

การออกแบบตัวควบคุมสำหรับตัวกระตุ้นแบบชั้นคู่ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
ด้วยทฤษฎีการป้อนกลับเชิงปริมาณร่วมกับวิธีการออกแบบพีคิว
Controller Design for Dual Stage Actuator in Hard Disk Drive
Using Quantitative Feedback Theory with PQ Design Method

จกัต เบญจเลิศยานนท์*, และ วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย

ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน (CRVLAB) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

*ติดต่อ: tac_m@msn.com

บทคัดย่อ

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์หรือจานบันทึกแบบแข็งเป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูลที่มีความสำคัญในระบบคอมพิวเตอร์ สมรรถนะของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มาจากหลายปัจจัย หนึ่งในนั้นคือความสามารถในการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียน ในช่วงเวลาไม่นานมานี้ อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้มีการนำตัวกระตุ้นแบบชั้นคู่(Dual-Stage Actuator, DSA) เข้ามาใช้งาน ทำให้ระบบที่ได้มีค่าแบนด์วิธที่สูงขึ้นซึ่งทำให้สามารถเพิ่มความหนาแน่นข้อมูลขึ้นได้มาก อย่างไรก็ตาม DSA เป็นระบบที่ประกอบด้วยสองอินพุตและหนึ่งเอาต์พุต (Dual-Input Single-Output, DISO) ซึ่งทำให้ตัวควบคุมที่ใช้จำเป็นต้องควบคุมอุปกรณ์ทั้งสองได้อย่างเหมาะสม ให้สมรรถนะการทำงานที่ดี ทนต่อความไม่แน่นอน และสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้น บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับ DSA ด้วยการออกแบบด้วยทฤษฎี ป้อนกลับเชิงปริมาณ (QFT) ร่วมกับวิธีการออกแบบพีคิว (PQ design method) โดยการอาศัยคุณสมบัติของ QFT ในการออกแบบระบบที่มีความไม่แน่นอนเพื่อสร้างขอบเขตการทำงานของตัวควบคุมในการควบคุมตัวกระตุ้นแบบ ชั้นคู่ และวิธีการออกแบบพีคิวที่อาศัยคุณสมบัติของระบบสองอินพุตหนึ่งเอาต์พุตที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าระบบ หลายอินพุตหลายเอาต์พุต (Multi-Input Multi-Output, MIMO) การออกแบบด้วยวิธีพีคิวจะพิจารณาความสัมพันธ์ ระหว่างเกนและเฟสของสองระบบย่อย โดยรวมเข้ากันให้อยู่ในรูปของระบบหนึ่งอินพุตหนึ่งเอาต์พุต (SISO) โดยที่ ตัวกระตุ้นหยาบจะมีเกนสูงที่ความถี่ต่ำและตัวกระตุ้นละเอียดจะมีเกนสูงที่ความถี่สูงขึ้น หลังจากนั้นจึงทำการ ออกแบบสมรรถนะของระบบโดยรวมด้วย QFT จากผลการจำลองพบว่าระบบป้อนกลับที่ได้มีเสถียรภาพและทนต่อ ความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ ผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นของอยู่ในช่วงโอเวอร์ชูต 5% และใช้เวลาเข้าสู่สถานะ อยู่ตัว 5% (5% Settling time) ทั้งสิ้น 0.41 มิลลิวินาที

คำหลัก: จานบันทึกข้อมูลแบบแข็ง, พีคิว, ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ

Abstract

A hard disk drive (HDD) is an important data storage device in computer systems. The performance of the hard disk drive depends on various factors, for example, read/write head positioning control. Recently,

DRC-2027

HDD industries have adopted the dual-stage actuator (DSA) in their products. It provides a higher system bandwidth which is able to increase data density. DSA consists of two inputs and one output called Dual-Input Single-Output (DISO). An appropriate controller for both devices is required for good performance and robustness against uncertainty and disturbance. In this paper, a quantitative feedback control with the PQ design method is proposed for the DSA control. The QFT is applied to deal with the control system with uncertainty by generating the boundaries of allowed regions, and the PQ design method is for conversion of the DISO system to equivalent SISO system. The benefit of the proposed scheme is that it provides less complicated design than Multi-Input Multi-Output (MIMO) design method. The PQ design method considers the relationship between gain and phase of the two sub-systems. The two sub-systems are combined into one SISO system, whose coarse actuator has high gain at low frequencies and fine actuator has high gain at higher frequencies. Afterward, the overall performance of the combined system is designed by the QFT. Simulation results show that the feedback system is stable under the parameter uncertainty. The step response of the system is well within the 5% overshoot and 0.41 millisecond of 5% settling time specifications.

Keywords: Hard disk drive, PQ design, Quantitative feedback

1. บทนำ

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูลที่มีความสำคัญในระบบคอมพิวเตอร์ ประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มาจากหลายปัจจัย หนึ่งในนั้นคือความสามารถในการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียน ซึ่งมีการปรับปรุงการควบคุมระบบเซอร์โวสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มาโดยลำดับ เช่น การนำเทคนิค Multirate มาใช้ในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดการคำนวณระหว่างการทำงาน [1] การเพิ่มตัวกระตุ้นละเอียดเพื่อช่วยในการเพิ่มแบนด์วิธของระบบควบคุม การปรับปรุงตัวควบคุมเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนต่างๆ เป็นต้น [2]

ในช่วงเวลาไม่นานมานี้ อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้มีการนำตัวกระตุ้นแบบขั้นคู่ (Dual Stage Actuator, DSA) เข้ามาใช้ในงาน โดยทำการเพิ่มตัวกระตุ้นแบบละเอียด เพื่อให้แบนด์วิธของระบบมีค่าที่สูงขึ้น เนื่องจาก DSA เป็นระบบที่ประกอบด้วยสองอินพุตและหนึ่งเอาต์พุต (Dual-Input Single-Output, DISO) ทำให้ตัวควบคุมที่ใช้จำเป็นต้องควบคุมอุปกรณ์ทั้งสองได้อย่างเหมาะสมที่ความถี่ต่างๆกันไปตามข้อกำหนดของตัวกระตุ้นแต่ละชนิด

เพื่อที่จะทำให้ได้ระบบควบคุมที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ทนต่อความไม่แน่นอนและสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้น นอกจากนั้นตัวควบคุมที่ได้ไม่ควรมีอันดับที่สูงจนเกินไป เนื่องจากอาจจะส่งผลต่อทรัพยากรและต้นทุนที่ต้องใช้ในการผลิต

โดยทั่วไปตัวควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะแบ่งเป็นสองหน้าที่หลักคือการค้นหาแทรค (Track-Seeking) และการติดตามแทรค (Track-Following) สำหรับการค้นหาแทรคโดยทั่วไปแล้วจะใช้การควบคุมเวลาที่เหมาะสมและรวดเร็ว เช่น วิธี Proximate Time Optimal Servomechanism (PTOS) [3], SMART เป็นต้น สำหรับการติดตามแทรคจะพิจารณาความทนทานต่อสิ่งรบกวน (Robustness) วิธีการควบคุมที่มีการศึกษาเช่น master-slave, u-synthesis, วิธี PQ, H2-Hinf เป็นต้น

สำหรับวิธีการออกแบบตัวควบคุมสำหรับ DSA มีด้วยกันหลากหลายวิธี โดยทั่วไปจะแบ่งออกได้เป็นสองกลุ่มหลัก [4] คือ

1. Decoupled หรือ sequential single input single output (SISO) เช่น วิธี Master-Slave วิธี

DRC-2027

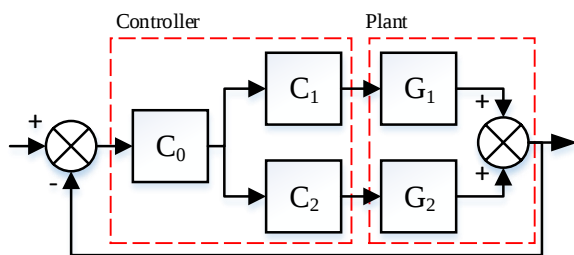
Decoupled Design วิธี PQ วิธี direct parallel design เป็นต้น

2. Modern optimal design methodologies เช่น Linear Quadratic Gaussian (LQG), LQG/loop transfer Recovery (LTR), H_∞ , μ -synthesis, Mixed H_2/H_∞ เป็นต้น วิธีนี้จะทำให้ได้ตัวควบคุมสำหรับตัวกระตุ้นทั้งสองพร้อมๆกัน

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับ DSA ด้วยการออกแบบด้วยทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณ (QFT) ร่วมกับวิธีการออกแบบพีคิว (PQ design method) โดยการอาศัยคุณสมบัติของ QFT ในการออกแบบระบบที่มีความไม่แน่นอนเพื่อสร้างขอบเขตการทำงานของตัวควบคุมในการควบคุมตัวกระตุ้นแบบขั้นคู่ และวิธีการออกแบบพีคิวที่อาศัยคุณสมบัติของระบบสองอินพุตหนึ่งเอาต์พุต

2. วิธีการออกแบบพีคิว

วิธีพีคิวถูกเสนอโดย Schroeck และ Messner [5] เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบที่มีหนึ่งอินพุตสองเอาต์พุตหรือมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบสองอินพุตหนึ่งเอาต์พุต (DISO)

รูปที่ 1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบ Dual-input single output, DISO ในที่นี้ G_1 แทนตัวกระตุ้นละเอียด (Fine actuator) ซึ่งเป็นตัวกระตุ้นประเภท Piezo electric transducer (PZT) G_2 แทนตัวกระตุ้นหยาบ (Coarse actuator) หรือ Voice coil motor (VCM), C_1 และ C_2 แทนตัวควบคุมสำหรับตัวกระตุ้นทั้งสอง C_0 แทนตัวควบคุมในการเพิ่มสมรรถนะของทั้งระบบ

โดยทั่วไป วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีคิวสำหรับระบบ DISO จะประกอบขึ้นตอนการออกแบบสองส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นการออกแบบความสัมพันธ์กันของเอาต์พุตที่เกิดขึ้นจากตัวกระตุ้นทั้งสองที่มีความถี่ต่างๆ โดยแบ่งเป็นขั้นตอนย่อย คือ

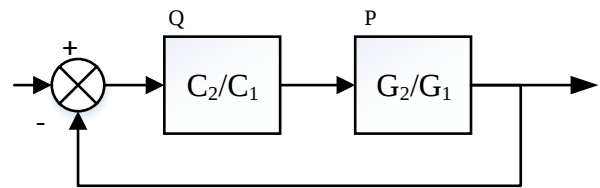
ขั้นตอนที่ 1 กำหนด

$$P(s) = \frac{G_2(s)}{G_1(s)}, Q(s) = \frac{C_2(s)}{C_1(s)} \quad (1)$$

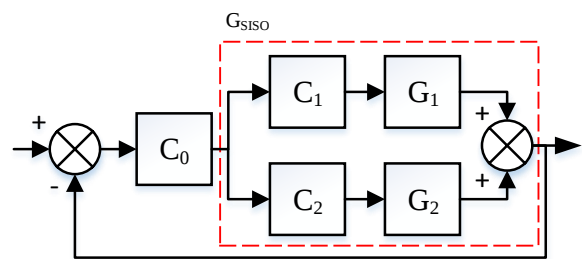
จะเห็นว่าโพลของระบบป้อนกลับ PQ ดังแสดงในรูปที่ 2 คือซีโรของระบบ G_{SISO} ดังแสดงในรูปที่ 3 หรือก็คือ

$$PQ_{CL}(s) = \frac{C_1 G_1 C_2 G_2}{C_1 G_1 + C_2 G_2} \quad (2)$$

$$G_{SISO}(s) = C_1(s)G_1(s) + C_2(s)G_2(s) \quad (3)$$



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของระบบ PQ



รูปที่ 3 G_{SISO}

การออกแบบ $Q(s)$ เพื่อให้ระบบป้อนกลับ PQ มีเสถียรภาพจึงมีผลให้ซีโรของระบบ G_{SISO} มีเสถียรภาพ

ขั้นที่ 2 ทำการออกแบบ $Q(s)$ เพื่อที่จะทำให้ระบบป้อนกลับ PQ มีเสถียรภาพ ความถี่ที่เส้น PQ ลากผ่าน 0 dB เรียกว่า hand-off frequency โดยที่ความถี่

DRC-2027

ที่ต่ำกว่า hand-off frequency G_2 จะมีอำนาจต่อผลตอบสนองของระบบเหนือกว่า G_1 ขณะที่ความถี่ที่สูงกว่า G_1 จะมีอำนาจต่อผลตอบสนองของระบบเหนือกว่า G_2 ค่าเฟสแมจิ้นจะแสดงถึงขนาดของการเสริมกันหรือหักล้างกันของเอาต์พุตเนื่องจากตัวกระตุ้นทั้งสองที่ hand-off frequency ซึ่งควรจะมีค่ามากกว่า 60 องศา เพื่อให้มั่นใจได้ว่าเอาต์พุตจากตัวกระตุ้นทั้งสองจะไม่เกิดการหักล้างกัน

ขั้นที่ 3 กำหนด C_1 และ C_2 โดยที่ค่าที่กำหนดสัมพันธ์กับค่า Q ตามสมการที่ (1)

ส่วนที่สองจะทำการออกแบบ C_0 สำหรับสมรรถนะโดยรวมของระบบป้อนกลับทั้งระบบ โดยพิจารณาเสมือนการออกแบบระบบ SISO ที่มี G_{SISO} แทนระบบที่ต้องการควบคุม ดังรูปที่ 3 โดยในบทความนี้จะใช้ QFT loop shaping ในการออกแบบในส่วนนี้

3. ทฤษฎีการป้อนกลับเชิงปริมาณ

การออกแบบด้วยทฤษฎีการป้อนกลับเชิงปริมาณ (Quantitative Feedback Theory) ถูกสร้างขึ้นโดย Isaac Horowitz ในช่วงประมาณปี ค.ศ. 1959 ซึ่งเป็นวิธีที่ถูกพัฒนาเพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุมที่ทนทานต่อความไม่แน่นอนของระบบและทนต่อสัญญาณรบกวน QFT ถูกปรับปรุงเพื่อให้สามารถรองรับการออกแบบระบบประเภทต่างๆ เช่น Single-input single-output Multi-input multi-output ระบบเชิงเส้น ระบบไม่เชิงเส้น เป็นต้น และได้ถูกนำมาใช้ทำงานกับระบบจริงในด้านต่างๆ ดังรวบรวมใน [6]

ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุม QFT โดยย่อ ดังนี้

1. จากข้อมูลของระบบที่ต้องการควบคุม (Plant) สามารถทำการสร้างแบบจำลองของระบบ และสามารถกำหนดเทมเพลตซึ่งเกิดจากการคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง จากนั้นจึงทำการเลือก Nominal plant จากเทมเพลตเพื่อใช้ในการออกแบบ

2. กำหนดข้อกำหนด (Specification) ของระบบและแปลงให้อยู่ในรูปของโดเมนความถี่ แต่ละข้อกำหนดที่

กำหนดและแต่ละความถี่ที่เลือกจะสามารถสร้างเส้นขอบเขตบนแผนภูมิโนลิสต์

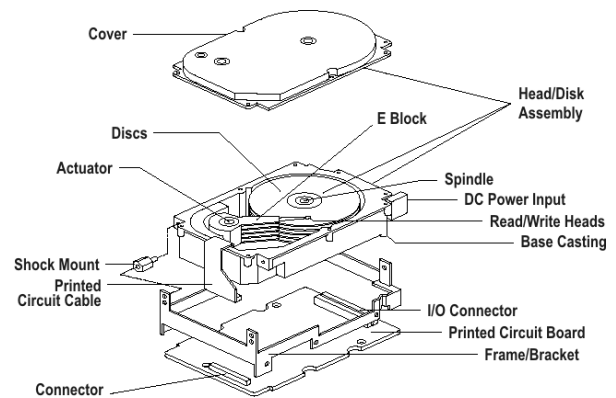
3. ทำการออกแบบตัวควบคุม G โดยการ Loop shaping ฟังก์ชัน L บนแผนภูมิโนลิสต์

4. ออกแบบ Pre-filter F เพื่อออกแบบผลตอบสนองต่อการติดตามสัญญาณ (Tracking)

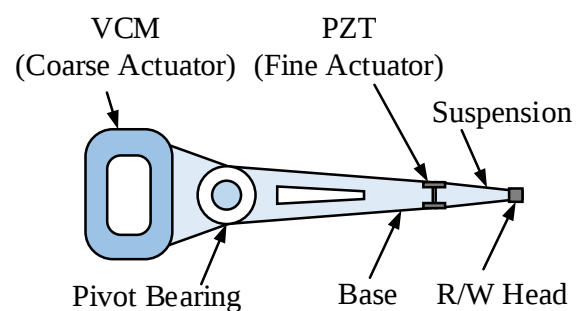
5. ทำการวิเคราะห์โดยการจำลองการทำงานเพื่อตรวจสอบความถูกต้องบนตำแหน่งต่างๆของเทมเพลต ดูข้อมูลขั้นตอนและรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ [7]

4. แบบจำลองระบบ

ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญดังรูปที่ 4 และ DSA มีโครงสร้างดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ส่วนประกอบที่สำคัญของฮาร์ดดิสก์ [8]



รูปที่ 5 Dual-Stage Actuator (DSA)

ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะมีข้อมูลในการระบุตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียน โดยจะถูกฝังตัวบนผิวของแผ่นจานบันทึกข้อมูล หัวอ่านจะรับค่าตำแหน่งป้อนกลับในรูปของสัญญาณคลาดเคลื่อนจากจุดกึ่งกลางแทรค

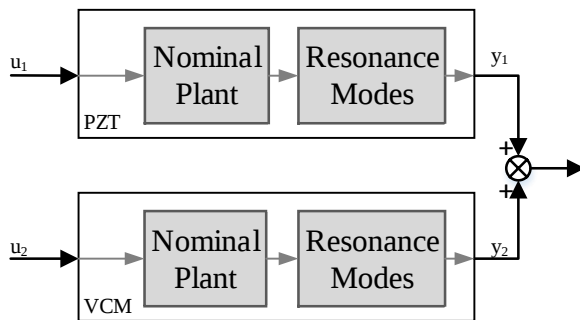
DRC-2027

(Position Error Signal, PES) ในบทความนี้จะใช้ระบบควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียนโดยใช้ข้อมูลจาก Benchmark Problem จาก [9] ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้จากการกระบวนการ identification ของตัวกระตุ้นทั้งสอง

4.1 แบบจำลองตัวกระตุ้นฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

(Plant Model)

พลศาสตร์ของตัวกระตุ้น VCM และ PZT ถูกอธิบายด้วยสมการอนุพันธ์อันดับสองร่วมกับสมการอธิบายเรโซแนนซ์โหมดของระบบดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 พลศาสตร์ของระบบควบคุม DSA

โดยที่สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกระตุ้นละอียด (PZT) คือ

$$G_1 = 0.5 \prod_{i=1}^5 G_{1,r,i} \quad (4)$$

$G_{1,r,i}$ ในสมการ (4) แทนโหมดของความถี่เรโซแนนซ์ของ PZT ประกอบด้วย

$$G_{1,r,1} = \frac{0.7938s^2 + 767.9s + 1.189 \times 10^9}{s^2 + 344.8s + 1.189 \times 10^9},$$

$$G_{1,r,2} = \frac{0.955s^2 + 978.6s + 1.605 \times 10^9}{s^2 + 400.6s + 1.605 \times 10^9},$$

$$G_{1,r,3} = \frac{0.8912s^2 + 1013s + 1.843 \times 10^9}{s^2 + 1073s + 1.843 \times 10^9},$$

$$G_{1,r,4} = \frac{0.9772s^2 + 460.1s + 2.167 \times 10^9}{s^2 + 465.5s + 2.167 \times 10^9},$$

$$G_{1,r,5} = \frac{2.376 \times 10^9}{s^2 + 487.4s + 2.376 \times 10^9}$$

สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวกระตุ้นหยาบ (VCM) คือ

$$G_2 = \frac{6.4013 \times 10^7}{s^2} \prod_{i=1}^4 G_{2,r,i} \quad (5)$$

$G_{2,r,i}$ ในสมการ (5) แทนโหมดของความถี่เรโซแนนซ์ของ VCM ประกอบด้วย

$$G_{2,r,1} = \frac{0.912s^2 + 457.4s + 1.433 \times 10^8}{s^2 + 359.2s + 1.433 \times 10^8},$$

$$G_{2,r,2} = \frac{0.7586s^2 + 962.2s + 2.491 \times 10^8}{s^2 + 789.1s + 2.491 \times 10^8},$$

$$G_{2,r,3} = \frac{9.917 \times 10^8}{s^2 + 1575s + 9.917 \times 10^8},$$

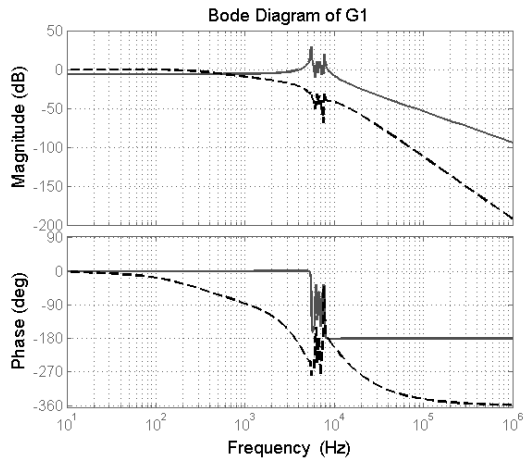
$$G_{2,r,4} = \frac{2.731 \times 10^9}{s^2 + 2613s + 2.731 \times 10^9},$$

โดยที่ u แทนสัญญาณที่ป้อนให้แก่ตัวกระตุ้น (โวลต์) และ y แทนตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียน (ไมครอน) ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวกระตุ้นเมื่อทำการชดเชยความถี่เรโซแนนซ์โหมดความถี่ต่ำแสดงได้ดังรูปที่ 7 และ รูปที่ 8

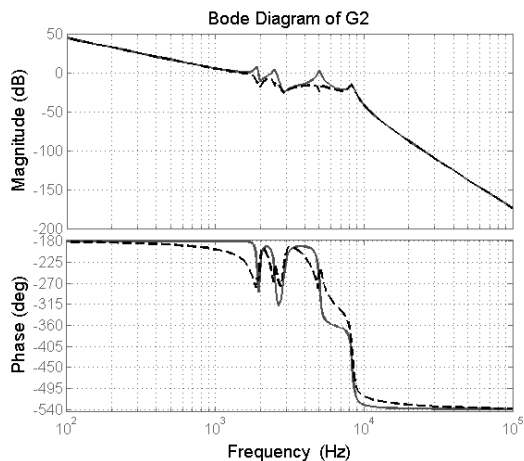
กำหนดข้อกำหนดของระบบควบคุมดังต่อไปนี้

1. สัญญาณควบคุม VCM มีค่าอยู่ระหว่าง ± 3 โวลต์
2. การเคลื่อนที่ของ PZT มีค่าไม่เกิน 1 ไมครอน และจะต้องกลับมายังตำแหน่งตั้งต้นก่อนการควบคุมไปยังตำแหน่งถัดไป
3. โอเวอร์ชูตและอันเดอร์ชูตไม่เกิน 0.05 ไมครอน (5% track pitch)
4. เกนมาร์จินไม่น้อยกว่า 6dB เฟสมาจินไม่น้อยกว่า 30 องศา

DRC-2027



รูปที่ 7 Bode diagram ของ G_1 (เส้นทึบและเส้นประ แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ ก่อนและหลัง ทำการชดเชยด้วยตัวกรองนอตช์และตัวชดเชย Phase lead)



รูปที่ 8 Bode diagram ของ G_1 (เส้นประแสดง G_1 ที่ทำการชดเชยด้วยตัวกรองนอตช์)

4.2 แบบจำลองสัญญาณรบกวน (Disturbance Model)

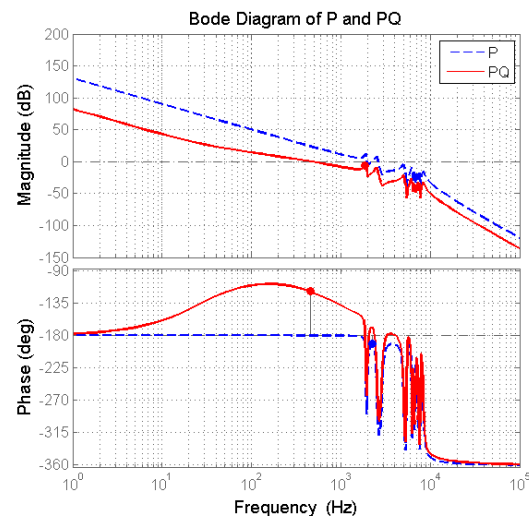
สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบที่สำคัญ ได้แก่ Non repeatable runout (NRRO), Repeatable runout (RRO), noise เป็นต้น

บทความนี้จะพิจารณา RRO เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบ ซึ่ง RRO เกิดจากความคลาดเคลื่อนของกระบวนการ Servo Track Writer ทำให้วงแหวนผิดเพี้ยนไปจากที่ควรจะเป็น โดยจะให้สัญญาณ RRO ประกอบด้วยผลบวกของสัญญาณไซน์ที่มีความถี่ต่างๆ คือ

$$w(t) = 0.5 + 0.1 \cos(100\pi t) + 0.05 \sin(220\pi t) + 0.02 \sin(440\pi t) + 0.01 \sin(880\pi t) \quad (6)$$

5. การออกแบบตัวควบคุม

ในหัวข้อนี้จะทำการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบขั้นคู่ที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 4 โดยใช้ทฤษฎีป้อนกลับเชิงปริมาณร่วมกับวิธีการออกแบบพีคิวิจากรูปที่ 2 สามารถกำหนดตัวแปร P และ Q จากสมการ (1) กำหนด Q ให้มีลักษณะ Low-pass เพื่อให้มีความซับซ้อนที่น้อยจะกำหนดให้ C_1 มีค่าเท่ากับ 1 และให้ C_2 เท่ากับ Q คือ $C_1 = 1$ และ $C_2 = k(\tau_2 s + 1)/(\tau_1 s + 1)$ โดยที่ τ_1 และ τ_2 มีค่า 6.1×10^{-3} และ 0.1675×10^{-3} ตามลำดับ k เป็นอัตราขยายขนาด 0.004 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของระบบวงปิด PQ แสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 Bode diagram แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของ P (เส้นประ) และ PQ (เส้นทึบ)

จากรูปที่ 9 Q ที่ได้ทำการออกแบบทำให้ระบบ PQ ที่ได้มีความถี่ที่ระบบตัดผ่านตำแหน่ง 0 dB มีค่า 460 Hz เฟสมาร์จิน 60.7 องศา และ เกนมาร์จิน 6.34 dB

ทำการออกแบบตัวชดเชย C_0 โดยใช้ขั้นตอนออกแบบ QFT loop shaping โดยพิจารณา G_{SISO} เป็น

DRC-2027

Plant ของระบบตามรูปที่ 10 และ ออกแบบ Prefilter (F) ตามรูปที่ 11

ตัวชดเชยทั้งระบบที่ทำการออกแบบประกอบด้วย

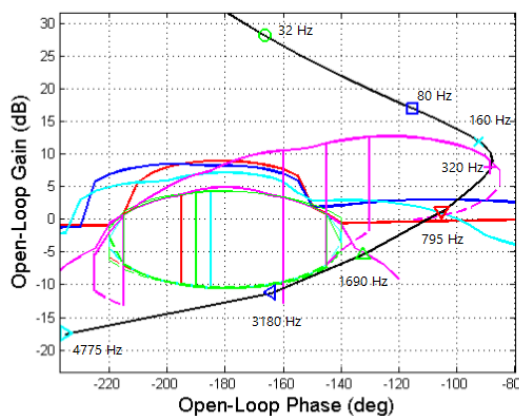
$$C_1 = 1$$

$$C_2 = \frac{2.5 \times 10^{-5}s + 0.004}{1.675 \times 10^{-4}s + 1}$$

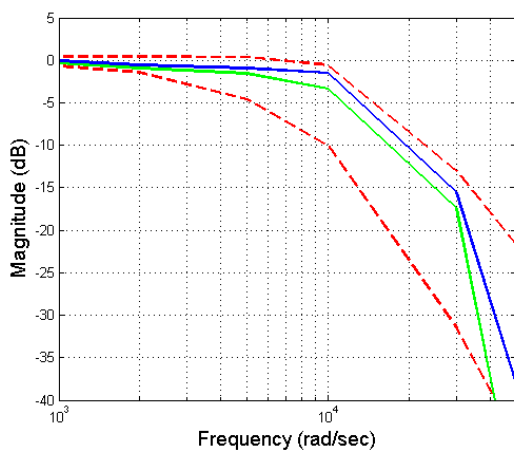
$$C_0 = \frac{2.269s + 376.3}{s}$$

$$F = \frac{0.9408s + 3097}{3097}$$

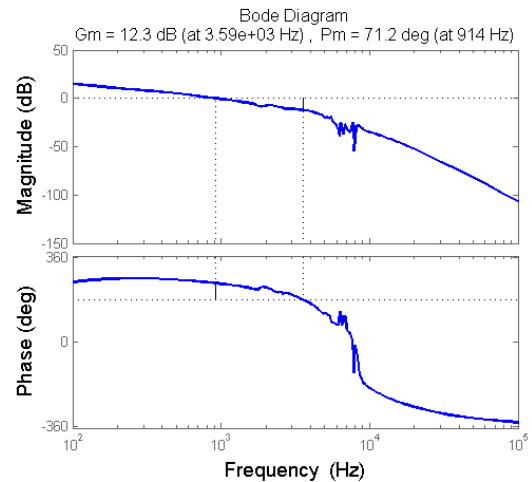
และตัวกรองนอตช์ในการกรองสัญญาณช่วงความถี่เรโซแนนซ์ความถี่ต่ำ



รูปที่ 10 Controller loop shaping



รูปที่ 11 Prefilter loop shaping

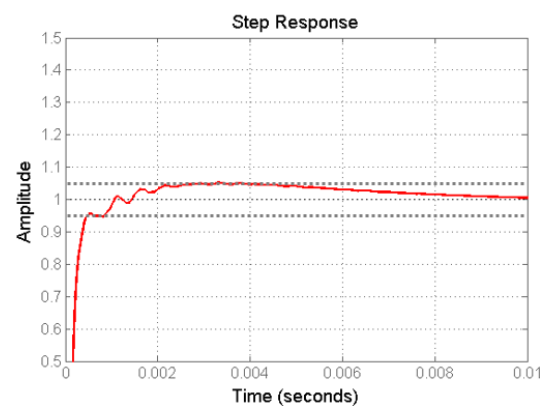


รูปที่ 12 Bode Diagram ของระบบเปิด C_0G_{siso}

6. การจำลอง

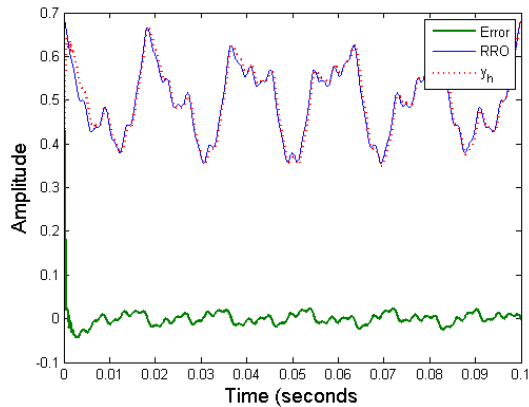
สัญญาณแบบขั้น (Step) ขนาด 1 ไมครอน ถูกใช้ในการจำลอง เพื่อแทนการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียนไปยังแทรคใกล้เคียงที่กำหนดบนแผ่นจานบันทึก ข้อมูล รูปที่ 13 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้นที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นไปตามข้อจำกัดที่กำหนดไว้ โดยมีช่วง 5% Settling time ที่ 0.41 ms และโอเวอร์ชูต 5%

รูปที่ 14 แสดงผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวน (6) ซึ่งระบบสามารถรักษาเสถียรภาพไว้ได้โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งหัวอ่านน้อยกว่า 0.02 ไมครอน ซึ่งเป็นขอบเขตที่หัวอ่าน/เขียนสามารถทำงานได้ถูกต้อง



รูปที่ 13 ผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบขั้น

DRC-2027



รูปที่ 14 ผลตอบสนองต่อสัญญาณรบกวน

6. สรุป

วิธีการออกแบบการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน/เขียน ด้วยวิธีที่นำเสนอทำให้สามารถออกแบบระบบด้วยวิธี QFT สำหรับระบบ DISO โดยใช้ความสัมพันธ์ของการตอบสนองต่อความถี่ของตัวกระตุ้นทั้งซึ่งสามารถออกแบบด้วยวิธีการพีค การออกแบบจะเปลี่ยนระบบ DISO ให้อยู่ในรูปของระบบ SISO ด้วยขั้นตอนการออกแบบพีค แล้วจึงออกด้วยวิธี QFT ซึ่งสามารถออกแบบระบบให้ทนต่อสัญญาณรบกวนและความไม่แน่นอนของแบบจำลองของระบบ จากการจำลองระบบแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็วตามที่ได้กำหนดไว้โดยข้อจำกัด และทนต่อสัญญาณรบกวนที่ได้ป้อนให้กับระบบ

7. กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก วิทยาลัย วิศวกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ศูนย์ เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (HDD-15-52-07D)

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Chiang, W.W. (1990). Multirate state-space digital controller for sector servo systems, paper presented in *Decision and Control*, Honolulu, HI.

[2] Mamun, A.A., Guo, G. and Bi, C. (2005). *Hard Disk Drive: Mechatronics and Control*, CRC Press, New York.

[3] Hredzak, B., Hermann, G. and Guoziao, G. (2006). A proximate-time-optimal-control design and its application to a hard disk drive dual-stage actuator systems, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 4(2), pp. 1708-1715.

[4] Bhushan, B. (2007). *Springer Handbook of Nanotechnology*, Springer, New York.

[5] Schroeck, S.J. and Messner, W.C. (1999). On controller design for linear time-invariant dual-input single-output systems, paper presented in *American Control Conference*, San Diego, CA.

[6] Houppis, C.H. and Ramussen, S.J. (2005). *Quantitative Feedback Theory: Fundamental and Applications*, CRC Press, New York.

[7] Yaniv, O. (1999). *Quantitative feedback design of linear and nonlinear control systems*, Kluwer, Massachusetts.

[8] KEPCIL Design (2012). *Hard Disk Inside*, URL: <http://www.kepcil.net/kepcilin/harddisk/hdinside.htm>

[9] Chen, B.M., Lee, T.H., Peng, K. and Venkataramanan, V. (2006). *Hard disk drive servo systems*, Springer, London.