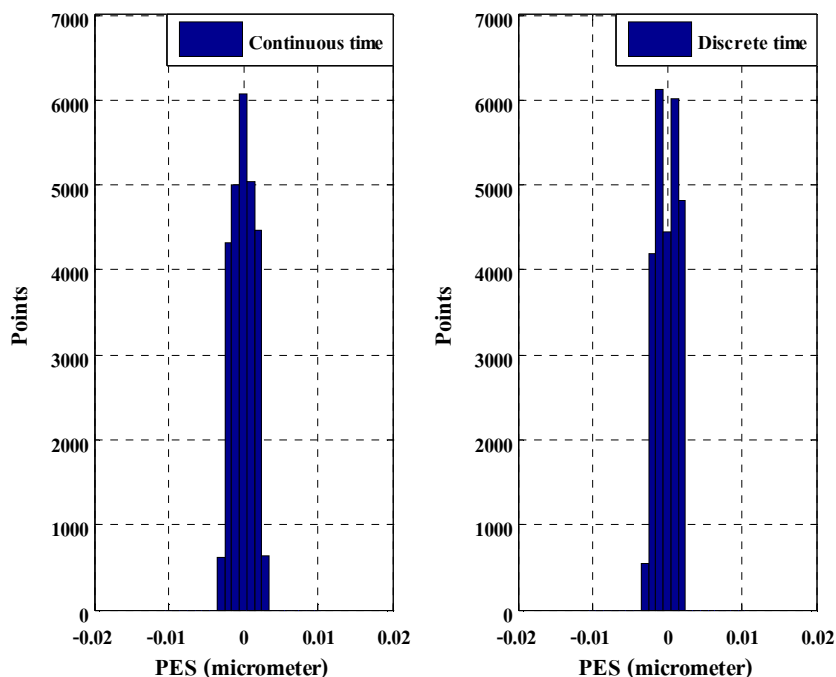
มาเกี่ยวข้องจึงทำให้การอ่านค่าตำแหน่งเข้ามาและค่าสัญญาณควบคุมที่ป้อนให้กับระบบไม่ได้ต่อเนื่องตลอดเวลาแต่ในขณะเดียวกันระบบการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์มีการตอบสนองที่เร็วส่งผลให้ผลตอบสนองของระบบมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากการใช้ตัวควบคุมแบบเวลาต่อเนื่อง



ภาพประกอบ 5-8 ผลตอบสนองของระบบแบบสองขั้นตอน



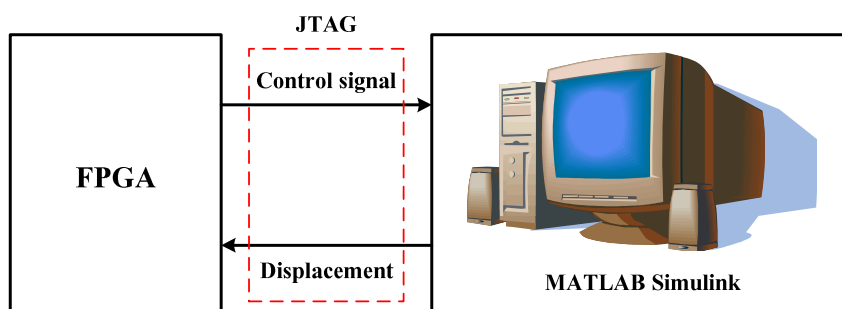
ภาพประกอบ 5-9 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนแบบสองขั้นตอน



ภาพประกอบ 5-10 ฮิสโทแกรมของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งแบบสองขั้นตอน

5.4 ผลการทดสอบจริงบน FPGA

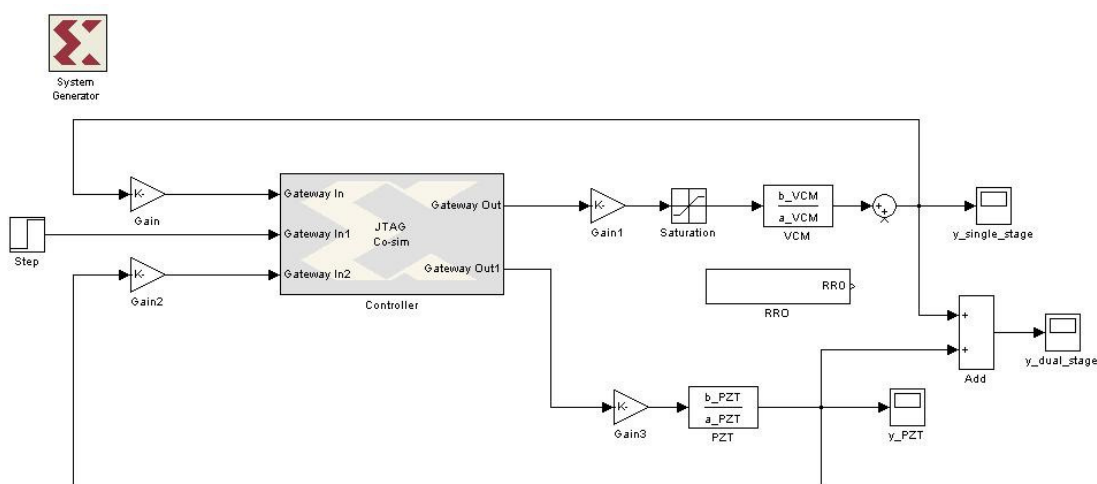
สำหรับในการประยุกต์ใช้งานจริงเป็นการนำวิธีการควบคุมที่ได้ออกแบบในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนไปตามแนวข้อมูลที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นมาประยุกต์ใช้งานจริง โดยการนำวิธีการควบคุมดังกล่าวไปทำงานบนตัวประมวลผลเพื่อทดสอบว่าวิธีการที่ได้นำเสนอสามารถทำงานบนตัวประมวลผลที่ไม่ใช่คอมพิวเตอร์ได้ เนื่องจากในการนำไปใช้งานจริงจะต้องให้ตัวควบคุมทำงานบนตัวประมวลผลและการคำนวณค่าต่างๆก็จะทำบนตัวประมวลผลเช่นกัน



ภาพประกอบ 5-11 บล็อกไดอะแกรมของการทดสอบแบบ Hardware-in-Loop

ตัวประมวลผลที่ใช้ในการทดสอบวิธีการควบคุมสำหรับงานวิจัยนี้เป็นบอร์ด FPGA Spartan-III XC3S400 ในการออกแบบจะใช้ Xilinx System Generator ในโปรแกรม MATLAB Simulink โดยการนำบล็อกในไลบรารีของ Xilinx Blockset มาประกอบกันให้เป็นตัวควบคุมดิจิทัลดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 5.2 แล้วทำการสร้างบล็อก Hardware Co-simulation ดังแสดงในภาพประกอบ 5-12 เพื่อใช้ในการทดสอบแบบ Hardware-in-Loop เนื่องจากไม่สามารถสร้างระบบที่จะควบคุมขึ้นมาได้ดังนั้นจึงต้องให้ตัวควบคุมระบบที่ออกแบบทำงานบนบอร์ด FPGA ผ่านบล็อก Hardware Co-simulation แล้วนำสัญญาณควบคุมที่ได้จากตัวควบคุมไปป้อนให้กับระบบใน MATLAB Simulink ดังแสดงในภาพประกอบ 5-11

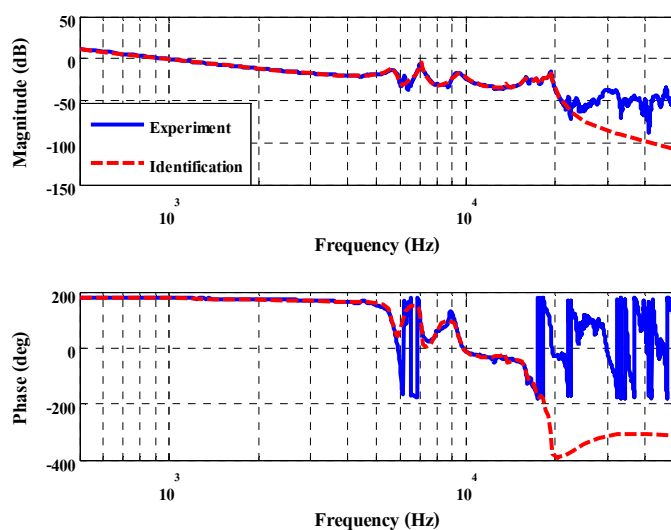
สำหรับในงานวิจัยนี้จะนำวิธีการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ไปตามแนวข้อมูลทั้งการควบคุมแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนไปประยุกต์ใช้งานจริงบนตัวประมวลผล FPGA โดยในการออกแบบได้ออกแบบให้ตัวประมวลผลมีการคำนวณแบบ fix point 16 บิต และใช้เวลาในการซีกตัวอย่าง (T_s) เท่ากับ $3.7879e-5$ s แล้วได้ทำการทดสอบโดยติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 5-14 และได้ผลการทดสอบดังที่ได้กล่าวในหัวข้อต่อไป



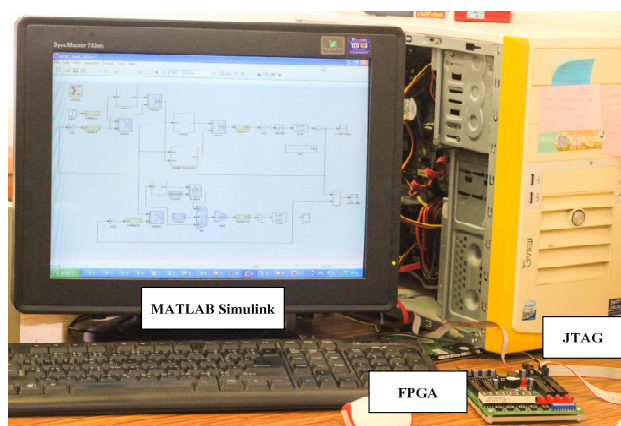
ภาพประกอบ 5-12 บล็อกโคโอดแกรมของการทดสอบจริงบน FPGA

นอกจากนี้เพื่อให้ระบบการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับระบบจริงมากที่สุด จึงได้เพิ่มจำนวนลำดับของระบบขับเคลื่อน VCM จากลำดับ 4 เป็นลำดับ 18 ทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังแสดงในสมการ (5-11) และผลตอบสนองเชิงความถี่ดังแสดงในภาพประกอบ 5-13 ส่วนตัวขับเคลื่อน PZT ยังคงเหมือนเดิม

$$G_{VCM}(s) = \frac{\left. \begin{aligned} &2.3290 \times 10^{16} s^{14} - 7.9898 \times 10^{21} s^{13} + 1.2603 \times 10^{27} s^{12} \\ &- 4.5101 \times 10^{32} s^{11} + 3.7743 \times 10^{37} s^{10} - 9.1913 \times 10^{42} s^9 + 6.8758 \times 10^{47} s^8 \\ &- 8.5821 \times 10^{52} s^7 + 6.8932 \times 10^{57} s^6 - 3.7335 \times 10^{62} s^5 + 3.4414 \times 10^{67} s^4 \\ &- 6.6874 \times 10^{71} s^3 + 7.4007 \times 10^{76} s^2 - 3.9109 \times 10^{80} s + 5.3401 \times 10^{85} \end{aligned} \right\}}{\left. \begin{aligned} &s^{18} + 1.9947 \times 10^4 s^{17} + 6.3860 \times 10^{10} s^{16} \\ &+ 1.0941 \times 10^{15} s^{15} + 1.6867 \times 10^{21} s^{14} + 2.4197 \times 10^{25} s^{13} + 2.3789 \times 10^{31} s^{12} \\ &+ 2.7616 \times 10^{35} s^{11} + 1.9300 \times 10^{41} s^{10} + 1.7278 \times 10^{45} s^9 + 9.0455 \times 10^{50} s^8 \\ &+ 5.8053 \times 10^{54} s^7 + 2.3393 \times 10^{60} s^6 + 9.5097 \times 10^{63} s^5 + 3.0044 \times 10^{69} s^4 \\ &+ 5.9921 \times 10^{72} s^3 + 1.4631 \times 10^{78} s^2 + 2.3922 \times 10^{80} s + 1.3120 \times 10^{83} \end{aligned} \right\}} \quad (5-11)$$



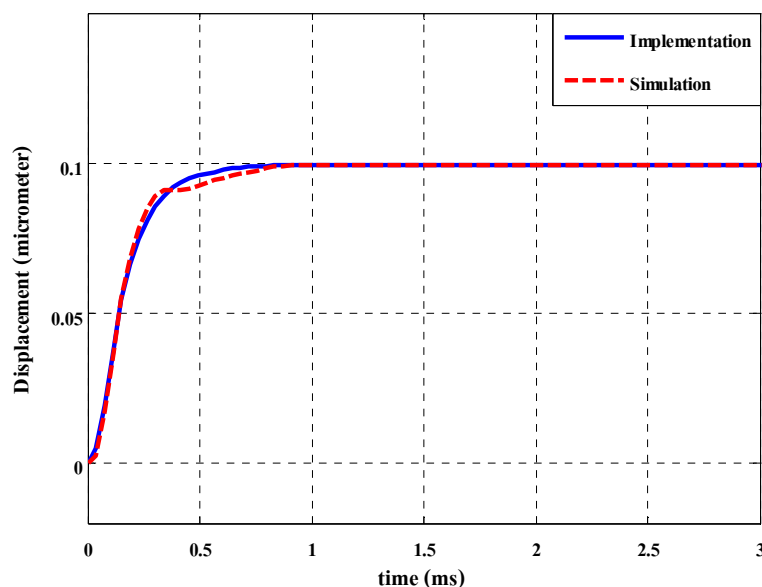
ภาพประกอบ 5-13 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวขับเคลื่อน VCM



ภาพประกอบ 5-14 การติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดสอบวิธีการควบคุม

5.4.1 การควบคุมแบบขั้นตอนเดียว

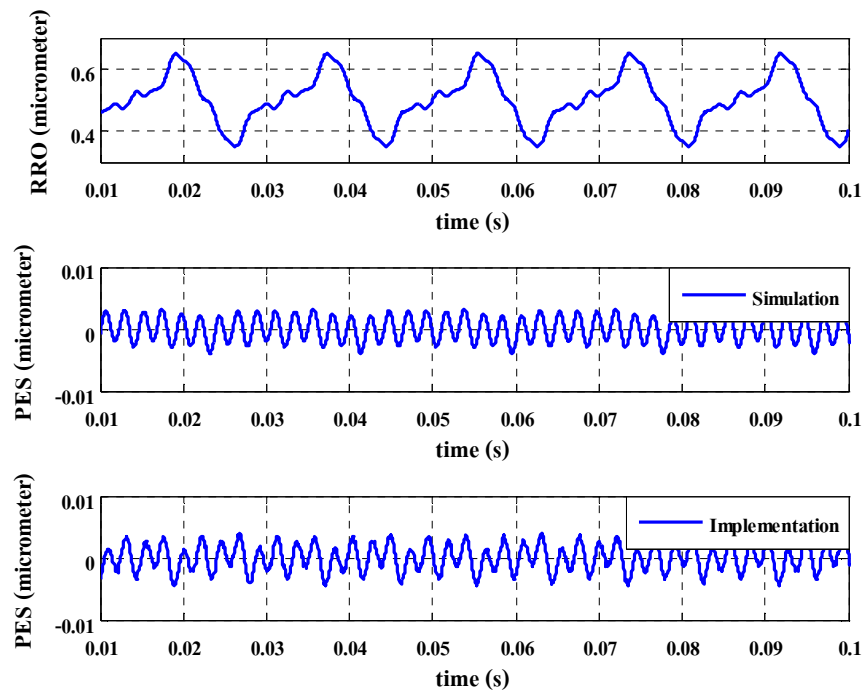
จากผลการทดสอบวิธีการควบคุมบนตัวประมวลผล FPGA สำหรับการควบคุมแบบขั้นตอนเดียวดังแสดงในภาพประกอบ 5-15, ภาพประกอบ 5-16 และภาพประกอบ 5-17 พบว่าผลตอบสนองของระบบมีค่าพุ่งเกิน 0 % ค่าเวลาขาขึ้น 0.3 ms และค่าเวลาเข้าที่ 0.62 ms ส่วนผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนมีค่า $3\sigma = 6.3543\%$ of Track แล้วเมื่อเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานพบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากการทดสอบวิธีการควบคุมบนตัวประมวลผล FPGA ได้ทดสอบกับระบบที่มีลำดับสูงกว่าระบบที่ใช้ในการจำลองการทำงานส่งผลให้ระบบมีความซับซ้อนและใกล้เคียงกับระบบจริงมากขึ้น



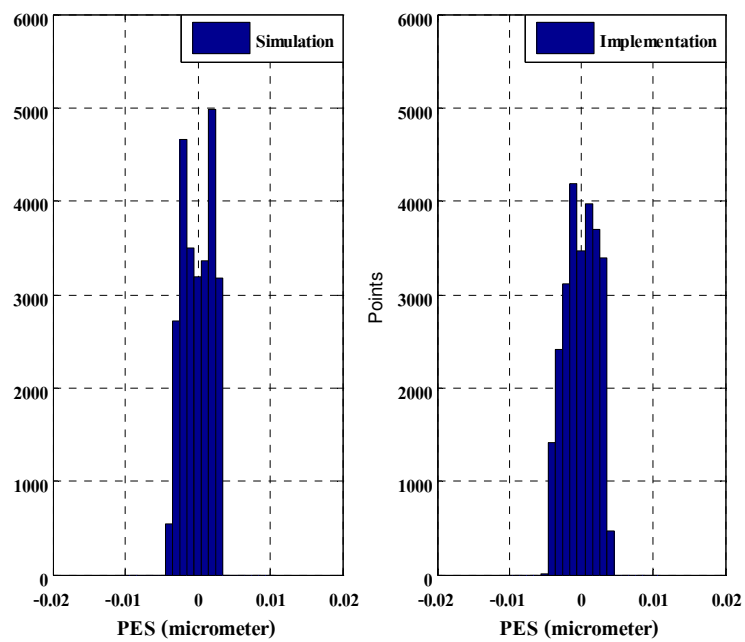
ภาพประกอบ 5-15 ผลตอบสนองของระบบแบบขั้นตอนเดียว

ตารางที่ 5-2 ประสิทธิภาพของตัวควบคุมระบบ

Controller	Rise time (ms)		Settling time (ms)		Overshoot (%)	
	Sim.	Imp.	Sim.	Imp.	Sim.	Imp.
Single stage APID	0.27	0.30	0.78	0.62	0	0
Dual stage APID	0.25	0.29	0.72	0.56	0	0



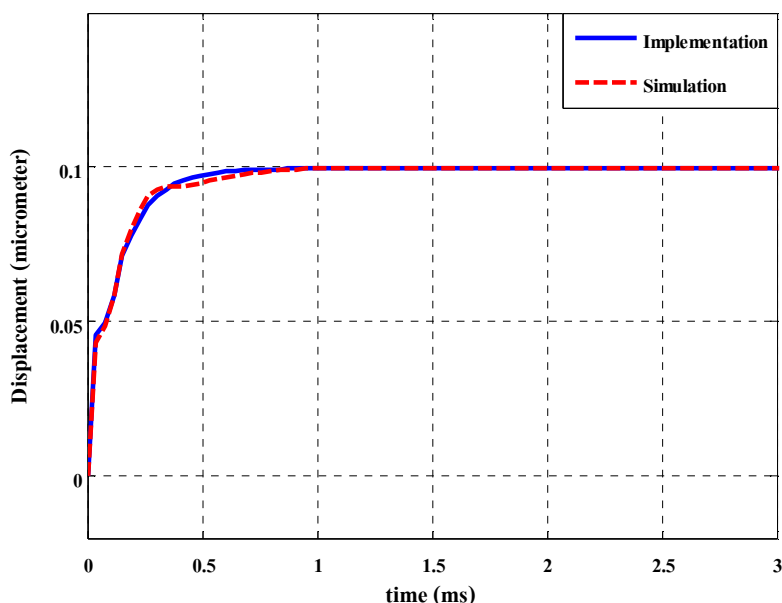
ภาพประกอบ 5-16 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนแบบขั้นตอนเดียว



ภาพประกอบ 5-17 ฮิสโทแกรมของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งแบบขั้นตอนเดียว

5.4.2 การควบคุมแบบสองขั้นตอน

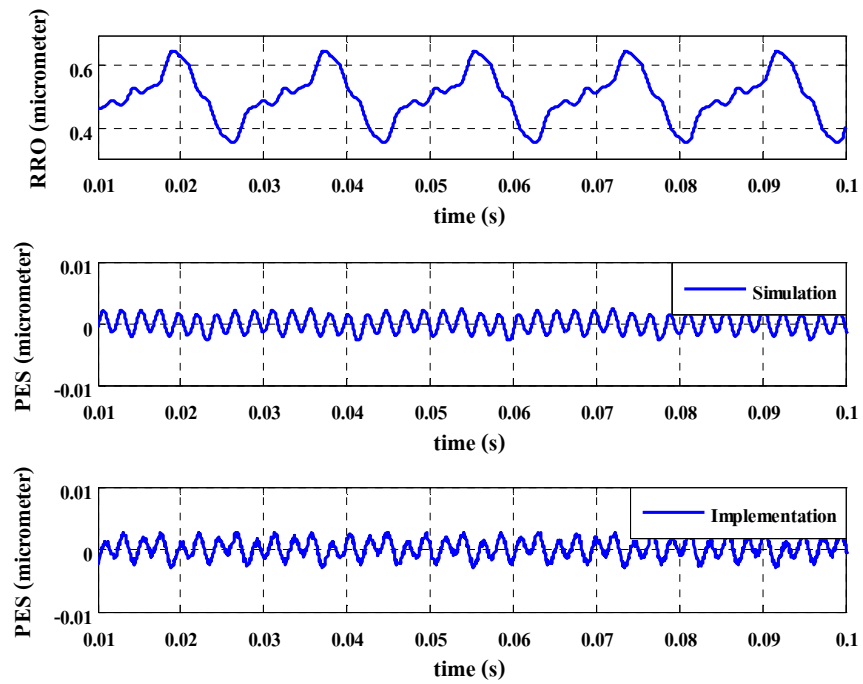
จากผลการทดสอบวิธีการควบคุมบนตัวประมวลผล FPGA สำหรับการควบคุมแบบสองขั้นตอนดังแสดงในภาพประกอบ 5-18, ภาพประกอบ 5-19 และภาพประกอบ 5-20 พบว่าผลตอบสนองของระบบมีค่าพุ่งเกิน 0 % ค่าเวลาขาขึ้น 0.29 ms และค่าเวลาเข้าที่ 0.56 ms ส่วนผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนมีค่า $3\sigma = 4.2138\%$ of Track แล้วเมื่อเทียบผลที่ได้จากการทดสอบกับผลที่ได้จากการจำลองการทำงานพบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมแบบสองขั้นตอนก็ยังให้ผลตอบสนองของระบบและค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่ดีกว่าการควบคุมแบบขั้นตอนเดียว



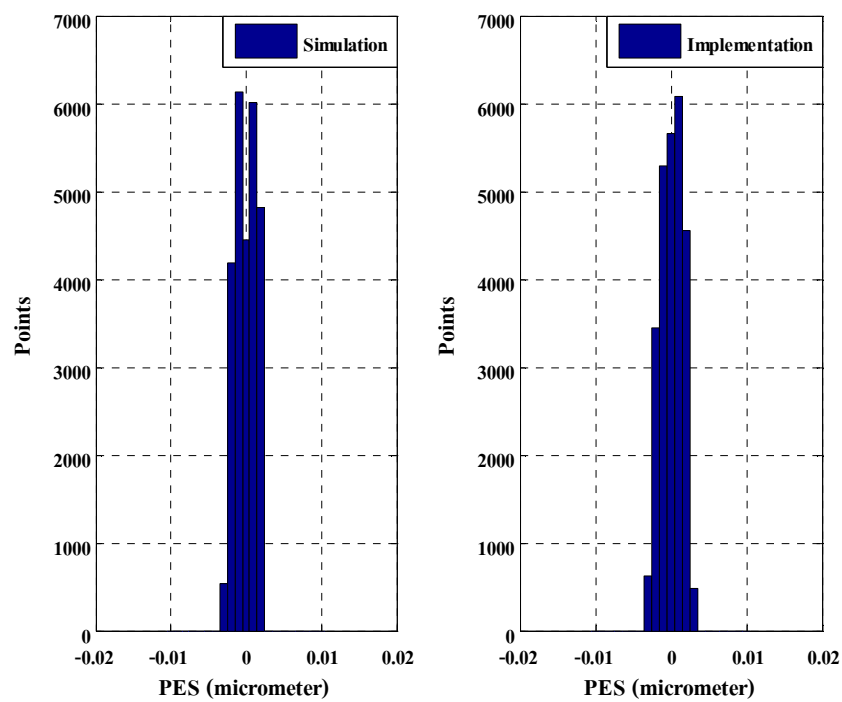
ภาพประกอบ 5-18 ผลตอบสนองของระบบแบบสองขั้นตอน

ตารางที่ 5-3 ประสิทธิภาพของตัวควบคุมระบบ

Controller	Rise time (ms)		Settling time (ms)		Overshoot (%)	
	Sim.	Imp.	Sim.	Imp.	Sim.	Imp.
Single stage APID	0.27	0.30	0.78	0.62	0	0
Dual stage APID	0.25	0.29	0.72	0.56	0	0



ภาพประกอบ 5-19 ผลตอบสนองของสัญญาณรบกวนแบบสองชั้นตอน



ภาพประกอบ 5-20 ฮิสโทแกรมของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งแบบสองชั้นตอน

5.5 สรุป

จากผลการจำลองการทำงานของตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ที่อยู่ในรูปแบบดิจิทัลหรือรูปแบบเวลาไม่ต่อเนื่องพบว่าผลตอบสนองของระบบและผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนทั้งการควบคุมแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนให้ผลที่ใกล้เคียงกับการควบคุมที่อยู่ในรูปแบบเวลาต่อเนื่อง ส่วนผลที่ได้จากการทดสอบวิธีการควบคุมบนตัวประมวลผล FPGA พบว่าผลตอบสนองของระบบและผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนทั้งการควบคุมแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการจำลองการทำงานเหมือนกันไม่ว่าระบบที่ควบคุมจะมีลำดับที่สูงขึ้นก็ตามวิธีการควบคุมที่ได้แนะนำเสนอก็ยังให้ผลตอบสนองของระบบและค่าความผิดพลาดของตำแหน่งได้ตามที่ต้องการ

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทนี้กล่าวถึงบทสรุปและข้อเสนอแนะหลังจากที่ได้ทำการศึกษาวิธีการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ไปตามแนวข้อมูล แล้วได้ทำการออกแบบวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ และทำการจำลองการทำงานทั้งการควบคุมแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน หลังจากนั้นก็ได้ทำการออกแบบให้อยู่ในรูปแบบตัวควบคุมดิจิทัลเพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานจริงบนตัวประมวลผล FPGA

6.1 สรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้สำหรับการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ไปตามแนวข้อมูล โดยใช้วิธีการค่ากำลังสองเฉลี่ยต่ำสุดในการปรับตัวค่าอัตราขยาย แล้วนำไปประยุกต์ใช้งานจริงบนตัวประมวลผล FPGA ซึ่งสามารถสรุปออกมาได้ดังนี้

สำหรับการควบคุมแบบขั้นตอนเดียวพบว่าในการทดสอบผลตอบสนองของระบบ ตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้สามารถลดค่าพุงเกิน และค่าเวลาเข้าที่ของระบบได้ เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตราขยายคงที่ และส่วนการทดสอบค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากการรบกวน พบว่าตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ทำให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตราขยายคงที่

สำหรับการควบคุมแบบสองขั้นตอนพบว่าผลตอบสนองของระบบในการควบคุมแบบสองขั้นตอนให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าระบบควบคุมแบบขั้นตอนเดียว และค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากการรบกวนลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับระบบควบคุมแบบขั้นตอนเดียว เนื่องจากการควบคุมแบบสองขั้นตอนเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างตัวขับเคลื่อน VCM และตัวขับเคลื่อน PZT ทำให้ระบบมีการตอบสนองที่เร็วขึ้น

สำหรับการนำวิธีการควบคุมที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้งานจริงบนตัวประมวลผล FPGA พบว่าทั้งการควบคุมแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนให้ผลตอบสนองของระบบและผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนใกล้เคียงกับการจำลองการทำงานไม่ว่าระบบที่ควบคุมจะมีลำดับที่สูงขึ้นก็ตาม

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวที่นำไปใช้ในการควบคุมแบบสองขั้นตอนให้ผลตอบสนองของระบบดีที่สุด และให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งน้อยที่สุดเมื่อมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวน และวิธีการควบคุมดังกล่าวก็สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงบนตัวประมวลผล FPGA หรือตัวประมวลผลอื่นๆ นอกจากนี้วิธีการควบคุมนี้สามารถควบคุมให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปตามแนวข้อมูลอยู่ได้และมีค่าความผิดพลาดที่น้อยเมื่อระบบที่ควบคุมมีลำดับที่สูงขึ้นหรือมีผลของการรบกวนต่างๆ มากขึ้น

6.2 ปัญหา

6.2.1 การควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะเกี่ยวข้องกับระยะทางที่หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ในหน่วยของไมโครเมตร ซึ่งต้องวัดด้วยเครื่อง Laser Dropper Vibrometer แต่ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถวัดได้เนื่องจากไม่มีเครื่องมือวัดจึงทำให้ในการออกแบบวิธีการควบคุมต้องใช้การจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์แทน

6.2.2 การจำลองการทำงานต้องจำลองระบบที่จะควบคุมขึ้นมา โดยจำลองมาจากข้อมูลจริงที่ได้จากโรงงานผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำให้ในการเผยแพร่งานวิจัยไม่สามารถเผยแพร่ได้ทั้งหมด

6.2.3 วิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ ไม่สามารถนำไปใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนจากแนวข้อมูลหนึ่งไปยังอีกแนวข้อมูลหนึ่งได้

6.2.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ ในส่วนของกฎการปรับตัวของค่าอัตราขยายจะต้องออกแบบค่าอัตราการเรียนรู้ให้เหมาะสมซึ่งได้จากการทดลองสุ่มจนได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดและทำให้ระบบมีเสถียรภาพ แต่ถ้าออกแบบค่าอัตราการเรียนรู้ไม่เหมาะสมจะทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ เนื่องจากค่าอัตราการเรียนรู้เป็นตัวกำหนดการปรับค่าอัตราขยายว่าจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงครั้งละเท่าไร ถ้าค่าอัตราการเรียนรู้มากเกินไปก็จะทำให้ค่าอัตราขยายที่ปรับได้มีค่าสูงเกินไปทำให้ระบบลู่ออกได้ แต่ถ้าค่าอัตราการเรียนรู้น้อยเกินไปก็จะทำให้ระบบลู่เข้าช้า

6.3 ข้อเสนอแนะ

6.3.1 การควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟด้วยวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ สามารถปรับปรุงวิธีการที่ใช้ในการปรับตัวของค่าอัตราขยายให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

6.3.2 การจำลองการทำงานสามารถนำแบบจำลองของระบบการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟแบบอื่นมาควบคุมโดยวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ก็สามารถจำลองการทำงานในส่วนของารรบกวนของสัญญาณรบกวนอื่นๆ นอกเหนือจากที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้

6.3.3 วิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนจากแนวข้อมูลหนึ่งไปยังอีกแนวข้อมูลหนึ่งได้

6.3.4 การออกแบบค่าอัตราการเรียนรู้ของกฎการปรับตัวค่าอัตราขยาย สามารถนำไปพัฒนาต่อเพื่อให้ได้สมการการออกแบบค่าอัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสม

6.3.5 การประยุกต์ใช้งานจริงของวิธีการควบคุมที่นำเสนอสามารถนำไปใช้กับระบบการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟจริงได้ โดยจะต้องมีตัวประมวลผล ฮาร์ดดิสก์ไคร์ฟที่ต้องการควบคุม และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัดระยะทางที่หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไป

บรรณานุกรม

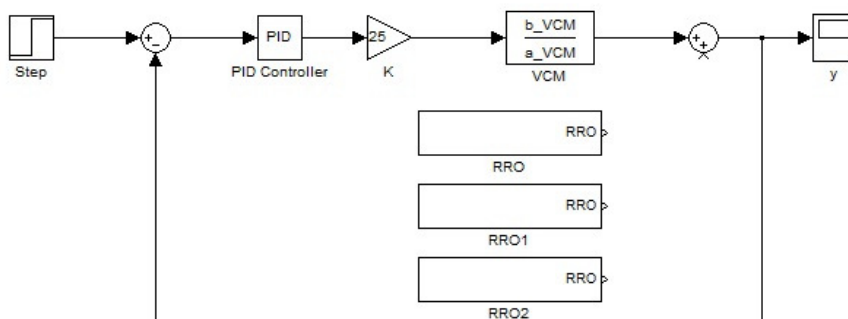
- [1] A. Al Mamun, G. Guo and C. Bi, *Hard Disk Drive Mechatronics and Control*, USA: CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.
- [2] K. Kalyanam and T-C. Tsao, "Experimental Study of Adaptive-Q Control for Disk Drive Track-Following Servo Problem," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 15, no. 3, pp. 480 – 491, June 2010.
- [3] B.M. Isayed and M.A. Hawwa. "A Nonlinear PID Control Scheme for Hard Disk Drive Servo Systems," *Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Control & Automation*, July 2007.
- [4] J. Chaoraingern, W. Vaidee, T. Trisuwannawat, A. Numsomran and V. Tipsuwanporn, "The Design of PID Controller for Track Following Control of Hard Disk Drive Using Coefficient Diagram Method," *Proceedings of the 11th International Conference on Control Automation and Systems*, pp. 72 – 77, Oct 2011.
- [5] T. Trisuwannawat, J. Chaoraingern and A. Numsomran, "Following Control of Hard Disk Drive Using Derivative State Constrained Optimal H_2 Controls," *Proceedings of the 10th International Conference on Control Automation and Systems*, pp. 1275 – 1280, Oct 2010.
- [6] M.T. Meziou, J. Ghommam and N. Derbel, "Track Following Problem of a VCM actuator Servo System for Hard Disc Drives using Predictive Control," *Proceedings of the 9th International Multi-Conference on Systems Signals and Devices*, 2012.
- [7] A. Nath and S.Kaitwanidvilai, "High Performance HDD Servo System using GA Based Fixed Structure Robust Loop Shaping Control," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1854 – 1859, Dec 2009.
- [8] S.Kaitwanidvilai and A. Nath, "Design and Implementation of A High Performance Hard Disk Drive Servo Controller Using GA Based 2DOF Robust Controller," *International Journal of Innovative Computing Information and Control*, vol. 8, no. 2, pp. 1025 – 1036, Feb 2012.
- [9] N.O. Perez-Arancibia, T-C Tsao, and J.S. Gibson, "Saturation-Induced Instability and Its Avoidance in Adaptive Control of Hard Disk Drives," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 368 – 382, March 2010.

- [10] F. Hong, C. Du, K.P. Tee, and S.S. Ge' "Adaptive Disturbance Rejection in the Presence of Uncertain Resonance Mode in Hard Disk Drives," Proceedings of the American Control Conference, pp. 3244 – 3249, June 2009.
- [11] T. Gao, C. Du, L. Xie, and W. Cai, "Impulsive Disturbance Rejection in Hard Disk Drives," Proceedings of the 11th International Conference Control Automation Robotics and Vision, Dec 2010.
- [12] S.Kaitwanidvilai and A. Nath, "GA based Reduced Order Robust Loop Shaping Controller Design for HDD Servo System with Dual Stage Actuator," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1600 – 1605, Dec 2010.
- [13] J. Zheng, M. Fu and Y. Wang, "Nonlinear Tracking Control for a Hard Disk Drive Dual-Stage Actuator System," IEEE Transactions on Mechatronics, vol. 13, no. 5, pp. 510 – 518, Oct 2008.
- [14] J. Auysakul and P. Smithmaitrie, "System Identification and PID Controller of The Dual-Stage Actuator for Hard Disk Drive Positioning," DST-CON, 2010.
- [15] วิกิพีเดีย, ระบบควบคุมพีไอดี, [ออนไลน์], เข้าถึงได้จาก: <http://th.wikipedia.org/wiki/ระบบควบคุมพีไอดี>
- [16] N.T. Trong and K.A. Kwan, "Adaptive Proportional–Integral–Derivative Tuning Sliding Mode Control for A Shape Memory Alloy Actuator," Proceedings of IOP Science on Smart Materials and Structures, 2011.
- [17] T.C. Kuo, Y.J. Huang and B.W. Hong, "Adaptive PID with Sliding Mode Control for The Rotary Inverted Pendulum System," Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, July 2009.
- [18] T.C. Kuo, Y.J. Huang, C.Y. Chen and C.H. Chang, "Adaptive Sliding Mode Control with PID Tuning for Uncertain Systems," Proceedings of Engineering Letters, 2008.
- [19] B. M. Chen, T. H. Lee, K. Peng and V. Venkataramanan, Hard Disk Drive Servo Systems, New York: Springer-Verlag, 2nd ed., 2006.

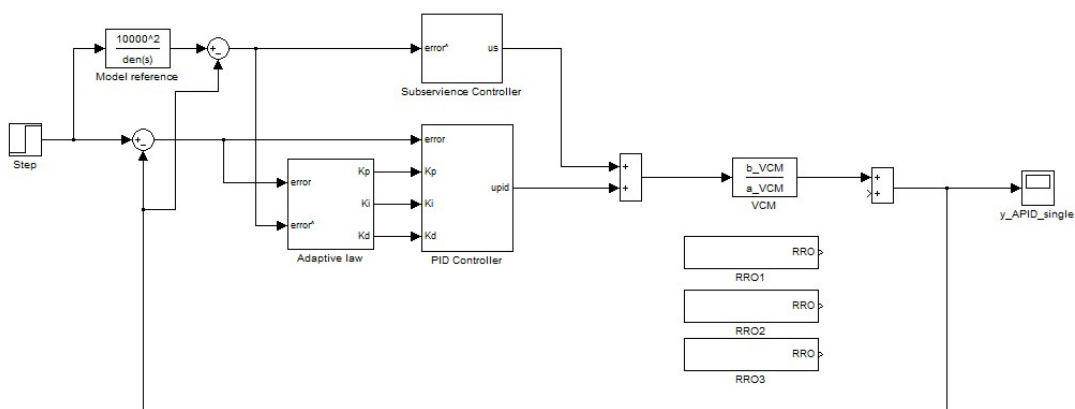
ภาคผนวก ก

บล็อกไดอะแกรมที่ใช้จำลองการทำงานในโปรแกรม MATLAB Simulink

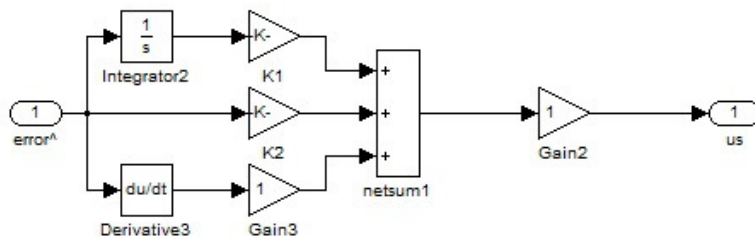
การควบคุมแบบขั้นตอนเดียว



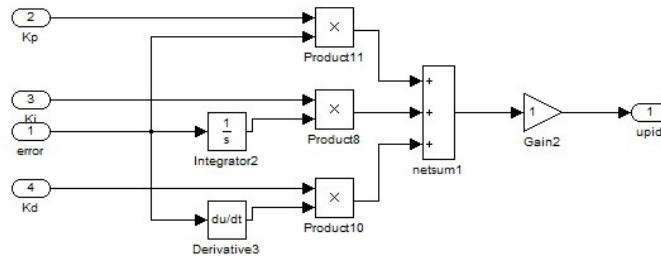
บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุม PID แบบขั้นตอนเดียว



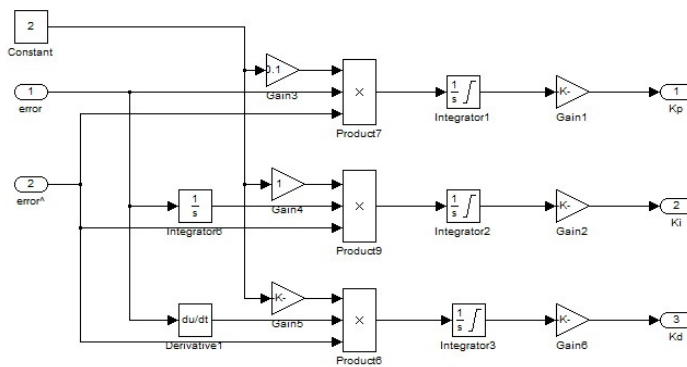
บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุม APID แบบขั้นตอนเดียว



บล็อกไดอะแกรมของ Subservience Controller

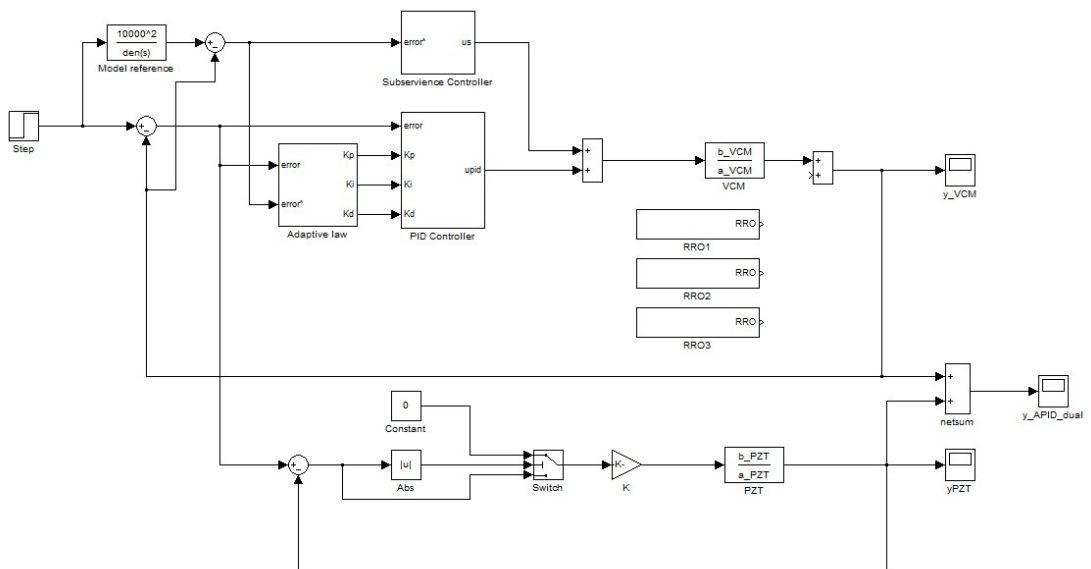


บล็อกไดอะแกรมของ PID Controller



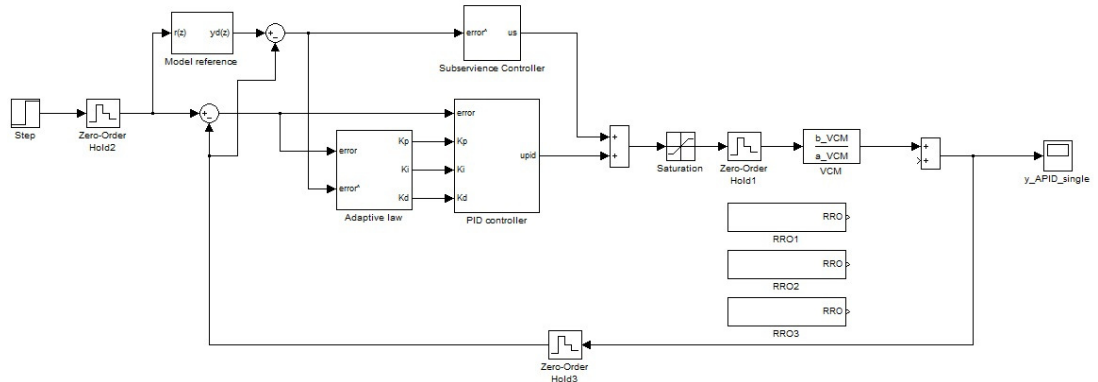
บล็อกไดอะแกรมของ Adaptive law

การควบคุมแบบสองชั้นตอน

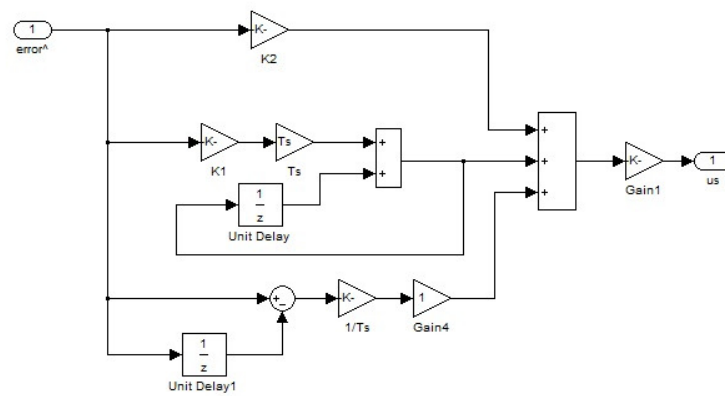


บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุม APID แบบสองชั้นตอน

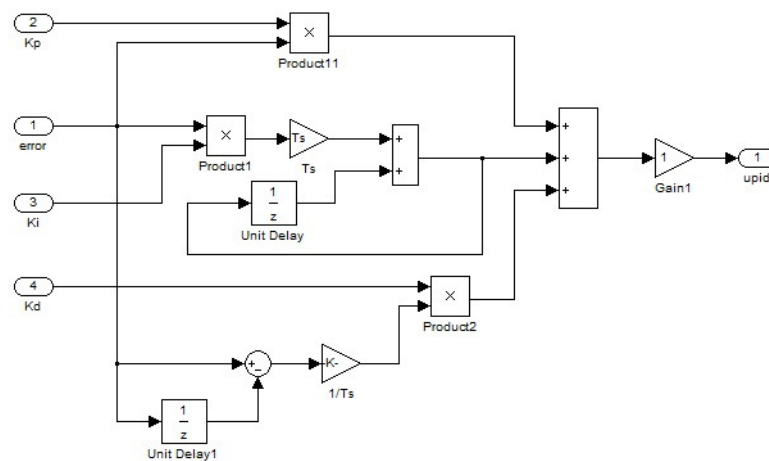
ตัวควบคุมดิจิทัล



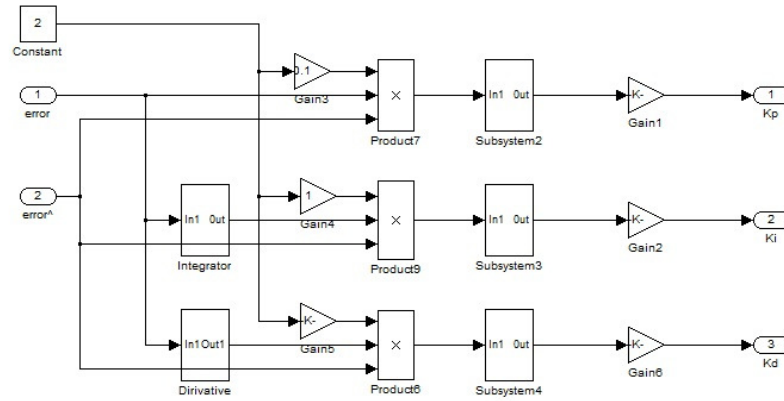
บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมดิจิทัล APID แบบขั้นตอนเดียว



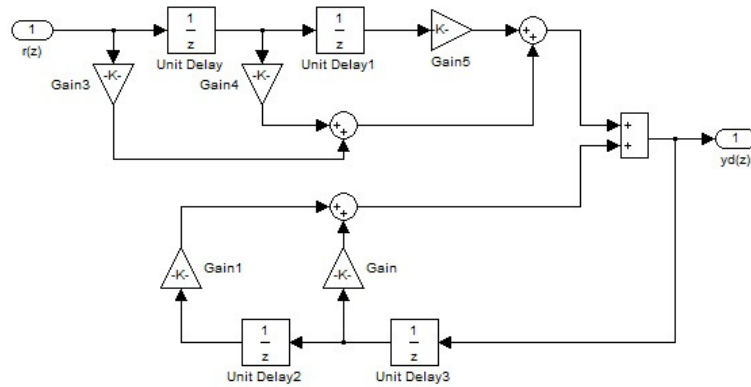
บล็อกไดอะแกรมของ Subservience Controller



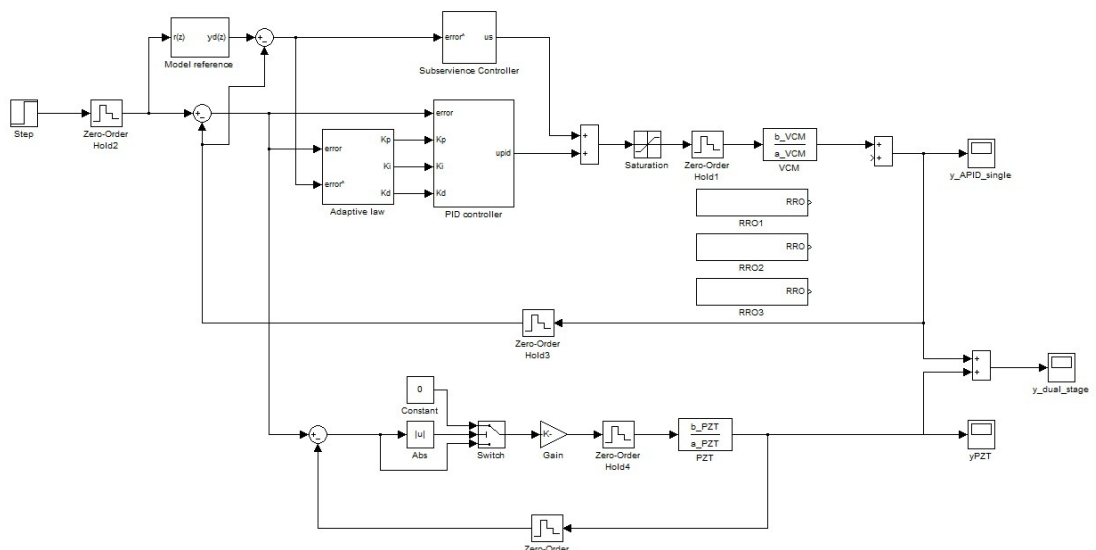
บล็อกไดอะแกรมของ PID Controller



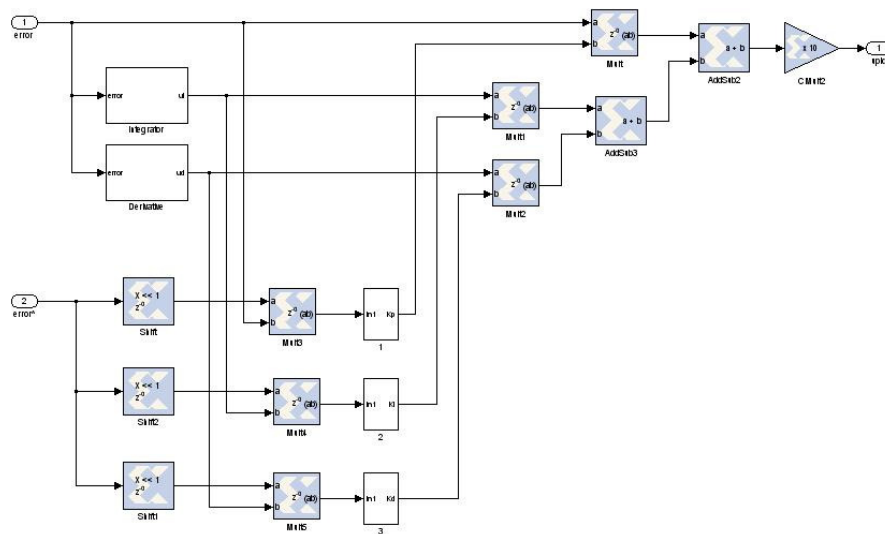
บล็อกไดอะแกรมของ Adaptive law



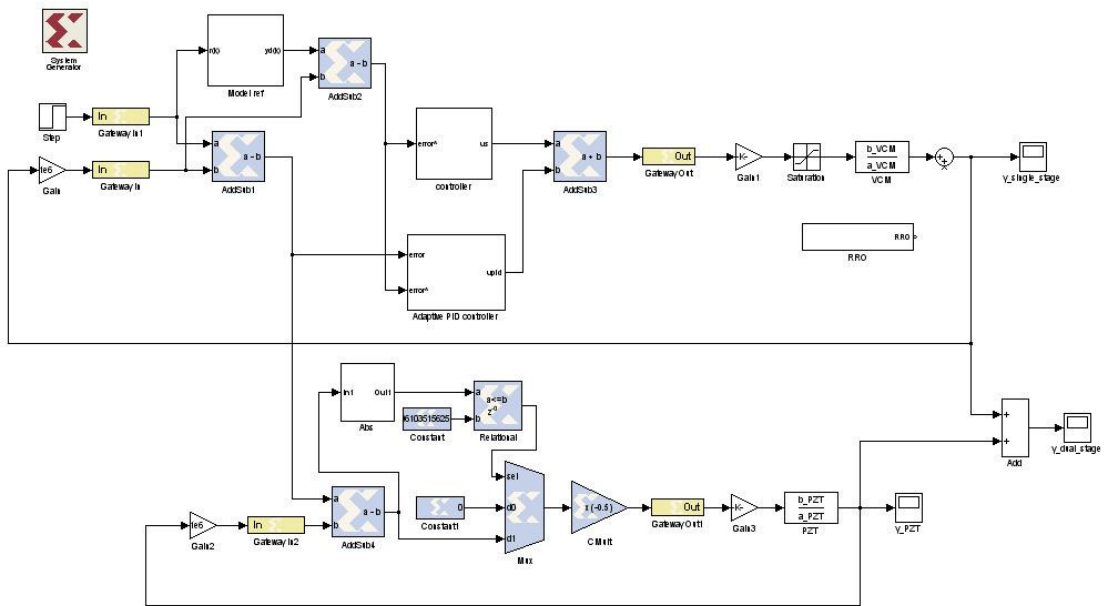
บล็อกไดอะแกรมของ Model reference



บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมดิจิทัล APID แบบสองขั้นตอน

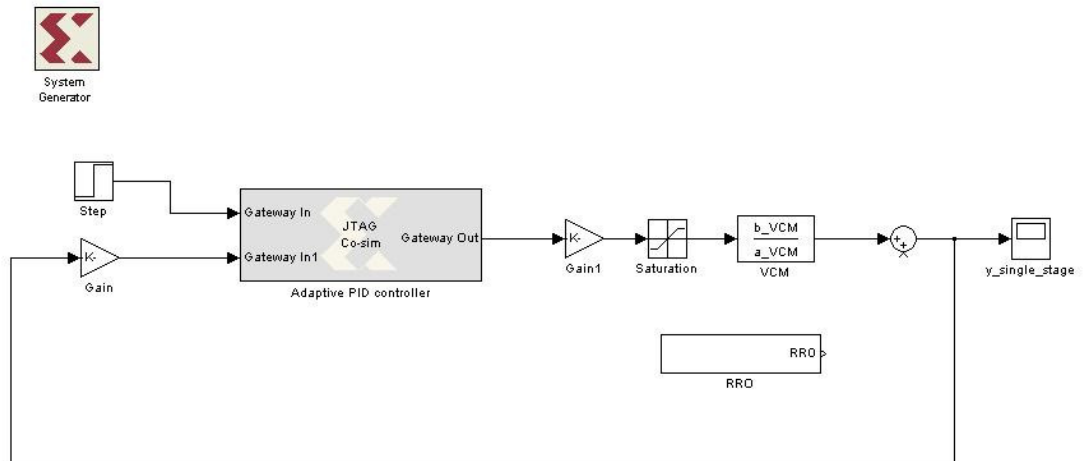


บล็อกโอดีแกรมของ Adaptive PID Controller

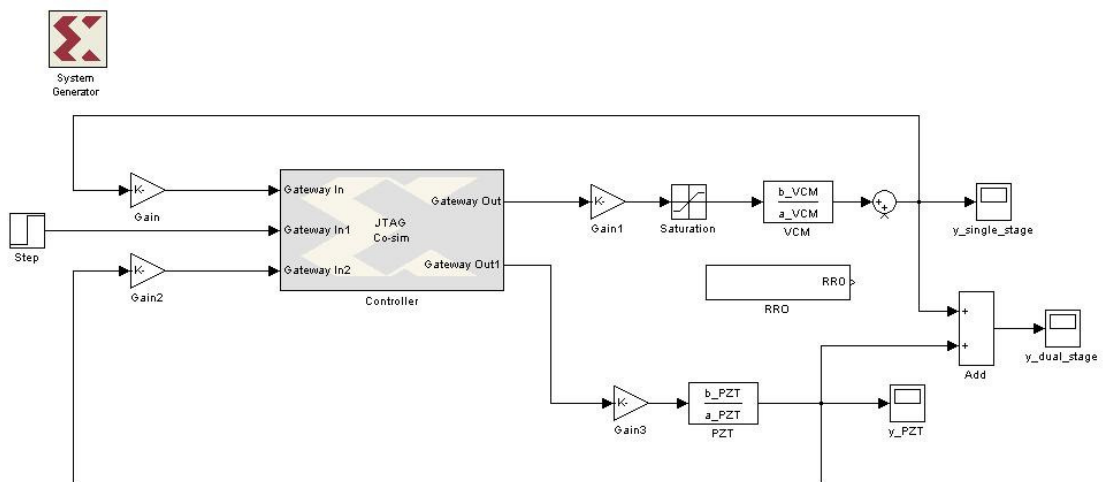


บล็อกโอดีแกรมของตัวควบคุม APID แบบสองขั้นตอน

การทดสอบ Hardware-in-loop



บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุม APID แบบขั้นตอนเดียว



บล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุม APID แบบสองขั้นตอน

ภาคผนวก ข
งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

การควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้สำหรับการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตามแนวข้อมูล An Adaptive PID Controller for Head Positioning in Track Following Control of Hard Disk Drive

เกียรติศักดิ์ เล็งช่วย¹ วุทธิ วิษณุ² พุทธิกร สมิตไมตรี³ และ ัญญา จินดาเพ็ชร⁴

^{1,2,4}ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และ ³ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

110/5 ถนนกาญจนวนิช ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112 โทรศัพท์: 0-7455-8831 E-mail: ak.kiattisak@hotmail.com¹

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตามแนวข้อมูลโดยใช้วิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียน และลดค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากการรบกวน ซึ่งในบทความนี้ได้ศึกษาสัญญาณค่าความผิดพลาดที่เกิดจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำเนื่องจากกระบวนการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนไปตามแนวข้อมูล สำหรับการออกแบบตัวควบคุมใช้วิธีการหาค่ากำลังสองเฉลี่ยต่ำสุดในการปรับอัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ และตัวควบคุมอนุพันธ์ ของตัวควบคุมพีไอดีให้สามารถปรับตัวต่อการรบกวน จากผลการจำลองการทำงานของระบบพบว่าตัวควบคุมที่นำเสนอสามารถลดค่าความผิดพลาดของตำแหน่งได้ร้อยละ 24 เมื่อเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตราขยายคงที่

คำสำคัญ: การควบคุมตำแหน่งตามแนวข้อมูล, ฮาร์ดดิสก์ไครฟ์, ตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้

Abstract

This paper presents a head positioning in the track following control of hard disk drives using an adaptive PID controller for improving the accuracy of head positioning and reducing the effect of the disturbance. The study concerns the position error signal (PES) effect of the repeatable runout (RRO) disturbance for the track following control in hard disk drives. The adaptive PID controller uses the least mean squares (LMS) algorithm to adjust the gains K_p , K_i , and K_d of the PID controller. The simulation results show that the proposed method can reduce the position error in track following control by 24% compared to the conventional PID controller.

Keywords: Track Following, Positioning Control, Hard Disk Drive, Adaptive PID Controller

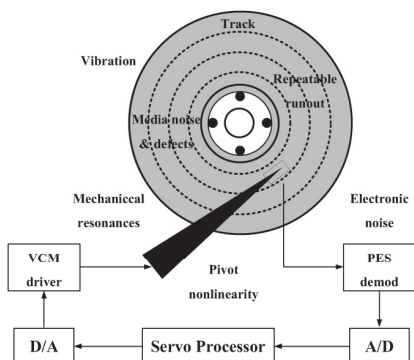
1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ได้ถูกพัฒนาขึ้นมา โดยเฉพาะความจุข้อมูล (Track per Inch: TPI) ที่เพิ่มมากขึ้น จึงจำเป็นต้องเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ให้มีความแม่นยำมากขึ้น โดยการพัฒนาวีธีการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนตามแนวข้อมูล (track following control) ให้มีความแม่นยำของตำแหน่งมากขึ้น

รูปที่ 1 แสดงแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบเซอร์โว (servo system) ของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ในการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียน ซึ่งประกอบด้วยการสั่นสะเทือนที่เกิดจาก flex cable ตัวรบกวนเชิงกล (mechanical disturbance) สัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (electrical noise) และสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำ (repeatable runout: RRO) ซึ่งเป็นผลมาจากการหมุนของมอเตอร์หมุนแผ่นจานฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ จากการรบกวนเหล่านี้ทำให้หัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งที่ต้องการ

วิธีการควบคุมแบบดั้งเดิม ที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ เช่น ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) [1] เป็นต้น เป็นตัวควบคุมที่ไม่สามารถตอบสนองต่อความจุข้อมูลที่เพิ่มขึ้นในปัจจุบันได้ เนื่องจากความจุข้อมูลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความกว้างของแนวข้อมูล (width of track) ลดขนาดลง ดังนั้นจึงมีการนำเสนอวิธีการควบคุมต่างๆ ที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการได้ เช่น ตัวควบคุมแบบแอลควิ (LQG controller) [2] ตัวควบคุมเหมาะสมที่สุด H_2 (H_2 optimal controller) [3] และตัวควบคุมที่มีตัวกรองแบบปรับตัวได้ (adaptive filter) [4] เป็นต้น แต่ตัวควบคุมเหล่านี้มีความซับซ้อน

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ (Adaptive PID control: APID) ซึ่งมีโครงสร้างที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ บทความนี้ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ ส่วนแรกกล่าวถึงที่มาของงานวิจัย ส่วนที่สองกล่าวถึงระบบเซอร์โวของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ ส่วนที่สามกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ ส่วนที่สี่กล่าวถึงผลการจำลองการทำงานของระบบ และส่วนสุดท้ายเป็นการสรุป



รูปที่ 1 แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนในระบบเซอร์โวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ [3]

2. ระบบเซอร์โวของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

2.1 การหาเอกลักษณ์ของระบบ

การหาเอกลักษณ์ของระบบ (system identification) เป็นการจำลองฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) ของตัวมอเตอร์ขดลวดเสียง (voice coil motor: VCM) โดยใช้ผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการวัดระยะทางการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ด้วยเครื่อง LDV (laser dropper vibrometer)

การจำลองฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ $G(s)$ โดยใช้วิธีการของ Gauss-Newton [5] ซึ่งให้ค่าฟังก์ชันความผิดพลาด (E_G) น้อยที่สุด ดังแสดงในสมการ (1) และ (2)

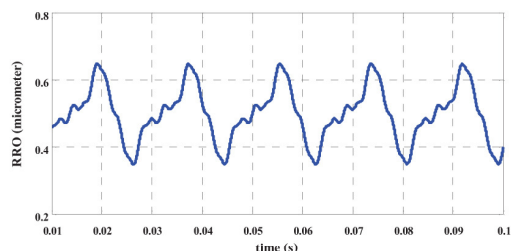
$$G(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_1s^i + b_2s^{i-1} + \dots + b_{i+1}}{a_1s^j + a_2s^{j-1} + \dots + a_{j+1}} \quad (1)$$

$$E_G = \sum_{k=1}^n \omega(k) \left| h(k) - \frac{B(\omega(k))}{A(\omega(k))} \right|^2 \quad (2)$$

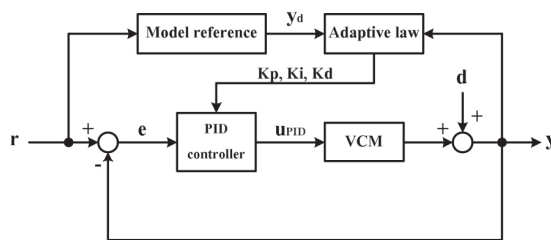
เมื่อ $A(\omega(k))$ และ $B(\omega(k))$ เป็นผลการแปลงฟูเรียร์ของพหุนาม a และ b ตามลำดับ $\omega(k)$ เป็นค่าความถี่เชิงมุม n เป็นจำนวนจุดของความถี่ $h(k)$ เป็นค่าเชิงซ้อนของผลตอบสนองเชิงความถี่ที่วัดได้จริง i และ j เป็นค่าอันดับพหุนาม $A(s)$ และ $B(s)$ ตามลำดับ ซึ่งค่าอันดับพหุนามสามารถเลือกให้เหมาะสมและใกล้เคียงกับข้อมูลจริงในช่วงความถี่ที่สนใจ

2.2 การจำลองสัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนไปตามแนวข้อมูลมาจากหลายแหล่งกำเนิดดังที่ได้กล่าวในหัวข้อ 1 ซึ่งในบทความนี้สนใจในส่วนของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำๆ สำหรับการจำลองสัญญาณรบกวนเป็นการรวมกันของสัญญาณไซน์ที่ฮาร์มอนิกต่างๆ [6] ดังแสดงในสมการ (3) และสัญญาณรบกวนที่ได้จำลองขึ้นแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำ



รูปที่ 3 บล็อกโคอะแดมของระบบควบคุมฟีดแบคแบบปรับตัวได้

$$d_{RRO}(t) = 0.5 + 0.1 \cos(110\pi t) + 0.05 \sin(220\pi t) + 0.02 \sin(440\pi t) + 0.01 \sin(880\pi t) \quad (3)$$

3. การออกแบบตัวควบคุมฟีดแบคแบบปรับตัวได้

วิธีการควบคุมฟีดแบคแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอในบทความนี้ แสดงดังในรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมฟีดแบค (PID controller) ระบบที่ต้องการควบคุม (VCM) กฎที่ใช้ในการปรับตัว (adaptive law) อัตราขยายของตัวควบคุมฟีดแบค (K_p, K_i, K_d) และแบบจำลองอ้างอิง (model reference)

จากบล็อกโคอะแดมในรูปที่ 3 สัญญาณควบคุม (u_{PID}) สามารถหาได้จากสมการ (4)

$$u_{PID} = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (4)$$

เมื่อ $e = r - y$ และ $y = u_{PID} VCM + d$

สำหรับการปรับอัตราขยายของตัวควบคุมฟีดแบค จะใช้วิธีการกำลังสองเฉลี่ยต่ำสุด (LMS algorithm) โดยกำหนดให้

$$\tilde{e} = y_d - y \quad (5)$$

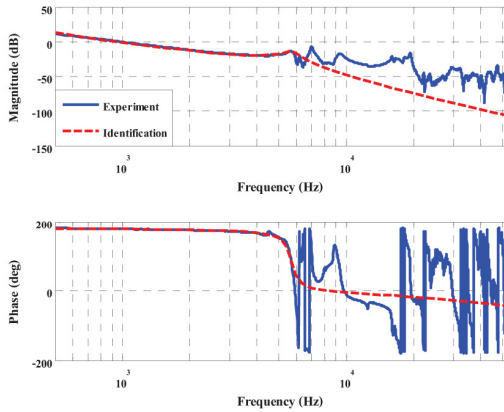
ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (mean square error)

$$\mathcal{E}_k = E\{\tilde{e}_k^2\} \quad (6)$$

และสามารถประมาณค่า y ได้จากค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยน้อยสุด มีค่าเท่ากับ $\tilde{\mathcal{E}}_k = \tilde{e}_k^2$ [2]

จากวิธีการ steepest descent โดย x_k เป็นค่าปัจจุบัน x_{k-1} เป็นค่าในอดีต และ $\nabla f(x)$ เป็นค่าประมาณของ gradient

$$x_k = x_{k-1} - \mu \nabla f(x) \quad (7)$$



รูปที่ 4 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของ VCM

ดังนั้นในการปรับค่าอัตราขยายของตัวควบคุมฟีดแบ็ค เป็นไปตามวิธีการ gradient descent [7] ดังแสดงในสมการ (8)

$$\begin{aligned} Kp_k &= Kp_{k-1} - \mu_1 \nabla \tilde{e}_k = Kp_{k-1} - 2\mu_1 \tilde{e}_k \frac{\partial \tilde{e}}{\partial Kp} \\ Ki_k &= Ki_{k-1} - \mu_2 \nabla \tilde{e}_k = Ki_{k-1} - 2\mu_2 \tilde{e}_k \frac{\partial \tilde{e}}{\partial Ki} \\ Kd_k &= Kd_{k-1} - \mu_3 \nabla \tilde{e}_k = Kd_{k-1} - 2\mu_3 \tilde{e}_k \frac{\partial \tilde{e}}{\partial Kd} \end{aligned} \quad (8)$$

และแทนสมการ (5) ลงในสมการ (8) แล้วหาอนุพันธ์เทียบกับอัตราขยาย Kp, Ki, Kd จะได้สมการการปรับตัวของอัตราขยาย ดังแสดงในสมการ (9)

$$\begin{aligned} Kp_k &= Kp_{k-1} + 2\mu_1 \tilde{e}_k e_k \\ Ki_k &= Ki_{k-1} + 2\mu_2 \tilde{e}_k \int e_k dt \\ Kd_k &= Kd_{k-1} + 2\mu_3 \tilde{e}_k \frac{de_k}{dt} \end{aligned} \quad (9)$$

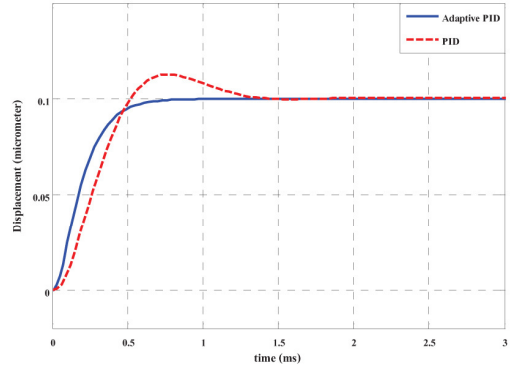
เมื่อ μ_1, μ_2, μ_3 เป็นอัตราการเรียนรู้ (learning rate)

ในส่วนของแบบจำลองอ้างอิง ออกแบบโดยใช้รูปแบบของสมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบปิด ดังแสดงในสมการ (10) ซึ่ง ω_n เป็นความถี่ธรรมชาติของระบบปิดของระบบ VCM และ ζ เป็นค่าความหน่วง (damping ratio) ของระบบ

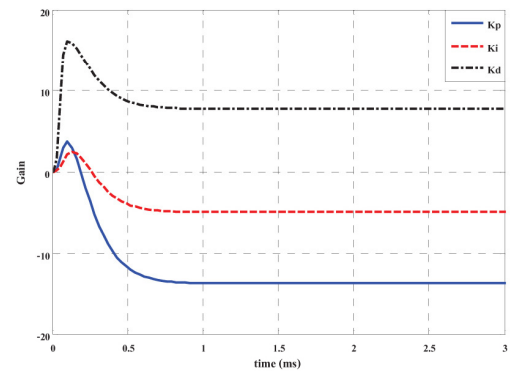
$$G(s)_{\text{model}} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (10)$$

4. ผลการจำลองการทำงาน

การจำลองการทำงานของระบบควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งจะทดสอบตัวควบคุมฟีดแบ็คแบบปรับตัวได้ ในส่วนของผลตอบสนองของระบบและผลตอบสนองสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่งเมื่อหัวอ่าน/เขียนเคลื่อนที่ไปตามแนวข้อมูล



รูปที่ 5 ผลตอบสนองของตัวควบคุมระบบ



รูปที่ 6 ค่าอัตราขยายของตัวควบคุมฟีดแบ็คแบบปรับตัวได้

การจำลองการทำงานจะต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่จะควบคุม โดยการหาเอกลักษณ์ของระบบจากผลการทดสอบจริงตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1 ผลการทดสอบวัดจากฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ขนาด 3.5 นิ้ว มีความจุข้อมูล 230 kTPI และแผ่นจานหมุนที่ความเร็ว 7200 rpm และเทียบกับผลการหาเอกลักษณ์ของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งสนใจในช่วงความถี่ 500 Hz – 7 kHz เนื่องจากตัว VCM ทำงานที่ความถี่ไม่สูงมาก โดยที่ความถี่ 5.7 kHz เป็นผลมาจาก flex cable [5]

4.1 ผลตอบสนองของระบบ

การทดสอบผลตอบสนองของระบบจะใช้ตัวควบคุมฟีดแบ็คแบบปรับตัวได้เปรียบเทียบกับตัวควบคุมฟีดแบ็คแบบอัตราขยายคงที่ โดยพารามิเตอร์ต่างๆ ของตัวควบคุมฟีดแบ็คแบบอัตราขยายคงที่หาได้จากวิธีการของซีเกลอร์-นิโคลส์ (ziegler-nichols) ซึ่งได้ค่า $K_p = 0.0262$, $K_i = 10.06$, $K_d = 6.52e-6$ และ $K = 25$ ส่วนพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในตัวควบคุมฟีดแบ็คแบบปรับตัวได้ที่กล่าวในหัวข้อ 3 มีดังต่อไปนี้ เลือกให้ค่า $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$ ค่าเริ่มต้น $K_p(0) = K_i(0) = K_d(0) = 0$ ค่า $\omega_n = 10$ krad/s และค่า $\zeta = 1$ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5 และตารางที่ 1 ส่วนผลตอบสนองของค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแสดงในรูปที่ 6

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพของตัวควบคุมระบบ

Controller	Rise time (ms)	Settling time (ms)	Overshoot (%)
PID	0.34	1.3	12.7
Adaptive PID	0.35	0.6	0

จากรูปที่ 6 เป็นผลตอบสนองของค่าอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ ซึ่งอัตราขยายแต่ละตัวจะปรับตัวเองเพื่อให้สัญญาณขาออกมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณอ้างอิง โดยอัตราขยาย K_p จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อให้ผลตอบสนองที่ไวขึ้น อัตราขยาย K_i จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อให้ผลตอบสนองเข้าสู่ค่าที่ต้องการได้เร็วขึ้น ส่วนอัตราขยาย K_d จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพื่อลดผลตอบสนองพุ่งเกิน แล้วอัตราขยายแต่ละตัวก็ค่อยๆ ลดลงจนเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่งเมื่อระบบเข้าสู่ค่าที่ต้องการ

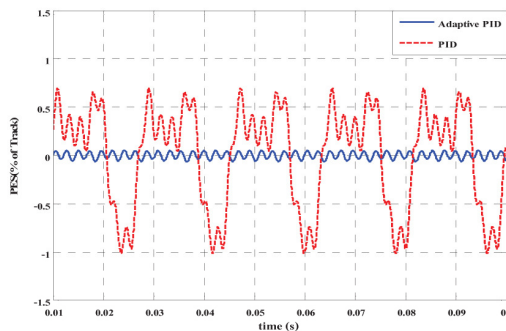
4.2 ผลตอบสนองสัญญาณความผิดพลาดของตำแหน่ง

การทดสอบค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง จะทดสอบโดยการให้สัญญาณอ้างอิงมีค่าเท่ากับศูนย์ ($r = 0$) แล้วป้อนสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นซ้ำทีละวินาทีในหัวข้อ 2.2 ที่สัญญาณขาออก (y) ของระบบ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะวิเคราะห์หารูปของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (3σ) ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7

จากรูปที่ 7 พบว่าค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของตัวควบคุมที่นำเสนอให้ค่า $3\sigma_{\text{adaptive PID}} = 5.4764\%$ of Track ส่วนตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตราขยายคงที่ให้ค่า $3\sigma_{\text{PID}} = 7.5811\%$ of Track (เมื่อเวลาผ่านไป 0.1 วินาที)

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้ สำหรับการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ตามแนวข้อมูล จากผลการจำลองการทำงานของระบบ พบว่าในการทดสอบผลตอบสนองของตัวควบคุม ตัวควบคุมที่นำเสนอไม่มีการตอบสนองพุ่งเกิน เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตราขยายคงที่ และส่วนการทดสอบค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากการรบกวน ตัวควบคุมที่นำเสนอให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งลดลงร้อยละ 24 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีแบบอัตราขยายคงที่ เนื่องจากตัวควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้สามารถปรับอัตราขยายเพื่อให้สัญญาณขาออกมีลักษณะเหมือนกับสัญญาณอ้างอิง ดังนั้นวิธีการควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ไปตามแนวข้อมูลได้



รูปที่ 7 ผลตอบสนองค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Al Mamun, G. Guo and C. Bi, *Hard Disk Drive Mechatronics and Control*, CRC Press, 2006.
- [2] K. Kalyanam and T.-C. Tsao, “Experimental Study of Adaptive-Q Control for Disk Drive Track-Following Servo Problem,” *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 15, no. 3, pp. 480–491, Jun. 2010.
- [3] T. Trisuwannawat, J. Chaoraingern, and A. Numsomran, “Following Control of Hard Disk Drive Using Derivative State Constrained Optimal H_2 Controls,” *10th International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 1275–1280, 2010.
- [4] N. O. Perez-Arancibia, T.-C. Tsao, and J. S. Gibson, “Saturation-Induced Instability and Its Avoidance in Adaptive Control of Hard Disk Drives,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 368–382, Mar. 2010.
- [5] J. Auysakul and P. Smithmaitrie, “System Identification and PID Controller of The Dual Stage Actuator for Hard Disk Drive Positioning,” *International Data Storage Technology Conference*, pp. 238-241, 2010.
- [6] B. M. Chen, T. H. Lee, K. Peng and V. Venkataramanan, *Hard Disk Drive Servo Systems*, New York: Springer-Verlag, 2nd ed., 2006.
- [7] N. Trong Tai and K. Kwan Ahn, “Adaptive Proportional–Integral–Derivative Tuning Sliding Mode Control for a Shape Memory Alloy Actuator,” *Smart Materials and Structures*, *IOP Science*, 2011.

ประวัติผู้เขียนบทความ



เกียรติศักดิ์ เต็งช่วย จบการศึกษา วศ.บ. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัจจุบันกำลังศึกษา ระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายเกียรติศักดิ์ เส็งช่วย		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5410120023		
วุฒิการศึกษา			
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2553

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนสำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรีและบัณฑิตศึกษาเพื่อพัฒนาเป็นอาจารย์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

เกียรติศักดิ์ เส็งช่วย, วุทธิ วิชกุล, พฤทธิกร สมิตไมตรี และณัฐชา จินดาเพ็ชร, “การควบคุมพีไอดีแบบปรับตัวได้สำหรับการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ได้รฟตามแนวข้อมูล,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON-35), นครนายก, หน้า 727-730, 12-14 ธันวาคม 2555.