



การวิเคราะห์ค่าความเผื่อของงานประกอบหัวอ่าน/เขียนสำเร็จด้วยวิธีการ DLM

Torlerencing analysis of Head Stack Assembly using Direct Linearization Method

พลเทพ เวงสูงเนิน* และ เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต

Ponthep Vengsungne* and Kiatfa Tangchaichit

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

*Correspondent author: pontve@kku.ac.th

Received January 17, 2012

Accepted April 2, 2012

บทคัดย่อ

ในบทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ค่าความเผื่อของงานประกอบหัวอ่าน/เขียนสำเร็จในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยวิธีการ Direct Linearization Method (DLM) เพื่อนำเอาไปใช้ในการวิเคราะห์สมการความคลาดเคลื่อน ค่าสภาวะวิกฤต ค่าสภาวะวิกฤตของค่ารากผลรวมกำลังสองและค่าอิทธิพลของแต่ละตัวแปรในงานประกอบ ผลการศึกษาคือค่าวิกฤตความคลาดเคลื่อนของแนวหัวอ่าน/เขียนในแนวแกน x จะมีค่าสูงสุดคือ ± 0.0106 mm. ส่วนแนวแกน y เท่ากับ ± 0.0491 mm. ส่วนค่าวิกฤตของค่ารากผลรวมกำลังสองในแนวแกน x เท่ากับ ± 0.0089 mm. แนวแกน y เท่ากับ ± 0.0239 mm. ตัวแปรควบคุมความขนาน k มีอิทธิพลต่อความคลาดเคลื่อนต่อแนวอ่าน/เขียนในแกน x มากที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 82.92% และค่ารากผลรวมกำลังสองเท่ากับ 97.83% ส่วนตัวแปร j มีอิทธิพลในแนวแกน y มากที่สุดที่ 32.00% และค่ารากผลรวมกำลังสองคิดเป็น 43.21% เมื่อนำผลการทดลองในห้องปฏิบัติการมาเปรียบเทียบกับค่าคำนวณโดยวิธีการ DLM แล้วผลการตอบสนองเฉลี่ยมีความแตกต่างเท่ากับ 0.174736 μm .

Abstract

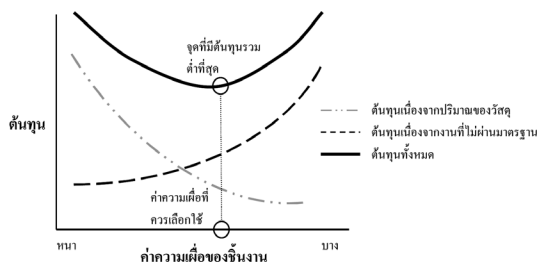
The objective of this paper is to study Head Stack Assembly tolerance analysis of Hard Disk Drive using the Direct Linearization Method (DLM) to analyze for tolerance assembly, Worst Case (WC), Root Sum Square (RSS) and percent contribution. The result show the maximum worst case is ± 0.0106 mm on x axis and ± 0.0491 mm on y axis. The maximum root sum square respect to x is ± 0.0089 mm and y is ± 0.0239 mm. The parallelism parameter k is the most effect to x axis about 82.92% and 97.83% for percent contribution of root sum square. In y axis, the parameter j is the most influences about 32.00%, and its root sum square is about 43.21%. The difference of average sensitivity between the experimental and the calculation is 0.17473 μm .

คำสำคัญ: สมการคณิตศาสตร์ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ หัวอ่าน/เขียน DLM

Keywords: mathematical, hard disk drive, read/write head, DLM

1. บทนำ

การวิเคราะห์ความเผื่อของงานประกอบ (Assembly Tolerance Stack-up Analysis) นั้นเป็นส่วนที่สำคัญในการออกแบบอย่างหนึ่ง การวิเคราะห์ความเผื่อเป็นการสร้างฟังก์ชันของการผลิตซึ่งเป็นวิธีการที่ต้องทำควบคู่ไปกับการจัดการความเผื่อ (Tolerance allocation) ซึ่งเป็นการสร้างฟังก์ชันในการออกแบบเสมอ (1) เนื่องจากชิ้นส่วนประกอบย่อยในงานประกอบนั้นจำเป็นต้องมีการออกแบบความเผื่อของการผลิตขึ้นงานด้วย หากมองในด้านของการใช้งานได้จริงและมีความแข็งแรงทนทานอย่างเดียวย่อมส่งผลกระทบทำให้เนื้อของวัสดุมีปริมาณที่สูงขึ้นจึงทำให้ต้นทุนในการผลิตงานสูงขึ้นตามไปด้วย ฉะนั้นการออกแบบจำเป็นต้องมีทั้งการออกแบบทางด้านวิศวกรรมและการจัดการปริมาณของเนื้องานให้เหมาะสม รูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงภาพของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะความเผื่อของชิ้นงานและต้นทุนในการผลิต และต้นทุนของงานที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (2)



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระยะความเผื่อของชิ้นงานกับต้นทุนในการผลิตและต้นทุนของงานที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

ในปี 1984 Kenneth W. Chase (3) ได้เริ่มที่จะศึกษาการนำเอาหลักการวิเคราะห์ของลูปเวกเตอร์มาใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยสร้างเป็นโปรแกรมของตนเอง จากนั้นในปี 1993 Charles David Carr ได้นำเอาทฤษฎีนั้นมาพัฒนาเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ในชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงได้ (4) จนกระทั่งในปี 1999 Kenneth W. Chase ได้นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเผื่อในงานประกอบ โดยสร้างวิธีการหาคำตอบขึ้นมาโดยให้ชื่อว่า Direction Linearization Method (DLM) (5) วิธีการ DLM นั้นเป็นวิธีการหาค่าความคลาดเคลื่อน

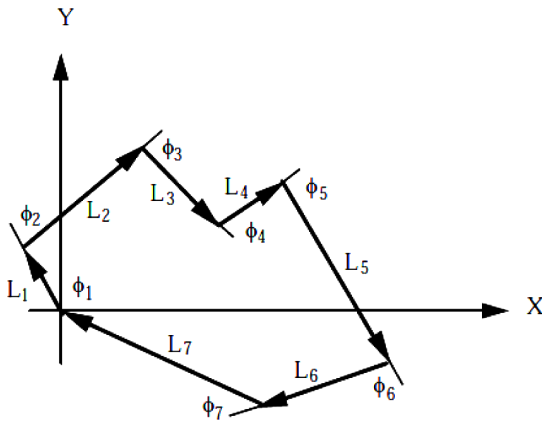
แบบแม่นยำตรง โดยทำการเปลี่ยนสมการของงานประกอบที่อยู่ในรูปของสมการโดยปริยายที่ไม่เป็นเชิงเส้น (non linear implicit functions) ไปเป็นสมการที่เป็นเชิงเส้น (linear explicit functions) (6,7,8) ซึ่งอาศัยหลักการกระจายอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor's Series Expansion) และหลักการคำนวณของระบบเมทริกซ์ในการคำนวณ ในปี 2551 พลเทพ และ เกียรติฟ้า ได้ทำการศึกษาการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ของความเผื่อในงานประกอบเพื่อนำเอาไปใช้ในการทำนายค่า Gram load โดยวิธีการ DLM เปรียบเทียบกับวิธีการ Monte Carlo Simulation และต่อมาในปี 2552 ได้นำเอา DLM ไปใช้ในการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ของหัวอ่าน/เขียน (9,10) ซึ่งผลของงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าวิธีการ DLM นั้นเป็นวิธีการที่มีความแม่นยำสูงและสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานประกอบต่างๆ ได้อย่างมากมาย

ดังนั้นในบทความนี้จึงเป็นการศึกษาการสร้างสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเผื่องานประกอบของหัวอ่าน/เขียนสำเร็จเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าการตอบสนองค่าสภาวะวิกฤต ค่าสภาวะวิกฤตของค่ารวมผลรวมกำลังสองและอิทธิพลของแต่ละตัวแปรในแต่ละชิ้นงานย่อยโดยวิธีการ DLM เพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นไปใช้ในการจัดการความเผื่อในการผลิตต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การสร้างสมการความคลาดเคลื่อนโดยใช้ Direct Linearization Method (DLM)

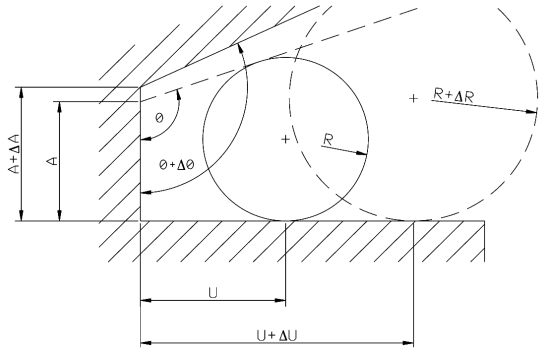
DLM เป็นวิธีการหาสมการของงานประกอบด้วยวิธีการแปลงสมการของงานประกอบที่อยู่ในรูปเวกเตอร์ สมการที่ได้นั้นจะอยู่ในรูปของสมการปริยายที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งยากต่อการหาผลเฉลยแม่นยำตรงในรูปของสมการเชิงเส้นที่ง่ายต่อการคำนวณและหาคำตอบโดยใช้การกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor's series expansion) เข้ามาช่วยหาผลเฉลย เวกเตอร์ของงานประกอบนั้น เมื่อมารวมกันจะได้เป็นนวงจรถ่วงหรือลูปเวกเตอร์ซึ่งมี 2 ประเภทได้แก่ ลูปแบบเปิด (Open vector loops) และลูปแบบปิด (Closed vector loops) จากรูปที่ 2 เป็นภาพลูปแบบปิด



รูปที่ 2 ลูปเวกเตอร์แบบปิด

นอกเหนือจากการสร้างเวกเตอร์รูปแล้วนั้น การสร้างสมการจำเป็นต้องทราบถึงลักษณะของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในงานประกอบ **ซึ่งมีความสำคัญ** ต่อการสร้างสมการเป็นอย่างมาก ความคลาดเคลื่อนในงานประกอบสามารถแบ่งเป็น 3 ส่วนด้วยกัน (6) ได้แก่

- ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการกำหนดขนาด (Dimensional variations) เมื่อกำหนดขนาดในการผลิตงานให้เป็น A, R, θ แต่ในการผลิตจริงไม่สามารถที่จะทำให้ชิ้นงานมีขนาดตามที่ต้องการสมบูรณ์ การผลิตจะต้องเกิด $\Delta A, \Delta R$ และ $\Delta \theta$ ขึ้นเสมอ
- ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการกำหนดค่าความเผื่อของรูปทรง (Geometric form feature variations) เมื่อมีการกำหนดความเผื่อให้แก่ผิวงาน เช่น ความราบเรียบ ความขนาน ความตั้งฉาก ฯลฯ ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการกำหนดค่าความเผื่อของรูปทรงก็จะเกิดขึ้นในระหว่างการผลิตชิ้นส่วนเช่นเดียวกับความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากขนาด
- ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากจุดเชื่อมต่อในลูป (Kinematic variations) ความคลาดเคลื่อนชนิดนี้เป็นความคลาดเคลื่อนที่ไม่เป็นอิสระ (dependent variations) (7) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากผลกระทบของความคลาดเคลื่อนในการผลิตที่เกิดขึ้น เช่น ΔU ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แหล่งของความคลาดเคลื่อนในงานประกอบ

หลังจากที่มีการสร้างเวกเตอร์รูปและกำหนดเงื่อนไขของความคลาดเคลื่อนแล้วจำเป็นต้องแบ่งประเภทของลูปและสร้างสมการ ดังสมการที่ (1) และ (2) (9,11)

$$\{0\} = [A]\{\delta X\} + [B]\{\delta U\} + [F]\{\delta \alpha\} \quad (1)$$

$$\{\delta HA\} = [C]\{\delta X\} + [D]\{\delta U\} + [G]\{\delta \alpha\} \quad (2)$$

โดยที่

$\{\delta HA\}$ คือเมทริกซ์ของ Head alignment ที่เปลี่ยนไป $[A], [C]$ คือเมทริกซ์สมการอนุพันธ์ของสมการ (1) หรือ (2) เทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนจากการผลิต

$[B], [D]$ คือเมทริกซ์สมการอนุพันธ์ของสมการ (1) หรือ (2) เทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนจากจุดเชื่อมต่อใน Loop

$[F], [G]$ คือเมทริกซ์สมการอนุพันธ์ของสมการ (1) หรือ (2) เทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนจากรูปทรง

$\{\delta X\}$ คือเวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนจากการผลิต

$\{\delta U\}$ คือเวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนจากจุดเชื่อมต่อ

$\{\delta \alpha\}$ คือเวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนจากรูปทรง

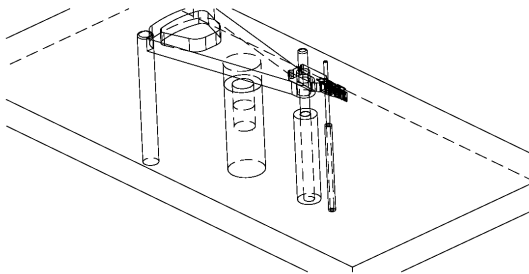
การคำนวณเริ่มจากการหาค่าของ $[A], [B]$ และ $[F]$ เป็นลำดับแรก เนื่องจากเมทริกซ์ทั้ง 3 ตัวนี้เป็นเมทริกซ์เริ่มต้นของงานประกอบ เพื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (1) เพื่อหา $\{\delta U\}$ ซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนของเมทริกซ์ $[A], [B]$ และ $[F]$ โดย $\{\delta U\}$ หาได้จากสมการที่ (3) (4,5)

$$\{\delta U\} = -[B]^{-1}[A]\{\delta X\} - [B]^{-1}[F]\{\delta \alpha\} \quad (3)$$

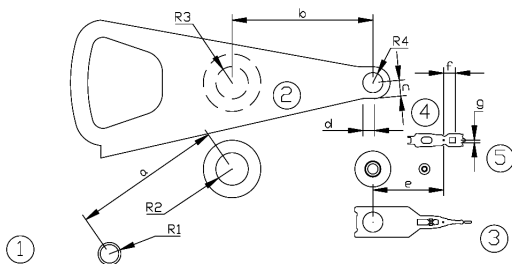
ทำการหาเมทริกซ์ของ $[C]$, $[D]$ และ $[G]$ จากนั้นแทนค่า $\{\delta U\}$ ในสมการที่ (3) เพื่อหาค่า $\{\delta HA\}$ จะได้สมการสุดท้ายดังสมการที่ (4) (4,5)

$$\{\delta HA\} = [[C]-[D][B]^{-1}[A]]\{\delta X\} + [[G]-[D][B]^{-1}[F]]\{\delta \alpha\} \quad (4)$$

รูปที่ 4 เป็นภาพของแบบจำลองที่ถูกนำมาใช้ในการการศึกษาในบทความนี้ ส่วนรูปที่ 5 เป็นรูปที่แสดงให้เห็นถึงการแยกส่วนประกอบแต่ละส่วน ซึ่งประกอบไปด้วย 5 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ Shuttle, Arm, Suspension, Long Tail และ Slide

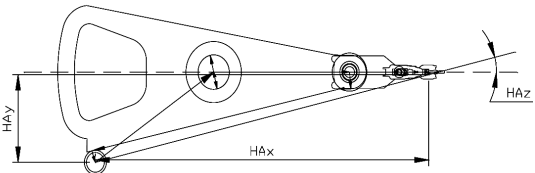


รูปที่ 4 แบบจำลองที่นำมาใช้ในการสร้างลูปเวกเตอร์



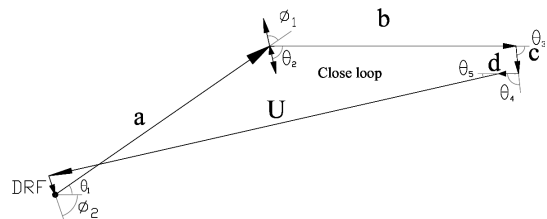
รูปที่ 5 การกำหนดตัวแปรลงในแบบจำลอง

หลังจากกำหนดค่าตัวแปรทั้งหมดของชิ้นงานย่อยในแต่ละชิ้น ขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างลูปเวกเตอร์รวมทั้งหมดของชิ้นงานประกอบทั้งหมดจากรูปแบบจำลองรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงการสร้างลูปเวกเตอร์ทั้งหมด

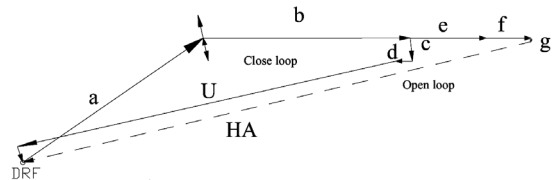


รูปที่ 6 เวกเตอร์ลูปที่ถูกสร้างลงบนชิ้นงาน

จากนั้นจึงนำเอาเวกเตอร์ลูปทั้งลูปแบบปิดและลูปแบบเปิดมาใส่ค่าตัวแปรที่มีการอธิบายดังตารางที่ 1 โดยรูปที่ 7 แสดงให้เห็นถึงเวกเตอร์ลูปแบบปิดที่มีการกำหนดตัวแปรเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 7 แผนภาพเวกเตอร์ลูปแบบปิด



รูปที่ 8 แผนภาพเวกเตอร์ลูปทั้งหมด

รูปที่ 8 เป็นแผนภาพเวกเตอร์ลูปทั้งหมดที่ถูกสร้างลงบนชิ้นงานประกอบที่นำมาวิเคราะห์ซึ่งไม่ได้มีการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมรูปทรงลงไปในแผนภาพ ขนาดและระยะเฟื่อของแต่ละชิ้นงานประกอบย่อยทั้งหมดสามารถแสดงได้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดและระยะเพื่อของชิ้นงานในการประกอบหัวอ่าน/เขียนสำเร็จ

ประเภท	ตัวแปร	ขนาด (mm.)	ระยะเพื่อ (+/-) (mm.)
In	a	20.7631	0.0000
	b	19.6060	0.0000
	c	2.2000	0.0000
	d	1.5773	0.0000
	e	9.8000	0.0000
	f	1.6240	0.0000
	g	0.3500	0.0000
	R1	1.5875	0.0025
	R2	2.2590	0.0025
	R3	2.2500	0.0000
	R4	1.4000	0.0000
	θ_1	34.6890	0.0000
	θ_2	75.4673	0.0000
	θ_3	84.8055	0.0000
De	θ_4	95.1945	0.0000
	θ_5	12.7500	0.0000
	θ_6	90.0000	0.0000
	U ₁	36.5537	N/A
	ϕ_1	69.8708	N/A
Geo	ϕ_2	77.2229	N/A
	H/A _x	48.0979	N/A
	H/A _y	11.4884	N/A
Geo	i	0.0000	0.0100
	j	0.0000	0.0157
	k	0.0000	0.0088
	l	0.0000	0.0050

หมายเหตุ:

- In = ตัวแปรอิสระ
 De = ตัวแปรไม่อิสระ
 Geo = ตัวแปรที่ควบคุมรูปทรง

จากเวกเตอร์รูปของงานประกอบที่สร้างขึ้นสามารถสร้างเป็นสมการของรูปปิดและรูปเปิดได้ดังสมการที่ (5) – (10)

$$\begin{aligned} \text{Close loop} \quad 0 &= a \cos(\theta_1) + (R_2 + l) \cos(\theta_1 + \phi_1) + R_3 \cos(\theta_1 + \phi_1 + 180) + b \cos(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2) \\ &+ c \cos(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2 - \theta_3) + d \cos(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2 - \theta_3 - \theta_4) \\ &+ U_1 \cos(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_5) + R_1 \cos(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_5 + 90) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} 0 &= a \sin(\theta_1) + (R_2 + l) \sin(\theta_1 + \phi_1) + R_3 \sin(\theta_1 + \phi_1 + 180) + b \sin(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2) \\ &+ c \sin(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2 - \theta_3) + d \sin(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2 - \theta_3 - \theta_4) \\ &+ U_1 \sin(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_5) + R_1 \sin(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_5 + 90) \end{aligned} \quad (6)$$

$$0 = \theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2 - \theta_3 - \theta_4 + \theta_5 + 90 + \phi_2 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{Open loop} \quad HA_x &= a \cos(\theta_1) + (R_2 + l) \cos(\theta_1 + \phi_1) + R_3 \cos(\theta_1 + \phi_1 + 180) + b \cos(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2) \\ &+ (e + k) \cos(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2) + f \cos(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2) \\ &+ (g + i + j) \cos(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2 - 90) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} HA_y &= a \sin(\theta_1) + (R_2 + l) \sin(\theta_1 + \phi_1) + R_3 \sin(\theta_1 + \phi_1 + 180) + b \sin(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2) \\ &+ (e + k) \sin(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2) + f \sin(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2) \\ &+ (g + i + j) \sin(\theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2 - 90) \end{aligned} \quad (9)$$

$$HA_0 = \theta_1 + \phi_1 + 180 + \theta_2 - 90 - \phi_2 + \phi_3 + 90 = 0 \quad (10)$$

2.2 การวิเคราะห์ค่าสภาวะวิกฤติ (Worst Case) และหาค่าสภาวะวิกฤติของค่ารากผลรวมกำลังสอง (Route Mean Square)

ค่าสภาวะวิกฤติ (Worst Case: WC) เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาค่าสภาวะวิกฤติหรือความเป็นไปได้สูงสุดที่งานประกอบจะเปลี่ยนไป ส่วนการใช้ค่าสภาวะวิกฤติของค่ารากผลรวมกำลังสอง (Root Mean Square: RSS) เพื่อการวิเคราะห์เป็นวิธีการวิเคราะห์ที่อาศัยหลักทางสถิติเป็นสำคัญโดยตั้งอยู่บนพื้นฐานว่าชิ้นงานมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าที่วิเคราะห์ได้จากสมการจะไม่เท่ากันแล้วแต่ว่าทางผู้ออกแบบจะใช้ค่าของ WC หรือ RSS เป็นเกณฑ์ในการออกแบบ (11) สมการที่ใช้วิเคราะห์ค่า WC และ RSS นั้นจะแสดงให้เห็นในสมการที่ (11) และ (12)

$$\text{WC} \quad \delta U \text{ or } \delta V = \sum |S_{ij} \delta x_j| + \sum |S_{ij} \delta \alpha_j| \quad (11)$$

$$\text{RSS} \quad \delta U \text{ or } \delta V = \sqrt{\sum (S_{ij} \delta x_j)^2 + \sum (S_{ij} \delta \alpha_j)^2} \quad (12)$$

โดยที่ δU เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นใน Close loop และ δV เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นใน Open loop

2.3 การวิเคราะห์ค่าอิทธิพลตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อหัวอ่าน/เขียน

การวิเคราะห์ค่าอิทธิพลตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อหัวอ่าน/เขียนนั้นมักจะคิดเป็นร้อยละของค่าทั้งหมด (Percent contribution : %Cont) และแสดงอยู่ในรูปของแผนภูมิแท่งเพื่อให้สามารถอ่านค่าได้ง่าย แผนภูมิค่าอิทธิพลนั้นจะแสดงให้เห็นว่าในการประกอบงานทั้งหมดมีชิ้นส่วนใดบ้างที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของงานประกอบมากที่สุด โดยการคำนวณจะนำเอาค่าระยะเพื่อและค่าการตอบสนองของชิ้นงานย่อยมาคิดด้วยสามารถคำนวณได้ทั้งค่าอิทธิพลในรูปของสภาวะวิกฤติและอิทธิพลตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อสภาวะวิกฤติของค่ารากผลรวมกำลังสองสถิติ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (13) เป็นสมการที่ใช้คำนวณสภาวะวิกฤติ ส่วนสมการที่ (14)

เป็นสมการที่ใช้คำนวณสภาวะวิกฤติของค่ารากผลรวมกำลังสอง (5)

อิทธิพลตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อสภาวะวิกฤติ (WC)

$$\%Cont_{WC} = \frac{\left| \frac{\partial Gap}{\partial x_j} \cdot \delta x_j \right|}{\sum \left| \frac{\partial Gap}{\partial x_j} \cdot \delta x_j \right|} \quad (13)$$

อิทธิพลตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อสภาวะวิกฤติของค่ารากผลรวมกำลังสอง (RSS)

$$\%Cont_{RSS} = \frac{\left(\frac{\partial Gap}{\partial x_j} \cdot \delta x_j \right)^2}{\sum \left(\frac{\partial Gap}{\partial x_j} \cdot \delta x_j \right)^2} \quad (14)$$

3. ผลการศึกษา

3.1 การสร้างสมการความคลาดเคลื่อนของแนวหัวอ่าน/เขียน

เริ่มต้นด้วยการหาสมการอนุพันธ์เพื่อให้ได้เมทริกซ์ [A], [B] และ [F] เพื่อหาค่า $\{\delta U\}$ เมื่อ $\{\delta R_1 \delta R_2\}^T$ คือเมทริกซ์ตัวแปรความคลาดเคลื่อนจากการผลิต $\{\delta U_1 \delta \theta_2 \delta \theta_3\}^T$ คือเมทริกซ์ตัวแปรความคลาดเคลื่อนจากจุดเชื่อม และ $\{\delta / \delta k \delta / \delta j\}^T$ คือเมทริกซ์ตัวแปรความคลาดเคลื่อนจากรูปทรง จากนั้นแทนค่าตัวแปรทั้งหมดที่ได้กำหนดเพื่อหาค่า ในสมการที่ (1) ดังนั้นจะได้

$$[A] = \begin{bmatrix} 0.2212 & -0.2514 \\ -0.9752 & 0.9679 \\ 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} -0.9752 & 11.8060 & 0.0000 \\ -0.2212 & -17.0708 & 0.0000 \\ 0.0000 & 1.0000 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

$$[F] = \begin{bmatrix} -0.2514 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9679 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

เมื่อแทนค่า (A), (B) และ (F) จะได้

$$\{\delta U\} = \begin{bmatrix} -0.4018 & .3705 \\ -2.9750 & 2.9736 \\ 2.9750 & -2.9736 \end{bmatrix} \{\delta X\} + \begin{bmatrix} .3705 & 0 & 0 & 0 \\ 2.9736 & 0 & 0 & 0 \\ -2.9736 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \{\delta \alpha\} \quad (15)$$

จากนั้นจึงหาอนุพันธ์เพื่อหาเมทริกซ์ $[C]$, $[D]$ และ $[G]$ แล้วจึงนำเอาค่าของตัวแปรทั้งหมดแทนลงไป ในสมการที่ (2) เพื่อหา δHA_x , δHA_y และ δHA_θ จะได้

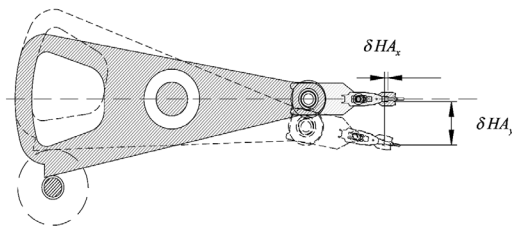
$$[C] = \begin{bmatrix} 0 & -2.514 \\ 0.1319679 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & .3266 & 0 \\ 0 & 31.0279 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[G] = \begin{bmatrix} -2.514 & 1 & .0005 & .0005 \\ .9679 & .0005 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

สุดท้ายจะได้สมการที่ใช้ทำนายค่าความคลาดเคลื่อนของแนวหัวอ่าน/เขียนดังสมการที่ (16) โดยรูปที่ 9 แสดงให้เห็นถึงแนวหัวอ่าน/เขียนที่เปลี่ยนไป

$$\begin{Bmatrix} \delta HA_x \\ \delta HA_y \\ \delta HA_\theta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.01656 & -0.23444 \\ -1.61108 & 2.57828 \\ -0.05182 & 0.05190 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta R_1 \\ \delta R_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.23444 & 2.57818 & 0.05190 \\ 1.00000 & 0.00047 & 0.00000 \\ 0.00047 & -1.00000 & 0.00000 \\ 0.00047 & -1.00000 & 0.00000 \end{bmatrix}^T \begin{Bmatrix} \delta l \\ \delta k \\ \delta i \\ \delta j \end{Bmatrix} \quad (16)$$



รูปที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของแนวหัวอ่าน/เขียน

3.2 การวิเคราะห์ค่าสภาวะวิกฤติและหาค่าสภาวะวิกฤติของค่าารากผลรวมกำลังสอง

สมการที่ (14) เป็นสมการสุดท้ายที่สามารถนำมาวิเคราะห์ค่าต่างๆของงานประกอบได้ ในส่วนแรกจะเป็นการนำเอาวิเคราะห์หาค่า WC และ RSS ซึ่งเป็นค่าที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์สภาวะวิกฤติและออกแบบงานประกอบ ในการวัดค่าของแนวหัวอ่าน/

Worst Case (mm.)

$$\begin{Bmatrix} \delta HA_x \\ \delta HA_y \end{Bmatrix}_{Worst\ Case} = \pm \begin{Bmatrix} 0.0106 \\ 0.0491 \end{Bmatrix} \quad (17)$$

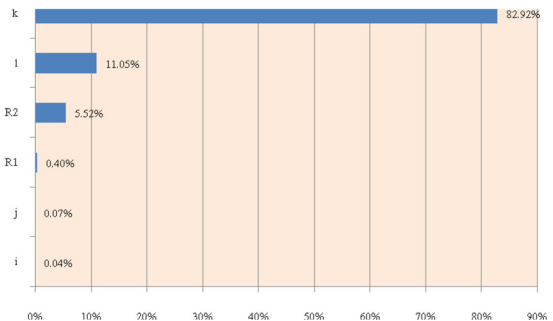
RSS (mm.)

$$\begin{Bmatrix} \delta HA_x \\ \delta HA_y \end{Bmatrix}_{RSS} = \pm \begin{Bmatrix} 0.0089 \\ 0.0239 \end{Bmatrix} \quad (18)$$

เขียนนั้นต้องการทราบค่า WC และ RSS ของ δHA_x , δHA_y เป็นตัวแปรที่สำคัญ ดังนั้นแทนค่าเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นได้จากสมการที่ (17) และ (18)

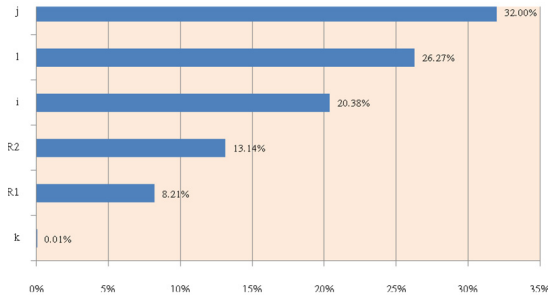
3.3 การวิเคราะห์ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อแนวหัวอ่าน/เขียน

กราฟอิทธิพลตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าแนวหัวอ่าน/เขียนสามารถหาได้จากสมการที่ (17) และ (18) ซึ่งในการวิเคราะห์งานจริงจะขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบว่าจะนำเอาค่าใดไปใช้ในการออกแบบ รูปที่ 10 และ 11 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่อแนวหัวอ่าน/เขียนในแนวแกน x และ y ของแต่ละตัวแปรในสภาวะวิกฤต ส่วนรูปที่ 12

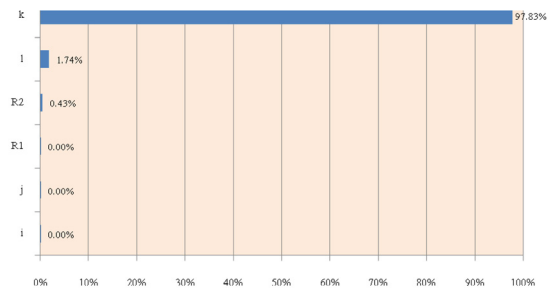


รูปที่ 10 อิทธิพลตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าแนวหัวอ่าน/เขียนในแกน x ในสภาวะวิกฤต

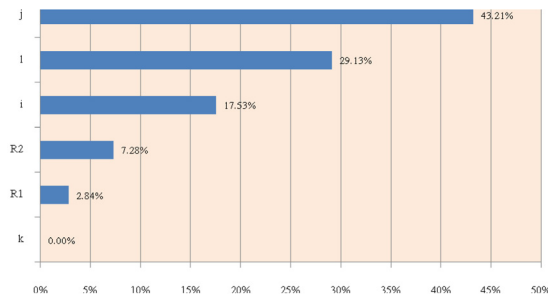
และ 13 เป็นอิทธิพลของ แต่ละตัวแปรในสภาวะวิกฤตของค่าารากผลรวมกำลังสอง



รูปที่ 11 แสดงอิทธิพลตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อแนวหัวอ่าน/เขียนในแกน y ในสภาวะวิกฤต



รูปที่ 12 แสดงอิทธิพลตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อแนวหัวอ่าน/เขียนในแกน x ในสภาวะวิกฤตของค่ารวมกำลังสอง

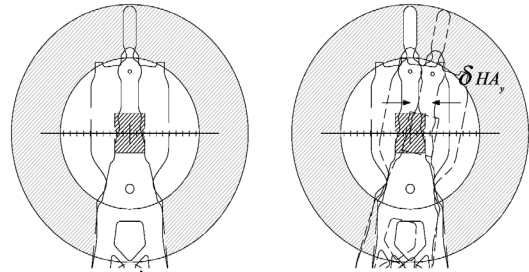


รูปที่ 13 แสดงอิทธิพลตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อแนวหัวอ่าน/เขียนในแกน y ในสภาวะวิกฤตของค่ารวมกำลังสอง

3.4 การเปรียบเทียบค่าระหว่างสมการทางคณิตศาสตร์และผลการทดสอบ

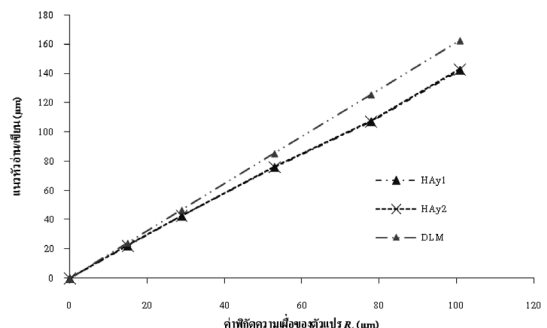
ในการทดสอบแนวหัวอ่าน/เขียน ณ ห้องปฏิบัติการจะใช้กล้องความละเอียดสูงในการจับภาพและวิเคราะห์โดยใช้วิธีการทางอิมเมจโปรเซสซิง (Image processing) เพื่อวัดค่าแนวหัวอ่าน/เขียนที่เปลี่ยนไป การทดสอบงานจริงเพื่อเทียบกับการคำนวณจะทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของ R_i จากนั้นวัดค่าแนวหัวอ่าน/

เขียนที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานผลิตในสายการผลิตเดียวกัน จำนวน 20 ชิ้น โมเดลของ HSA เป็นแบบ 2 หัวอ่าน โดยกำหนดให้ระยะแนวหัวอ่าน/เขียนของหัวอ่านที่ 1 และ 2 เป็น H_{ay1} และ H_{ay2} ตามลำดับ รูปที่ 14 เป็นตัวอย่างของภาพจากกล้องที่ใช้ในการวัดค่าแนวหัวอ่าน/เขียนก่อนและหลังการเพิ่มความหนาของตัวแปร R_i



รูปที่ 14 ภาพแนวหัวอ่าน/เขียน ที่สามารถอ่านค่าได้จากกล้องก่อนและหลังจากเพิ่มความหนาของ R_i

หลังจากการวัดค่าของชิ้นงานก่อนการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร R_i จากนั้นทำการเพิ่มค่าพิคคความถี่ของชิ้นงานไป 5 ระดับ ได้แก่ 15, 29, 53, 78 และ 101 μm ทำการวัด 3 ซ้ำในแต่ละข้อมูล ซึ่งผลจากการวัดค่า ณ ห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับค่าจากการคำนวณด้วยวิธีการ DLM สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของแนวหัวอ่าน/เขียนจากแนวอ้างอิง เทียบกับการคำนวณโดยวิธีการ DLM

จากนั้นจึงทำการคำนวณผลตอบสนองเพื่อให้เป็นตัวบ่งบอกถึงผลการตอบสนองของแนวหัวอ่านเขียนที่เปลี่ยนแปลงไปต่อค่าพิคคความถี่ที่เกิดขึ้น 1 หน่วย โดยคำนวณจากสมการที่ (19)

$$S_{en} = \frac{H_{align}}{T_{ol}} \quad (19)$$

โดยที่

S_{en} คือ ผลตอบสนองของความคลาดเคลื่อน
 H_{align} คือ แนวหัวอ่านเขียนที่เปลี่ยนไป
 T_{ol} คือ ค่าพิสัยความเผื่อของชิ้นงานประกอบที่เกิดขึ้น

4. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาการวิเคราะห์ค่าความเผื่อของงานประกอบหัวอ่าน/เขียนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ด้วยวิธีการ DLM สามารถสรุปได้ ดังนี้

(1) ค่าวิกฤตความคลาดเคลื่อนของแนวหัวอ่าน/เขียนในแนวแกน x จะมีค่าสูงสุดคือ ± 0.0106 mm. ส่วนแนวแกน y เท่ากับ ± 0.0491 mm. ส่วนถ้าวิเคราะห์โดยใช้ค่าวิกฤตของค่ารวมผลรวมกำลังสองจะมีความคลาดเคลื่อนในแนวแกน x เท่ากับ ± 0.0089 mm. ส่วนแนวแกน y เท่ากับ ± 0.0239 mm. ซึ่งมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน

(2) การวิเคราะห์ห้อิทธิพลตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อหัวอ่าน/เขียนในสภาวะวิกฤต จากรูปที่ 10 และ 11 ซึ่งให้เห็นได้ว่าค่าตัวแปรความขนาน k ของชิ้นงานมีอิทธิพลต่อความคลาดเคลื่อนต่อแนวอ่าน/เขียนในแกน x มากที่สุดมีค่าประมาณ 82.92% ส่วนค่า j มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงแนวหัวอ่าน/เขียนในแนวแกน y มากที่สุดที่ 32.00%

(3) การวิเคราะห์ห้อิทธิพลตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อหัวอ่าน/เขียนในสภาวะวิกฤตของค่ารวมผลรวมกำลังสอง จากรูปที่ 12 และ 13 ซึ่งให้เห็นได้ว่าค่าตัวแปรความขนาน k มีอิทธิพลต่อความคลาดเคลื่อนต่อแนวอ่าน/เขียนในแกน x มากที่สุดมีค่าประมาณ 97.83% ส่วนค่า j มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงแนวหัวอ่าน/เขียนในแนวแกน y มากที่สุดที่ 43.21%

(4) จากรูปที่ 15 แสดงให้เห็นกราฟการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของแนวหัวอ่าน/เขียน ณ ห้องปฏิบัติการเปรียบเทียบกับค่าคำนวณโดย DLM ผลคือมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน ซึ่งหากดูในรูปของผลการตอบสนองแล้วค่าของ $HA_1 = 1.433077$ และ $HA_2 = 1.439619$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าคำนวณโดยวิธีการ DLM แล้วมีค่าเท่ากับ 1.611 ความแตกต่างเฉลี่ยเท่ากับ $0.174736 \mu\text{m}$. ซึ่งในการผลิตจริงสามารถยอมรับได้ที่ $\pm 10 \mu\text{m}$. ดังนั้นจึงสามารถนำเอาแนวทางนี้ไปใช้กับการวิเคราะห์ชิ้นงานจริงในอุตสาหกรรมได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) และ ศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ (IUCRC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความสนับสนุนเงินวิจัย และขอขอบคุณบริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Chase KW, Parkinson AR. A Survey of Research in the Application of Tolerance Analysis to the Design of Mechanical Assemblies. Engineering Design. 1991 April; 3: p. 23-37.
- (2) Trego A. A Comprehensive System for Modeling Variation in Mechanical Assemblies. MS Thesis. Utah: Brigham Young University; 1993.
- (3) Simmons AP. Automated Vector Loop Generation for Kinematic Models of Mechanical Assemblies. MS Thesis. Utha: Brigham Young University; 1990. Report No.: 90-1.

- (4) Carr CD. A Comprehensive Method for Specifying Tolerance Requirements for Assemblies. MS Thesis. Utha: Brigham Young University; 1993. Report No.: 93-1.
- (5) Chase KW. Tolerance Analysis of 2-D and 3-D Assemblies. Utah: Brigham Young University; 1999.
- (6) Gao J, Chase KW, Magleby SP. A New Monte Carlo Simulation Method for Tolerance Analysis of Kinematically Constrained Assemblies. Utha: Brigham Young University.
- (7) Chase KW, Magleby SP. A Comprehensive System for Computer-Aided Tolerance Analysis of 2-D and 3-D Mechanical Assemblies. In 5th International Seminar on Computer-Aided Tolerancing; 1997; Toronto.
- (8) Glancy CG. A second-order method for assembly tolerance analysis. A Master Thesis. Utha: Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University; 1994.
- (9) Vengsungnle P, Tangchaichit K. Head alignment mathematical modeling and tolerance analysis of Head Stack Assembly. In DST-CON 2009; 2009; Bangkok. Thai.
- (10) Vengsungnle P, Tangchaichit K. Comparison of Assembly Tolerance Analysis of HSA by the DLM And the Monte Carlo Simulation Method. In The 22th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand; 2008; Pathumthani. p. 195-199. Thai.
- (11) Mortensen AJ. An intergrated methodology for statistical tolerance analysis of flexible assemblies. A master thesis. Utha: Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University; 2002.