

## การควบคุมป้อนกลับเชิงปริมาณของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

### Quantitative Feedback Control of Hard Disk Actuator

ภูวดล โพร้แดง<sup>1\*</sup> และ วิทิต ฉัตรรัตนกุลชัย<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน (CRV Lab) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทร 085-988-3964 โทรสาร 0-2579-4576 \*อีเมลล์ moopuwadon@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

หัวอ่านฮาร์ดดิสก์จำเป็นต้องเคลื่อนที่ไปยังแทร็คที่ต้องการด้วยความเร็วและความแม่นยำสูง การออกแบบระบบควบคุมของหัวอ่านเป็นสิ่งท้าทายเนื่องจากความไม่แน่นอนของแบบจำลอง สภาพการทำงานที่มีแรงสั่นสะเทือนจากภายนอก สัญญาณรบกวนที่เซ็นเซอร์ และความต้องการประสิทธิภาพที่สูง เทคนิคการควบคุมที่ใช้กับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบัน ไม่ได้นำสิ่งเหล่านี้มาพิจารณาทั้งหมด ส่งผลให้ประสิทธิภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่านไม่ดีเท่าที่ควร บทความนี้นำทฤษฎีการควบคุมย้อนกลับเชิงปริมาณ (Quantitative feedback theory (QFT) มาใช้ออกแบบระบบควบคุมหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ซึ่งเท่าที่ทราบ ยังไม่เคยมีการทำมาก่อน QFT เป็นเทคนิคออกแบบเชิงความถี่ ที่ไม่ต้องอาศัยแบบจำลองที่แม่นยำ เนื่องจากระบบควบคุมถูกออกแบบจากเซตของฟังก์ชันถ่ายโอน นอกจากนี้เรายังสามารถกำหนดคุณสมบัติด้านการลดผลกระทบของการสั่นสะเทือนภายนอก (Disturbance rejection) และคุณลักษณะของการเคลื่อนที่ที่ต้องการ (Tracking specification) จากการจำลองและการทดลองจริง จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมหัวอ่านฮาร์ดดิสก์นี้ ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### Abstract

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

#### 1. คำนำ

ฮาร์ดดิสก์เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในการเก็บข้อมูล ซึ่งในปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องมาจากความสามารถในการเก็บข้อมูล และความน่าเชื่อถือในการทำงาน ความสามารถในการเก็บข้อมูลนั้นจะอยู่ที่  $70-100 \text{ Gb/in}^2$  ถ้าหากพิจารณาตามความยาวในแนวนอนคือช่วงความยาว 1 นิ้วบนแผ่นดิสก์จะมีจำนวนแทร็คที่ใช้เก็บข้อมูลอยู่ประมาณ 70,000-100,000 แทร็ค ค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ในการอ่านและเขียนข้อมูลจะอยู่ที่ 15 และ 10 เปอร์เซ็นต์ของความกว้างแทร็ค การทดลองของฮาร์ดดิสก์โดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 วิธีคือ Track seek/settling และ Track following [1]

ตัวควบคุมที่นิยมใช้ในฮาร์ดดิสก์โดยทั่วไปจะเป็นตัวควบคุมแบบ PID controller ต่อมาได้มีการพัฒนาตัวควบคุมแบบ PID ให้สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยจะนำ Nonlinearity ของระบบมาพิจารณาในการออกแบบด้วย Muhammad A. และ Ahmad A Masoud [2] ทำการออกแบบโดยเลือกค่า Damping ให้เหมาะสมกับการทำงานในแต่ละช่วง เพื่อลดค่าความผิดพลาดในการทำงานและลดพลังงานที่ให้แก่ระบบ Ying Li และคณะ [3] ได้ปรับปรุงตัวควบคุมแบบ PID โดยเปลี่ยนแปลงที่ตัว Integrator โดยใช้ Gaussian function เข้ามาช่วยคำนวณ นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์การควบคุมแบบอื่นๆเพื่อนำมาใช้กับฮาร์ดดิสก์ Guido Herrmann และคณะ [4] ได้ใช้การควบคุมแบบ Neural network มาประยุกต์ใช้กับการควบคุมฮาร์ดดิสก์

การออกแบบตัวควบคุมส่วนมากจะออกแบบจากสมการของระบบ ดังนั้นประสิทธิภาพของตัวควบคุมที่ได้จะขึ้นกับความแม่นยำของสมการ ด้วยเหตุนี้ Quantitative feedback theory (QFT) จึงเป็นเทคนิคที่น่าสนใจเนื่องจากสมการของระบบที่ทำการออกแบบนั้นไม่ต้องการความแม่นยำที่สูงมาก แต่จะออกแบบจากเซตสมการของระบบที่กำหนดมาจาก Plant parametric uncertainty ถ้ากำหนดค่ากว้างมากพอ ตัวควบคุมที่ได้จะสามารถครอบคลุมการทำงานได้ทั้งหมด

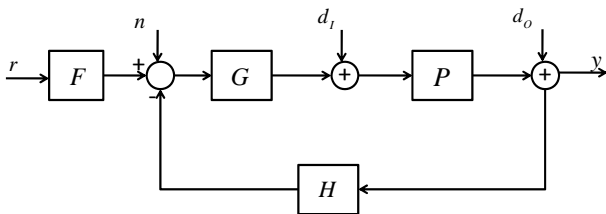
เทคนิค QFT ถูกคิดค้นโดย I. Horowitz ในปี ค.ศ.1960 [5] การออกแบบจะทำในโดเมนเชิงความถี่ ซึ่งจะออกแบบบน Nichols chart การออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิคนี้จะแบ่งได้เป็นสามขั้นตอนใหญ่ๆ

คือ ขั้นแรกทำการกำหนดคุณสมบัติของระบบในรูปแบบโดเมนเชิงความถี่  
ขั้นต่อไปทำการหา Plant template และเลือก Nominal point  $L(0)$   
และจะนำไปออกแบบร่วมกับขอบเขตของ QFT ที่สร้างขึ้นจาก  
คุณสมบัติของระบบที่ได้ออกแบบไว้ในขั้นแรก ขั้นสุดท้ายเป็นการ  
ออกแบบตัวควบคุมโดยจะใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนพื้นฐานเพื่อทำให้  
nominal point  $L(0)$  สอดคล้องกับขอบเขตของ QFT ต่อไป

ใน ส่วนที่ 2 ของเอกสารฉบับนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานของเทคนิค QFT  
ใน ส่วนที่ 3 และ 4 จะเป็นขั้นตอนการหา Plant parametric uncertainty  
ของระบบ, การสร้าง Plant template, การสร้างขอบเขตของ QFT, การ  
ออกแบบตัวควบคุม และ จำลองผลที่ได้ในโปรแกรม Matlab ในส่วน  
ที่ 5 เป็นส่วนของการจัดเตรียมอุปกรณ์ และ ผลการทดลอง และ ส่วน  
สุดท้ายเป็นการสรุปผลการทดลอง

## 2. พื้นฐานของ QFT

การออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค QFT สามารถพิจารณาได้จาก  
บล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1 เมื่อ  $P$  คือระบบที่ประกอบด้วยเซตของ  
 $\{P\}$  ซึ่งเซต  $\{P\}$  จะครอบคลุมความเป็นไปได้ของระบบทั้งหมด  $G$   
คือตัวควบคุม  $H$  คือเซ็นเซอร์  $F$  คือ Filter ซึ่งค่าตัวควบคุมและ  
Filter เป็นค่าที่เราออกแบบ เพื่อให้ระบบทำงานได้ตามที่ต้องการ  
 $d_i$  และ  $d_o$  เป็นสิ่งรบกวนของระบบที่เข้าและขาออกของระบบ  
ส่วนค่าของ  $r, n, e$ , และ  $y$  คือ สัญญาณอ้างอิง สัญญาณรบกวน ค่า  
ความผิดพลาด และ ค่าสัญญาณขาออก



รูปที่ 1 ภาพบล็อกไดอะแกรมของระบบป้อนกลับ

ในการออกแบบระบบนั้นเราสามารถกำหนดคุณสมบัติในโดเมน  
เวลาของระบบได้ และสามารถเปลี่ยนคุณสมบัตินี้มาเป็นคุณสมบัติใน  
โดเมนความถี่ เพื่อนำไปออกแบบขอบเขต (Bounds) ของเทคนิค QFT  
ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างปริมาณสอง  
ปริมาณ [6] ขอบเขตต่างๆสามารถเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

- 1) Plant output disturbance rejection

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

- 2) Plant input disturbance rejection

$$\left| \frac{y}{d_i} \right| = \left| \frac{P}{1+PGH} \right| < \delta_{di} \quad (2)$$

- 3) Model matching

$$\left| \frac{y}{r} - F_m \right| = \left| \frac{PGF}{1+PGH} - F_m \right| < \delta_m \quad (3)$$

- 4) Tracking

$$\alpha \leq \left| \frac{PGF}{1+PGH} \right| \leq \beta \quad (4)$$

- 5) Noise rejection

$$\left| \frac{y}{n} \right| = \left| \frac{PG}{1+PGH} \right| < \delta_n \quad (5)$$

- 6) Control effort

$$\left| \frac{u}{n} \right| = \left| \frac{G}{1+PGH} \right| < \delta_c \quad (6)$$

สมการ (1) และ (2) เป็นขอบเขตที่ใช้ลดผลกระทบของสิ่งรบกวน  
ภายนอกที่มีต่อสัญญาณขาออกของระบบ เมื่อทำการกำหนดขอบเขตนี้  
แล้ว ผลกระทบของสัญญาณขาออกจากสิ่งรบกวนภายนอกจะมีค่าน้อย  
กว่าค่าของ  $\delta_{do}$  และ  $\delta_{di}$  ที่กำหนด ทำให้ระบบสามารถทำงานได้ดี  
ขึ้น สมการที่ (3) และ (4) เป็นการนำฟังก์ชันถ่ายโอนมาเป็นขอบเขต  
เพื่อทำให้ระบบทำงานอยู่ในช่วงของฟังก์ชันถ่ายโอนที่กำหนด สมการที่  
(5) และ (6) เป็นสมการที่ช่วยลดสัญญาณรบกวนของระบบ และ  
กำหนดการใช้พลังงานที่ใช้ควบคุมระบบ

ในส่วนของการออกแบบตัวควบคุมจะนำ Plant template มา  
ออกแบบร่วมกับขอบเขตของเทคนิค QFT ให้มีความสอดคล้องกัน การ  
ออกแบบตัวควบคุมนั้นจะใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนพื้นฐานมาออกแบบ คือ  
เมื่อทำการใส่ฟังก์ชันเข้า  $L(0)$  จะเปลี่ยนไปตามฟังก์ชันที่ใส่เข้าไป  
ด้วยเหตุนี้เราสามารถปรับเปลี่ยน  $L(0)$  ได้ตามความเหมาะสม นั้น  
คือสามารถเปลี่ยนแปลงตัวควบคุมได้โดยตรง ฟังก์ชันถ่ายโอนพื้นฐาน  
ที่นิยมใช้มีดังต่อไปนี้

- 1) Gain:  $k$

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

- 3) Lead and lag:  $\left( \frac{s/z + 1}{s/p + 1} \right)$

- 4) Complex pole and complex zero:

$$\left( \frac{1}{s^2/\omega_n^2 + 2\xi\omega_n + 1} \right), \left( \frac{s^2/\omega_n^2 + 2\xi\omega_n + 1}{1} \right)$$

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

- 6) Complex lead and complex lag:

$$\left( \frac{s^2 + 2ads + a^2}{s^2 + 2bds + b^2} \right)$$

การออกแบบทั้งหมดจะทำในโปรแกรม QFT control design toolbox  
[7] ซึ่งเป็น Toolbox ของโปรแกรม Matlab

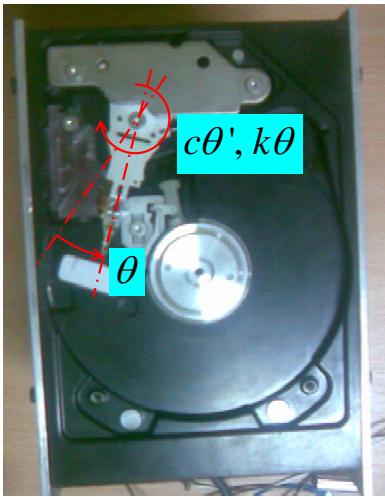
### 3. ระบบหัวอ่าน Hard Disk

Diagram ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์เขียนได้ตามรูปที่ 2 ซึ่งแขนของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์จะมีลักษณะคล้ายกับลูกตุ้มที่แกว่งในแนวระดับซึ่งสามารถใช้กฎข้อที่สองของนิวตันได้ [8]

จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน จะได้

$$T - c\theta' - k\theta = J\theta'' \quad (7)$$

เมื่อ  $T$  คือค่าทอร์ก  $k$  คือค่าคงที่ของสปริง  $J$  คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์  $\theta$  คือมุมของหัวอ่าน ( $^{\circ}$ ) คืออนุพันธ์เทียบกับเวลา



รูปที่ 2 Diagram ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

ค่าทอร์กที่มอเตอร์สร้างขึ้น

$$k_d V = IR_m + k_b \theta' \quad (8)$$

$$T = k_m I \quad (9)$$

เมื่อ  $V$  คือค่าความดันที่ป้อนให้กับมอเตอร์  $I$  กระแสในขดลวด  $R_m$  คือความต้านทานในขดลวด  $k_b$  คือค่า Back emf ของมอเตอร์  $k_d$  คือ Motor drive constant และ  $k_m$  คือ Motor torque constant ทำการรวมสมการ (8) และ (9) จะได้

$$T = \frac{k_d k_m V}{R_m} - \frac{k_b k_m}{R_m} \theta' \quad (10)$$

แทนสมการ (10) ลงใน (7) และทำการกำหนดค่าโดยให้

$$a = JR_m / k_d k_m, b = (cR_m + k_b k_m) / k_d k_m, c = kR_m / k_d k_m$$

ทำการจัดรูปสมการใหม่ได้เป็น

$$V = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta'' \\ \theta' \\ \theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

เราใช้วิธี Least square เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังสมการ

$$Y = \Phi \Theta \quad (12)$$

โดย

$$\Phi \in \mathbb{R}^{n \times 3} = \begin{bmatrix} \theta'' & \theta' & \theta \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}, \Theta \in \mathbb{R}^{3 \times 1} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$Y \in \mathbb{R}^{n \times 1} = \begin{bmatrix} V \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$n$  คือจำนวนข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ทำการ Minimize square error  $E = (Y - \Phi\Theta)^2 / 2$  จะได้

$$\hat{\Theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (13)$$

ป้อนสัญญาณความดันไฟเข้าระบบ  $V$  โดยเปลี่ยนความถี่ของสัญญาณ Sine จากความถี่ตั้งแต่ 0.1 จนถึง 4 Hz ในระยะเวลา 60 วินาที ที่ Amplitude 0.2 Volts สัญญาณออกที่วัดได้คือ  $\theta$  หลังจากนำมาหาอนุพันธ์โดยวิธี Finite difference เราได้  $\theta'$  และ  $\theta''$

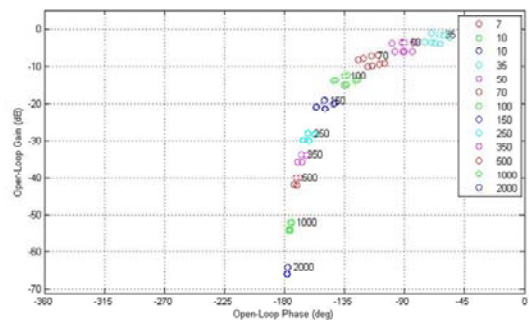
เมื่อนำมาใส่ในสมการ (13) เราจะได้ค่า  $\hat{\Theta}$  หนึ่งค่า จากการทดลอง 32 ครั้ง เราจะได้ช่วงของตัวแปรดังนี้

$$a = [0.0004 \ 0.0008], b = [0.04 \ 0.07], c = [2.8 \ 3.0]$$

เมื่อทำการแปลงลาปลาซจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณขาเข้าและขาออกดังต่อไปนี้

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{1}{as^2 + bs + c} \quad (14)$$

เมื่อแทน  $s = j\omega$  สามารถนำไปกำหนดจุดบน Nichols chart ทำการเลือกความถี่ที่สนใจ ในที่นี้จะทำการเลือก Nominal point  $L(0)$  เพื่อเป็นจุดอ้างอิงซึ่งจะเลือกที่จุด  $a = 0.0004, b = 0.04, c = 2.8$  เมื่อได้ค่าตัวแปรต่างๆที่ต้องการแล้ว ต่อไปจึงนำค่าเหล่านี้ไปกำหนดจุดบน Nichols chart ซึ่งจะได้ตามรูปที่ 3 ซึ่งในแต่ละกลุ่มสีนั้นจะแสดงถึงความไม่แน่นอนของระบบที่ความถี่ต่างๆกัน



รูปที่ 3 Plant template ของระบบ

### 4. การออกแบบตัวควบคุม

เราต้องการออกแบบตัวควบคุม ให้หัวอ่านฮาร์ดดิสก์เคลื่อนที่ตาม Square wave ที่ความถี่ 0.5 Hz และมีขนาด amplitude 0.08 rad การทำงานของระบบจะต้องอยู่ระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนตามสมการที่

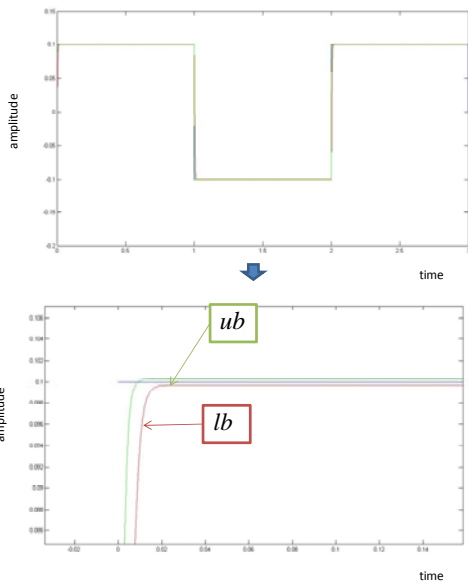
$$(16) \text{ และ } (17)$$

$$ub = \frac{\omega_n^2(s+a)}{s^2 + 2\xi\omega_n + \omega_n^2} \quad (15)$$

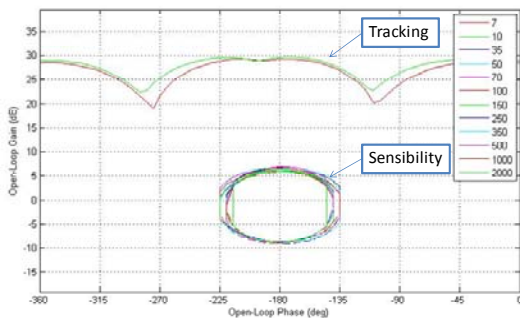
$$lb = \frac{a_1 a_2 a_3}{(s+a_1)(s+a_2)(s+a_3)} \quad (16)$$

เมื่อ  $ub$  และ  $lb$  คือขอบเขตบนและขอบเขตล่างของระบบที่เราต้องการ ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้มานี้เป็นการเปลี่ยนจากโดเมนเชิงเวลา มาเป็นโดเมนเชิงความถี่ [9] เราสามารถกำหนดตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้  $\omega_n = 650 \text{ rad/s}$ ,  $a = 600 \text{ rad/s}$ ,  $a_1 = a_2 = 600 \text{ rad/s}$ ,  $a_3 = 650 \text{ rad/s}$ ,  $\xi = 0.7$  ซึ่งจะได้ค่า Settling time ของระบบอยู่ระหว่าง  $8 \text{ ms}$  และ  $14 \text{ ms}$  ในที่นี้จะกำหนดค่าความผิดพลาดไว้เท่ากับ  $\pm 0.005 \%$

ขอบเขตการทำงานของระบบแสดงไว้ในรูปที่ 4 จากนั้นจะนำ  $ub$  และ  $lb$  ไปกำหนดจุดบน Nichols chart ซึ่งจะได้ลักษณะกราฟตามรูปที่ 5 การออกแบบตัวควบคุมนั้นจะออกแบบให้ Nominal point  $L(0)$  อยู่เหนือเส้นของ Tracking bounds ตามความถี่ต่างๆที่กำหนดขึ้น



รูปที่ 4 ภาพ Square wave ที่กำกับด้วย  $ub$  และ  $lb$



รูปที่ 5 ภาพขอบเขต QFT ทั้งหมดที่สร้างขึ้น

จาก Nyquist criterion เราสามารถกำหนด Stability margin ของระบบได้ตามสมการ

$$\left| \frac{1}{1+L} \right| < \delta_s \quad (17)$$

ซึ่งในเทคนิค QFT แบบ SISO นั้นค่า stability margin จะเป็นค่าเดียวกับสมการ (17) ซึ่งจะเลือก  $\delta_s = \delta_{do} = 4 \text{ dB}$  สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5 การออกแบบตัวควบคุมนั้นจะเป็นการจัดรูป Nominal point  $L(0)$  ให้อยู่ภายนอกจุด  $(-1, 0)$  บนกราฟเชิงขั้ว เมื่อมากำหนดค่าบน Nichols chart นั้นคือขอบเขตที่อยู่รอบเฟสที่  $-180^\circ$  การออกแบบ  $L(0)$  นั้นจะต้องไม่เข้าไปในไปวงรีของส่วนที่กำหนดนี้

เมื่อได้ขอบเขตทั้งหมด ขั้นตอนต่อไปคือนำขอบเขตทั้งหมดรวมเข้าด้วยกันดังนั้นจะมีบางขอบเขตที่มีค่าซ้ำกันดังนั้นก่อนทำการออกแบบจะต้องทำการรวมขอบเขตที่ซ้ำกันเข้าด้วยกันก่อน ซึ่งเมื่อทำการรวมขอบเขตทั้งหมดแล้วจะได้ลักษณะตามรูปที่ 5

เมื่อกำหนดขอบเขตต่างๆได้แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการออกแบบตัวควบคุมแสดงดังรูปที่ 6 แสดง Nominal point  $L(0)$  และขอบเขต เมื่อทำการเพิ่มค่า Gain = 30.35 จะทำให้  $L(0)$  สอดคล้องกับ Tracking bound ต่อมาทำการใส่ Real zero = 204.9 และค่า Real pole = 2062 เข้าไปในระบบ ขั้นสุดท้ายทำการใส่ Complex pole ให้กับ  $L(0)$  ซึ่งทำให้  $L(0)$  เป็นไปตามรูปที่ 6(b) ซึ่งจะได้ตัวควบคุมตามสมการ

$$G = \frac{837581625.7544 \times (s + 216.1)}{(s + 2396)(s^2 + 1103s + 2.774 \times 10^7)} \quad (18)$$

เมื่อได้ตัวควบคุมแล้วแล้วขั้นตอนต่อไปเป็นการออกแบบตัว Filter ซึ่งเป็นการออกแบบให้ระบบแบบป้อนกลับ ทำงานอยู่ในช่วงที่ออกแบบไว้ ขั้นตอนการออกแบบ Filter สามารถแสดงได้จากรูปที่ 7 จากรูปที่ 7(a) เป็นรูปของระบบก่อนการออกแบบ ซึ่งการออกแบบจะทำการเพิ่มค่า Gain = 1.1075 และค่า Real pole = 280 ให้กับระบบ ซึ่งจะได้รูปของระบบตามรูปที่ 7(b) ซึ่งสามารถเขียน Filter ได้ตามสมการ

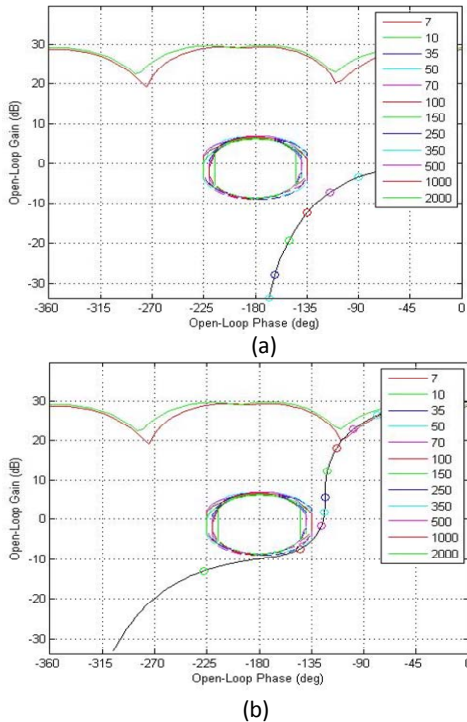
$$F = \frac{310.1}{(s + 280)} \quad (19)$$

ผลของการจำลองการทำงานของระบบในโปรแกรม Matlab แสดงได้ดังรูปที่ 8 โดยรูปที่ 8 (a) แสดงกราฟของของ Stability margin ที่  $4 \text{ dB}$  รูปที่ 8(b) เป็นการจำลองการทำงานของระบบปิดซึ่งสามารถระบบทำงานให้อยู่ในช่วงที่เราต้องการได้ รูปที่ 8(c) เป็นภาพของ Output disturbance rejection เมื่อระบบเคลื่อนที่ตาม Square wave รูปที่ 8(d) เป็นการทำงานของระบบภายใต้ Tracking specification เมื่อระบบเคลื่อนที่ตาม Square wave

## 5. การทดลองและผลการทดลอง

รูปที่ 9(a) เป็นการเตรียมชุดทดลองหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ในการทดลองจะใช้ Omron encoder ในการวัดค่ามุม  $\theta$  และใช้ Dimension Engineering motor driver สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ การเตรียมอุปกรณ์จะทำตามรูปที่ 9(b) Host computer ทำหน้าที่สั่งงาน Target computer ในตัว Host computer จะประกอบด้วยโปรแกรม Windows XP,

โปรแกรม Labview, Labview real time, Labview control toolkit, Labview simulation module และโปรแกรม Matlab ในการสั่งงานจะกระทำบน Host computer แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปส่งงานเครื่อง Target computer ใน Target computer จะประกอบด้วย Labview real-time operating system และ DAQ card ซึ่ง DAQ card นี้จะเป็นตัวรับส่งสัญญาณระหว่าง Target computer กับ ชุดทดลอง

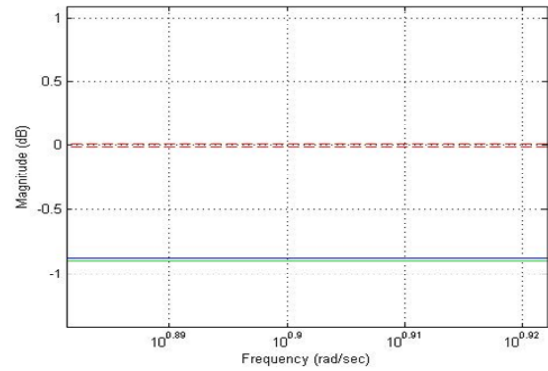


รูปที่ 6 การออกแบบตัวควบคุม: (a) ค่าเริ่มต้นก่อนการออกแบบตัวควบคุม (b) ภาพหลังจากการออกแบบตัวควบคุม

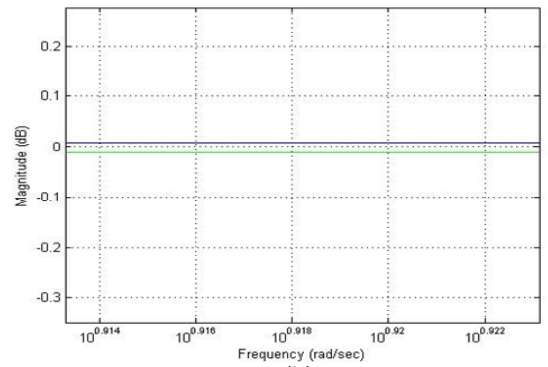
รูปที่ 10 แสดงผลการทดลองจริงกับชุดทดลองฮาร์ดดิสก์ รูปที่ 10 (a) เป็นการเปรียบเทียบสัญญาณเข้าในระบบกับค่าสัญญาณออกจากระบบ เส้นสีแดงคือสัญญาณที่ป้อนให้กับระบบ สีน้ำเงินคือค่าสัญญาณที่วัดได้จากระบบจริง รูปที่ 10(b) คือค่าความแตกต่างระหว่างสัญญาณเข้าและสัญญาณออกของระบบเมื่อวัดเทียบกับเวลาต่าง จากการทดลองจะได้ค่า Settling time = 25 ms และค่า Tracking error ที่ได้ประมาณ  $10^{-4}$  rad

## 6. สรุปผลการทดลอง

จากการออกแบบตัวควบคุมด้วยเทคนิค QFT หัวอ่านฮาร์ดดิสก์สามารถเคลื่อนที่ตาม Square wave ได้ดี ซึ่งผลที่ได้ระหว่างการจำลองการทำงานในโปรแกรม Matlab และผลที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกัน

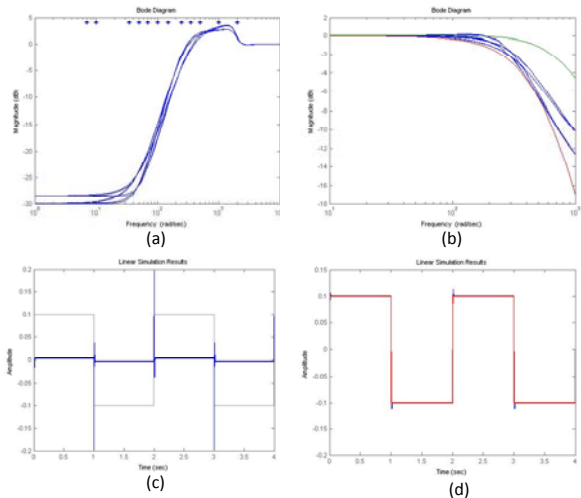


(a)



(b)

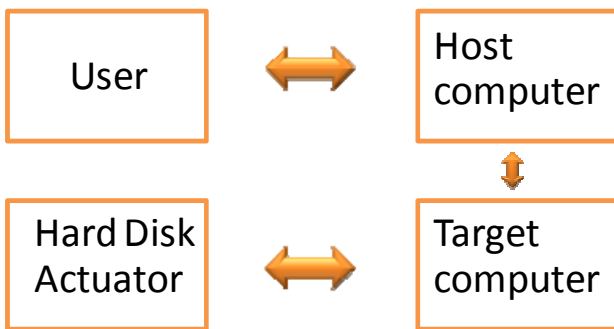
รูปที่ 7 การออกแบบตัว Filter: (a) เป็นค่าเริ่มต้นก่อนการออกแบบ (b) ภาพหลังจากการออกแบบ Filter



รูปที่ 8 คุณสมบัติเชิงความถี่ของระบบ:(a) stability (b) tracking คุณสมบัติเชิงเวลาของระบบ:(c) output disturbance rejection (d) tracking

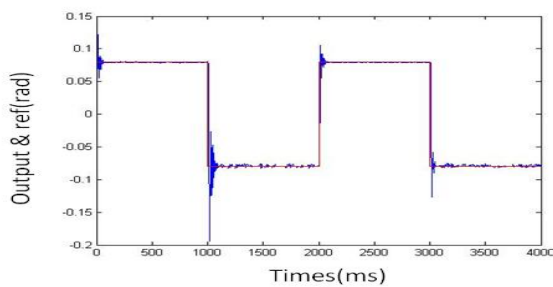


(a)

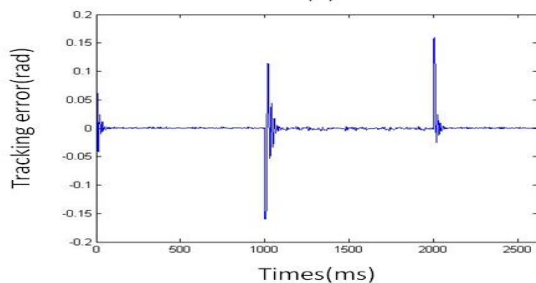


(b)

รูปที่ 9 (a) ชุดทดลองหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (b) รูปการจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง



(a)



(b)

รูปที่ 10 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเข้าและสัญญาณออก (b) ค่า Tracking error

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ Craig Borghesani และบริษัท Terasoft ที่ให้การสนับสนุนโปรแกรม QFT Toolbox งานนี้ทำที่ห้องปฏิบัติการควบคุมหุ่นยนต์และการสั่นสะเทือน (CRV Lab) ซึ่งตั้งอยู่ที่และได้รับการสนับสนุนบางส่วนจากสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIP) แห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Al. Mamun, Abdullah., Guo, Guoxiao., and bi, Chao., 2007. Hard Disk Drive: Mechatronics and Control. CRC, United State of America.
- [2] A. Hawwa, Muhammad., and A. Masoud, Ahmad., 2006. A Nonlinear PID Servo Controller for Computer Hard Disk Drives. IEEE Control Systems Magazine, pp.672-676.
- [3] Li. Ying., Guo. Guoxiao., and Wang. Youyi., 2004. A Nonlinear Control Scheme for Fast Settling in Hard Disk Drives. IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 40, No. 4, pp. 2086-2088.
- [4] Herrmann, Guido., Sam, Shuzui., and Guo. Guoxiao., 2002. Neural Network Control of Hard Disk Drive. IEEE Control System Magazine. pp.
- [5] Horowitz, I., 1984. History of Personal Involvement in Feedback Control Theory. IEEE Control Systems Magazine, pp. 22-23
- [6] Yaniv, O., 1999. Quantitative Feedback Design of Linear and Nonlinear Control Systems. Kluwer Academy Publishers, United State of America.
- [7] Borghesani, C., Chait, Y., and Yaniv, o., 2003. The Frequency Domain Control Design Toolbox User's Guide, Terasoft Inc.
- [8] Chatlatanagulchai, withit., Inseemeeesak, Bundit., and Siwakosit, wichai., 2007. Quantitative Feedback Control of a Pendulum with Uncertain Payload. Journal of Research in Engineering and Technology. Vol. 4, No. 4, pp. 347-367.
- [9] Houpis, S., J., and Sanz, Gracia ., 2005. Quantitative Feedback Theory: Fundamentals and Applications. 2<sup>nd</sup>. CRC, United State of America.