

การวิเคราะห์สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบอลแบร์ริงในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

Mathematical Modeling Equation Analysis of Pivot ball bearing in Hard Disk Drive

บัณฑิตย์ ปรานนท์¹ เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต^{2*}

¹ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002

โทร 0-8682-22615 โทรสาร 0-4320-2849

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ. ขอนแก่น 40002

โทร 0-4320-2845 ต่อ 151 โทรสาร 0-4320-2849 *อีเมลล์ kiatfa@kku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical modeling equation) ของบอลแบร์ริง (Pivot ball bearing) ของแขนหัวอ่าน/เขียน (Actuator-arm) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive) โดยมีการวิเคราะห์ค่าพิทความเผื่อ (Tolerance analysis) ของชิ้นส่วนต่างๆ ของบอลแบร์ริง โดยใช้หลักการพื้นฐานของการวิเคราะห์ คือ Worst case analysis และ Statistical analysis เพื่อสร้างเป็น Min/Max chart ซึ่งสามารถอธิบายถึงผลของค่าพิทความเผื่อของแต่ละพารามิเตอร์ของแต่ละชิ้นส่วนที่ส่งผลต่อการเกิดระยะแก็บ (Gap) หรือการชนกัน (Interference) อีกทั้งได้มีการใช้ร่วมกันระหว่าง Min/Max chart กับหลักการของมอนติคาร์โล (Monte Carlo) ช่วยในการจำลองพารามิเตอร์ (Parametric simulation) เพื่อนำข้อมูลไปสร้างเป็นสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจากความสัมพันธ์ของสมการทางคณิตศาสตร์มีส่วนช่วยในกระบวนการออกแบบ กระบวนการผลิตและการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นจากงานประกอบ ตลอดจนอธิบายหรือทำนายผลของพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อการประกอบของบอลแบร์ริง

Abstract

This research studies the building for the mathematical modeling equation of Pivot ball bearing of actuator-arm in hard disk drive (HDD) by Tolerance analysis of ball bearing parts which uses the basic of the worst case analysis and statistical analysis to generate Min/Max Chart which can describe the relation of the individual part dimensions which affects to the clearance or interference. Moreover, with the common tolerance analysis methods, Min/Max Charts are combined with Monte carlo theory to generate Parametric Simulation for generate the mathematical modeling equation which assist in model design, production, assembly problem analysis and including to explain or

predict the result of parameters which affects to ball bearing assembly.

1. บทนำ

ฮาร์ดดิสก์ในปัจจุบันได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งด้านความจุ ความเร็วรอบและความเร็วในการเข้าถึงข้อมูล (Access times) อีกทั้งยังมีการประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย นอกจากเป็นอุปกรณ์ที่เก็บข้อมูลในคอมพิวเตอร์แล้ว ยังมีการนำไปประยุกต์ใช้ในรถยนต์ โทรศัพท์มือถือ หรือแม้แต่ในเครื่องสำอางและอุปกรณ์อื่นๆ อีกมากมาย ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าต่อไปในอนาคตแนวโน้มของการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีทางด้านอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ยังจะมีการพัฒนาที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้มีการวิจัยและการพัฒนาการออกแบบของโครงสร้างหรือการพัฒนากระบวนการควบคุมของฮาร์ดดิสก์อยู่ตลอดเวลา

ฮาร์ดดิสก์ในยุคแรกๆ จะมีการทำงานของการหมุนของแขนหัวอ่าน/เขียนเป็นแบบ Stepper motor ซึ่งจากการวิจัยของ Blount [1] พบว่ามีข้อเสียทางด้านข้อจำกัดด้านความเร็วและอุณหภูมิ อีกทั้งการควบคุมตำแหน่งของหัวอ่าน/เขียนยังไม่เสถียร เนื่องจากระบบเป็นแบบเปิด (Open loop systems) ในปัจจุบันจึงหันมาใช้ Voice Coil Motor ซึ่งจะทำให้ระบบสามารถควบคุมตำแหน่งได้เสถียรมากกว่า เพราะว่าจะมีสัญญาณป้อนกลับไว้คอยตรวจสอบตำแหน่งที่ผิดพลาดของระบบปิด (Closed-loop feedback signal) ในการควบคุมของระบบนี้เรียกว่า “ระบบควบคุมแบบเซอร์โว” (servo system) แต่ระบบยังมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ของระบบ จากงานวิจัยของ Chang [2], Peng และคณะ [3] ได้เสนอถึงสาเหตุของความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบเนื่องจากปัจจัยหลัก 2 ประการ คือ อย่างแรกเป็นผลอันเนื่องมาจากผลของค่าแรงเสียดทานของแบร์ริงกลไกแขนหัวอ่าน/เขียน และอีกประการเป็นผลอันเนื่องมาจาก Data flex cable งานวิจัยของ Chang [2] จึงได้เสนอวิธีการลดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของฮาร์ดดิสก์ขนาด 3.5 นิ้ว โดยการสร้างแบบจำลองของแบร์ริงโดยใช้ Relay function เพื่อหาค่าของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นของแบร์ริงเทียบกับการทดลองในห้องทดลอง แต่การทดลองยังเกิดค่า

ความผิดพลาดเกิดขึ้นอันเนื่องจากผลของ Data flex cable และการเลื่อน (Shift) เกิดขึ้นในตำแหน่งการหมุนของแบริ่งซึ่งวัดโดย Laser Doppler vibrometer (LDV) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการแก้ปัญหาส่วนใหญ่จะเน้นไปยังระบบควบคุมเซอร์โว เพื่อให้แชนหัวอ่าน/เขียนสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการและแม่นยำจึงทำให้เกิดการลื่นไหลของพลังงานที่ใช้ในการทำงานของฮาร์ดดิสก์ แต่ยังมีส่วนน้อยของงานวิจัยที่จะศึกษาผลกระทบของค่าพิทักความเผื่อของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นของแบริ่งที่ส่งผลต่อค่าความเสียดทาน ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

วิธีการของการวิเคราะห์ค่าพิทักความเผื่อ Shah และคณะ [4] ได้จำแนกวิธีการไว้ด้วยกัน 4 วิธี แต่มี 2 วิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ 1-D Min/Max Chart และ Parametric Simulation ในงานวิจัยอาจใช้การวิเคราะห์โดยศึกษาในกรณีของ Worst case analysis หรืออาจใช้ร่วมกันระหว่าง Worst case analysis กับ Statistical analysis ขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของงานที่ทำการศึกษา เช่น Li และ Roy [5] ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ค่าพิทักความเผื่อของงานประกอบของแผ่นโลหะ (Sheet metal) โดยใช้ Beam-Base model เพื่อศึกษาถึงการหาค่าของค่าความผิดพลาดจากงานประกอบ (Fabrication errors) ซึ่งก็จะมีการใช้วิธีการของ Worst case analysis เข้ามาวิเคราะห์ร่วมด้วย ในปี 1991 Schlatter [6] ได้มีการวิเคราะห์ค่าพิทักความเผื่อของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้ computer aided 3D เป็นครั้งแรกโดยบริษัท IBM ในการวิเคราะห์ฮาร์ดดิสก์ ขนาด 5 1/4 นิ้ว ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะเคยใช้กับอุตสาหกรรมยานยนต์มาก่อน ตั้งแต่ปี 1992 การวิเคราะห์ค่าพิทักความเผื่อแบบ 3D ถูกพัฒนาขึ้นให้ใช้กับฮาร์ดดิสก์ 2.5 นิ้ว โดยใช้ VSA – 3D ซอฟต์แวร์ ซึ่งสามารถทำนายการเกิด run-out, disk – stack envelope, และ imbalance numbers

ในส่วนของงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ค่าพิทักความเผื่อของบอลแบริ่งของแชนหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ซึ่งจากงานวิจัยของ Prannattee และ Tangchaichit [7] ได้มีการสร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบอลแบริ่งในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยใช้ Tolerance stack-up analysis ซึ่งใช้หลักการการวิเคราะห์ของ Meadows [8] โดยมีการอ้างอิงกับมาตรฐาน ANSI Y14.5M [9] แต่ค่าของสมการที่ได้ยังไม่ได้มีการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง งานวิจัยนี้จึงทำการเปรียบเทียบผลของสมการที่ได้จากการ Parametric Simulation กับผลของการทดลองจากการวัดค่าจริง อีกทั้งเนื่องจากในปัจจุบันในกระบวนการออกแบบ กระบวนการผลิตชิ้นส่วนแต่ละชิ้นส่วนและกระบวนการประกอบชิ้นส่วนของบอลแบริ่งของแชนหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ยังประสบปัญหาในเรื่องของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นหลังจากการประกอบ โดยไม่ทราบถึงพฤติกรรมของการปรับขนาดค่าพิทักความเผื่อของชิ้นส่วนแต่ละชิ้นว่ามีผลอย่างไรกับระยะแก็ป (Gap) หรือระยะการขบกัน (Interference) ซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดแรงเสียดทาน ซึ่งถ้าสามารถหาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical modeling equation) ของค่าพิทักความเผื่อของแต่ละชิ้นส่วนได้แล้วก็จะนำไปสู่การหาค่าของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น เนื่องจากผลของค่าพิทักความเผื่อโดยใช้การวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. สร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบอลแบริ่งของแชนหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จากความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

2. สามารถหาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้

3. ขอบเขต และข้อจำกัดของงานวิจัย

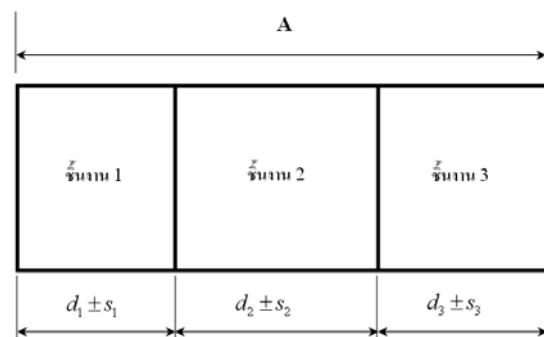
ศึกษาและหาแนวทางการวิเคราะห์ค่าพิทักความเผื่อของบอลแบริ่งของแชนหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ขนาด 3.5 นิ้ว, ความเร็วรอบ 7200 รอบ/นาที, 2 หัวอ่าน/เขียน เพื่อสร้างเป็นสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างค่าของพารามิเตอร์

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ค่าพิทักความเผื่อ คือ ช่วงระหว่างขนาดจำกัดโตสุด (Maximum limit of size) และขนาดจำกัดเล็กสุด (Minimum limit of size) ของการขึ้นรูป เป็นค่าที่แปรเปลี่ยนได้สูงสุด ซึ่งสามารถยอมรับได้บนชิ้นงาน

การวิเคราะห์ค่าพิทักความเผื่อจะมีพื้นฐานของการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

1. Worst case analysis เป็นการหาค่าของระยะแก็ปที่มากที่สุด (Maximum gap) และน้อยสุด (Minimum gap) ซึ่งการหาค่าทำได้โดยการหาผลรวมของขนาดทำงานและผลรวมของค่าเฉลี่ยของ Bi-lateral tolerances ยกตัวอย่างการหาค่าผลต่างของขนาดทำงาน เมื่อนำชิ้นงาน 3 ชิ้น แล้วนำมาประกอบเข้าด้วยกันแสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงชิ้นงาน 3 ชิ้นประกอบเข้าด้วยกัน

จากรูปที่ 1 เมื่อ A คือ ขนาดทำงานรวมของชิ้นงาน 1 ชิ้นงาน 2 และชิ้นงาน 3 ผลรวมค่าเฉลี่ยของ Bi-lateral tolerances

$$\text{มีค่าเท่ากับ } \bar{S} = \bar{S}_1 + \bar{S}_2 + \bar{S}_3 \quad (1)$$

ผลรวมของขนาดทำงานแต่ละชิ้นงานมีค่าเท่ากับ

$$D = d_1 + d_2 + d_3 \quad (2)$$

จะได้ความสัมพันธ์

$$A = (d_1 + d_2 + d_3) \pm \bar{S} \quad (3)$$

$$A = D \pm \bar{S} \quad (4)$$

ค่ามากที่สุดของ A มีค่าเท่ากับ

$$A = D + \bar{S} = \text{Max. A} \quad (5)$$

ค่าน้อยสุดของ A มีค่าเท่ากับ

$$A = D - \bar{S} = \text{Min. } A \quad (6)$$

จะได้ผลต่างของ A มีค่าเท่ากับ

$$\Delta A = \text{Max. } A - \text{Min. } A \quad (7)$$

2. Statistical analysis หรือ Root Sum Square (RSS) Method เป็นการหาค่าของระยะแก๊บที่มากที่สุดและน้อยสุดเช่นเดียวกันกับกรณีของ Worst case analysis แต่การหาค่าทำได้โดยการหารากของผลรวมยกกำลังสองของ Bi-lateral tolerances ของแต่ละชิ้นงาน ยกตัวอย่างการหาค่าผลต่างของขนาดทำงานรวม จากรูปที่ 1 เมื่อ A คือ ขนาดทำงานรวมของชิ้นงาน 1 ชิ้นงาน 2 และชิ้นงาน 3 ผลรวมของค่าเฉลี่ยกำลังสองของ Bi-lateral tolerances มีค่าเท่ากับ

$$\bar{S}_{RSS} = (\bar{S}_1^2 + \bar{S}_2^2 + \bar{S}_3^2)^{1/2} \quad (8)$$

จะได้ความสัมพันธ์

$$A = D \pm (\bar{S}_1^2 + \bar{S}_2^2 + \bar{S}_3^2)^{1/2} \quad (9)$$

$$A = D \pm \bar{S}_{RSS} \quad (10)$$

ค่ามากที่สุดของ A มีค่าเท่ากับ

$$A = D + \bar{S}_{RSS} = \text{Max. } A \quad (11)$$

ค่าน้อยสุดของ A มีค่าเท่ากับ

$$A = D - \bar{S}_{RSS} = \text{Min. } A \quad (12)$$

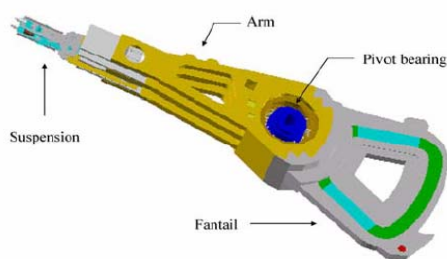
จะได้ผลต่างของ A เท่ากับ

$$\Delta A = \text{Max. } A - \text{Min. } A \quad (13)$$

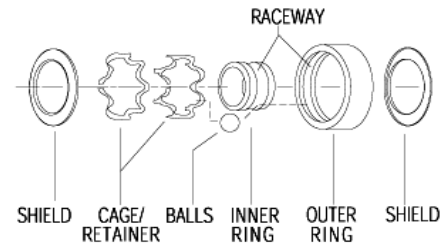
3. The common tolerance analysis methods ทั้งวิธีของ Worst case analysis และ Statistical analysis สามารถนำไปสร้างเป็น Min/Max Tolerances Chart ได้ ซึ่งวิธีของ Common tolerance analysis จะเป็นการวิเคราะห์ร่วมกันระหว่าง Min/Max Tolerances Chart และ Parametric Simulation ซึ่งในการวิเคราะห์ Min/Max Tolerances Chart จำเป็นต้องสร้าง Loop analysis diagram ขึ้นมาก่อน จากนั้นจึงสร้าง Min/Max Tolerances Chart การใช้วิธี Parametric Simulation เป็นการสุ่มพารามิเตอร์ที่สนใจหรือพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อการออกแบบชิ้นงาน การผลิตชิ้นงานหรือการประกอบชิ้นงานโดยใช้หลักการของมอนติคาร์โล เพื่อทำการจำลองข้อมูลภายใต้ขอบเขตที่กำหนด

5. วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาโครงสร้างและส่วนประกอบของแบริ่งทำของแขนหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ ในฮาร์ดดิสก์ 3.5 นิ้วความเร็วรอบ 7200 รอบ/นาที, 2 หัวอ่านเขียน



รูปที่ 2 แสดงส่วนประกอบของ Actuator-arm ใน HDD



รูปที่ 3 แสดงส่วนประกอบของบอลแบริ่ง

2. ศึกษาขนาดของแต่ละชิ้นส่วนของบอลแบริ่งและกำหนดขนาดของแต่ละชิ้นส่วนด้วยการแทนค่าพารามิเตอร์ของชิ้นส่วนเมื่อกำหนดให้

Gap = ช่องว่างระหว่างบอลกับร่องบอล

A = ระยะจากส่วนโค้งด้านนอกของ Raceway ถึงขอบนอกของ Race diameter

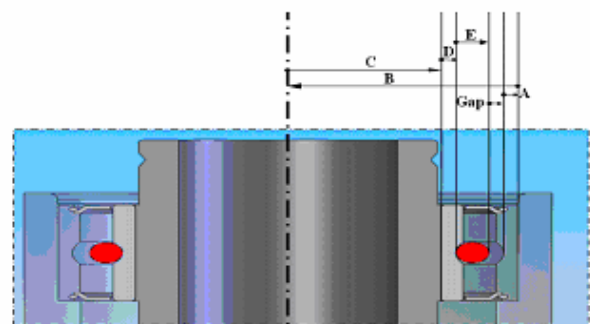
B = ระยะจากขอบนอกของ Race diameter ถึงเส้นผ่านศูนย์กลางของบอลแบริ่ง

C = ระยะจากเส้นผ่านศูนย์กลางของบอลแบริ่งถึงขอบของ Inner race

D = ระยะจาก Inner race ถึงส่วนโค้งด้านในของ Raceway

E = ระยะจากส่วนโค้งด้านในของ Raceway ถึงจุดเริ่มต้นของ Gap

นำไปเขียนเป็นแผนภาพของ Loop analysis diagram ได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 Loop analysis diagram ของบอลแบริ่งใน HDD

จากรูปที่ 4 สามารถสร้างสมการของ loop analysis ได้เป็น

$$\overline{Gap} = \bar{B} - \bar{A} - \bar{C} - \bar{D} - \bar{E} \quad (14)$$

3. พิจารณาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องซึ่งค่าของขนาดได้มาจากแบบงาน (Drawing) และเปลี่ยนขนาดไปเป็น Bi-lateral tolerances และใส่ค่าต่างๆ ที่ได้ลงใน Min/Max Chart แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงการใส่ค่าลงใน Min/Max tolerance Chart

Para meters	Nom	Nom (+/-)	Tol (+/-)	Effect Tol.	Max	Min
A	0.29375	-0.29375	0.0000	0.00000	0.29375	0.29375
B	4.76250	4.76500	0.0075	0.00750	4.77000	4.75500
C	3.17000	-3.17400	0.0060	0.00600	3.17600	3.16400
D	0.29375	-0.29375	0.0000	0.00000	0.29375	0.29375
E	0.87330	-0.87330	0.0100	0.01000	0.88330	0.86330
	Gap =	0.13020	WOW =	0.02350		
			RSS =	0.01387		

จากตารางที่ 1 คำนวณค่าได้ดังนี้

ผลของการวิเคราะห์วิธีของ Worst case จะได้ค่าดังนี้

Nominal gap = 0.13020 mm.

Maximum gap = 0.13020 + 0.02350 = 0.1537 mm.

Minimum gap = 0.13020 - 0.02350 = 0.1067 mm.

ผลของการวิเคราะห์วิธีของ Root Sum Square (RSS) จะได้ค่าดังนี้

Nominal gap = 0.13020 mm.

Maximum gap = 0.13020 + 0.01387 = 0.14407 mm.

Minimum gap = 0.13020 - 0.01387 = 0.11633 mm.

4. สร้างข้อมูลของพารามิเตอร์ด้วยวิธีการ Parametric Simulation โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งมีหลักการทำงานโดยอาศัยทฤษฎีของมอนติคาร์โล ซึ่งการจำลองพารามิเตอร์จะใช้การแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) เพราะจะให้ค่าการแจกแจงของข้อมูลมีความแม่นยำ เพราะเป็นวิธีที่ทำให้มีความไม่แน่นอนน้อยที่สุดและจะให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยที่สุด ซึ่งค่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานได้มาจากการคำนวณโดยนำค่าของ Bi-lateral tolerances ของพารามิเตอร์แต่ละตัวหารด้วย 3 เนื่องจากในการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะยึดหลักสมมติฐานจุดสิ้นสุดการควบคุม $\pm a$ โดยค่า a มีค่าเท่ากับ 99.7 ของการแจกแจงแสดงดังรูปที่ 5 ส่วนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะได้จากการคำนวณแสดงดังตารางที่ 2



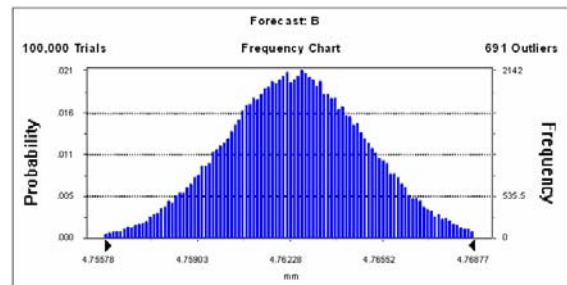
รูปที่ 5 การแจกแจงแบบปกติ

$$s_{source} = \frac{1}{3}a$$

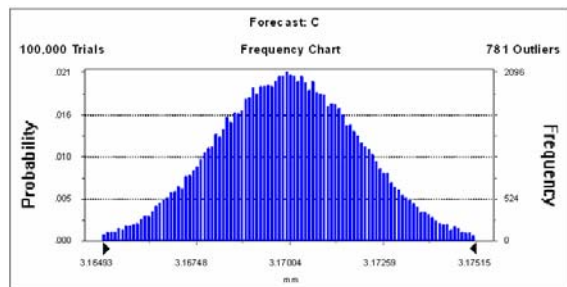
ตารางที่ 2 สมมติฐานและค่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ

Parameters	Assumption	Sigma. (Standard deviation)
B	Normal distribution	0.0075/3 = 0.0025
C	Normal distribution	0.0060/3 = 0.002
E	Normal distribution	0.0100/3 = 0.00333

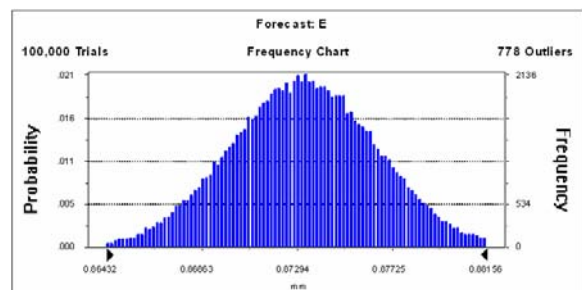
นำผลจากตารางที่ 1 และวิธีการแจกแจงแบบปกติ ตลอดจนค่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของพารามิเตอร์ นำไปจำลองสร้างเป็นข้อมูลจำนวน 100000 ค่า เนื่องจากเมื่อนำค่าของข้อมูลนี้ไปสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ ค่าการเปลี่ยนแปลงของสมการน้อยมาก เมื่อเทียบกับระหว่างการจำลองข้อมูลของจำนวนข้อมูลที่แตกต่างกัน ผลการจำลองพารามิเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 6-9



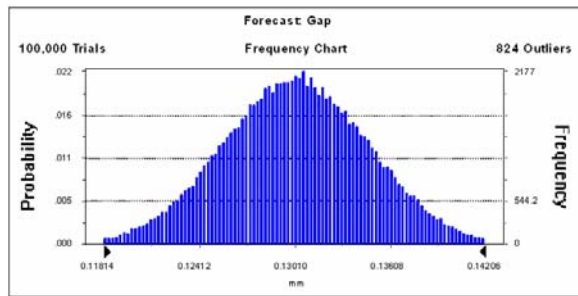
รูปที่ 6 การจำลองค่าของพารามิเตอร์ B



รูปที่ 7 การจำลองค่าของพารามิเตอร์ C



รูปที่ 8 การจำลองค่าของพารามิเตอร์ E



รูปที่ 9 การจำลองค่าของพารามิเตอร์ Gap

จากรูปที่ 6-9 สามารถนำผลการสุ่ม (Random) ภายใต้การแจกแจงแบบปกติไปแยกเป็นข้อมูลของแต่ละพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลของแต่ละพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลอง

Trials	B	C	E	Gap
1	4.76307	3.17542	0.8748	0.12385
2	4.75786	3.17039	0.87455	0.12392
3	4.75621	3.16859	0.88034	0.11828
4	4.76258	3.16925	0.86607	0.13827
5	4.76675	3.16742	0.87297	0.13737
6	4.75819	3.1716	0.87518	0.12242
7	4.76741	3.16807	0.87603	0.13431
8	4.76399	3.16921	0.87159	0.13418
9	4.76125	3.17076	0.87473	0.12677
10	4.76068	3.17147	0.87001	0.1302
11	4.76257	3.16761	0.86636	0.1396
12	4.76203	3.172	0.87062	0.1304
13	4.76317	3.16884	0.87041	0.13492
14	4.76044	3.16982	0.87119	0.13043
15	4.76125	3.17068	0.87472	0.12685
16	4.76465	3.16887	0.87466	0.13212
17	4.76487	3.16984	0.86646	0.13958
18	4.76033	3.16924	0.87668	0.12542
19	4.76698	3.17318	0.87686	0.12794
20	4.76127	3.1705	0.86658	0.13519
*	*	*	*	*
*	*	*	*	*
100000	4.76195	3.17165	0.87601	0.12529

5. หาค่าความสัมพันธ์ของขนาดแต่ละชิ้นส่วนของแต่ละพารามิเตอร์เป็นสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติ (Statistical analysis) แสดงได้ดังรูปที่ 10

Regression Analysis: Gap versus B, C, E

The regression equation is

$$\text{Gap} = -0.589 + 1.00B - 1.00C - 1.00E$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0.588949	0.000046	-12779.82	0.000
B	0.99999	0.00001	135568.12	0.000
C	-1.00001	0.00001	-108397.17	0.000
E	-1.00000	0.00001	-181011.74	0.000

S = 0.000005763 R-Sq = 100.0% R-Sq(adj) = 100.0%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	2.09094	0.69698	2.099E+10	0.000
Residual Error	99996	0.00000	0.00000		
Total	99999	2.09094			

Source	DF	Seq SS
B	1	0.61342
C	1	0.38933
E	1	1.08818

รูปที่ 10 ผลการรันด้วยโปรแกรม

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (15)

$$\text{Gap} = -0.589 + 1.00B - 1.00C - 1.00E \quad (15)$$

6. ตรวจสอบความแม่นยำของสมการที่ (15) ที่ได้จากผลของการสุ่มการเก็บข้อมูลของพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ ด้วยการเก็บข้อมูลของขนาดพารามิเตอร์ที่วัดค่าของพารามิเตอร์ได้จริงด้วยเครื่องมือวัดระบบวิชั่น ผลการวัดค่าพารามิเตอร์แสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลของการวัดค่าพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือวัดระบบวิชั่น

Pivot no.	B (mm)	C (mm)	E (mm)	Gap (mm)
1	4.76256	3.15964	0.88219	0.13323
2	4.75890	3.17488	0.87372	0.12279
3	4.76258	3.17526	0.86949	0.13033
4	4.75547	3.17424	0.86949	0.12423
5	4.76613	3.17335	0.86949	0.13579
6	4.76410	3.17361	0.86949	0.13351
7	4.76042	3.16027	0.87372	0.13892
8	4.76271	3.16027	0.86949	0.14544
9	4.76194	3.17399	0.87796	0.12250
10	4.77020	3.17450	0.87796	0.13025

จากข้อมูลที่ได้นำไปสร้างเป็นสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ (16)

$$\text{Gap} = -0.586 + 1.00B - 0.999C - 0.999E \quad (16)$$

6. ผลการวิจัย

ในการศึกษาการหาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบอลเบริงของแขนหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ มีการหาค่าสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากขนาดของพารามิเตอร์ที่ได้มาจากการจำลองข้อมูลและได้มาจากการวัดค่าจริง แสดงดังสมการที่ (15) และสมการที่ (16) และเมื่อนำสมการแทนค่าด้วยขนาดของพารามิเตอร์แต่ละตัวและเปรียบเทียบค่าของระยะกับ แสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนของระยะกับ

	Mathematical modeling equation		% error
	Vision Measurement	Parametric Simulation	
Nom. Gap	0.1272	0.1302	-2.3585
Max. Gap	0.1413	0.1443	-2.1231
Min. Gap	0.1132	0.1161	-2.5618

7. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยทำให้เราสามารถเรียนรู้การสร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบอลแบร์ริงที่ได้จากการจำลองของข้อมูลและการวัดค่าของพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือวัดระบบวิชั่น ทั้งนี้วิธีการจำลองของข้อมูลมีข้อดีทางด้านการวัดขนาดของชิ้นส่วนที่ต้องการวัดปริมาณมาก ๆ และมีขนาดความละเอียดของชิ้นส่วนสูงหรือวัดค่าได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องทำการจำลองของข้อมูลของพารามิเตอร์ซึ่งมีส่วนช่วยในการประหยัดเวลาในการทำการวัดค่าของพารามิเตอร์ จากสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ทำให้เราสามารถทราบถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์แต่ละตัวว่าส่งผลอย่างไรกับระยะแก๊บ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการหาความสัมพันธ์ของระยะแก๊บว่าส่งผลอย่างไรต่อการเกิดแรงเสียดทานต่อไป จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นอาจเป็นผลมาจากการวัดค่าของพารามิเตอร์ด้วยเครื่องมือวัดระบบวิชั่นที่ยังมีการวัดค่าของตัวอย่าง (Sample) ไม่เพียงพอ ทั้งนี้เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านการวัดและตัวอย่างที่นำมาทดสอบ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทเวสเทิร์นดิิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด และคุณเทิดไท เทียนทอง ที่ให้การสนับสนุนด้านอุปกรณ์และข้อมูลทางเทคนิคในการทำการวิจัย รวมถึงศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (I/UCRC in HDD Component) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ช่วยประสานงานทางด้านทุนในการทำวิจัยและขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาในการทำวิจัยครั้งนี้ ภายใต้โครงการพัฒนาศักยภาพบุคคลในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์

เอกสารอ้างอิง

1. W.C. Blount, "Noise Reduction Using Dampening in Voice Coil Motor/Actuators of Hard Disk Drives", IBM Storage Technology, San Jose, October 2001.
2. H.S. Chang, S. E.Baek, J.H. Park, and Y.K. Byun, "Modeling of Pivot Friction Using Relay Function and Estimation of its Frictional Parameters", Proceeding of the American Control Conference San Diego, California, June 1999.
3. K. Peng, G. Cheng, B.M. Chen, and T.H. Lee, "Comprehensive Modeling of Friction in a Hard Disk Drive Actuator", Proceeding of the American Control Conference Denver, Colorado, June 2003.
4. J.J. Shah, G. Ameta, Z. Shen, and J. Davidson, "Navigating the Tolerance Analysis Maze", Computer-Aided Design & Applications, Vol. 4, No. 5, pp. 705-718, 2007.
5. B. Li and U. Roy, "Positioning of Toleranced Parts in 2-D Polygonal Assembly and its use in Tolerance Analysis", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 13, No. 3, June 2001.

6. B. Schlatter, "Computer-aided 3D tolerance analysis of disk drives", IBM J.RES.DEVELOP., Vol. 40, No. 5, September 1996.
7. B. Prannattee and K. Tangchaichit, "Tolerance Analysis of Pivot ball bearing in Hard Disk Drive", The 1st International Data Storage Technology Conference 2008 (DST-CON 2008), 21-23 April 2008.
8. J.D. Meadows. Tolerance Stack-up Analysis, 2001.
9. Dimensioning and tolerancing. ANSI Y14.5M, American Society of Mechanical Engineers, USA, 1982.