บทที่ 6

การทดลอง

ในการทดลองเกี่ยวกับอุปกรณ์วัดแรงจะแบ่งขั้นตอนเป็นสามขั้นตอน ในขั้นตอนแรกจะเป็นการทดลองเพื่อหาค่าของเซนเซอร์คาลิเบรชันเมตริกซ์ (sensor calibration matrix) ซึ่งเป็นเมตริกซ์ที่ใช้ในการคำนวนหาค่าของแรงและโมเมนต์ ในขั้นตอนที่สองจะทำการทดลองหาค่าคุณสมบัติด้านสแตติกของอุปกรณ์วัดแรงที่ได้หลังจากการปรับเทียบค่าแล้ว ส่วนในขั้นตอนที่สามจะเป็นการทดสอบวัดแรงและโมเมนต์ในแนวแกนและทิศทางต่างๆกัน เพื่อพิจารณาผลการวัดในลักษณะของการใช้งานจริงและตรวจสอบถึงผลกระทบต่อค่าการวัดในแนวแกนอื่นๆ

ในการใช้งานอุปกรณ์วัดแรงเพื่อหาค่าของแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นนั้น ในขั้นตอนแรกต้องทำการปรับเทียบค่าเครื่องมือวัดแรงที่สร้างขึ้นมา เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงและโมเมนต์กับสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า เนื่องจากจำนวนของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จะต้องทำการวัดมีมากถึง 8 สัญญาณการจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกจะทำให้มีความสะดวกและรวดเร็วในการนำไปใช้คำนวนหาแรงและโมเมนต์ที่เกิดกับตัวอุปกรณ์วัดแรง ความสัมพันธ์นี้สามารถแสดงในรูปของเมตริกที่ใช้ในการแปลงค่าสัญญาณไฟฟ้าที่สามารถวัดได้ไปเป็นค่าของแรงและโมเมนต์ ที่เรียกว่า เซนเซอร์คาลิเบรชันเมตริกซ์ (sensor calibration matrix) หรือรีโซลด์ฟอร์ซ-เมตริกซ์ (Resolved force matrix) ในการปรับเทียบค่าเพื่อหาค่าของเซนเซอร์คาลิเบรชันเมตริกซ์จะต้องทำการหาจากเมตริกซ์ที่เรียกว่า ซูโดอินเวอร์สคาลิเบรชันเมตริกซ์ (Pseudoinverse calibration matrix) ซึ่งจะเป็นเมตริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและโมเมนต์ที่รู้ค่ากับค่าของสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

เมื่อได้เซนเซอร์คาลิเบรชันเมตริกซ์จากการปรับเทียบค่าแล้วจะต้องทำการตรวจสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดแรง ซึ่งจะเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติทางสแตติก ได้แก่ ค่าความแม่นยำหรือค่าแอคเคอเรซี่ (accuracy) ค่ารีโซลูชั่น (resolution) ค่าลิเนียริตี้ (linearity) ค่ารีพีทอะบิลิตี้ (repeatability) ค่าฮีสเตอเรซิส (hysteresis) และทดสอบการวัดแรงและผลที่มีต่อการวัดแรงในทิศทางอื่นๆ

การปรับเทียบค่าและวิธีการหาค่าเซนเซอร์คาลิเบรชันเมตริกซ์

การปรับเทียบค่า (Calibration)คือ การทดสอบโดยการใส่ค่าของแรงหรือโมเมนต์ที่รู้ค่ากระทำกับอุปกรณ์ตรวจวัดที่จัดสร้างขึ้นมา แล้วทำการอ่านและบันทึกค่าเอาท์พุท (สัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า) ที่ส่งออกมาจากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงที่ได้สร้างขึ้นมา เครื่องมือที่จะใช้ในการ

ทดลองทำการปรับเทียบค่าจะเป็นชุดโต๊ะทดสอบที่สามารถทำการออกแรงกระทำที่รู้ค่ากับตัวอุปกรณ์วัดแรง ได้ทั้งหมด 6 ส่วนประกอบของแรง คือ แรงในทิศทาง 3 แนวแกน (F_x,F_y,F_z) และโมเมนต์ในทิศทาง 3 แนวแกน (M_x,M_y,M_z) โดยจะทำการทดลองใส่แรงหรือโมเมนต์ที่รู้ค่าทำการทดลองทีละแนวแกนและทำการเพิ่มค่าของแรงหรือโมเมนต์ที่กระทำ โดยแต่ละครั้งก็ทำการวัดค่าของสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแต่ละชุดของสเตรนเกจ W_1 ถึง W_8 จำนวน 8 ชุด เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปหาความชันของความสัมพันธ์ระหว่างแรงหรือโมเมนต์ที่กระทำกับสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในรูปของเมตริกซ์ที่เรียกว่า ซูโดอินเวอร์สคาลิเบรชันเมตริกซ์ ซึ่งสมาชิกในแต่ละคอลัมน์ของเมตริกซ์นี้จะแทนความชันของความสัมพันธ์ระหว่างแรงหรือโมเมนต์กับสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า เรียงกันไปตามแถวที่ 1 ถึงแถวที่ 8 (ตัวอย่างเช่น r_{11} คือสมาชิกในคอลัมน์ที่ 1 แถวที่ 1 แทนค่าความชันระหว่าง F_x กับความต่างศักย์ W_1 หรือ r_{21} จะแทนค่าความชันระหว่างแรง F_x กับความต่างศักย์ W_2 เป็นต้น) และจากการทำการทดลองกับแรงและโมเมนต์ทั้ง 3 แนวแกนก็จะได้สมาชิกทั้งหมดของซูโดอินเวอร์สคาลิเบรชันเมตริกซ์ แล้วใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด(Least square fit) แปลงค่าเมตริกซ์ที่ได้จากการทดลองกลับไปเป็นเซนเซอร์คาลิเบรชันเมตริกซ์จากสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} W1 \\ W2 \\ W3 \\ W4 \\ W5 \\ W6 \\ W7 \\ W8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} & r_{16} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} & r_{26} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} & r_{36} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} & r_{46} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} & r_{55} & r_{56} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} & r_{64} & r_{65} & r_{66} \\ r_{71} & r_{72} & r_{73} & r_{74} & r_{75} & r_{76} \\ r_{81} & r_{82} & r_{83} & r_{84} & r_{85} & r_{86} \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}$$

$$W = R_F^* \cdot F$$

R_F^* คือ Psuedoinverse calibration matrix

คูณด้วย$(R_F^*)^T$ ทั้งสองข้างของสมการ

$$(R_F^*)^T \cdot W = (R_F^*)^T R_F^* \cdot F$$

$$F = [(R_F^*)^T \cdot R_F^*]^{-1} \cdot (R_F^*)^T \cdot W$$

$$F = R_F \cdot W$$

เมื่อ $R_F = [(R_F^*)^T \cdot R_F^*]^{-1} (R_F^*)^T$ (6.1)

R_F คือ sensor calibration matrix

สรุปขั้นตอนการทำการทดลองปรับเทียบค่า

1.ใส่แรงกระทำ(จากตุ้มน้ำหนัก) ในแนวแกน x โดยเริ่มจากน้อยไปหามาก ในแต่ละค่าของแรงให้ทำการวัดค่าสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากเสตรนเกจ ทั้ง 8 ชุด w_1-w_8 แล้วทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าสัญญาณที่ได้เพื่อหาค่าความชันของข้อมูลซึ่งจะได้สมาชิกของเมตริกซ์ R_F^* (Psuedoinverse calibration matrix) ในคอลัมน์ที่ 1 จำนวน 8 ตัวคือ r_{11} - r_{81}

2.ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 1 แต่เปลี่ยนแนวแรงกระทำไปในแนวแกน y และแกน z ซึ่งจะได้สมาชิกของเมตริกซ์ในคอลัมน์ที่ 2 (F_Y) r_{12} - r_{82} และสมาชิกในคอลัมที่ 3 (F_Z) r_{13} - r_{83} ตามลำดับ

3.การปรับเทียบกับโมเมนต์ทำได้โดยการออกแรงบิดกระทำในแต่ละแนวแกน ในแนวแกน x และแกน y จะทำการทดลองโดยใส่แรงบิดเพิ่มจากน้อยไปหามาก ในแต่ละค่าของโมเมนต์ให้ทำการวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับข้อ 1 ซึ่งเราสามารถหาสมาชิกของเมตริกซ์ในคอลัมน์ที่ 4 (M_X) และในคอลัมน์ที่ 5 (M_Y) ได้

4.การปรับเทียบในแนวแกน Z ทำเช่นเดียวกับข้อ 3 ก็จะได้สมาชิกของเมตริกซ์ในคอลัมน์ที่ 6 (M_Z)

5.จากเมตริกซ์ที่ได้ทำการแปลงกลับเมตริกซ์ก็จะได้ sensor calibration matrix (R_F) จากสมการ

การทดสอบคุณสมบัติด้านสแตติกของเครื่องมือวัดแรง

หลังจากการปรับเทียบค่าแล้วจะทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดแรงในด้านอื่นคือ การหาค่าความแม่นยำ (acuracy) ค่ารีโซลูชัน (resolution) ค่ารีพีทอะบิลิตี้ (repeatability) ค่าลิเนียริตี้ (linearity) และค่าฮีสเตอเรซิส (hysteresis) ซึ่งมีรายละเอียดของวิธีการต่างๆ ดังนี้

1.ค่าความแม่นยำ (acuracy) เป็นค่าที่แสดงของเครื่องมือวัดที่เราได้ออกแบบสร้างขึ้นมา โดยมีวิธีการแสดงค่าความผิดพลาดในรูปของเปอร์เซนต์ของความผิดพลาด (percent error) ซึ่งแสดงได้ 2 วิธีคือ ในรูปของ percent of full scale output และ percent of reading สามารถเขียนในรูปของสมการได้ดังนี้

- Percent of full-scale output (วิธีนี้จะเป็นที่นิยมที่สุด)

$$= \frac{load_{error}}{load_{full\ scale}} \times 100 \quad \%$$

- Percent of reading

$$= \frac{load_{error}}{load_{true}} \times 100 \ \%$$

โดยที่

$$load_{error} = load_{actual\ output} - load_{true}$$

2.**ค่ารีโซลูชัน (resolution)** คือค่าที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของอินพุทที่น้อยที่สุดที่ยังทำให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของเอาท์พุท ในกรณีนี้คือค่าของแรงหรือโมเมนต์ ที่น้อยที่สุดที่สามารถทำการค่าของสัญญาณไฟฟ้าได้

3.**ค่ารีพีทอะบิลิตี้ (repeatability)** คือค่าที่แสดงถึงความน่าเชื่อถือของเครื่องมือวัดโดยการป้อนค่าอินพุทค่าเดิมหลายครั้งๆ แล้วทำการวัดเพื่อตรวจสอบลักษณะการกระจายของข้อมูลของเอาท์พุทเอาท์ วิธีการแสดงแสดงค่า repeatability ในรูปของสมการได้ 2 วิธีดังนี้

- $\text{Repeatability} = \frac{\text{maximum - minimum}}{\text{full scale}} \times 100 \ \%$

- $\text{Repeatability} = \frac{\text{largest deviation - average}}{\text{full scale}} \times 100 \ \%$

4. **ค่าลิเนียริตี้ (linearity)** เป็นค่าที่แสดงความเป็นเส้นตรงของเอาท์พุทเมื่อเทียบกับอินพุท โดยทำการหาค่าเปอร์เซนต์ (full scale) ผลต่างสูงที่สุดระหว่างเส้นตรงแสดงค่าเฉลี่ยกับข้อมูลในแต่ละจุด ซึ่งเส้นตรงที่แสดงค่าเฉลี่ยของข้อมูลมีวิธีการหาค่าได้ 3 วิธี ทำให้สามารถจำแนกวิธีการหาค่าลิเนียริตี้ได้ 3 วิธีคือ Endpoint linearity Independent straight-line linearity และ Least squares linearity ซึ่งในการทดลองจะใช้วิธีการหาค่าแบบ Least squares linearity เนื่องจากเป็นวิธีการที่นิยมใช้ที่สุดเพราะเส้นตรงที่ได้หาจากวิธีการทางสถิติ(วิธีกำลังสองน้อยที่สุด)

4.**ค่าฮีสเตอเรซิส (hysteresis)** เป็นค่าที่แสดงถึงความเสียดทานภายใน (internal friction) ของเครื่องมือวัดที่แสดงในรูปเปอร์เซนต์แบบฟูลสเกล (full scale) ความแตกต่างมากที่สุดระหว่างผลการวัดเมื่อเพิ่มอินพุทกับผลการวัดเมื่อลดอินพุท

การตรวจสอบผลการวัดแรงและโมเมนต์

ในการทดลองในขั้นตอนนี้จะเป็นการใช้อุปกรณ์วัดแรงในการวัดค่าของแรงและโมเมนต์ในทิศทางแกน X Y และ Z เพื่อพิจารณาถึงผลการวัดและผลกระทบของแรงและโมเมนต์ในทิศทางใดทิศทางหนึ่งต่อการวัดในทิศทางอื่น ๆ โดยในการทดลองจะทำการออกแรงหรือโมเมนต์หลายค่ากระทำในทิศทางเดียวแล้วทำการคำนวนวัดค่าแรงและโมเมนต์ที่เกิดและพิจารณาถึงผลที่มีต่อการวัดในทิศทางอื่นๆ ในรูปของเปอร์เซนต์แบบฟูลสเกล (fullscale) ของแต่ละแนวแกน

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. Bond resistance strain gauge B-FAE-5-12-T11 ผลิตโดย บริษัท MINIBEA Co.,Ltd. เกจแฟคเตอร์ 2.05 ± 1% ความต้านทาน 120 ± 0.2% โอห์ม ความยาวเกจ 5 มิลิเมตร จำนวนใช้งาน 16 ตัว

3. ชุดโต๊ะปรับเทียบค่าที่สามารถออกแรงกระทำและโมเมนต์ที่รู้ค่าได้ ตามรูปที่ 6.1

2. โครงสร้างอุปกรณ์วัดแรงที่ทำจากชิ้นงานอลูมิเนียมชิ้นเดียวกัดขึ้นรูป พร้อมชิ้นส่วนประกอบ ลักษณะตามรูปที่ 6.2 และ 6.3

4. มวลมาตรฐานขนาด 0.5 ปอนด์ (2.23 นิวตัน) และขนาด 1 ปอนด์ (4.46 นิวตัน)

6. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24 โวลท์พร้อมเกียร์ทดขนาด 60.5:1 รุ่น GM8713ES45 ของบริษัท PITTMAN สำหรับการปรับสมดุลย์ของวงจรบริดจ์ จำนวน 8 ตัว

7. ชุดลิเนียร์เพาเวอร์แอมปลิไฟเออร์ แบบโวลท์เทจฟีดแบค ขนาดความสามารถจ่ายกระแสได้ 2 แอมแปร์ ขนาดการขยายสัญญาณแรงดัน 2.1 เท่า ขนาดแรงดันเอาท์พุทสูงสุด 25 โวลท์

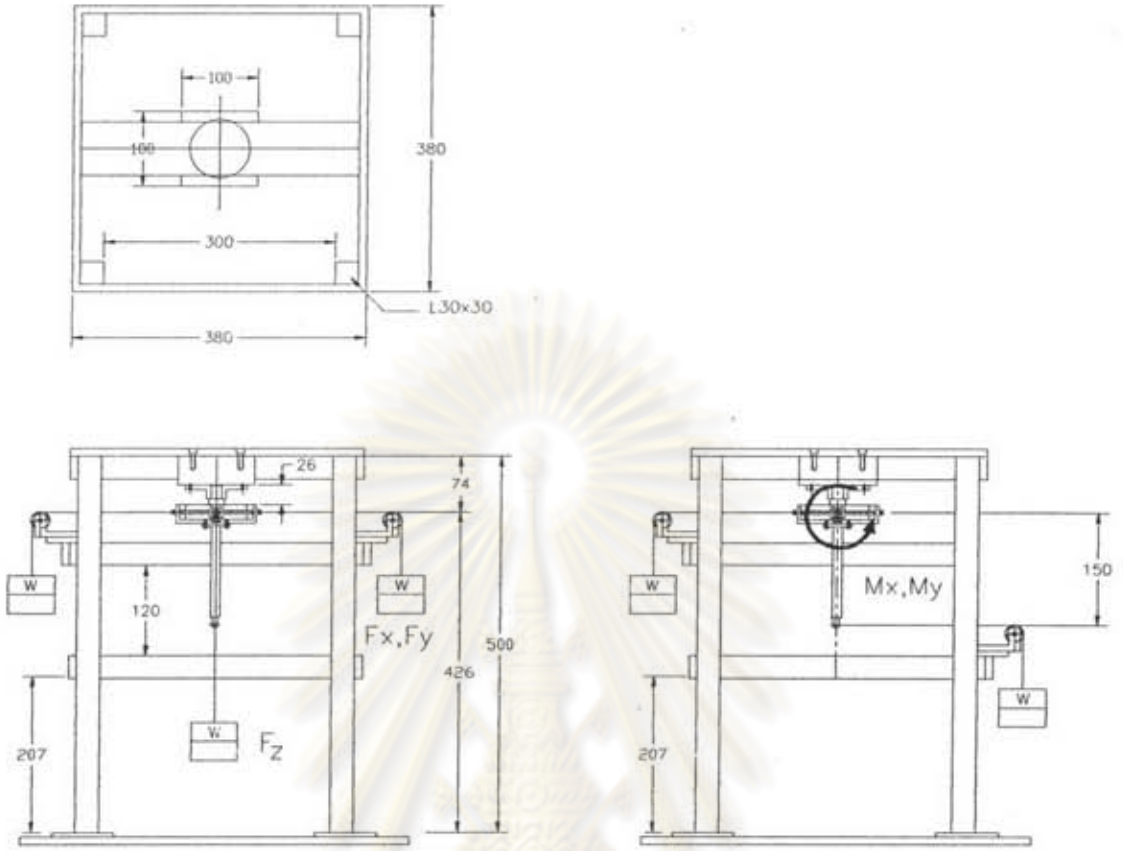
8. ชุดขยายสัญญาณ (Strain amplifer) ขนาดอัตราการขยายสัญญาณ 1732 เท่าพร้อมกับชุดวงจรบริดจ์ ชุดโปเทนชิโอมิเตอร์ปรับสมดุลย์ และชุดกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูง จำนวน 8 ชุดโดยจำกัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดในการขยายสัญญาณที่ ±12 โวลท์

9. อุปกรณ์สวิทชิ่งเลือกช่องสัญญาณสำหรับควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในข้อที่ 6 สำหรับ ปรับวงจรบริดจ์สมดุลย์ สามารถเลือกช่องทางการควบคุมเอาท์พุทได้จำนวน 8 ช่องสัญญาณ จากสัญญาณเข้า 1 ช่องสัญญาณ

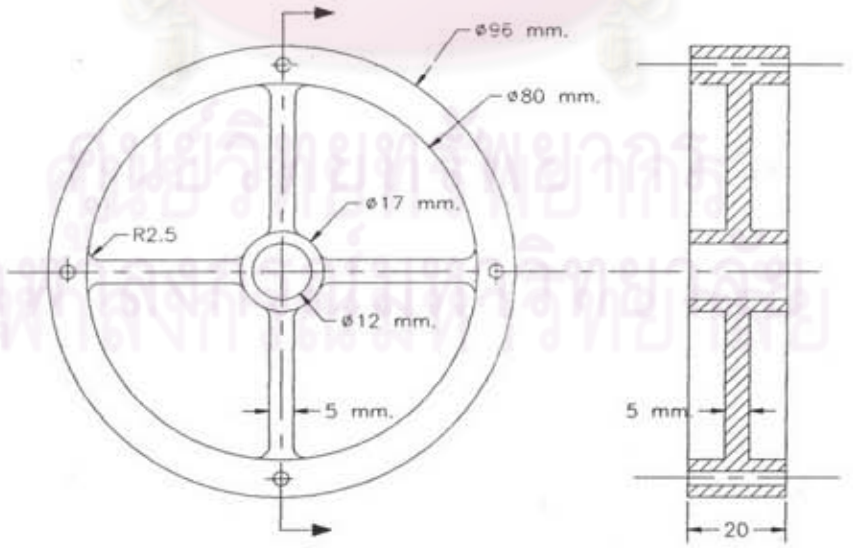
10.แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงความต่างศักย์ 6 โวลท์ และ 12 โวลท์ จ่ายกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 2 แอมป์

11. อุปกรณ์รับส่งและแปลงสัญญาณข้อมูลแบบ Analog to Digital Converter และ Digital to Analogue Cconverter ขนาดความละเอียด 12 บิต สามารถอ่านค่าสัญญานได้ 16 ช่อง และส่งสัญญาณออกได้ 2 ช่อง พร้อมกับ digital input output ขนาด 16 บิต ความเร็วสูงสุดในการอ่านข้อมูลแต่ละช่องสัญญาณ น้อยกว่า 30 ไมโครวินาที ของบริษัท Advantech Co., Ltd.รุ่น PCL-712

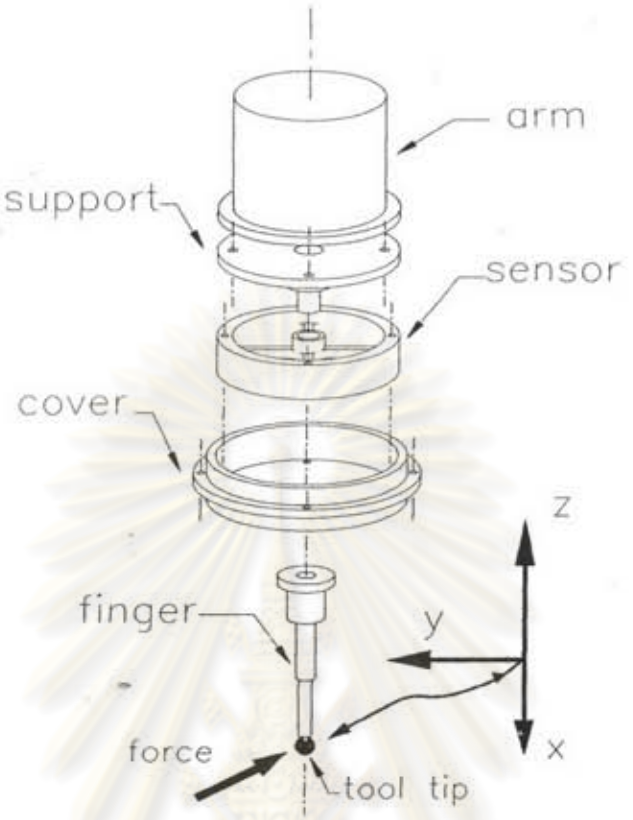
12.เครื่องคอมพิวเตอร์ขนาด 32 บิต สำหรับใช้ในการรับค่าและคำนวนพร้อมทั้งแสดงผล จำนวน 1 เครื่อง



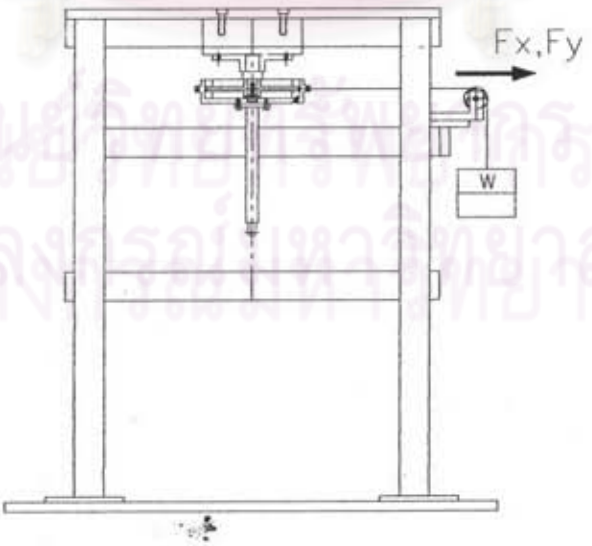
รูปที่ 6.1 ชุดโต๊ะเครื่องมือในการปรับเทียบค่า



รูปที่ 6.2 อุปกรณ์วัดแรง

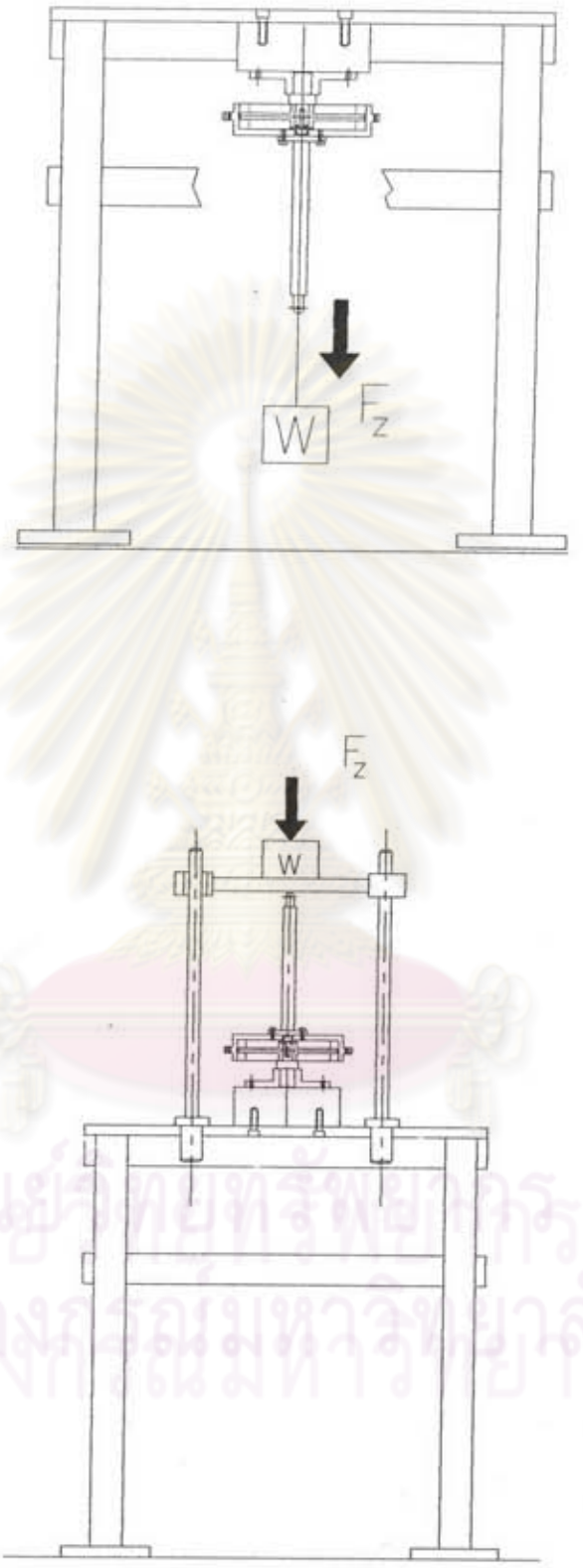


รูปที่ 6.3 ภาพประกอบอุปกรณ์วัดแรง



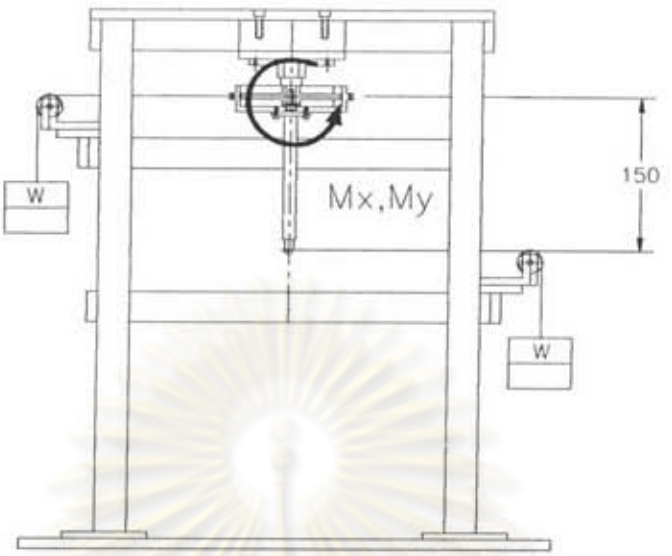
รูปที่ 6.4 แสดงการปรับเทียบค่าแรง F_x และ F_y

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

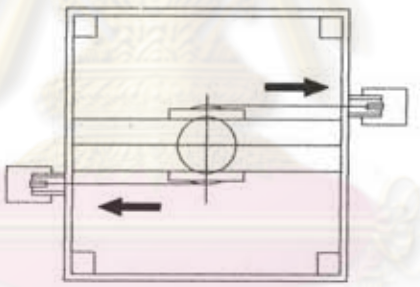


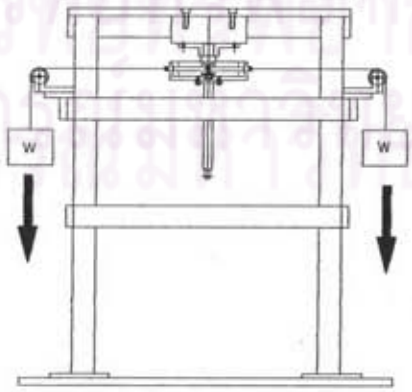
รูปที่ 6.5 แสดงการปรับเทียบค่าแรง F_z

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.6 การปรับเทียบค่าโมเมนต์ M_x และ M_y





รูปที่ 6.7 การปรับเทียบค่าโมเมนต์ M_z

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย