

การวิเคราะห์โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจแรง 6 องศาอิสระสำหรับหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

A Analysis Structure Of 6-Dof Force Sensor For Robot Manipulator

รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ นายตริยวิทย์ วงศ์อภิวัฒน์กุล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พญาไท กรุงเทพฯ 10330
โทร 022186389, โทรสาร 022521513, E-Mail: Viboon.s@eng.chula.ac.th

Viboon Sangveraphunsiri and Traiwit Wong-apiwatthanakul
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Phayatai Rd., Bangkok 10330.
Tel: 022186389, Fax: 022521513

บทคัดย่อ

บทความนี้จะกล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจแรงแบบ 6 องศาอิสระสำหรับใช้งานกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรม โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ เป้าหมายของการออกแบบเพื่อให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานกับแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม โดยพิจารณาค่าคอนดิชันนัมเบอร์ (Condition number) เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการทำงานของโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจแรง นอกจากนี้ความถี่ธรรมชาติและความแข็งแรงของโครงสร้างก็เป็นพารามิเตอร์ที่มีส่วนสำคัญในการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจแรงดังกล่าวด้วย

Abstract

This paper is to design a structure for a 6 degree-of-freedom force sensor. This sensor is mainly used with robot manipulators. The finite element method will be used as a tool for helping in design and analysis. The Condition number is an important criterion for comparing the structure performance. Another factors, which also play the importance role in designing, are natural frequency and stiffness of the sensor structure.

1. บทนำ

ในยุคปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยบางอย่างที่ใช้แรงงานมนุษย์เป็นหลัก เริ่มปรับเปลี่ยนหันมาใช้ระบบคอมพิวเตอร์หรือหุ่นยนต์อุตสาหกรรมในการผลิตมากขึ้นเพื่อให้ได้งานที่มีคุณภาพสูงและรวดเร็วกว่าเดิม โดยหุ่นยนต์อุตสาหกรรมส่วนใหญ่นั้นจะใช้การควบคุมแบบควบคุมตำแหน่ง (Position control) แต่ในงานบางประเภทเราไม่สามารถใช้การควบคุมตำแหน่งแต่เพียงอย่างเดียวเพราะอาจทำให้เกิดการเสียดายขึ้นกับชิ้นงานเช่น ในงานประกอบชิ้นส่วน หรือในงานขัดผิว เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้การควบคุมแรง (force control) แทน

ซึ่งการที่เราจะทำการควบคุมแรงได้นั้น จำเป็นที่จะต้องมียูปรณ์ตรวจแรง (force sensor) เสียก่อน ซึ่งอุปกรณ์ตรวจแรงเองก็มีหลายประเภทด้วยกัน แต่เพื่อที่จะนำไปใช้กับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมตัวอุปกรณ์ตรวจแรงควรมี 6 องศาอิสระ (Degree of Freedom, DOF) คือสามารถวัดแรงตามแนวแกน X, Y, และ Z รวมกับวัดโมเมนต์ในทิศทางดังกล่าว อุปกรณ์ตรวจแรงที่พัฒนาขึ้นนี้จะใช้สเตรนเกจ (strain gage) เป็นตัวทรานสดิวเซอร์สำหรับวัดค่าสเตรนเพื่อมาคำนวณหาแรงและโมเมนต์ดังกล่าว

2. หลักการวัดแรงและโมเมนต์

แรงและโมเมนต์ที่กระทำกับตัวอุปกรณ์ตรวจแรงนั้น เราสามารถหาได้จากการคำนวณผ่านการวัดค่าความเครียด (Strain) ที่ตำแหน่งที่เรากำหนดบนตัวโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจแรง โดยสมมติฐานว่าแรงและโมเมนต์ที่กระทำกับโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ตรวจแรงนั้นทำให้เกิดการเสียรูปที่ยังอยู่ในช่วงที่ยืดหยุ่นได้ (elastic range) ดังนั้นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเครียดกับแรงและโมเมนต์ภายนอกที่กระทำกับอุปกรณ์ตรวจแรงจะเป็นไปดังสมการต่อไปนี้

$$\varepsilon_s = C_s f_s \quad (1)$$

โดยที่ ε_s คือ เวกเตอร์ของความเครียดขนาด $(n \times 1)$ มิติ

n คือ จำนวนตำแหน่งที่เราวัดความเครียด

C_s คือ สเตรนคอมพลีเมนต์เมตริกซ์ (strain compliance matrix) ขนาด $(n \times m)$ มิติ

f_s คือ เวกเตอร์ของแรงและโมเมนต์ซึ่งประกอบด้วยแรง F_s และโมเมนต์ M_s ซึ่งกระทำที่จุดกึ่งกลางของอุปกรณ์ตรวจแรง

m คือ จำนวนแรงและโมเมนต์ของแรงภายนอกที่เราต้องการจะวัด ซึ่งโดยปกติจะเท่ากับ 6 คือ ประกอบด้วยแรงในแนวแกน X, Y, Z และโมเมนต์รอบแกน X, Y, Z โดยที่ $n \geq m$ เสมอ

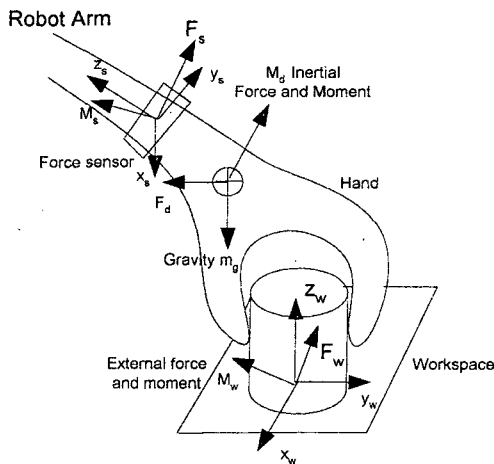
เนื่องจากจุดประสงค์ของการอุปกรณ์ตรวจรู้แรงคือ ต้องการวัดแรงและโมเมนต์ภายนอกที่มากระทำ ดังนั้นจากสมการที่ (1) ถ้า $n \geq m$ และ $\text{rank } C_s = m$ แล้วเราจะสามารถหา f_s ได้โดยอาศัยมัวร์-เพนโรสอินเวอร์ส (Moore-Penrose Inverse) ของ C_s ดังนี้

$$f_s = C_s^+ \varepsilon_s \quad (2)$$

โดยที่ C_s^+ คือ เซนเซอร์คาลิเบชันเมตริกซ์ (Sensor calibration matrix) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก C_s ดังสมการต่อไปนี้

$$C_s^+ = (C_s^T C_s)^{-1} C_s^T \quad (3)$$

ทั้งนี้แรงและโมเมนต์ที่ได้จากเวกเตอร์ f_s เป็นแรงที่กระทำที่เซนเซอร์เฟรม {S} ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งหากเราต้องการหาแรงหรือโมเมนต์ที่ปลายแขนของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม (F_w, M_w) เราก็สามารถคำนวณได้โดยการทรานฟอร์มแรงที่วัดได้เทียบกับเซนเซอร์เฟรมไปยังเฟรมของวัตถุโดยใช้ทรานฟอร์มเมชันเมตริกซ์ (Transformation matrix)



รูปที่ 1 แสดงการวัดแรงและโมเมนต์โดยอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

3. การพิจารณาโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

การที่จะทำให้ได้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่มีประสิทธิภาพดีนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 อย่างคือ

1. ลักษณะของโครงสร้าง
2. ตัวทรานสดิวเซอร์ที่จะใช้

ดัชนีคอนดิชันนัมเบอร์ซึ่งนำเสนอโดย M.Uchiyama (1987) [2] จะเป็นดัชนีที่ใช้เปรียบเทียบสมรรถนะของโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง โดยดัชนีคอนดิชันนัมเบอร์จะแสดงถึงความผิดพลาดในการวัดแรงของโครงสร้างที่ใช้

การหาค่าคอนดิชันนัมเบอร์นั้น เราจำเป็นต้องจะต้องรู้ทรานคอมเพล็กซ์เมตริกซ์ C_s ที่แสดงในสมการ (1) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ค่าคงที่ โดยค่าของมันจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง โครง

สร้างที่แตกต่างกันจะได้เมตริกซ์ C_s ที่แตกต่างกัน เราสามารถหาเมตริกซ์ C_s นี้ได้ 2 วิธีคือ

1. การทดลอง
2. ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

เมื่อได้เมตริกซ์ C_s แล้วเราจะต้องทำการนอร์มอลไลซ์ (normalized) เสียก่อนด้วยแรงและโมเมนต์มาตรฐานโดยจากสมการ (1) เมื่อทำการนอร์มอลไลซ์แล้วจะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\varepsilon_s = \bar{C}_s \bar{f}_s \quad (4)$$

โดย

$$\bar{f}_s = \begin{bmatrix} F_x & F_y & F_z & M_x & M_y & M_z \\ F_{std} & F_{std} & F_{std} & M_{std} & M_{std} & M_{std} \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

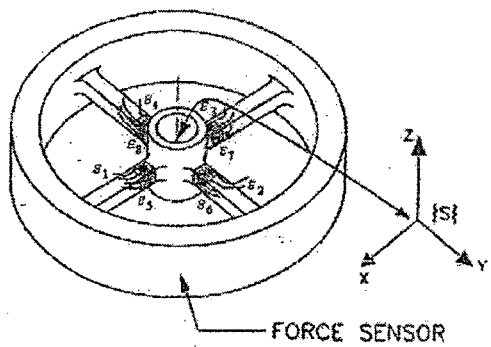
$$\bar{C}_s = C_s \cdot \text{diag}[F_{std} \ F_{std} \ F_{std} \ M_{std} \ M_{std} \ M_{std}] \quad (6)$$

ส่วนค่าแรงมาตรฐาน (F_{std}) และโมเมนต์มาตรฐาน (M_{std}) นั้นมีหลักในการเลือก 2 วิธีดังนี้

วิธีที่ 1 (โดย T. Yosikawa, T. Miyazaki 1989) [3] นั้นมีหลักในการเลือกดังนี้คือ ถ้าเรากำหนดให้ F_{std} มีค่าเท่ากับ 1 N เสมอ ค่า M_{std} จะเท่ากับอัตราส่วนระหว่างขนาดของตัวขยายของแรงเฉลี่ยกับขนาดของตัวขยายของโมเมนต์เฉลี่ย ซึ่งถ้า C_s อยู่ในสภาวะที่เป็นอุดมคติแล้ว C_s จะมีลักษณะดังต่อไปนี้

$$C_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & * & 0 & * & 0 \\ 0 & 0 & * & * & 0 & 0 \\ 0 & 0 & * & 0 & * & 0 \\ 0 & 0 & * & * & 0 & 0 \\ 0 & * & 0 & 0 & 0 & * \\ * & 0 & 0 & 0 & 0 & * \\ 0 & * & 0 & 0 & 0 & * \\ * & 0 & 0 & 0 & 0 & * \end{bmatrix} \quad (7)$$

โดยที่ * คือ ตัวเลขใด ๆ ที่ไม่เท่ากับ 0 และ C_s ในสมการที่ (7) คือรูปแบบในอุดมคติ (ideal form) เมื่อมีการติดสเตรนเกจและแกนสมมุติมีลักษณะดังรูปที่ 2 ในกรณีที่ใช้ระเบียบวิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์เราสามารถอ่านสเตรนตรงตำแหน่งที่กำหนดจากข้อมูลเอาท์พุทที่ได้จากการวิเคราะห์ แล้วนำค่าสเตรนที่อ่านได้นั้นมาหารด้วยแรงหรือโมเมนต์ก็จะได้ค่า * ที่เติมลงใน C_s



รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งสเตรนเกจและแกนสมมุติ

จากสมการ (7) M_{std} จะมีค่าดังนี้

$$M_{std} = \frac{\text{ผลบวกของค่าสัมบูรณ์ของ * ทั้งหมดใน 3 คอลัมน์แรก}}{\text{ผลบวกของค่าสัมบูรณ์ของ * ทั้งหมดใน 3 คอลัมน์หลัง}} \quad (8)$$

วิธีที่ 2 (โดย M.Uchiyama 1987)[2] นั้นจะใช้ค่าแรงสูงสุดและโมเมนต์สูงสุดที่เราออกแบบเป็นค่า F_{std} และ M_{std} ตามลำดับ

จากค่า $\bar{C}_s$ เราจะนำเมตริกซ์ $\bar{C}_s$ มาหาค่าซิงกูลาร์วอลู (Singular value) โดยจะได้ค่าซิงกูลาร์วอลูออกมาหลายค่าด้วยกัน จำนวนของซิงกูลาร์วอลูที่ได้ขึ้นอยู่กับมิติของเมตริกซ์ $\bar{C}_s$ ค่าคอนดิชันนัมเบอร์ก็คือ อัตราส่วนระหว่างซิงกูลาร์วอลูที่มากที่สุดต่อซิงกูลาร์วอลูที่น้อยที่สุด เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Cond(\bar{C}_s) = \frac{\max. \text{ singular value}}{\min. \text{ singular value}} \quad (9)$$

โดยคอนดิชันนัมเบอร์ในอุดมคติจะมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งคอนดิชันนัมเบอร์นั้นเป็นดัชนีที่แสดงถึงความผิดพลาดในการวัดแรง ยิ่งมีค่าใกล้ 1 เท่าไรก็แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ตรวจวัดมีความผิดพลาดในการวัดร่น้อยเท่านั้น

นอกจากคอนดิชันนัมเบอร์แล้วเรายังต้องคำนึงถึงความแข็งแรง (stiffness)[4,5] ของอุปกรณ์ตรวจวัดด้วย เนื่องจากเราต้องนำอุปกรณ์ตรวจวัดที่ได้ไปติดไว้กับหุ่นยนต์ ถ้าอุปกรณ์ตรวจวัดที่คำนวณออกมาเสียรูปมากเกินไปเมื่อมีแรงหรือโมเมนต์ภายนอกมากกระทำ ก็จะทำให้ตำแหน่งปลายของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมผิดพลาดไปจากที่ต้องการมากเกินไป (เมื่อตอนปลายแขนสัมผัสกับชิ้นงาน) อันจะมีผลทำให้การควบคุมแขนกลเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ ซึ่งเราอาจจะกำหนดไว้ว่าควรมีค่าไม่เกิน 40 ไมครอน ทั้งนี้จะเห็นว่าความแข็งแรงกับความไว (Sensitivity) ของอุปกรณ์ตรวจวัดนั้นมีความสัมพันธ์ในทางที่ตรงกันข้ามกัน คือ ถ้าอุปกรณ์ตรวจวัดมีความแข็งแรงมาก ความไวก็จะน้อยลง ในทางกลับกันถ้าอุปกรณ์ตรวจวัดมีความไวมาก ความแข็งแรงก็จะต้องน้อยลง อันจะมีผลทำให้หุ่นยนต์ที่ติดอุปกรณ์ตรวจวัดนั้นมีความแข็งแรงน้อยไปด้วย

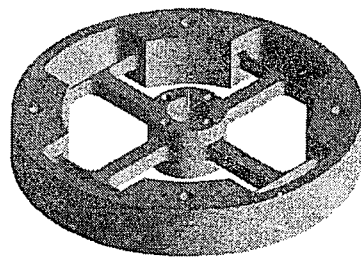
ทางด้านพลศาสตร์ (dynamics) เราต้องรู้ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างที่ใช้ ซึ่งโดยทั่วไปควรจะมีความมากกว่า 10 เท่าของความถี่ที่หุ่นยนต์ทำงาน เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการไหวอันเนื่องจากการเกิดเรโซแนนซ์ (resonance) ขึ้น ทราบดีสเตรนเกจที่ใช้กับโครงสร้างที่ออกแบบนี้คือ สเตรนเกจ

ท้ายที่สุดในการออกแบบโครงสร้างเราจะต้องพิจารณาถึงรูปร่างที่เป็นไปได้ในการสร้างด้วย เพราะบางรูปร่างอาจจะทำได้ยากหรืออาจทำไม่ได้เลยเนื่องจากไม่มีเครื่องมือหนักที่จะใช้ทำ ต้องคำนึงความยากง่ายของการติดตั้งสเตรนเกจเนื่องจากเป็นส่วนสำคัญต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดเช่นกัน

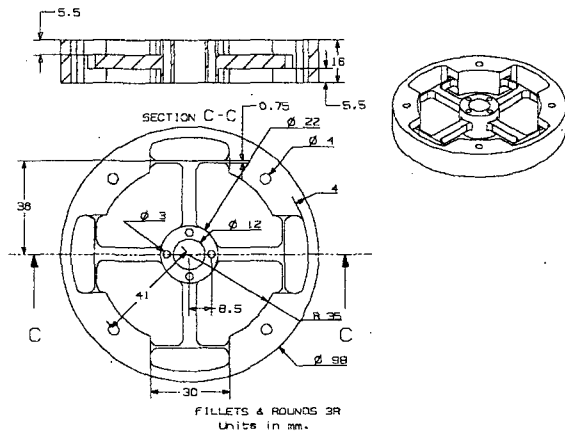
4. การวิเคราะห์โดยไฟไนต์เอลิเมนต์

ต่อไปเราจะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือในการออกแบบโครงสร้างและปรับปรุงเพื่อให้ได้โครงสร้างที่ดีขึ้น โดยเราจะสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีรูปร่างเหมือนกับโครงสร้างที่จะออกแบบและผลิต กำหนดภาระ (load) ต่าง ๆ กำหนดเงื่อนไขบังคับ (Constraint) เพื่อนำไปคำนวณค่าสเตรน (Strain) ที่ตำแหน่งที่เราต้องการหรือตำแหน่งที่ติดตั้งสเตรน ต่อไปก็นำผลที่ได้มาคำนวณหาเมตริกซ์ C_s แล้วนำไปคำนวณหาคอนดิชันนัมเบอร์ต่อไป ขั้นตอนดังกล่าวสามารถนำไปใช้กับโครงสร้างแบบอื่นและนำค่าคอนดิชันนัมเบอร์นี้มาเปรียบเทียบกับเพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาความสมรรถนะของโครงสร้างแบบต่าง ๆ

รูปแบบของโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดที่เราให้ความสนใจนั้นแสดงอยู่ในรูปที่ 3 โดยกำหนดความสามารถในการใช้งาน ดังนี้คือ สามารถรับแรงสูงสุดได้ 100 นิวตันและโมเมนต์สูงสุด 4.64 N-m วัสดุที่ใช้สร้างเป็นอลูมิเนียม เราจะวิเคราะห์โดยใช้ระเบียบวิธีการของไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์



รูปที่ 3 แสดงรูปอุปกรณ์ตรวจวัดที่คิดค้นใหม่



รูปที่ 4 แสดงขนาดของอุปกรณ์ตัวจริงแรงในรูปที่ 3

โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เรหามาเมตริกซ์ C_s ของ โครงสร้างใหม่ ได้ดังนี้

$$C_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 3.29 & 0 & -161.42 & 0 \\ 0 & 0 & 3.29 & 161.42 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.29 & 0 & 161.42 & 0 \\ 0 & 0 & 3.29 & -161.42 & 0 & 0 \\ 0 & 2.99 & 0 & 0 & 0 & 92.03 \\ 2.99 & 0 & 0 & 0 & 0 & -92.03 \\ 0 & 2.99 & 0 & 0 & 0 & -92.03 \\ 2.99 & 0 & 0 & 0 & 0 & 92.03 \end{bmatrix}$$

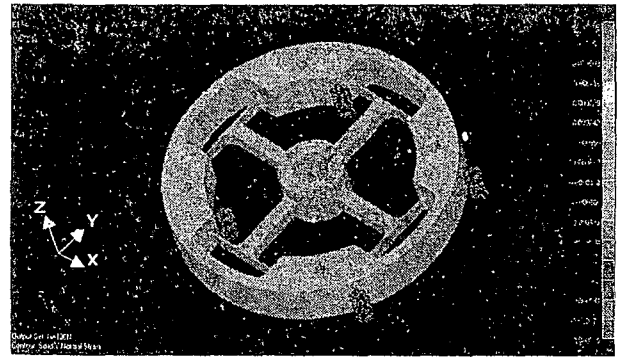
เมื่อทำการนอร์มัลไลซ์ (normalization) ตามสมการ (8) จะได้เมตริกซ์ $\bar{C}_s$ ดังนี้

$$\bar{C}_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 3.29 & 0 & -3.9997 & 0 \\ 0 & 0 & 3.29 & 3.9997 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.29 & 0 & 3.9997 & 0 \\ 0 & 0 & 3.29 & -3.9997 & 0 & 0 \\ 0 & 2.99 & 0 & 0 & 0 & 2.2803 \\ 2.99 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2.2803 \\ 0 & 2.99 & 0 & 0 & 0 & -2.2803 \\ 2.99 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.2803 \end{bmatrix}$$

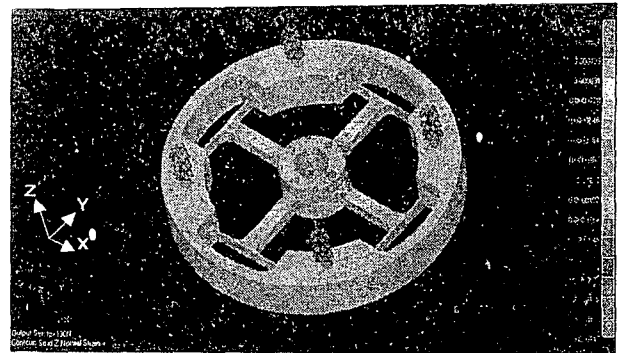
คำนวณได้ค่าคอนดิชันนัมเบอร์ = 1.5561

ในส่วนของความแข็งแรง (stiffness) นั้นมีผลดังนี้

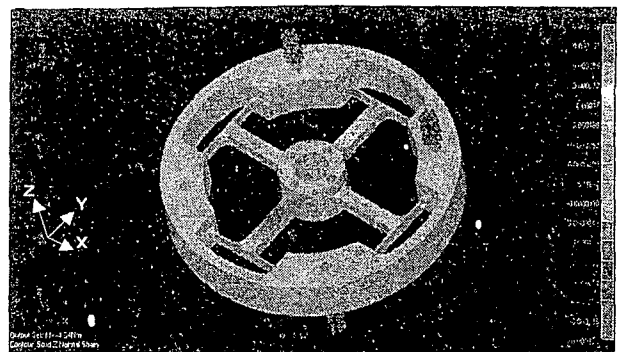
- เมื่อใส่แรง F_x หรือ F_y 100 N ทำให้เกิดการเสียรูปมากที่สุด 32.9 ไมครอน
 - เมื่อใส่แรง F_z 100 N ทำให้เกิดการเสียรูปมากที่สุด 45.85 ไมครอน
 - เมื่อใส่ M_x หรือ M_y 4.64 N.m ทำให้เกิดการเสียรูปมากที่สุด 149 ไมครอน
 - เมื่อใส่ M_z 4.64 N.m ทำให้เกิดการเสียรูปมากที่สุด 64.6 ไมครอน
- และเราสามารถหาความถี่ธรรมชาติตัวแรก (1^{st} natural frequency) ได้ 606.4029 Hz

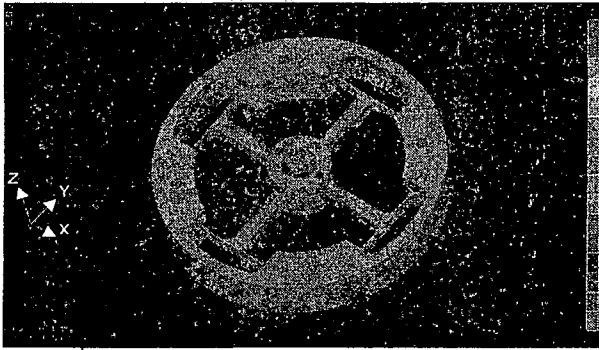
รูปที่ 5 แสดงการหาสเตรนโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บน โครงสร้างใหม่เมื่อใส่แรง $F_x = 100$ N

จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าเกิดสเตรนมากที่สุดที่ครีบบาง ๆ ทั้ง 2 ข้างซึ่งเป็น จุดที่เปราะบางที่สุด และเกิดสเตรนมากอีกจุดบนแกน ที่ทอดตัวตามแนว y ใกล้กับจุดศูนย์กลางของอุปกรณ์ตัวจริง ส่วน F_y เราจะไม่คำนวณ เพราะรูปมีลักษณะสมมาตรกันในแนวแกน x และ y

รูปที่ 6 แสดงการหาสเตรนโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บน โครงสร้างใหม่เมื่อใส่แรง $F_z = 100$ N

จากรูปที่ 6 จะเห็นว่าเกิดสเตรนมากที่สุดบนแกนทั้ง 4 บริเวณใกล้กับ จุดศูนย์กลางของอุปกรณ์ตัวจริง

รูปที่ 7 แสดงการหาสเตรนโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บน โครงสร้างใหม่เมื่อใส่โมเมนต์ $M_x = 4.64$ N-m



รูปที่ 8 แสดงการหาสเตรนโดยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์บน
โครงสร้างใหม่เมื่อใส่โมเมนต์ $M_z = 4.64 \text{ N-m}$

จากรูปที่ 7 และ 8 จะเห็นว่าจุดที่เกิดสเตรนมากที่สุดคือ บริเวณแกนทั้ง 4 โดยจะเกิดมากขึ้นเมื่อเข้าใกล้จุดศูนย์กลางของอุปกรณ์ตรวจแรง ดังนั้นเราจะนำจะติดสเตรนเกจที่บริเวณนี้

จากที่ได้ทั้งหมดทำให้สรุปได้ว่า โครงสร้างนี้อาจจะมีปัญหาในเรื่องของความแข็งแรง ในส่วนของการรับโมเมนต์ เราอาจแก้ปัญหาโดยกำหนดโมเมนต์มากที่สุดใหม่ให้ค่าน้อยลง หรือถ้าเป็นงานที่ต้องการรับโมเมนต์มาก ๆ ก็ต้องลองหาโครงสร้างแบบอื่นแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาแบบที่ดีขึ้นกว่าเดิม

5. สรุป

จะเห็นว่าเราสามารถที่จะนำเอาระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์มาใช้ช่วยในการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจแรงได้ ทำให้เราได้อุปกรณ์ตรวจแรงที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเราไม่จำเป็นต้องสร้างอุปกรณ์ตรวจแรงขึ้นมาแต่แรก นอกจากนั้นยังช่วยให้เราสามารถพิจารณาเปรียบเทียบโครงสร้างหลาย ๆ แบบได้ก่อนการสร้างจริง ทำให้ประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย ในท้ายที่สุดนี้สิ่งสำคัญที่จำเป็นต้องทำคือการตรวจสอบจริงหรือการทดลองจริง ซึ่งมีความจำเป็นหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพราะผลที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์เป็นเพียงการประมาณเท่านั้น นอกจากนั้นการติดตั้งสเตรนเกจ วงจรรีเล็คทรอนิกส์ สัญญาณรบกวน ก็มีความสำคัญอย่างมากกับประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจแรงนี้ ขั้นตอนการศึกษาต่อไปคือศึกษาดูพารามิเตอร์หรือปรับรูปแบบขนาดของตัวโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจแรงเพื่อให้ค่าคอนดิชันนัมเบอร์นี้มีค่าเข้าใกล้ 1 ให้มากที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] ไพศาล เต็งเจริญชัย, 2541, การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์สำหรับอุปกรณ์ตรวจแรงและแรงบิด, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] Uchiyama, M., Bayo, E., Palma-Villalon, E., 1991, "A Systematic Design Procedure to Minimize a Performance Index for Robot Force Sensors", ASME, Vol. 113, September, pp. 388-394

- [3] Yoshikawa, T., Miyazaki, T., 1989, "A Six-Axis Force Sensor with Three-Dimensional Cross-Shape Structure", IEEE, pp. 249-255
- [4] Bayo, E., and Stubbe, J. R., 1989, "Six-Axis Force Sensor Evaluation and a New Type of Optimal Frame Truss Design for Robotic Applications", Journal of Robotic Systems, Vol. 6, No. 2, pp. 191-208
- [5] Nakamura, Y., Yoshikawa, T., and Futamura, I., 1988, "Design and Signal Processing of Six-Axis Force Sensors", Robotics Research: 4th International Symposium, MIT Press, Cambridge, MA, pp. 75-81