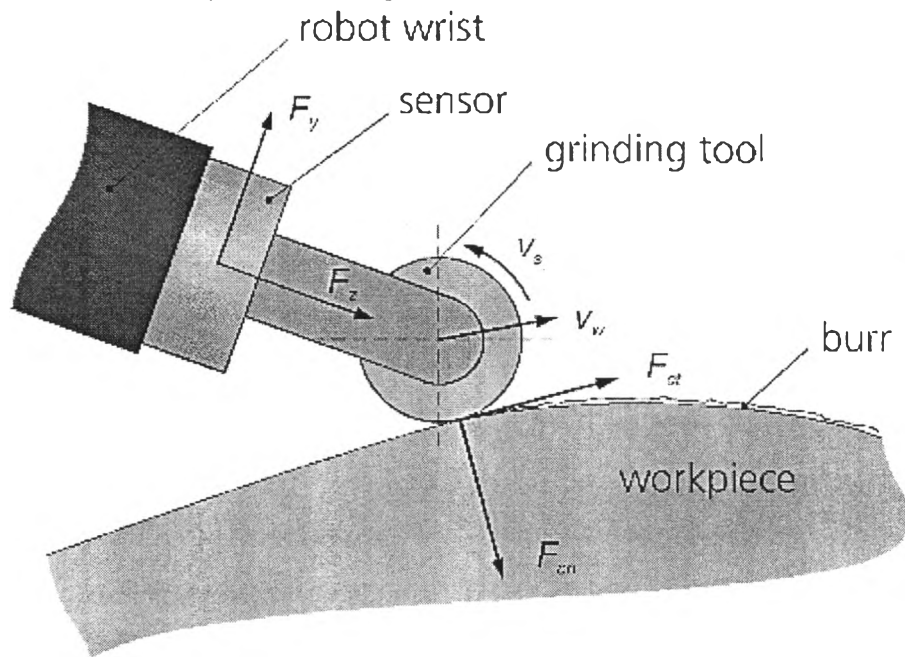


บทที่ 2

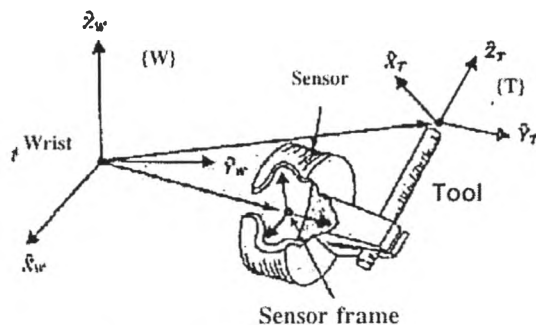
อุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและแรงบิด

อุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและแรงบิดเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เสริมการทำงานของแขนกลให้สามารถทำงานได้ในสภาพที่ต้องมีการควบคุมแรงหรือโมเมนต์ที่เกิดขึ้นระหว่างแขนกลกับสภาพแวดล้อม เช่น การขัดผิววัตถุ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการใช้งาน force-torque sensor ในงานขัดผิววัตถุ

ค่าของแรงและโมเมนต์ที่วัดได้คือแรงและโมเมนต์ที่ตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและแรงบิดบอกอยู่ในพิกัดของอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและแรงบิด แต่สิ่งที่เราต้องการรู้ก็คือแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่ปลายเครื่องมือซึ่งเป็นจุดที่หุ่นยนต์ออกแรงกระทำต่อวัตถุหรือสิ่งแวดล้อมต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนั้นเราจำเป็นต้องแปลงค่าต่างๆที่วัดได้ ณ ตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและแรงบิดซึ่งบอกอยู่ในพิกัดของอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและแรงบิด (พิกัดของข้อมือแขนกล) ไปเป็นค่า ณ ตำแหน่งที่ปลายเครื่องมือและบอกอยู่ในพิกัดของเครื่องมือ ดังรูปที่ 2.2 การแปลงดังกล่าวมาสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



รูปที่ 2.2 แสดงพิกัดของเครื่องมือและพิกัดที่ข้อมือของแขนกล

$${}^tF_t = {}^tJ^T {}^sF_s$$

$${}^tJ^T = \begin{bmatrix} {}^tR_s & 0 \\ {}^tP_{sorg} \times {}^tR_s & {}^tR_s \end{bmatrix}$$

$$P \times = \begin{bmatrix} 0 & -p_z & p_y \\ p_z & 0 & -p_x \\ -p_y & p_x & 0 \end{bmatrix}$$

โดยที่ tF_t คือแรงและโมเมนต์ ณ ตำแหน่งปลายเครื่องมือและบอกลอยู่ในพิกัดของเครื่องมือ

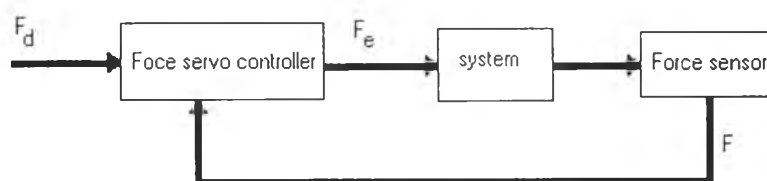
sF_s คือแรงและโมเมนต์ ณ ตำแหน่งของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดและบอกลอยู่ในพิกัดของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด

${}^tJ^T$ คือ Jacobian matrix ที่ใช้ในการแปลง

tR_s คือ rotation matrix

${}^tP_{sorg}$ คือระยะทางระหว่างจุดกำเนิดของพิกัดอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดกับพิกัดของเครื่องมือโดยบอกลอยู่ในพิกัดของเครื่องมือ

การจะควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ให้สามารถออกแรงกระทำต่อวัตถุอื่นได้ตามอย่างที่ต้องการนั้น นอกจากจะต้องมีอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและโมเมนต์แล้ว ยังจะต้องมีวิธีการที่ดีเข้ามาควบคุมอีกด้วย ซึ่งแสดงวิธีการอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงระบบการควบคุมแรงอย่างง่าย

โดยที่ F_d คือ ขนาดของแรงและโมเมนต์ในทิศทางต่างๆที่เราต้องการให้เป็นไป

F_c คือ คำสั่งที่ส่งไปยังระบบ

F คือ แรงและโมเมนต์ในทิศทางต่างๆที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด

การวัดแรงและโมเมนต์ของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด

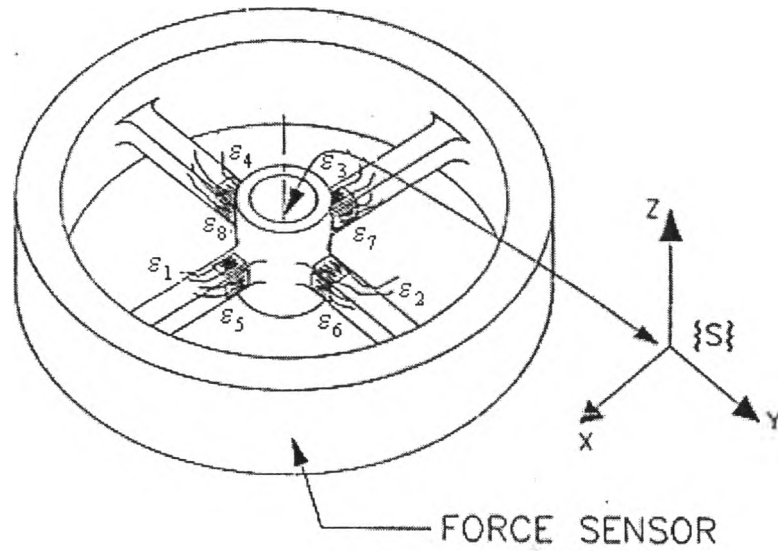
อุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดของห้องปฏิบัติการหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมีลักษณะเป็นโครงสร้างรูปไม้กางเขนทำขึ้นจากอลูมิเนียมขึ้นเดียวกัดขึ้นรูป มีการติดตั้งสเตรนเกจทั้งหมด 8 ชุดอยู่ที่แกนของไม้กางเขน สเตรนเกจแต่ละชุดมีอยู่ 2 ตัว ทั้งสองตัวนี้จะต่ออยู่ในวงจรฮาล์ฟบริดจ์ (half bridge) โดยที่สเตรนเกจแต่ละตัวจะอยู่ด้านตรงข้ามกัน สาเหตุที่ต้องมีสเตรนเกจชุดละ 2 ตัวก็เพราะว่า

1. เพื่อชดเชยความผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
2. เพื่อเพิ่มอัตราขยายของวงจรบริดจ์
3. เมื่อพิจารณาไปที่แกนแต่ละแกน จะพบว่าเป็นลักษณะของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดแบบนี้ที่ในทางอุดมคติแล้ว ต้องการให้สามารถวัดความเครียดได้จากผลของโมเมนต์ดัดเท่านั้น เนื่องจากค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับสเตรนเกจทั้งสองตัวเนื่องจากโมเมนต์ดัดนั้นมีค่าเท่ากันแต่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกัน เมื่อสัญญาณผ่านเข้าไปในวงจร wheatstone แบบ half bridge ก็จะได้ขนาดของความต่างศักย์ไฟฟ้าออกมาเป็น 2 เท่าของการวัดโดยใช้สเตรนเกจเพียงตัวเดียวต่อเป็นวงจรแบบ quarter bridge ส่วนค่าความเครียดที่เกิดจากแรงดึงตามแนวแกน แรงกดตามแนวแกน หรือ แรงบิดตามแนวแกน ซึ่งจะทำให้เกิดความเครียดขึ้นที่ สเตรนเกจทั้ง 2 ตัวเท่ากัน เมื่อผ่านวงจรบริดจ์ก็จะได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าออกมาเป็น 0 โวลต์

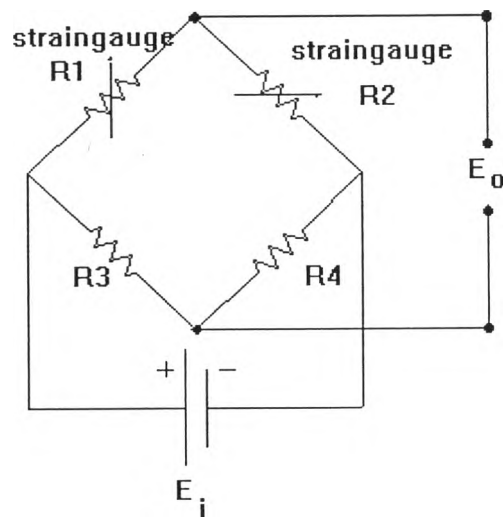
การวัดแรง F_x, F_y, F_z และโมเมนต์ M_x, M_y, M_z แต่ละอย่างนั้นจะมีชุดของสเตรนเกจที่เป็นตัวหลักในการวัดแรงหรือโมเมนต์นั้นๆอยู่ โดยมีหลักก็คือ สเตรนเกจชุดที่เป็นหลักในการวัดจะเป็นชุดสเตรนเกจที่รับโมเมนต์ดัด ชุดสเตรนเกจดังกล่าวจะมีความเครียดเกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์ดัดซึ่งเป็นผลเนื่องจากแรงหรือโมเมนต์ภายนอกที่มากระทำ ดังนั้นคู่สเตรนเกจดังกล่าวจึงจะมีตัวหนึ่งที่เกิด compression strain อีกตัวหนึ่งเกิด tension strain ในรูปที่ 2.4 เราจะเห็นได้ว่า ชุดสเตรนเกจ $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ และ ϵ_4 จะติดอยู่ทางด้านบนและด้านล่างของแกน ส่วนชุดสเตรนเกจ $\epsilon_5, \epsilon_6, \epsilon_7$ และ ϵ_8 จะติดอยู่ทางด้านข้างของแกน

- แรงในแนวแกน x จะถูกตรวจวัดโดยชุดของสเตรนเกจ ϵ_5 และ ϵ_8
- แรงในแนวแกน y จะถูกตรวจวัดโดยชุดของสเตรนเกจ ϵ_5 และ ϵ_7
- แรงในแนวแกน z จะถูกตรวจวัดโดยชุดของสเตรนเกจ $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ และ ϵ_4

- โมเมนต์ในแนวแกน x จะถูกตรวจวัดโดยชุดของสเตรนเกจ ϵ_2 และ ϵ_4
- โมเมนต์ในแนวแกน y จะถูกตรวจวัดโดยชุดของสเตรนเกจ ϵ_1 และ ϵ_3
- โมเมนต์ในแนวแกน z จะถูกตรวจวัดโดยชุดของสเตรนเกจ ϵ_5 , ϵ_6 , ϵ_7 และ ϵ_8



รูปที่ 2.4 แสดงภาพลักษณะการติดตั้งสเตรนเกจ



รูปที่ 2.5 วงจร wheat stone แบบ half bridge ที่ใช้ในการวัดความเครียด

การทดสอบอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดเพื่อหา strain compliance matrix

การทำ strain compliance matrix ทำได้โดยการใส่ค่าของแรงหรือโมเมนต์ที่รู้ค่ากระทำต่ออุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด แล้วทำการบันทึกค่าความเครียดที่เกิดขึ้น การทดลองจะทำได้โดยใส่แรง F_x ที่มีค่าๆหนึ่งเข้าไป แล้ววัดค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับสเตรนเกจทั้ง 8 ชุด จากนั้นก็เปลี่ยนค่าแรง F_x แล้ววัดอีก หลังจากทดลองกับแรง F_x เสร็จแล้ว ก็เปลี่ยนเป็น F_y , F_z , M_x , M_y และ M_z เมื่อทำเสร็จทั้งหมดแล้วก็นำค่าที่ได้ในแต่ละชุดของสเตรนเกจไปหาค่าความสัมพันธ์ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่ชุดสเตรนเกจนั้นๆกับแรงหรือโมเมนต์ที่มากระทำ สุดท้ายเราก็จะได้ matrix ที่เรียกว่า strain compliance matrix ซึ่งสมาชิกแต่ละตัวของ matrix นี้จะแทนค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่ชุดสเตรนเกจนั้นๆกับแรงหรือโมเมนต์ที่มากระทำ

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \\ \varepsilon_7 \\ \varepsilon_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \\ C_{71} & C_{72} & C_{73} & C_{74} & C_{75} & C_{76} \\ C_{81} & C_{82} & C_{83} & C_{84} & C_{85} & C_{86} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon_s = C f_s \quad 2.1$$

$$\varepsilon_s = [\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3 \quad \varepsilon_4 \quad \varepsilon_5 \quad \varepsilon_6 \quad \varepsilon_7 \quad \varepsilon_8]^T \quad 2.2$$

$$f_s = [F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_x \quad M_y \quad M_z]^T \quad 2.3$$

โดยที่ C คือ strain compliance matrix

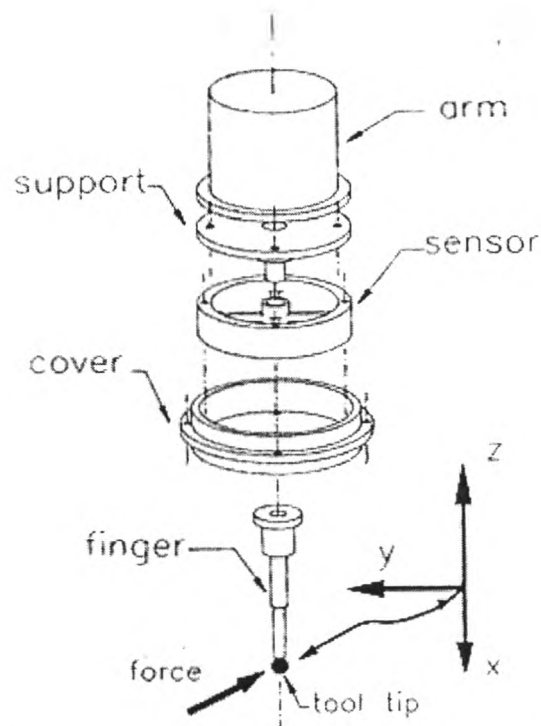
หลังจากที่เราได้ strain compliance matrix แล้ว เราก็จะสามารถที่จะหา sensor calibration matrix ออกมาได้ โดยที่

$$f_s = C^+ \varepsilon_s \quad 2.4$$

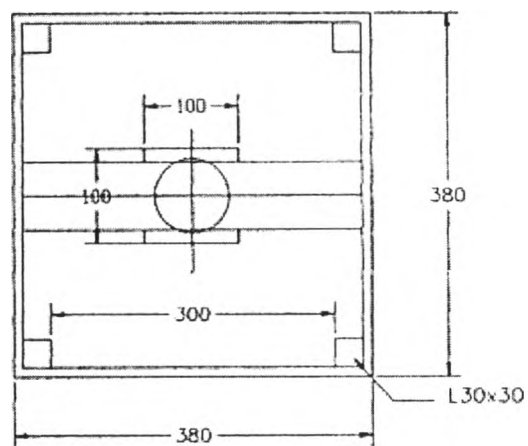
$$C^+ = (C^T C)^{-1} C^T \quad 2.5$$

C^+ คือ sensor calibration matrix

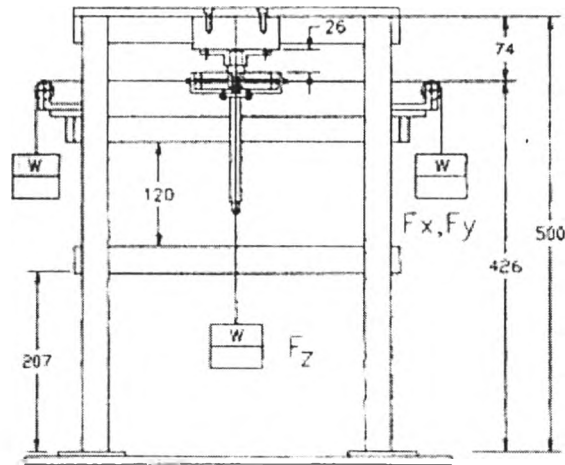
รูปแบบต่างๆในการทดสอบอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดมีดังต่อไปนี้



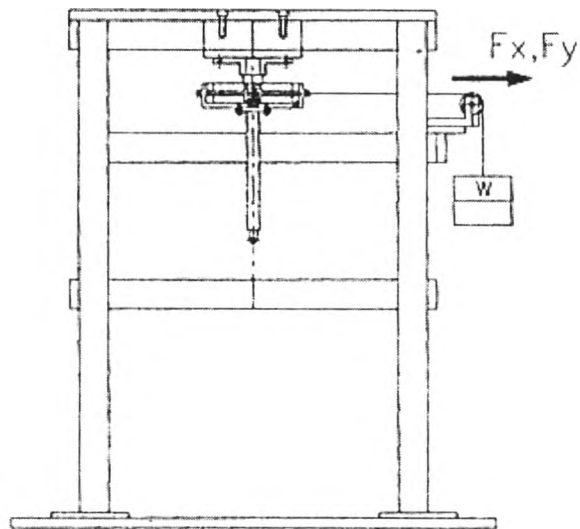
รูปที่ 2.6 แสดงส่วนประกอบของชุดประกอบอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด



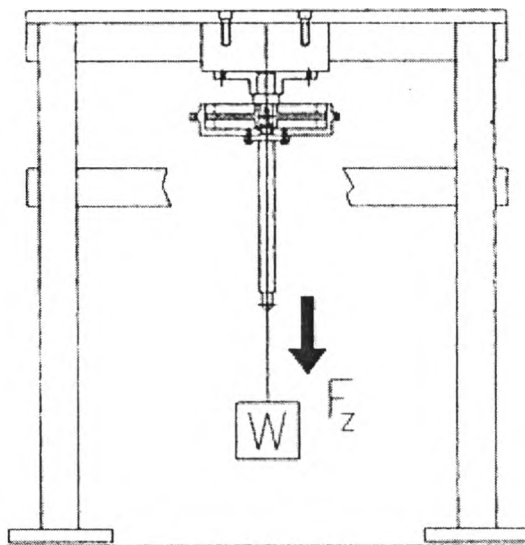
รูปที่ 2.7 แสดงภาพมุมมองด้านบนของโต๊ะทดสอบอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิด



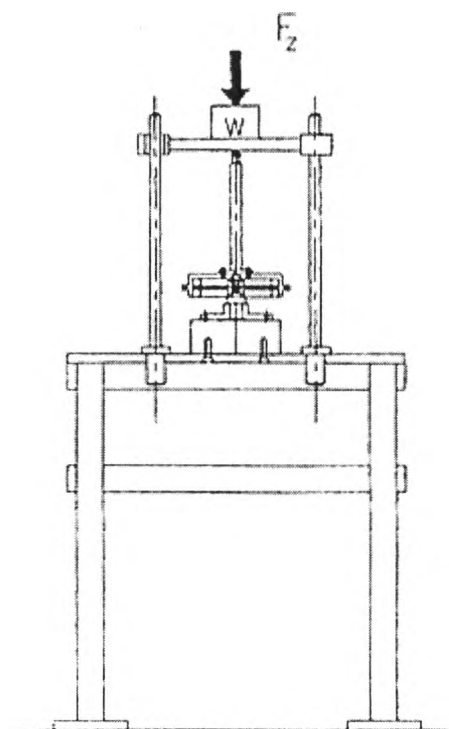
รูปที่ 2.8 ภาพด้านข้างของโต๊ะทดสอบแสดงวิธีการออกแรงกระทำในทิศทางต่างๆ



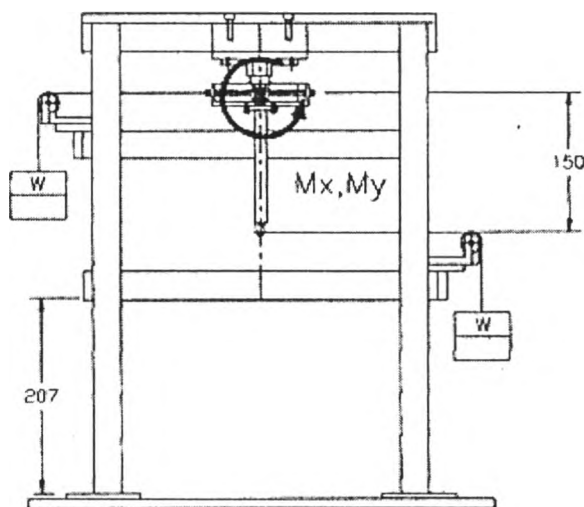
รูปที่ 2.9 แสดงวิธีการออกแรงกระทำในแนวแกน x, y



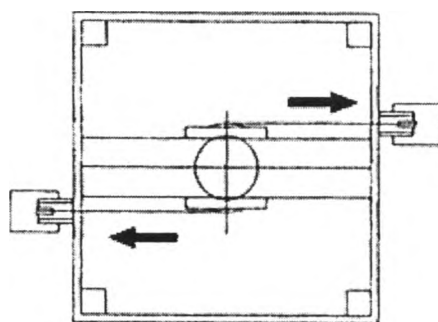
รูปที่ 2.10 แสดงวิธีการออกแรงกระทำในแนวแกน $-z$



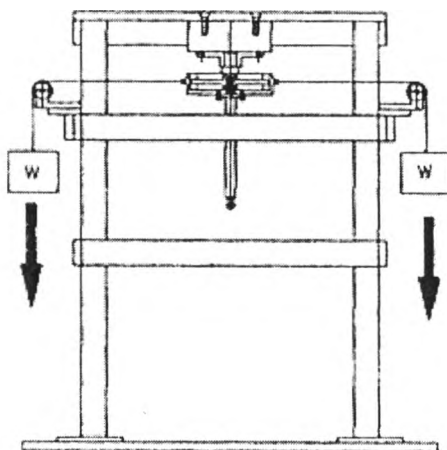
รูปที่ 2.11 แสดงการออกแรงกระทำในแนวแกน $+z$



รูปที่ 2.12 แสดงการสร้างโมเมนต์ในแนวแกน x, y



(a)



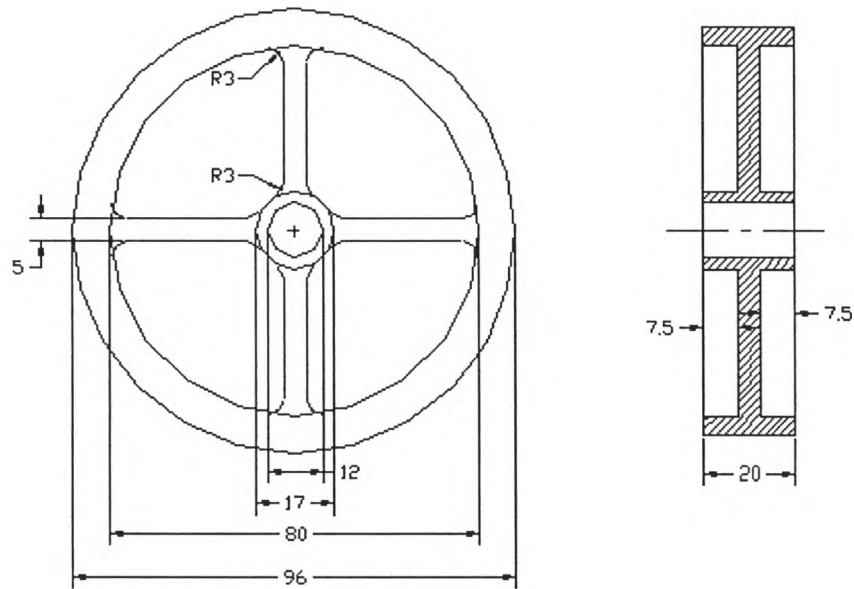
(b)

รูปที่ 2.13 แสดงการสร้างโมเมนต์ในแนวแกน z

(a) มุมมองด้านบน

(b) มุมมองด้านข้าง

อุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่มีอยู่เดิมของห้องปฏิบัติการวิจัยหุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Sensor I) มีขนาดดังนี้



รูปที่ 2.14 แสดงขนาดของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและแรงบิดที่มีอยู่เดิมของห้องปฏิบัติการวิจัยหุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Sensor I)

ตำแหน่งที่ติดสเตรนเกจ คือที่ระยะ 13.5 mm. จากจุดศูนย์กลางไปตามแนวแกนทั้ง 4