

ระเบียบวิธีสำหรับควบคุมระยะการบินของหัวอ่าน-เขียน ฮาร์ดดิสก์เพื่อลดอัตราข้อมูลผิดพลาดจากการอ่าน-เขียน

An Optimal Hard Disk Head Fly-Height Control Algorithm for Soft Error Rate Reduction during the Read-Write Process

ชญญพร ชาญณรงค์ (Tanyaporn Channarong)¹

ณัฐธา จินดาเพ็ชร (Nattha Jindapetch)² *

เกริกชัย ทองหนู (Krekchai Thongnoo)³

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการออกแบบระเบียบวิธีสำหรับควบคุมระยะการบินของหัวอ่าน - เขียนฮาร์ดดิสก์เพื่อลดอัตราข้อมูลผิดพลาดจากการอ่าน-เขียนโดยศึกษาผลของตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงระยะการบินของหัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์เพื่อหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นเมื่อหัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์เข้าใกล้ดิสก์ ตัวแปรที่ถูกทดสอบคือสัญญาณระบุตำแหน่งผิดพลาด (PES: position error signal) ซึ่งเป็นตัวระบุตำแหน่งหัวอ่าน - เขียนฮาร์ดดิสก์ และค่าการแปลงดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (DAC: digital to analog converter) ที่ป้อนให้แก่คอยล์มอเตอร์เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์ ผลการศึกษาพบว่าค่า DAC เปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อหัวอ่าน-เขียนเข้าใกล้ดิสก์ ดังนั้นค่า DAC จึงถูกใช้ในการตรวจจับการเข้าใกล้ดิสก์และระยะการบินของหัวอ่าน-เขียน จากผลการทดสอบระเบียบวิธีที่นำเสนอไปใช้สามารถปรับปรุงระยะการบินเพื่อลดอัตราข้อมูลผิดพลาดจากการอ่าน-เขียนข้อมูลได้เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 6.99 % เมื่อเปรียบเทียบกับค่าระยะการบินที่ถูกกำหนดจากโรงงาน

ABSTRACT

This paper presents an optimal fly-height (FH) control algorithm for soft error rate (SER) reduction during the read-write process. The parameters related to the fly-height change were studied to find the relations occurring when the hard disk drive head is going to contact the disk. The parameters considered in this algorithm are the position error signal (PES) and the voice coil motor digital to analog converter (DAC) values. The study results show that the DAC values change noticeably when the head moves close to the disk. Therefore, the DAC values are used to indicate when the head moves close to the disk and specify FH to reduce SER. From the test results, the proposed algorithm can improve FH with the SER reduced by 6.99% on average when compared with the default FH set from the factory.

คำสำคัญ: หัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์ ระยะการบินของหัวอ่าน-เขียน อัตราข้อมูลผิดพลาดจากการอ่าน-เขียน

Keywords: Hard disk head, Fly-height (FH), Soft error rate (SER)

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

* Corresponding author, e-mail: nattha.s@psu.ac.th

บทนำ

ในปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ถูกพัฒนาให้มีความจุเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในขณะที่ขนาดของแผ่นฮาร์ดดิสก์ยังคงเดิม จึงทำให้การสร้างฮาร์ดดิสก์ที่มีความจุสูงนั้นมีความท้าทายเป็นอย่างมาก เนื่องจากต้องการเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อใช้สร้างฮาร์ดดิสก์ความจุสูงขึ้นมา วิธีการหนึ่งของการสร้างฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุสูงคือการสร้างหัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์ให้มีระยะห่างของช่องว่างระหว่างหัวอ่าน-เขียนกับแผ่นดิสก์ ซึ่งเรียกว่าระยะบิน (FH: fly-height) ให้น้อยลงในระดับนาโนเมตร เพื่อที่จะสามารถสร้างแม่เหล็กต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยได้มากขึ้นและเพิ่ม ระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR: signal to noise ratio) โดยจะต้องควบคุมระยะห่างของช่องว่างระหว่างหัวอ่าน-เขียนกับแผ่นดิสก์ให้เหมาะสม เพื่อลดอัตราข้อมูลผิดพลาดจากการอ่าน-เขียน (SER: soft error rate) โดย SER คืออัตราข้อมูลที่ผิดพลาดต่อข้อมูลที่สมบูรณ์ ซึ่งข้อมูลที่ผิดพลาดนี้สามารถถูกแก้ไขให้ถูกต้องได้โดยการลดระยะบิน ซึ่งต่างกับข้อมูลที่ผิดพลาดทางกายภาพที่ไม่สามารถแก้ไขได้ในระหว่างการอ่าน-เขียนข้อมูล และเพื่อป้องกันการชนกันระหว่างหัวอ่าน-เขียนกับแผ่นดิสก์ ที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อฮาร์ดดิสก์ได้

เทคโนโลยีหนึ่งที่ใช้สำหรับการสร้างหัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์ให้อยู่ใกล้กับแผ่นดิสก์คือ การให้ความร้อนเพื่อควบคุมระยะบิน (TFC: Thermal Fly-height Control) (Schultz, 2007) (Hitachi global storage technologies, 2009) เป็นการให้ความร้อนจากชุดควบคุมโดยการป้อนกระแสไปที่ขดลวดที่อยู่บริเวณหัวอ่าน-เขียนมีผลทำให้หัวอ่าน-เขียนขยายตัวเข้าใกล้แผ่นดิสก์จึงทำให้ระยะบินลดลง การคำนวณระยะระหว่างหัวอ่าน-เขียนกับดิสก์จะใช้การให้ความร้อนไปที่หัวอ่าน-เขียนจนขยายตัวใกล้สัมผัสกับแผ่นดิสก์แล้วจึงนำค่าพลังงานที่ได้จากการให้ความร้อนนี้มาคำนวณเป็นระยะบิน การป้องกันการชนกันของหัวอ่าน-เขียนกับดิสก์ทำโดยการกำหนดระยะบินที่ปลอดภัยสำหรับทุกบริเวณบนดิสก์และเป็นค่าคงที่จากโรงงาน โดยมีความแตกต่างกันสำหรับฮาร์ดดิสก์

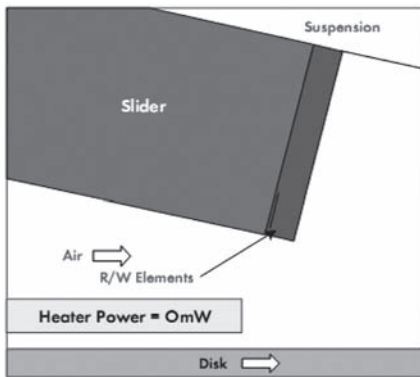
สำหรับฮาร์ดดิสก์แต่ละรุ่นที่ผลิต แต่อย่างไรก็ตามระยะบินดังกล่าวยังเป็นค่าที่สูงและยังสามารถถูกปรับลดลงมาเพื่อที่จะได้ค่าความผิดพลาดที่มีค่าน้อยลงได้ แต่ยังคงขาดวิธีการที่มาควบคุมระยะบินให้ยืดหยุ่นและปลอดภัยทุกบริเวณบนดิสก์

เทคโนโลยีหนึ่งที่ใช้สำหรับการสร้างหัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์ให้อยู่ใกล้กับแผ่นดิสก์คือ การให้ความร้อนเพื่อควบคุมระยะบิน (TFC: Thermal Fly-height Control) (Schultz, 2007) (Hitachi global storage technologies, 2009) เป็นการให้ความร้อนจากชุดควบคุมโดยการป้อนกระแสไปที่ขดลวดที่อยู่บริเวณหัวอ่าน-เขียนมีผลทำให้หัวอ่าน-เขียนขยายตัวเข้าใกล้แผ่นดิสก์จึงทำให้ระยะบินลดลง การคำนวณระยะระหว่างหัวอ่าน-เขียนกับดิสก์จะใช้การให้ความร้อนไปที่หัวอ่าน-เขียนจนขยายตัวใกล้สัมผัสกับแผ่นดิสก์แล้วจึงนำค่าพลังงานที่ได้จากการให้ความร้อนนี้มาคำนวณเป็นระยะบิน การป้องกันการชนกันของหัวอ่าน-เขียนกับดิสก์ทำโดยการกำหนดระยะบินที่ปลอดภัยสำหรับทุกบริเวณบนดิสก์และเป็นค่าคงที่จากโรงงาน โดยมีความแตกต่างกันสำหรับฮาร์ดดิสก์แต่ละรุ่นที่ผลิต แต่อย่างไรก็ตามระยะบินดังกล่าวยังเป็นค่าที่สูงและยังสามารถถูกปรับลดลงมาเพื่อที่จะได้ค่าความผิดพลาดที่มีค่าน้อยลงได้ แต่ยังคงขาดวิธีการที่มาควบคุมระยะบินให้ยืดหยุ่นและปลอดภัยทุกบริเวณบนดิสก์

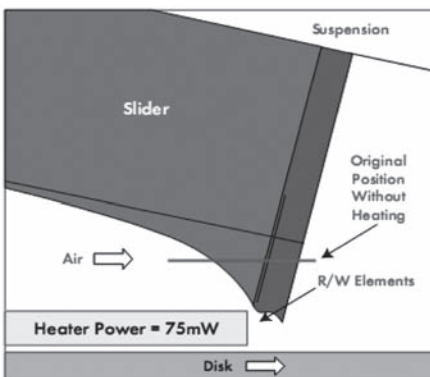
ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีการศึกษาและออกแบบอัลกอริทึมที่สามารถควบคุมระยะบิน ให้อยู่ในระยะที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการชนกันของหัวอ่าน-เขียนกับดิสก์และเพื่อให้ได้ SER ที่ดีขึ้น

เทคโนโลยีการกำหนดระยะบิน

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อความจุของฮาร์ดดิสก์ และ SER คือ ระยะบินที่น้อยลง แต่เนื่องจากอุณหภูมิและ รอบทำงานของการอ่าน-เขียนมีผลต่อระยะบินที่กำลังทำงานอยู่ในขณะนั้น ดังนั้นการควบคุมระยะบินให้อยู่ในระยะที่เหมาะสมตลอดการอ่าน-เขียนจึงมีความจำเป็น เทคโนโลยีที่ได้นำมาใช้คือเทคโนโลยี TFC ซึ่งมีการกำหนดระยะบินโดยการติดตั้งเซนเซอร์อุณหภูมิและชุดควบคุมกระแสที่ชุดหัวอ่าน-เขียน ทำให้สามารถมอนิเตอร์และควบคุมอุณหภูมิได้ หลักการทำงานก็คือที่หัวอ่าน-เขียนจะมีตัวทำความร้อน โดยตัวทำความร้อนจะเพิ่มความร้อนที่หัวอ่าน-เขียนทำให้ขยายและยื่นตัวออกไปใกล้กับดิสก์ ระยะบินจึงลดลงตั้งรูปที่ 1 (ก) และ (ข) ซึ่งแสดงหัวอ่าน-เขียนตอนก่อนให้ความร้อนและหลัง



(ก) หัวอ่าน-เขียนก่อนให้ความร้อน



(ข) หัวอ่าน-เขียนหลังให้ความร้อน

รูปที่ 1. ระยะบินของหัวอ่าน-เขียนก่อนและหลังให้ความร้อน (Schultz, 2007)

ให้ความร้อน เนื่องจากเทคนิคนี้จะทำการวัดระยะบินตอนเริ่มต้นจากวงในสุดและนอกสุดของแผ่นดิสก์ หลังจากนั้นจึงกำหนดค่าระยะบินเป็นค่าคงที่ซึ่งคำนวณมาจากค่าเฉลี่ยระหว่างวงในสุดและนอกสุดของดิสก์ ทำให้ระยะบินที่ได้ยังไม่แม่นยำมากนัก (Schultz, 2007)

Touch Down Power (TDP)

กำลังงานที่ทำให้หัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์สัมผัสกับดิสก์ (TDP: touch down power) ถูกทดสอบเพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงในการคำนวณระยะบิน โดยจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของความร้อนที่เกิดขึ้นที่หัวอ่าน-เขียน ทำให้เมื่อหัวอ่าน-เขียนได้รับความร้อนจะขยายตัวยื่นออกมาเข้าจนสัมผัสดิสก์ จากนั้นจึงใช้ค่านี้ในการคำนวณเป็นระยะบิน ตัวอย่างเช่น ฮาร์ดดิสก์มี TDP เท่ากับ 80 mW และมีอัตราส่วนของกำลังงานที่ให้ต่อการยืดของหัวอ่าน-เขียนที่ 1 mW/0.1 nm ดังนั้นหากต้องการให้หัวอ่าน-เขียนอยู่ห่างจากดิสก์ 4 nm จะต้องป้อนพลังงานให้แก่หัวอ่าน-เขียนเท่ากับ $80 \text{ mW} - (4/0.1) \text{ mW} = 40 \text{ mW}$

Soft Error Rate (SER)

อัตราข้อมูลผิดพลาด (SER: soft error rate) เป็นพารามิเตอร์หนึ่งของฮาร์ดดิสก์ที่ใช้ในการตรวจสอบความผิดพลาดของการอ่าน-เขียนข้อมูล โดยจะมีการเขียนสัญญาณลงไปก่อนและอ่านสัญญาณกลับขึ้นมาหลายๆ ครั้งต่อการเขียนหนึ่งครั้งในพื้นที่หนึ่งหน่วย การทดสอบนี้สามารถทำได้ทุกแตร็คของฮาร์ดดิสก์ หลังจากนั้นจึงตรวจสอบการอ่านค่าจากทั้งหมดว่ามีจำนวนผิดพลาดเกิดขึ้นกี่ครั้งแล้วนำมาคำนวณ SER ตามสมการที่ (1) จะเห็นว่า SER ที่ดีจะต้องมีจำนวนผิดพลาดน้อยมาก ๆ ซึ่งผลลัพธ์จากการคำนวณจะเป็นค่าติดลบ ยังมีค่าติดลบมากเท่าไรนั่นหมายถึง SER ยิ่งดีมากขึ้นไปด้วย

$$SER = \text{Log}_{10} \left[\frac{\text{Error_count}}{S \times W \times R \times b} \right] \quad (1)$$

โดยที่

Error_count คือ จำนวนข้อผิดพลาด

S คือ พื้นที่ (Sector) ที่ทดสอบ

W คือจำนวนรอบในการเขียน

R คือจำนวนครั้งในการอ่านข้อมูลของแต่ละรอบของการเขียน

b คือจำนวนข้อมูลเป็นบิต

Position Error Signal (PES)

ในแต่ละแทร็คของฮาร์ดดิสก์ไม่ได้มีแต่ข้อมูลที่ผู้ใช้งานเขียนลงไปเท่านั้นแต่ยังรวมถึงข้อมูลของเซอร์โวซึ่งมีด้วยกัน 5 ส่วนสำคัญคือ DC-gap field, Automatic gain control (AGC) field, Servo timing mask (STM) field, Grey coded track number field, Position burst pattern field ดังรูปที่ 2 แต่ส่วนที่เกี่ยวข้องกับ PES นั้นมีอยู่ด้วยกันสองส่วนคือ Grey coded track number field เป็นตัวระบุหมายเลขแทร็คเพื่อให้ตัวควบคุมรู้ว่าตอนนี้หัวอ่าน-เขียนอยู่ที่แทร็คใด และส่วน Position burst pattern field เป็นรูปแบบของเซอร์โวเพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งของหัวอ่าน-เขียนว่าอยู่ที่ตำแหน่งใดโดยใช้รูปแบบการเขียนเป็นแบบแผน burst A, B, C, D ดังรูปที่ 3 ในขณะที่ฮาร์ดดิสก์ทำงานหากหัวอ่าน-เขียนอยู่ที่ตำแหน่งที่ 0 ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของแทร็ค N สัญญาณที่อ่านได้จาก burst C จะมีค่าสูงสุด burst D จะเป็น 0 ส่วน burst A และ B จะมีค่าเท่ากันแต่น้อยกว่า burst C โดยรูปแบบของสัญญาณที่อ่านได้จากตำแหน่ง 0 สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 (ก) ถ้าหากว่าตำแหน่งของหัวอ่านไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งที่ 0 สัญญาณที่อ่านได้จาก burst A, B, C, D ก็จะแตกต่างกันออกไปด้วย ยกตัวอย่างเช่นหากหัวอ่านอยู่ที่ตำแหน่งหมายเลข 1 สัญญาณที่อ่านได้จาก burst B ย่อมสูงกว่า burst A เพราะหัวอ่านอยู่ใกล้มากกว่า ดังรูปแบบสัญญาณได้ดังรูปที่ 4 (ข) ดังนั้นตำแหน่งที่หัวอ่าน-เขียนอยู่ห่างจากศูนย์กลางของแทร็คสามารถคำนวณได้จากสัญญาณ burst เหล่านี้ และตำแหน่งศูนย์กลางของแทร็คสามารถ

คำนวณได้จากสัญญาณ burst เมื่อสัญญาณที่อ่านได้จาก burst A เท่ากับ burst B ความแตกต่างของ A และ B เรียกว่าสัญญาณ in-phase PES ดังสมการที่ (2) เพื่อยืนยันตำแหน่งของหัวอ่าน-เขียนในขณะที่อยู่บนแทร็คนอกจาก burst A และ B แล้ว ยังใช้ burst C และ D ด้วยโดยใช้หลักการเดียวกัน เพียงแต่หากหัวอ่านอยู่กึ่งกลางแทร็คจะอ่านค่าสัญญาณ burst C ได้สูงสุดและไม่สามารถอ่านสัญญาณ burst D ได้ ซึ่งความแตกต่างของ C และ D เรียกว่าสัญญาณ quadrature PES ดังสมการที่ (3) โดยหากใช้หัวอ่าน-เขียนสแกนอ่านค่าของแต่ละแทร็คไม่เฉพาะจุดที่คิดว่าเป็นศูนย์กลางจะได้รูปสัญญาณดังรูปที่ 5 ซึ่งเฟสจะต่างกัน 90 องศา

$$PES_{in_phase} = A_A - A_B \quad (2)$$

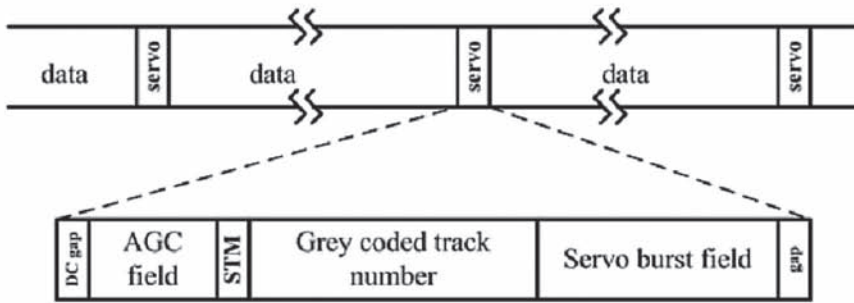
$$PES_{quadrature} = A_C - A_D \quad (3)$$

เมื่อ A_A, A_B, A_C, A_D

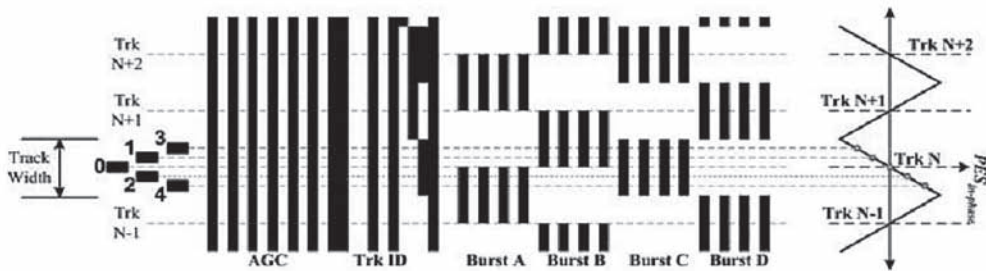
คือระดับสัญญาณของ burst A, B, C, D ตามลำดับ

การควบคุมหัวอ่าน - เขียนบนแทร็ค

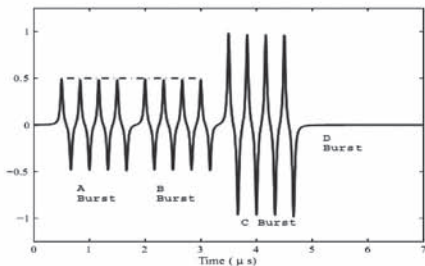
กระบวนการอ่าน-เขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์เมื่อต้องการไปที่แทร็คที่ต้องการ จะเริ่มจากกระบวนการค้นหา track ID ซึ่งกำหนดโดย grey code number หลังจากนั้นเมื่อพบแทร็คที่ต้องการแล้ว จึงพยายามทำให้หัวอ่าน - เขียนอยู่กึ่งกลางของแทร็คโดยอ้างอิงตำแหน่งของหัวอ่านจากค่า PES โดยกระบวนการของการให้หัวอ่าน - เขียนอยู่กึ่งกลางของแทร็คแสดงดังรูปที่ 6 เมื่อหัวอ่าน-เขียนเคลื่อนที่ไปถึงแทร็คที่ต้องการแล้วแต่หัวอ่าน-เขียนยังไม่อยู่ตรงกึ่งกลางของแทร็คก็สามารถรับรู้ได้ด้วยระดับสัญญาณ PES จากนั้นตัวควบคุม (controller) จะส่งค่าดิจิทัลเพื่อแปลงเป็นแอนะล็อก (DAC: digital to analog converter) ไปที่วอยซ์คอยมอเตอร์ (VCM: voice coil motor) เพื่อปรับให้หัวอ่าน-เขียนอยู่ตรงกึ่งกลางของแทร็คหรือใกล้เคียงกึ่งกลางของแทร็คมากที่สุดจึงจะเริ่มอ่านหรือเขียนข้อมูล



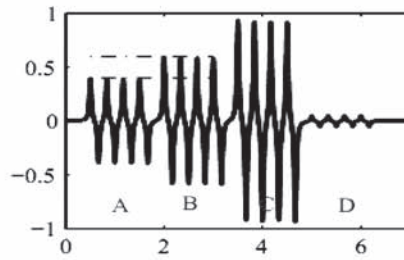
รูปที่ 2. โครงสร้างของแทร็คบนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



รูปที่ 3. โครงสร้างของแบบแผน burst A B C D

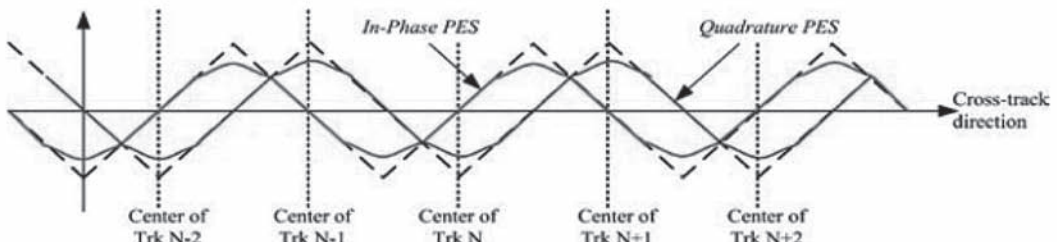


(ก) ระดับสัญญาณที่ตำแหน่ง 0

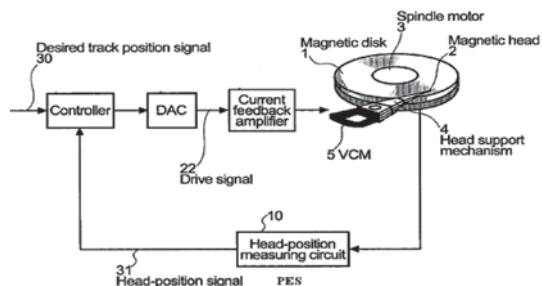


(ข) ระดับสัญญาณที่ตำแหน่ง 1

รูปที่ 4. ระดับสัญญาณ PES ที่ตำแหน่ง 0 และ 1



รูปที่ 5. สัญญาณ PES in-phase and quadrature



รูปที่ 6. การทำงานของการควบคุมตำแหน่งหัวอ่าน-เขียนบนแตร็ค (Hamada, 2009)

การทดสอบความสัมพันธ์

PES และ DAC กับระยะบิน

จุดประสงค์การทดสอบนี้เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับระยะการบิน ในที่นี้จำทำการศึกษาค่า PES และ DAC ซึ่งกับการการระบุตำแหน่งและควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน-เขียน โดยทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการลดระยะบินจนใกล้สัมผัสกับพารามิเตอร์เหล่านี้ว่ามีความเกี่ยวข้องหรือสัมพันธ์กับระยะบินหรือไม่ จากนั้นจึงทำการเลือกใช้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องที่เห็นได้ชัดเจนที่สุดมาใช้ในการออกแบบอัลกอริทึม

การทดสอบพารามิเตอร์ PES และ DAC แสดงดังรูปที่ 7 นั้นเป็นการทดสอบเพื่อดูความสัมพันธ์ที่อาจเกิดขึ้นเมื่อทำให้หัวอ่าน-เขียนเข้าใกล้ดิสก์เพิ่มมากขึ้นโดยการให้ความร้อนจนกระทั่งมีการขยายตัวของหัวอ่าน-เขียน หลังจากนั้นจึงนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระยะบินโดยการทดสอบนี้มีการบันทึกค่า PES และ DAC ไปพร้อมๆกันด้วยซอฟต์แวร์ทดสอบฮาร์ดดิสก์ในโรงงาน

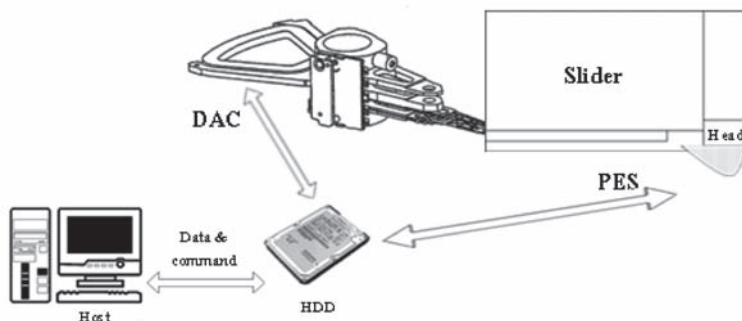
ในการทดสอบเมื่อมีการเพิ่มกำลังงานทุกๆ 1 mW จะมีการบันทึกหนึ่งครั้ง ซึ่งมีวิธีการทดสอบดังนี้

1. กำหนดจุดทดสอบที่วงใน, วงนอก, กึ่งกลาง, ระยะกึ่งกลางจากระยะกึ่งกลางมายังวงนอกและระยะกึ่งกลางจากระยะกึ่งกลางมายังวงใน ซึ่งกำหนดเป็นหมายเลข cylinder โดยประมาณได้ดังนี้ -500 (วงนอก), 42500, 85000 (กึ่งกลาง), 127500, 152031 (วงใน) โดยทดสอบหัวอ่าน-เขียนทั้งหมด 8 หัวจากโมเดลรุ่นเดียวกันทั้งหมดซึ่งอยู่ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สองตัว

2. เริ่มให้ความร้อนที่หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยแต่ละขั้นของการเพิ่มความร้อน (1 mW) จะบันทึกค่า PES และ DAC การบันทึกผลการทดสอบนี้จะกระทำไปจนกระทั่งซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทดสอบตรวจพบการสัมผัสกันของหัวอ่านเขียนกับดิสก์ ผลของการบันทึกค่าจะถูกเก็บไว้ใน log file เพื่อนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์

ผลการทดสอบ PES และ DAC

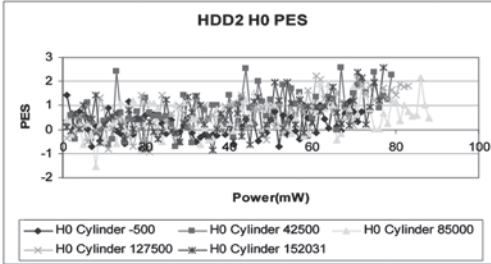
การทดสอบ PES ซึ่งก็คือค่าที่ระบุตำแหน่งของหัวอ่าน-เขียนจากกึ่งกลางของแตร็ค หากหัวอ่าน-เขียนอยู่ตรงกึ่งกลางพอดีค่า PES จะเท่ากับศูนย์ หากเบี่ยงซ้ายหรือขวา ค่า PES จะแสดงค่าเป็นบวกหรือลบดังรูปที่ 8 ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าเมื่อระยะบินเข้าใกล้ดิสก์มากขึ้นการรักษาตำแหน่งของหัวอ่าน-เขียนเริ่มทำได้ยากมากขึ้นสังเกตได้จาก PES เคลื่อนที่เบี่ยงซ้ายหรือขวาไปเรื่อยๆ



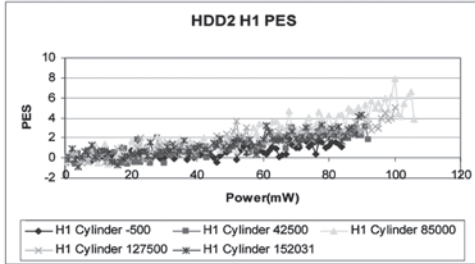
รูปที่ 7. ระบบทดสอบความสัมพันธ์ PES และ DAC กับระยะบิน

การทดสอบ DAC ซึ่งก็คือค่าที่ใช้สำหรับการควบคุม วอยซ์คอยมอเตอร์เพื่อให้หัวอ่าน-เขียนอยู่กึ่งกลางของ แทร็คโดยใช้ค่าของ PES เป็นตัวระบุตำแหน่งของหัว อ่าน-เขียน ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 9 สังเกตเห็นว่า

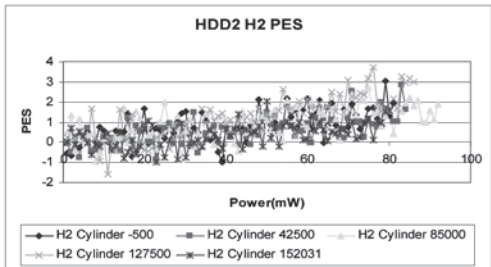
เมื่อระยะบินเข้าใกล้ดิสก์มากขึ้นการรักษาตำแหน่งของ หัวอ่าน-เขียนเริ่มทำได้ยากมากขึ้น จึงทำให้ค่า DAC เปลี่ยนแปลงมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน



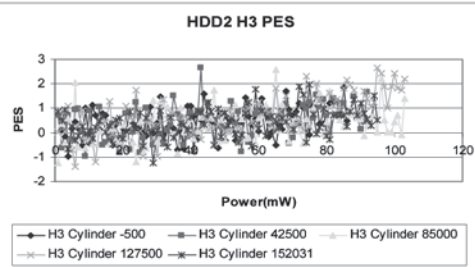
(ก) หัวอ่าน-เขียนที่ 0



(ข) หัวอ่าน-เขียนที่ 1

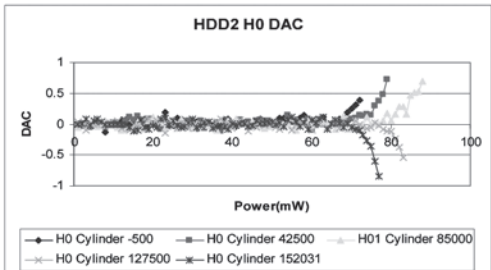


(ค) หัวอ่าน-เขียนที่ 2

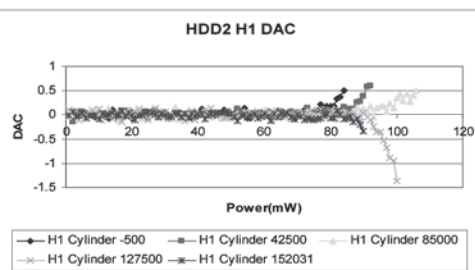


(ง) หัวอ่าน-เขียนที่ 3

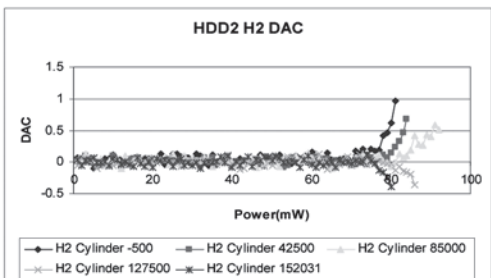
รูปที่ 8. ค่าเฉลี่ย PES ของ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 2 ในการทำให้ หัวอ่าน-เขียนต่างๆ ขยายตัว



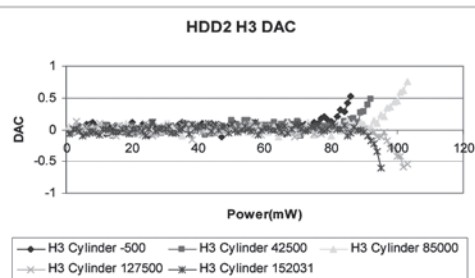
(ก) หัวอ่าน-เขียนที่ 0



(ข) หัวอ่าน-เขียนที่ 1



(ค) หัวอ่าน-เขียนที่ 2



(ง) หัวอ่าน-เขียนที่ 3

รูปที่ 9. ค่าเฉลี่ย DAC ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 2 ในการทำให้ หัวอ่าน-เขียนต่างๆ ขยายตัว

ผลการทดสอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทั้งสองตัวให้ผลทำนองเดียวกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเมื่อหัวอ่าน-เขียนถูกให้ความร้อนจากเทคโนโลยี TFC จนหัวอ่าน-เขียนขยายตัวทำให้ระยะบินน้อยลงจนกระทั่งเข้าใกล้ดิสก์ การเปลี่ยนแปลงของค่า PES และ DAC จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเบี่ยงเบนจากค่ากลาง แต่จากผลการทดสอบจากหัวอ่าน-เขียนดังรูปที่ 8 และ 9 แสดงให้เห็นว่าค่า DAC จะมีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจนมากกว่าค่า PES

ข้อพิจารณาในการเลือกใช้พารามิเตอร์

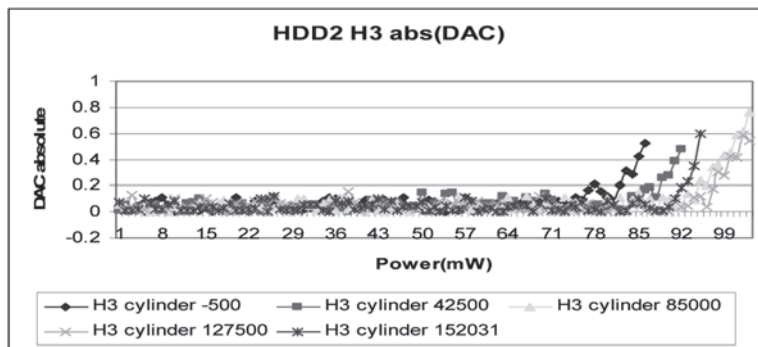
จากผลการทดสอบข้างต้นเห็นได้ชัดเจนว่าค่า DAC มีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดเจนมากกว่าค่า PES ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า DAC เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบอัลกอริทึม เนื่องจากค่า DAC มีการเปลี่ยนแปลงทั้งในด้านบวกและด้านลบดังรูปที่ 8 และ 9 ดังนั้นเพื่อสะดวกในการคำนวณและเพื่อความยืดหยุ่นของอัลกอริทึมจึงนำค่า DAC มาหาค่าสัมบูรณ์ซึ่งจะทำให้ค่า DAC ที่ได้หลังจากการคำนวณจะเคลื่อนที่อยู่ในด้านบวกเสมอดังรูปที่ 10

ข้อพิจารณาการตรวจจับความผิดปกติของค่า DAC

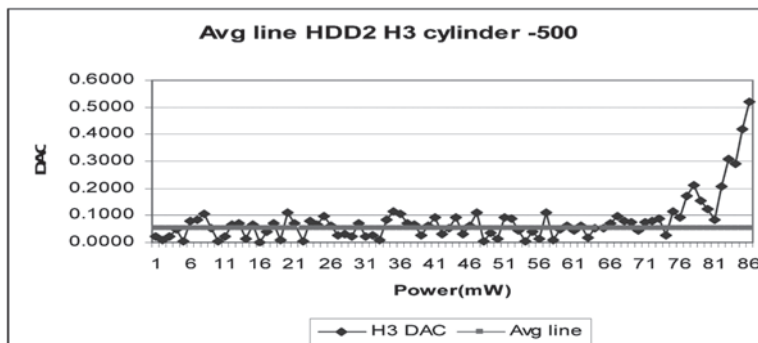
การตรวจจับค่าผิดปกติของ DAC เพื่อจะเป็นตัวบ่งบอกพฤติกรรมที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของหัวอ่าน-เขียนเมื่อเริ่มเข้าใกล้ดิสก์หรือก็คือระยะบินต่ำมาก ๆ นั้นเอง การตรวจจับค่าความผิดปกติของ DAC นั้นจะดูการเปลี่ยนของความแตกต่างค่าสูงสุดของการวัด โดยค่าสูงสุดถูกรวบรวมมาจากการให้พลังงานความร้อนตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งถึง 40 mW เพื่อหาค่าสูงสุด

การคำนวณเส้นค่าเฉลี่ยของค่า DAC

เนื่องจากค่า DAC สูงสุดได้รวบรวมมาจากการให้พลังงานความร้อนจนกระทั่งถึงการให้พลังงานความร้อนที่ 40mW ดังนั้นค่าทั้งหมดที่วัดได้จะถูกนำมาคำนวณโดยการหาผลบวกของค่า DAC ทั้งหมดหารด้วยจำนวนครั้งของการวัดดังสมการที่ (4) จึงได้เป็นเส้นค่าเฉลี่ย ตัวอย่างเส้นค่าเฉลี่ยแสดงดังรูปที่ 11 โดยใช้ข้อมูลจากฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่สองหัวที่สามตำแหน่ง cylinder ที่ -500



รูปที่ 10. ตัวอย่างค่าสัมบูรณ์ DAC ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 2 หัวอ่าน-เขียนที่ 3



รูปที่ 11. ตัวอย่างค่าเฉลี่ยของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 2 หัวอ่าน-เขียนที่ 3 (H3)

$$Avg_{line} = \frac{\sum_{n=1}^N DAC_n}{N} \quad (4)$$

เมื่อ DAC_n คือ ค่า DAC ที่อ่านได้จากการวัดครั้งที่ n และ N คือจำนวนครั้งของการวัด

การคำนวณเส้นตรวจจับความผิดปกติ

เส้นตรวจจับความผิดปกติ (Detection line) ของค่า DAC ใช้เพื่อกำหนดความผิดปกติของค่า DAC ที่จะเกิดขึ้นเมื่อหัวอ่าน-เขียนเข้าใกล้ดิสก์โดยคำนวณจากการหาค่าสูงสุดของค่า DAC จากการเก็บตัวอย่างที่ได้มาจากการเริ่มให้ความร้อนจนกระทั่งกำลังงานที่ให้เป็น 40 mW เพื่อใช้ในสมการที่ (5) โดยกำหนด 1.5 ซึ่งได้จากการสังเกตข้อมูลเป็นค่าผิดพลาดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้จากการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของ DAC เทียบกับเส้นค่าเฉลี่ย

$$Detection\ line = ((DAC_{peak} - Avg_{line}) \times 1.5) + Avg_{line} \quad (5)$$

เมื่อ DAC_{peak} คือ ค่า DAC สูงสุดที่รวบรวมมาจากการเริ่มให้ความร้อนหัวอ่าน-เขียนจนกระทั่งกำลังงานที่ให้เป็น 40 mW

เทคนิคการแยกค่า DAC เพื่อใช้คำนวณ

เนื่องจากค่า DAC ที่ใช้ในการคำนวณเป็นค่าที่ได้มาจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลดังนั้นความไวของการตรวจจับการเข้าใกล้ดิสก์ของหัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์ย่อมน้อยลงตามจำนวนของข้อมูลที่นำมาหาค่าเฉลี่ยดังนั้นจึงใช้วิธีการนำค่า DAC มาตรวจจับความผิดปกติดังนี้

1. กำหนดปริมาณข้อมูล (window size) สำหรับการแยกค่า DAC เพื่อนำมาวิเคราะห์
2. ข้อมูลที่นำเข้ามาใน window size ใช้วิธี FIFO คือข้อมูลที่เข้ามาก่อนจะถูกนำมาวิเคราะห์ก่อนดังข้อมูลบริเวณที่แรเงาในรูปที่ 12 ซึ่งทุกรอบทำงานจะมีการเลื่อน window ไปที่ข้อมูลใหม่และย้อนหลัง 4 ข้อมูล
3. ข้อมูลเมื่อมาอยู่ใน window size แล้วจะถูกเรียงข้อมูลจากมากไปหาน้อยดังรูปที่ 13
4. นำข้อมูลมาแบ่งกลุ่มสูงสุด ต่ำสุด และกึ่งกลางดังรูปที่ 14 มาคำนวณหาค่าสัมบูรณ์เพื่อนำมาคำนวณ DAC_{peak} , Avg_{line} และ $Detection\ line$
5. เมื่อค่าใดค่าหนึ่งในกลุ่มที่ถูกแยกออกมาแล้วเคลื่อนที่เหนือเส้น $Detection\ line$ จะเป็นการระบุหัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์เข้าใกล้ดิสก์มากเกินไป ดังตัวอย่างในรูปที่ 15

FIFO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
DAC values	3	2	3	4	5	3	2	1	2	3	4	5	3
Window1	3	2	3	4	5								
Window2		2	3	4	5	3							
Window3			3	4	5	3	2						
Window4				4	5	3	2	1					
WindowK					K	K	K	K	K				

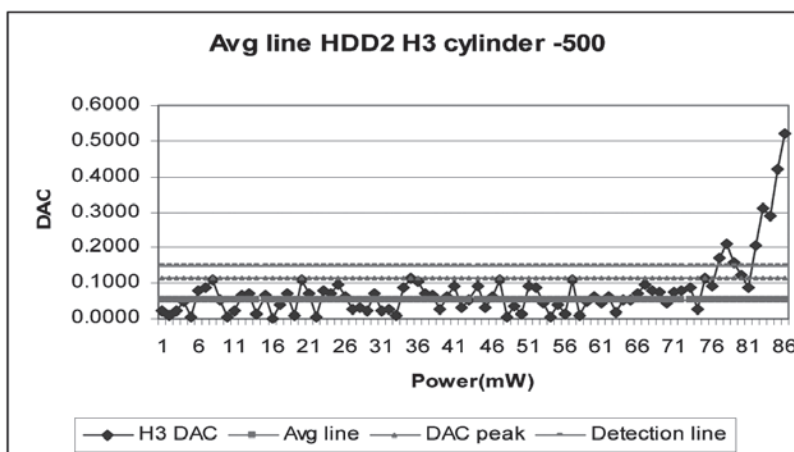
รูปที่ 12. ข้อมูลที่นำเข้ามาใน window size กำหนดความกว้างไว้ที่ 5

Window1	3	2	3	4	5		เรียงข้อมูล	5	4	3	3	2
Window2	2	3	4	5	3		เรียงข้อมูล	5	4	3	3	2
Window3	3	4	5	3	2		เรียงข้อมูล	5	4	3	3	2
Window4	4	5	3	2	1		เรียงข้อมูล	5	4	3	3	1

รูปที่ 13. ข้อมูลที่นำเข้ามาใน window size เรียงข้อมูลจากมากไปน้อย

Windows	1	2	3	4	...	K
DAC high	5	5	5	5	...	K
DAC normal	3	3	3	3	...	K
DAC low	2	2	2	1	...	K

รูปที่ 14. ข้อมูลใน windows ที่ถูกแบ่งแยกกลุ่มเพื่อนำไปคำนวณ

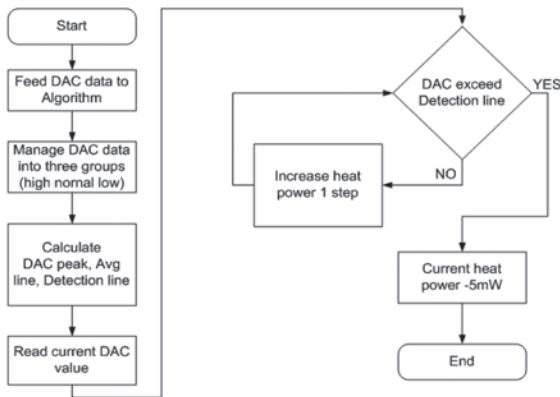


รูปที่ 15. ตัวอย่าง DAC_{peak}, Avg_{line}, Detection line และเส้นค่าเฉลี่ยของหัวที่ 3 (H3)

การออกแบบอัลกอริทึม

ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมสำหรับควบคุมระยะหัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์เพื่อลดอัตราข้อมูลผิดพลาดจากการอ่าน-เขียนข้อมูลสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 16 เริ่มต้นด้วยการป้อนข้อมูลค่า DAC ให้แก่อัลกอริทึมเพื่อนำข้อมูลมาแบ่งกลุ่มสูงสุด ต่ำสุด และกึ่งกลางมาหาค่าสัมบูรณ์เพื่อนำมาคำนวณ DAC_{peak}, Avg_{line} และ Detection line ของแต่ละกลุ่มโดยใช้วิธีการแบ่งเป็น windows หลังจากได้ค่าต่างๆแล้วขั้นตอนต่อไปคือให้

ความร้อนไปที่หัวอ่าน-เขียนจนกระทั่งมีการแจ้งเตือนการตรวจพบค่าผิดปกติของค่า DAC เนื่องจากเคลื่อนที่เหนือเส้น Detection line เมื่อมีการแจ้งเตือนแสดงว่าหัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์เข้าใกล้ดิสก์มากเกินไปจึงต้องมีการลดกำลังงานที่ส่งให้หัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์โดยกำหนดให้ลดกำลังงานจากจุดที่ตรวจจับเป็น -5 mW เพื่อไม่ให้อัลกอริทึมแจ้งเตือนอยู่ตลอดเวลาจึงได้เป็นค่าที่เหมาะสมกับฮาร์ดดิสก์ในแต่ละบริเวณ



รูปที่ 16. ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมการกำหนดระยะบิน

การทดสอบอัลกอริทึมกับฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์จริง

หลังจากได้ออกแบบอัลกอริทึมเป็นที่เรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นจึงเป็นการนำอัลกอริทึมที่ได้ออกแบบมาใช้กับฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์จริง โดยทดสอบกับฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ตัว

ที่สองหัวที่ 0 และ 3 ซึ่งได้ผลการทดสอบเป็นดังตารางที่ 1 และ 2 ผลการทดสอบการทดสอบอัลกอริทึมที่ใช้ในการตรวจจับการเข้าใกล้ดิสก์ของหัวอ่าน-เขียนกับดิสก์พบว่าสามารถตรวจจับการเข้าใกล้ดิสก์ได้เมื่อหัวอ่าน-เขียนเข้าใกล้ดิสก์ และนำผลไปกำหนดระยะบินด้วยอัลกอริทึมในแต่ละตำแหน่งของฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์เป็นที่น่าพอใจว่าสามารถปรับปรุง SER ให้ดีขึ้นกว่าการตั้งค่า FH มาจากโรงงาน (ค่า Default) ผลของ SER ที่ดีขึ้นเป็นผลจากระยะบินที่ต่ำลงทำให้สามารถเพิ่ม SNR ได้ดีขึ้นทำให้ความผิดพลาดจากการเขียนหรืออ่านข้อมูลจากหัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์ลดลงส่งผลให้ SER ดีขึ้นเฉลี่ย 6.99% ทั้งนี้เป็นข้อจำกัดในการวิจัยที่ไม่สามารถจัดหาฮาร์ดดิสก์จำนวนมากมาทดสอบ และไม่สามารถทดสอบทุกหัวอ่าน-เขียนของฮาร์ดดิสก์ทั้งสองตัวได้ แต่การทดสอบก็ได้ทำซ้ำที่ตำแหน่งต่างๆ ของดิสก์ ซึ่งผลที่ได้ให้แนวโน้มเดียวกัน

ตารางที่ 1. สรุปค่า SER ของหัวอ่าน-เขียนที่ 0 ที่ได้จากการทดสอบของโรงงานกับอัลกอริทึม

Cylinder	SER Avg				FH Power		
	Default	Algorithm	Delta	%Improve	Default	Algorithm	Delta
0	-5.4908	-5.7324	-0.2416	4.400	73	78	5
42500	-6.0446	-6.6304	-0.5858	9.691	72	84	12
85000	-6.0690	-6.4090	-0.3400	5.602	71	89	18
127500	-5.6570	-6.1674	-0.5104	9.022	69	85	16
153021	-5.4972	-6.3246	-0.8274	15.051	69	80	11

ตารางที่ 2. สรุปค่า SER ของหัวอ่าน-เขียนที่ 3 ที่ได้จากการทดสอบของโรงงานกับอัลกอริทึม

Cylinder	SER Avg				FH Power		
	Default	Algorithm	Delta	%Improve	Default	Algorithm	Delta
0	-5.8856	-6.346	-0.4600	7.816	68	75	7
42500	-6.1404	-6.373	-0.2330	3.795	67	79	12
85000	-6.1334	-6.550	-0.4164	6.789	67	85	18
127500	-7.0126	-7.254	-0.2418	3.448	67	81	14
153021	-6.0850	-6.343	-0.2584	4.247	67	77	10

สรุป

พารามิเตอร์ที่เห็นได้ชัดเจนเมื่อหัวอ่าน-เขียนเคลื่อนที่เข้าใกล้ดิสก์คือค่า DAC ที่ป้อนให้กับวอยซ์คอยมอเตอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน-เขียนในแนวระนาบ พารามิเตอร์นี้จึงถูกนำไปใช้ในอัลกอริทึมเพื่อตรวจจับหัวอ่าน-เขียนว่าเริ่มมีการเคลื่อนเข้าใกล้ดิสก์เพื่อนำค่า TDP ที่ได้มากำหนดเป็นระยะบินในการปรับปรุง SER

ค่าพลังงานที่ใช้ในการกำหนดระยะบินเป็นค่าที่ได้จากอัลกอริทึม ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำกว่าการตรวจจับเมื่อหัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์เข้าใกล้การชนกับดิสก์ ดังนั้นเมื่อใช้กำลังงานที่ได้จากอัลกอริทึมนี้มากำหนดระยะบินมีโอกาสน้อยมากที่จะทำให้หัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์ชนกับดิสก์เนื่องจากเมื่อหัวอ่าน-เขียนเคลื่อนที่เข้าใกล้ดิสก์สามารถตรวจพบด้วยอัลกอริทึมนี้ ซึ่งหากมีการตรวจพบการเข้าใกล้ดิสก์ของหัวอ่าน-เขียนเกิดขึ้นสามารถเพิ่มระยะบินเพื่อป้องกันการชนของหัวอ่าน-เขียนกับดิสก์ได้

ความผิดพลาดของการอ่านเขียนข้อมูลถูกวัดด้วยค่า SER จากผลการทดสอบจากตาราง แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะบินที่ทำให้หัวอ่าน-เขียนฮาร์ดดิสก์เข้าใกล้ดิสก์มากเท่าไรจะส่งผลต่อค่า SER มากยิ่งขึ้น และจากผลของการออกแบบอัลกอริทึมทำให้ได้ค่าการกำหนดระยะบินที่ส่งผลให้หัวอ่าน-เขียนเข้าใกล้ดิสก์ได้มากกว่าค่าที่กำหนดจากโรงงาน ดังนั้นผลของค่า SER ที่ได้จึงดีกว่า SER จากโรงงาน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดร์ฟ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ในโครงการ CPN-HR 13-01-52 M และบริษัทฮิตาชิ โกลบอล สตอเรจ เทคโนโลยี ประเทศไทย จำกัด ในการสนับสนุนสถานที่และข้อมูลในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Hamada, Y. and Date, K. 2009. **Disk storage device**. US. Patent No. 6989957.
- Hitachi global storage technologies. **The era of giant magnetoresistive heads**. [online]. [Cite 12April 2009]. Available from:<http://www.hitachigst.com/hdd/technolo/gmr/gmr.htm>
- Lille, J. and Suk, M. 2008. **Predictive failure analysis of thermal flying height control system and method**. US. Patent No. 7336434.
- Liu, B., Yu, S.K., Zhou, W.D., Wong, C.H., and Hua, W. 2008. Low flying-height slider with high thermal actuation efficiency and small flying-height modulation caused by disk waviness. *IEEE Transactions on Magnetics*, 44(1): 145-150.
- Ma, Y. 2008. **Detection of fly height change in a disk drive**. US. Patent No. 2008/0013198A1.
- Schultz, B.E. 2007. **Thermal fly-height control (TFC) technology in Hitachi hard disk drives**. [online]. [Cite 19 November 2008]. Available from:[http://www.hitachigst.com/tech/techlib.nsf/techdocs/98EE13311A54CAC886257171005E0F16/\\$file/TFC_whitepaper041807.pdf](http://www.hitachigst.com/tech/techlib.nsf/techdocs/98EE13311A54CAC886257171005E0F16/$file/TFC_whitepaper041807.pdf)
- Yuan, Z.M., Wan, L., Zhang W., Hu, S.B., Xian, R., Liu, B. 2002. In-Situ Flying Height Testing Technology. **Asia-Pacific Magnetic Recording Conference**, TU-P-13-01 - TU-P-13-02.