

การควบคุม Piezo Actuator เพื่อลดความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ในเครื่องทดสอบหัวอ่านโดยใช้ตัวควบคุมแบบ H_∞

ธนชัย จัตูรงค์พลกุล¹ และ เบญจมาศ พนมรัตน์รักษ์²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

ในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ การตรวจสอบคุณภาพของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ หรือ Head Gimbal Assembly (HGA) เป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งในขบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ขณะทำการทดสอบหัวอ่านโดยใช้เครื่องทดสอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์อาจเกิดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากสิ่งรบกวนจากภายนอกได้ เช่น ความแปรปรวนของอากาศที่เกิดจากการหมุนของจานแม่เหล็กทำให้หัวอ่านฮาร์ดดิสก์เกิดการแกว่งและเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งที่กำหนด ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า สัญญาณความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง (Position Error Signal) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การหาโมเดลของระบบเซอร์โวที่อยู่ภายในระบบการตรวจสอบคุณภาพของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์โดยใช้อัลกอริทึม Transfer Function Determination Code (TFDC) ร่วมกับอัลกอริทึม Particle Swarm Optimization (PSO) โดยอัลกอริทึม TFDC เป็นวิธีการหาโมเดลของระบบในโดเมนความถี่ และอัลกอริทึม PSO ถูกใช้ในการปรับค่าน้ำหนักในแต่ละความถี่ของอัลกอริทึม TFDC งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการกำหนดค่าน้ำหนักความถี่ในอัลกอริทึม PSO ที่แตกต่างกัน จากนั้นทำการออกแบบตัวควบคุมเพื่อกำจัดผลของสัญญาณรบกวนโดยใช้วิธีการควบคุมแบบพีโอดี และเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมโดยการใช้ตัวควบคุมแบบเอช-อินฟินิตี้

คำสำคัญ : หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ / เครื่องทดสอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ / ระบบเซอร์โว / สัญญาณความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่ง

* Corresponding author : benjamas.pan@kmutt.ac.th

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด

² อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด

A Design of H_∞ Controller for Minimizing Position Error Signal in HGA Tester

Tanachai Jatturongkapolkul¹ and Benjamas Panomruttanarug²

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

In hard disk drive industry, head gimbal assemblies (HGAs) may be individually tested prior to their installation in a disk drive. While performing a test by a HGA tester, false negative result may result because of external air turbulence caused by the rotation of the test disk, which may lead to oscillation of the HGA, causing it to move out of track; this error is called PES (Position Error Signal). The objective of this study is to find a model of a servo system in HGA testing system by using Transfer Function Determination Code (TFDC) algorithm with Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. TFDC technique is proposed to model the system in frequency domain and PSO is used to adjust the weights in the TFDC algorithm at each frequency. Several kinds of inertia weights for PSO are compared to get the different models. After getting the model, controllers are designed to get rid of the effect of disturbance by using PID Control and H_∞ Control.

Keywords : Head Gimbal Assembly / HGA Tester / Position Error Signal / Servo System

* Corresponding author : benjamas.pan@kmutt.ac.th

¹ Master Student, Department of Control System and Instrumentation, Faculty of Engineering.

² Assistant Professor, Department of Control System and Instrumentation, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

การตรวจสอบคุณภาพของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (Head Gimbal Assembly) เป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยการตรวจสอบคุณภาพของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์นั้นจะตรวจสอบด้วยเครื่องทดสอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ที่เรียกว่า HGA Tester เนื่องจากว่าเครื่องทดสอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์รุ่นเก่า นั้น ยังไม่มีโครงสร้างป้องกันสิ่งรบกวนจากภายนอก เช่น air shroud ทำให้การตรวจสอบพารามิเตอร์บางตัวของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์อาจเกิดความผิดพลาดได้ เนื่องจากตำแหน่งของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์เกิดความคลาดเคลื่อน เรียกค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวว่า Position Error Signal (PES) ถ้าตำแหน่งของหัวอ่าน HGA มีความคลาดเคลื่อนมาก สัญญาณแรงดันที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน HGA จะมีค่าสูงขึ้น ทำให้ต้องมีการทดสอบพารามิเตอร์ตัวนั้นอีกครั้ง ดังนั้นจะพยายามควบคุมสัญญาณแรงดันให้มีค่าใกล้เคียง 0 โวลต์ เพื่อควบคุมค่าความคลาดเคลื่อน PES ถ้าปัญหาดังกล่าวก่อให้เกิดขึ้นบ่อยครั้ง จะทำให้ผลผลิตของกระบวนการตรวจสอบคุณภาพของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ในแต่ละวันลดลง

เครื่อง HGA Tester จะมีระบบเซอร์โวเพื่อช่วยในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนด ดังนั้นในการลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น สามารถทำได้โดยการออกแบบตัวควบคุมเพิ่มเข้าไปในระบบเซอร์โวดังกล่าว แต่สิ่งหนึ่งที่จะต้องทราบ คือ โมเดลของระบบเซอร์โวที่มีความถูกต้อง การหาโมเดลของระบบ (System Identification) คือ การหาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์จากข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต [1] สำหรับการหาโมเดลของระบบเซอร์โวในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ตัวอย่างเช่น การหาโมเดลของระบบเซอร์โวที่มีผลของแรงเสียดทาน โดยใช้วิธี System Identification by Differential Binary Excitation (SIDBE) [2] การหาโมเดลของระบบ และออกแบบตัวควบคุมภายในระบบเซอร์โวของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากข้อมูลของสัญญาณ PES โดยใช้วิธี ACORN estimator [3] สำหรับระบบอื่นๆ มีการหาโมเดลของระบบโดยใช้วิธี Particle Swarm Optimization (PSO) [4]-[5] และใน [14] มีการกล่าวถึงการหาโมเดลของระบบโดยใช้วิธีเครื่อง

ช่วยใยประสาทแบบนุ่มในการสร้างตัวแบบทำนายระบบ

การออกแบบตัวควบคุมเพื่อลดผลของความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ มีการศึกษาอยู่หลายวิธีด้วยกัน ตัวอย่างเช่น การใช้หลักการควบคุมแบบ Acceleration Feedforward Control เพื่อลดผลของสัญญาณรบกวนภายในระบบดิสก์ไดรฟ์ [6] การลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณ PES โดยใช้วิธี Error Transfer Function Inversion Method [7] การออกแบบ Compensator โดยใช้ Correction Algorithm ด้วยวิธี Iterative Learning Control เพื่อลดสัญญาณ PES [8] การออกแบบตัวควบคุมเพื่อลดแรงสั่นสะเทือนจากภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้หลักการควบคุมแบบ Adaptive Feedforward Control และใช้ Single Shock Sensor เป็นตัววัดแรงสั่นสะเทือน [9] การออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบ Self-Servo Track Writing ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้ Feedforward Compensator ร่วมกับ H_2/H_∞ control [10]

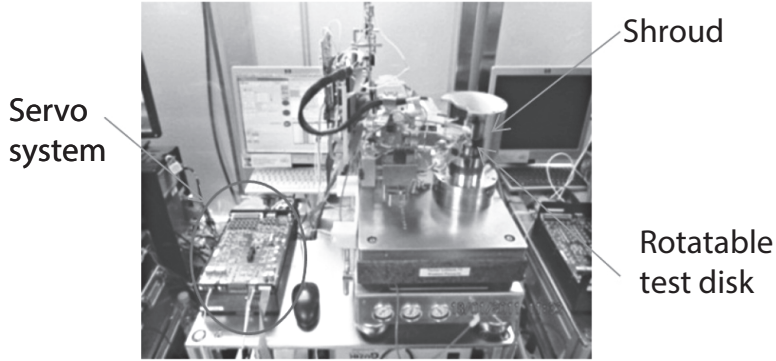
ในงานวิจัยนี้ จะทำการหาโมเดลของระบบเซอร์โวในเครื่อง HGA Tester จากข้อมูลของผลการตอบสนองทางความถี่ ที่เรียกว่า Transfer Function Determination Code (TFDC) [11] ร่วมกับอัลกอริทึม Particle Swarm Optimization (PSO) โดยจะเปรียบเทียบผลจากความแตกต่างของ Inertia Weight ภายในอัลกอริทึม PSO [12] และทำการออกแบบตัวควบคุมเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อน PES โดยใช้ตัวควบคุมเอช-อินฟินิตี

2. ระเบียบวิธีวิจัย

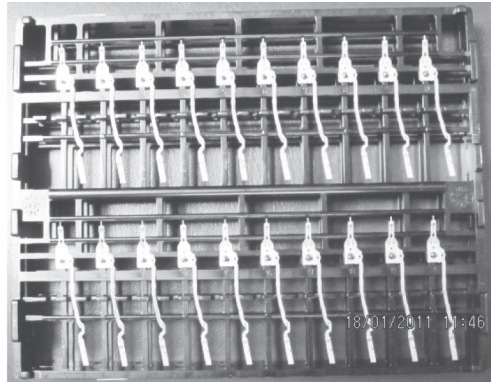
ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก ทำการศึกษากระบวนการหาโมเดลของระบบ และส่วนที่สองทำการศึกษาวิธีการหาโมเดลของระบบ และส่วนที่สามทำการศึกษาวิธีการออกแบบตัวควบคุมเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อน PES ที่เกิดขึ้น

2.1 เครื่องตรวจสอบคุณภาพของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์

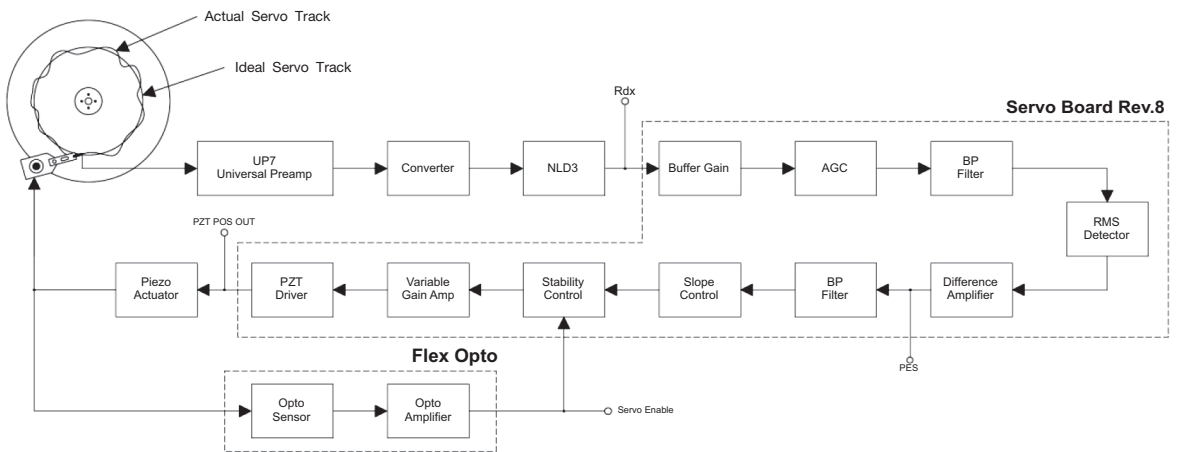
เครื่องตรวจสอบคุณภาพของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ของทางบริษัท Western Digital (Thailand) แสดงดังรูปที่ 1 ประกอบด้วย Rotatable test disk สำหรับติดตั้งชิ้นงาน HGA ดังรูปที่ 2, Shroud เป็นส่วนป้องกันสิ่งรบกวนจากภายนอก และระบบเซอร์โวเป็นส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ มีการทำงานดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 เครื่องตรวจสอบคุณภาพของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ (HGA Tester)



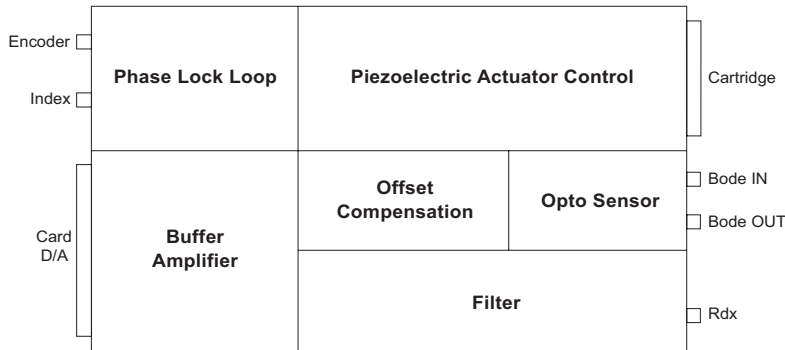
รูปที่ 2 HGA (Head Gimbal Assembly)



รูปที่ 3 Servo System Diagram

โครงสร้างภายในระบบเซอร์โวประกอบด้วยวงจรที่สำคัญทั้งหมด 6 ส่วนด้วยกัน (รูปที่ 4) ได้แก่ Buffer Amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จาก Card D/A, Phase Lock Loop ทำหน้าที่สร้างสัญญาณ Sector Pulse, Compensate Offset ทำหน้าที่ตั้งค่าระยะหัวอ่านและหัวเขียน, Filter ทำหน้าที่กรองสัญญาณ Read Back

Signal (Rdx) ให้เหลือเพียงสัญญาณ Servo Burst, Opto Sensor ทำหน้าที่ตรวจสอบสัญญาณ On track และ Piezoelectric Actuator Control ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของ Piezo Actuator ที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์



รูปที่ 4 Head Positioning Servo System

2.2 การหาโมเดลของระบบเซอร์โว

การหาโมเดลของระบบเซอร์โวโดยใช้วิธี Transfer Function Determination Code ร่วมกับ Particle Swarm Optimization

TFDC เป็นการหาโมเดลของระบบในโดเมนความถี่ เรียกว่า Discrete-Time Transfer Function ด้วย Zero Order Hold (ZOH) อยู่ในรูป

$$G(z) = \frac{b(z)}{a(z)} = \frac{b_m z^m + b_{m-1} z^{m-1} + \dots + b_1 z + b_0}{a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + 1} \quad (1)$$

$$\sum_{k=0}^m b_k \cos(k\omega_i T) + j \sum_{k=0}^m b_k \sin(k\omega_i T) = (x_i + jy_i) \left(\sum_{k=1}^n a_k \cos(k\omega_i T) + j \sum_{k=1}^n a_k \sin(k\omega_i T) + 1 \right) \quad (3)$$

โดยที่จำนวน poles ต้องมากกว่าจำนวน zeros อยู่ 1 [13] ผลการตอบสนองทางความถี่ของระบบเซอร์โวที่ได้จากการทดลองสามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$G(e^{j\omega_i T}) = x_i + jy_i \quad (2)$$

โดยที่ x_i และ y_i เป็นส่วนจริงและส่วนจินตภาพที่ความถี่ i ตามลำดับ และ T เป็นเวลาในการดึงข้อมูลจากสมการที่ (1) สามารถแทนด้วยสมการ Eulers และสมการที่ (2) ได้เป็น

จากสมการที่ (3) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์โดยมีความสัมพันธ์เป็น

$$H\theta \approx u \quad (4)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
 H &= [h_{1R} \quad h_{2R} \quad \dots \quad h_{iR} \quad h_{iI} \quad h_{2I} \quad \dots \quad h_{iI}]^T \\
 u &= [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_i \quad y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_i]^T \\
 \theta &= [b_0 \quad b_1 \quad \dots \quad b_m \quad a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_n]^T \\
 h_{iR} &= [1 \quad \cos(\omega_i T) \quad \cos(2\omega_i T) \quad \dots \quad \cos(m\omega_i T) \\
 &\quad y_i \sin(\omega_i T) - x_i \cos(\omega_i T) \quad \dots \quad y_i \sin(n\omega_i T) - x_i \cos(n\omega_i T)]^T \\
 h_{iI} &= [0 \quad \sin(\omega_i T) \quad \sin(2\omega_i T) \quad \dots \quad \sin(m\omega_i T) \\
 &\quad -x_i \sin(\omega_i T) - y_i \cos(\omega_i T) \quad \dots \quad -x_i \sin(n\omega_i T) - y_i \cos(n\omega_i T)]^T
 \end{aligned}$$

จากสมการที่ (4) θ เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของโมเดลของระบบเซอร์โวที่ต้องการ โดยจะใช้อัลกอริทึม PSO ในการหาค่า θ ดังกล่าว PSO เป็นอัลกอริทึมที่ใช้หลักการทางด้านจิตวิทยาที่เลียนแบบพฤติกรรมการอยู่รวมกันเป็นกลุ่มของฝูงนกหรือฝูงปลา PSO จะประกอบด้วย 2 สมการหลัก

$$\begin{aligned}
 v_{ij}(t+1) &= \\
 \omega v_{ij}(t) + c_1 r_1 (p_{ij} - x_{ij}(t)) + c_2 r_2 (g_j - x_{ij}(t)) & \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (6)$$

โดยที่ $v_{ij}(t)$ แทนความเร็วของอนุภาค i ที่มีองค์ประกอบย่อยเป็น j ที่เวลา t , $x_{ij}(t)$ แทนตำแหน่งของอนุภาค i ที่มีองค์ประกอบย่อยเป็น j ที่เวลา t , p_{ij} แทนค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของอนุภาค i ที่มีองค์ประกอบย่อยเป็น j , g_j แทนค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดของกลุ่มอนุภาคที่มีองค์ประกอบย่อยเป็น j , ω เป็นค่า Inertia Weight, r_1, r_2 เป็นค่าสุ่มที่อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1, และ c_1, c_2 เป็นค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้ โดยจะกำหนด Fitness Function ในการหาโมเดลของระบบ เป็นค่า MSE (Mean Square Error) ตามสมการ

$$MSE = \frac{\sum_{k=1}^M (y - y_k)^2}{M} \quad (7)$$

โดยที่ y และ y_k เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการทดลอง และสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากโมเดลของระบบตามลำดับ ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการทดลองเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงของตัว piezoactuator และ M เป็นจำนวนข้อมูลของสัญญาณ

สำหรับอัลกอริทึม PSO ค่า Inertia Weight เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้จะกำหนด Inertia Weight ทั้งหมด 4 ประเภทได้แก่

1) Simple Inertia Weight (SIW): กำหนดค่า Inertia Weight เป็น 1

2) Fixed Inertia Weight (FIW): กำหนดค่า Inertia Weight เป็นค่าคงที่ ตามสมการ

$$\omega = \frac{1}{2 \cdot \ln 2} \quad (8)$$

3) Linearly Decreasing Inertia Weight (LDIW): กำหนดค่า Inertia Weight ตามสมการ

$$\omega_k = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{iter_{\max}} \times k \quad (9)$$

โดยที่ $\omega_{\max} = 0.9$ และ $\omega_{\min} = 0.4$ และ $iter_{\max}$ เป็นค่าจำนวนในการวนรอบสูงสุด และ k เป็นค่าวนรอบในปัจจุบัน ซึ่งวิธีนี้มีความสมดุลในการหาค่าตอบของอัลกอริทึม PSO

4) Simulated Annealing Inertia Weight (SAIW): กำหนดค่า Inertia Weight ตามสมการ

$$\omega_k = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times \lambda^{(k-1)} \quad (10)$$

โดยที่ค่า ω_{\max} จะเป็นค่าเริ่มต้นของ ω และกำหนดให้ $\lambda = 0.95$ ซึ่งวิธีนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหาคำตอบของอัลกอริทึม PSO

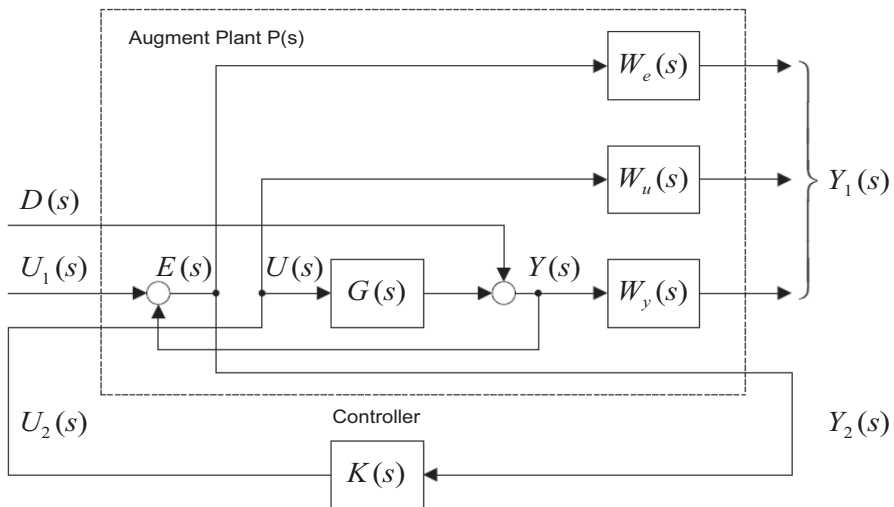
2.3 การออกแบบตัวควบคุมแบบเอช-อินฟินิตี

การควบคุมแบบเอช-อินฟินิตี เป็นทฤษฎีทางด้าน Robust Control ซึ่งถูกพัฒนาโดย Zamez และมีการกล่าวถึงควมมีประสิทธิภาพและความมีเสถียรภาพของระบบควบคุม วิธีนี้ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์และ

ออกแบบตัวควบคุมของระบบให้มีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพมากขึ้น ในการออกแบบตัวควบคุมแบบเอช-อินฟินิตี โมเดลของระบบจะมีการเพิ่มในส่วนของ weight function ขึ้นมา 3 ตัว คือ sensitivity weight (W_e), control weight (W_u) และ output weight (W_y) ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะค่า sensitivity weight ตามสมการที่ (11) และกำหนดให้ค่า control weight (W_u) เป็น 1 และไม่พิจารณาค่า output weight (W_y)

$$W_e = \frac{\eta s + \lambda}{s + \xi \lambda} \quad (11)$$

โดยที่ค่าตัวแปร η ถูกจำกัดอยู่ในช่วง $0 \leq \eta < 1$ และค่า $\lambda > 0$ และค่า ξ มีค่าน้อย

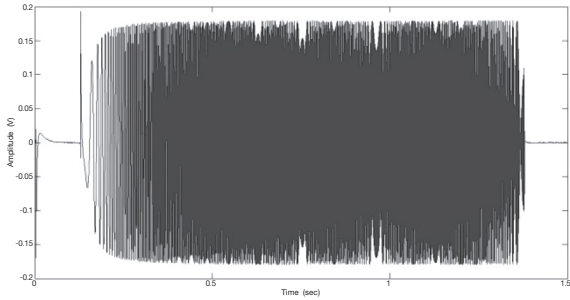


รูปที่ 5 Augment Plant ของ H_∞ -Controller

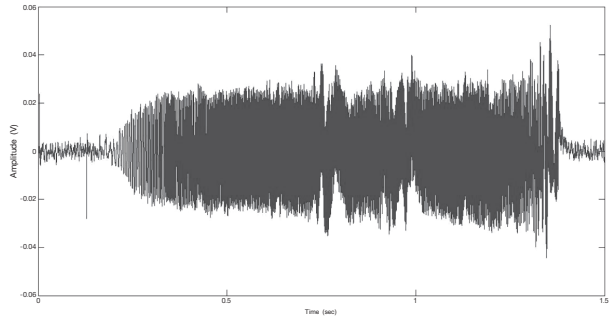
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในงานวิจัยนี้จะใช้ชุดประมวลผลสัญญาณดิจิทัลรุ่น TMS320C6713 ในการวัดสัญญาณของเครื่องตรวจสอบคุณภาพของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ โดยกำหนด sampling time เป็น 0.25 ms เพื่อนำมาวิเคราะห์หาเอกลักษณ์ของระบบ รวมถึงการออกแบบตัวควบคุมของระบบ ในการทดลองจะทำการหาโมเดลของระบบเซอร์โวเป็นแบบ

ระบบปิด (Closed-Loop Transfer Function) และกำหนดสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณ Chirp Signal ที่มีความถี่ตั้งแต่ 0 Hz – 1 KHz ดังรูปที่ 6 ซึ่งได้สัญญาณเอาท์พุตจากระบบเซอร์โวดังรูปที่ 7 โดยกำหนดอันดับของ Transfer Function เป็น 5 ซึ่งเป็นอันดับของ Transfer Function ที่ใช้วิธี TFDC หาค่าสัมประสิทธิ์ของโมเดลแล้วให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด



รูปที่ 6 สัญญาณอินพุตเข้าระบบเซอร์โว

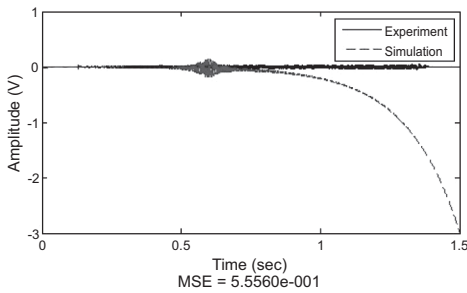


รูปที่ 7 สัญญาณเอาต์พุตจากระบบเซอร์โว

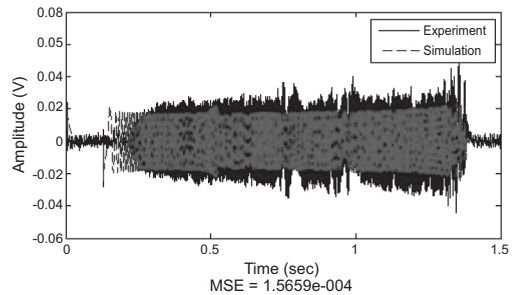
รูปที่ 8 และรูปที่ 9 เป็นสัญญาณเอาต์พุต และผลการตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากการหาโมเดลของระบบเซอร์โวจากการใช้อัลกอริทึม PSO กับค่า Inertia Weight ทั้ง 4 ประเภท โดยที่ค่า MSE ที่ได้จากการทดลองจะแสดงใน

ตารางที่ 1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการกำหนดค่า Inertia Weight เป็น LDIW จะให้ค่า MSE ที่น้อยที่สุด และได้ Closed-Loop Transfer Function เป็น

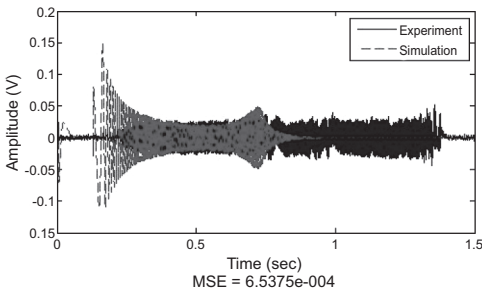
$$G(z) = \frac{-2.039z^4 + 1.445z^3 + 1.358z^2 - 3.41z + 2.257}{23.5z^5 - 29.46z^4 + 6.696z^3 + 17.65z^2 - 17.35z - 1} \quad (12)$$



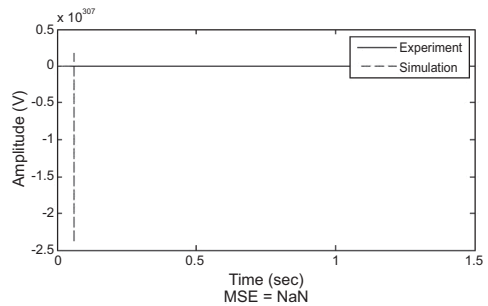
(น) Simple Inertia Weight



(ด) Linearly Decreasing Inertia Weight

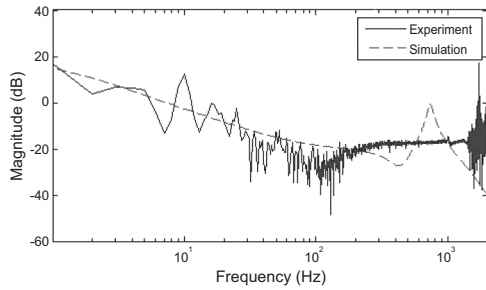


(บ) Fixed Inertia Weight

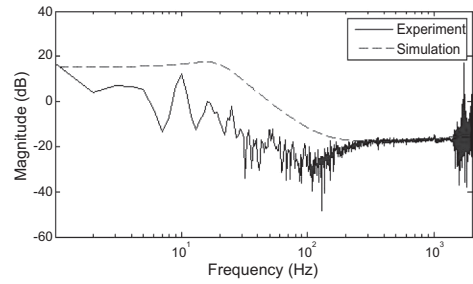


(ง) Simulated Annealing Inertia Weight

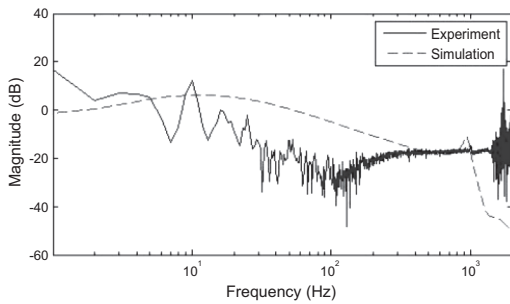
รูปที่ 8 การเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุต จากการกำหนดค่า Inertia Weight ทั้ง 4 ประเภท



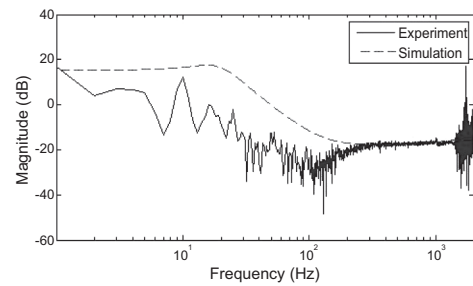
(ก) Simple Inertia Weight



(ค) Linearly Decreasing Inertia Weight



(ข) Fixed Inertia Weight



(ง) Simulated Annealing Inertia Weight

รูปที่ 9 การเปรียบเทียบผลการตอบสนองทางความถี่ จากการกำหนดค่า Inertia Weight ทั้ง 4 ประเภท

ตารางที่ 1 ค่า Fitness Function ที่ได้จากการกำหนดค่า Inertia Weight ทั้ง 4 ประเภท

ค่าน้ำหนักความเฉื่อย	ค่า Fitness Function
SIW	5.5560×10^{-1}
FIW	6.5375×10^{-4}
LDIW	1.5659×10^{-4}
SAIW	∞

หลังจากนั้นทำการออกแบบตัวควบคุมแบบเอช-อินฟินิตี เปรียบเทียบกับการออกแบบตัวควบคุมแบบพีโอดี ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐาน โดยกำหนดให้ objective function เป็นค่าความคลาดเคลื่อน NRMS (Normalized Root Mean Square) เนื่องจากเราต้องการจำกัดค่าของ cost ไม่ให้มีค่าสูงเกินไป และต้องการเปรียบเทียบค่าของ error กับค่าของสัญญาณ y ว่า error ที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนเท่าใดของสัญญาณ y ซึ่งการคำนวณหาค่า NRMS แสดงได้ดังสมการ

$$\epsilon_{NRMS} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2}}{\max(y(k)) - \min(y(k))} \quad (13)$$

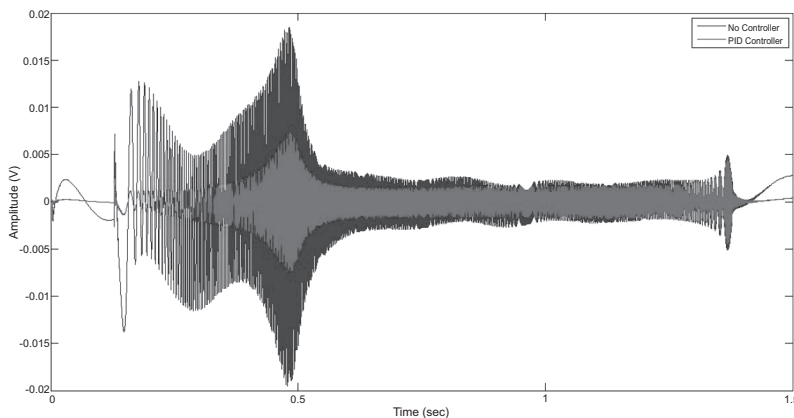
โดยที่ $y(k)$ เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากระบบเซอร์โวที่ไม่มีตัวควบคุม, $\hat{y}(k)$ เป็นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากระบบเซอร์โวที่มีตัวควบคุม

สำหรับตัวควบคุมแบบพีโอดี จะกำหนด Transfer Function เป็น

$$K(z) = \frac{0.5z^2 - 0.9z + 0.4}{z^2 - z} \quad (14)$$

โดยใช้วิธี Trial and Error หาค่าเกนในเทอม P, I และ D ที่ให้ค่า NRMS น้อยที่สุด ซึ่งจะได้ผลการเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุตดังแสดงในรูปที่ 10 จากรูปที่ 10 จะได้ค่าความคลาดเคลื่อน NRMS เป็น

$$\epsilon_{NRMS} = 0.1355 \quad (15)$$



รูปที่ 10 สัญญาณเอาต์พุตจากระบบเซอร์โวที่ไม่มีตัวควบคุมกับระบบเซอร์โวที่มีตัวควบคุม PID

สำหรับตัวควบคุมแบบเอช-อินฟินิตี จะใช้กับระบบที่เป็น Open-Loop และ Continuous Transfer Function

ดังนั้นจะทำการหาโมเดลของระบบใหม่โดยกำหนดให้ Inertia Weight เป็น LDIW จะได้เป็น

$$G(z) = \frac{0.008983z^4 - 0.006794z^3 - 0.005597z^2 + 0.009156z - 0.006266}{1.148z^5 - 2.54z^4 + 1.294z^3 + 1.443z^2 - 2.346z + 1} \quad (16)$$

แปลง Discrete Transfer Function เป็น Continuous Transfer Function ได้เป็น

$$G(s) = \frac{27.08s^5 + 2.496 \times 10^4 s^4 + 4.731 \times 10^9 s^3 + 8.265 \times 10^{12} s^2 + 7.321 \times 10^{16} s - 1.043 \times 10^{19}}{s^6 + 607.1s^5 + 1.704 \times 10^8 s^4 + 8.004 \times 10^{10} s^3 + 1.96 \times 10^{15} s^2 + 2.429 \times 10^{16} s + 1.535 \times 10^{18}} \quad (17)$$

กำหนด Sensitivity Weight ในการออกแบบตัวควบคุมเป็น

$$W_e = \frac{0.667s + 10}{s + 0.01} \quad (18)$$

จะได้ตัวควบคุมที่ออกแบบโดยใช้การควบคุมแบบเฮช-อินฟินิตี เป็น

$$K(s) = \frac{-1179s^6 - 7.157 \times 10^5 s^5 - 2.008 \times 10^{11} s^4 - 9.434 \times 10^{13} s^3 - 2.31 \times 10^{18} s^2 - 2.863 \times 10^{19} s - 1.809 \times 10^{21}}{s^7 + 3382s^6 + 1.725 \times 10^8 s^5 + 5.531 \times 10^{11} s^4 + 2.254 \times 10^{15} s^3 + 5.522 \times 10^{18} s^2 + 9.686 \times 10^{20} s + 9.685 \times 10^{18}} \quad (19)$$

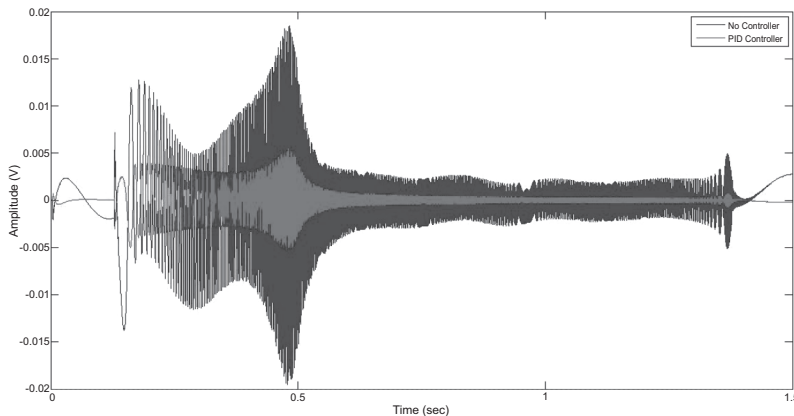
แปลงให้อยู่ในรูปโดเมน Z ด้วยวิธี ZOH (Zero-Order Hold) ได้เป็น

$$K(z) = \frac{-0.2116z^6 + 0.2594z^5 + 0.223z^4 - 0.5013z^3 + 0.1701z^2 + 0.2421z - 0.1818}{z^7 - 1.706z^6 - 0.4439z^5 + 2.87z^4 - 1.969z^3 - 0.7368z^2 + 1.415z - 0.4294} \quad (20)$$

เนื่องจาก $K(z)$ ที่ออกแบบมานั้น ไม่ได้ถูกรวมเข้าไปในระบบหรือทำให้ dynamic ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงค่า แต่มันจะไปทำการปรับเปลี่ยนสัญญาณอินพุตเข้าระบบ โดยดูจากค่าของ error ที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจึงพิจารณา stability ของ $K(z)$ จากการดูตำแหน่ง pole ของ $K(z)$ ว่าอยู่ภายใน unit circle หรือไม่ ซึ่ง $K(z)$ ที่ได้ ออกแบบมานั้นมี pole ทุกตัวอยู่ภายใน unit circle กล่าวคือสัญญาณที่ส่งออกมาจาก $K(z)$ นั้นเป็นสัญญาณที่ถูก bound เอาไว้นั่นเอง

จากนั้นทำการเปรียบเทียบสัญญาณเอาท์พุตที่ได้จากการป้อนสัญญาณอินพุตตามรูปที่ 6 ระหว่างระบบเซอร์โวที่ไม่มีตัวควบคุมกับระบบเซอร์โวที่มีตัวควบคุมแบบเฮช-อินฟินิตี จะได้ผลการเปรียบเทียบสัญญาณเอาท์พุตดังแสดงในรูปที่ 11 จากรูปที่ 11 จะได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อน NRMS เป็น

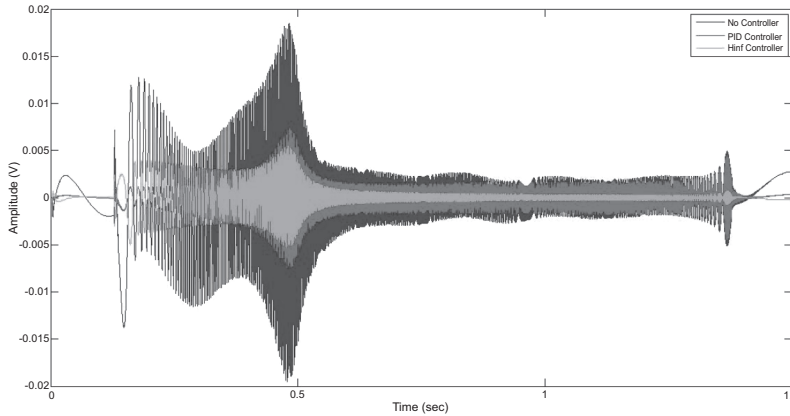
$$\varepsilon_{NRMS} = 0.0968 \quad (21)$$



รูปที่ 11 สัญญาณเอาท์พุตจากระบบเซอร์โวที่ไม่มีตัวควบคุมกับระบบเซอร์โวที่มีตัวควบคุม H_∞ -Controller

ในรูปที่ 12 จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากระบบเซอร์โวที่ไม่มีตัวควบคุม (เส้นสีน้ำเงิน) สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากระบบเซอร์โวที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดี (เส้นสีแดง) และสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากระบบเซอร์โวที่มีตัวควบคุมแบบเอช-อินฟินิตี (เส้นสีเขียว) ซึ่งจะเห็น

ได้ว่าสัญญาณดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงที่ 0 โวลต์ เนื่องจากสัญญาณดังกล่าว เป็นสัญญาณความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการวัดการเปลี่ยนแปลงของตัว piezo actuator เพื่อควบคุมให้หัวอ่าน HGA อยู่ตำแหน่งแทรกที่กำหนด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด



รูปที่ 12 เปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากระบบเซอร์โวที่ไม่มีตัวควบคุมกับระบบเซอร์โวที่มีตัวควบคุม

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางการควบคุมตัว piezo actuator เพื่อลดความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ที่เกิดขึ้นในเครื่องทดสอบหัวอ่านที่เรียกว่า HGA Tester การเก็บข้อมูลของสัญญาณจากเครื่องทดสอบหัวอ่านจะใช้บอร์ด DSP เบอร์ TMS320C6713 กำหนดสัญญาณอินพุตเป็น Chirp Signal ที่ความถี่ตั้งแต่ 0 ถึง 1 kHz การทดลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การหาโมเดลของระบบเซอร์โว และการออกแบบตัวควบคุม โดยที่การหาโมเดลของระบบจะใช้อัลกอริทึม PSO เนื่องจากโครงสร้างที่ง่ายของอัลกอริทึม และการปรับพารามิเตอร์เพียงไม่กี่ตัว ร่วมกับอัลกอริทึม TFDC เพื่อให้ผลการตอบสนองทางความถี่ของโมเดลของระบบเซอร์โวที่ได้ ใกล้เคียงกับผลการตอบสนองทางความถี่ของระบบเซอร์โวจริง ในส่วนของการออกแบบตัวควบคุมจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี เปรียบเทียบกับตัวควบคุมแบบเอช-อินฟินิตี จากนั้นทำการหาค่าความคลาดเคลื่อน NRMS (Normalized Root Mean Square) ของทั้ง 2 วิธี ได้เป็น

$$\varepsilon_{NRMS}(PID) = 0.1355$$

$$\varepsilon_{NRMS}(H_{\infty}) = 0.0968$$

จากค่าความคลาดเคลื่อน NRMS ที่ได้จะเห็นได้ว่า ค่า NRMS ที่ได้จากการใช้ตัวควบคุมแบบเอช-อินฟินิตี จะให้ค่าน้อยกว่าค่า NRMS ที่ได้จากการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี หมายความว่า การใช้ตัวควบคุมแบบเอช-อินฟินิตี จะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านการผลิตขั้นสูงในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (IUCRC in Advanced Manufacturing) ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณทีมงานบริษัท Western Digital (Thailand) ที่ให้ความช่วยเหลือสำหรับงานวิจัยนี้จนสำเร็จ ล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

1. Ljung L., 1999, "System Identification – Theory For the User", *PTR Prentice Hall*, 2nd Edition, ISBN-13: 978-0136566953, January.
2. Chen, Y.Y., Huang, P.Y., and Yen, J.Y., 2002, "Frequency-Domain Identification Algorithms for Servo Systems with Friction", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 10, No. 5, September, pp. 654-665.
3. Loannou, P.A., Xu, H., and Fidan, B., 2007, "Identification and High Bandwidth Control of Hard Disk Drive Servo Systems Based on Sampled Data Measurements", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 15, No. 6, November, pp. 1089-1095.
4. Xiuqin, D., 2009, "System Identification Based on Particle Swarm Optimization Algorithm", *International Conference on Computational Intelligent and Security*, December, pp. 259-263.
5. Hou, Z.X., 2008, "Wiener Model Identification Based on Adaptive Particle Swarm Optimization", *International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Vol. 2, September, pp. 1041-1045.
6. Sang-Eun, B., and Seung-Hi, L., "Vibration Rejection Control for Disk Drives by Acceleration Feedforward Control, 1999", *Proceeding of the 38th Conference on Decision & Control*, December, pp. 1163-1166.
7. Lee, H.S., 2001, "Controller optimization for minimum position error signals of hard disk drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 48, No. 5, October, pp. 945-950.
8. Kang, C.I., and Kim, C.H., 2005, "An Iterative Learning Approach to Compensation for the Servo Track Writing Error in High Track Density Disk Drives", *Technical Paper of Microsyst Technol*, pp. 623-637.
9. Usui, K., Kisaka M., Okuyama A., and Nagashima M., 2006, "Reduction of external vibration in hard disk drives using adaptive feed-forward control with single shock sensor", *IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, pp. 138-143.
10. Nie, J., and Horowitz, R., 2010, "Control Design of Concentric Self-Servo Track Writing Systems for Hard Disk Drives", *American Control Conference*, July, pp. 2631-2640.
11. Young, W.R., and Irwin, D., 1993, "Total Least Squares and Constrained Least Squares Applied to Frequency Domain System Identification", *IEEE International Conference on Industrial Technology and Southeastern Symposium on System Theory*, March, pp. 285-290.
12. Han W., Yang, P., Ren, H., and Sun, J., 2010, "Comparison Study of Several Kinds of Inertia Weights for PSO", *IEEE International Conference on Progress in Informatics and Computing*, December, pp. 280-284.
13. Astrom, K.J., Hagander, P., and Sternby, J., 1980, "Zeros of Sampled Systems", *IEEE Conference on Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes*, December, pp. 1077-1081.
14. Boonserm, P., and Achalakul, T., 2553, "The SNN-Based Predictive Model for HGA Manufacturing", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 185-196 (In Thai).

