

**FIBO**

*A Cradle of Future Leaders  
in Robotics*

# การวิเคราะห์และออกแบบ อุปกรณ์วัดแรงปฏิกิริยาของหุ่นยนต์ชีวแมนนอยด์

โดย

นายจิตติศักดิ์ จันทร์พรหม

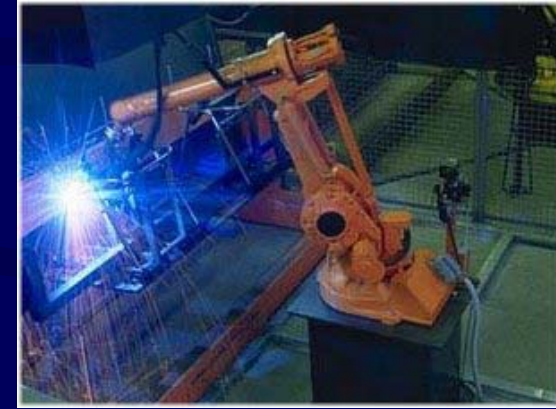
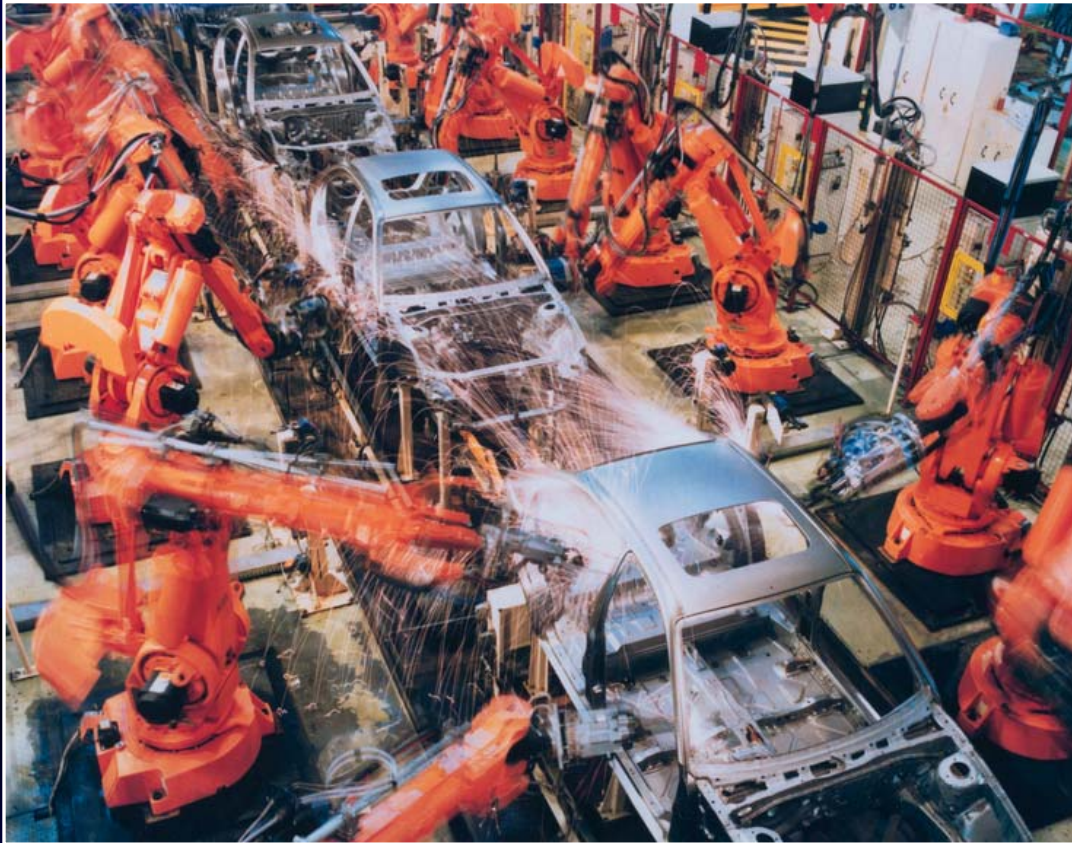
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม (FIBO)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

# หัวข้อที่น่าสนใจ

1. ที่มาของงานวิจัย
2. ทฤษฎีเสถียรภาพของหุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์
3. การวิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์วัดแรง
4. การทดลองอุปกรณ์วัดแรงที่สร้างขึ้นมา
5. ปัญหาและข้อเสนอแนะ

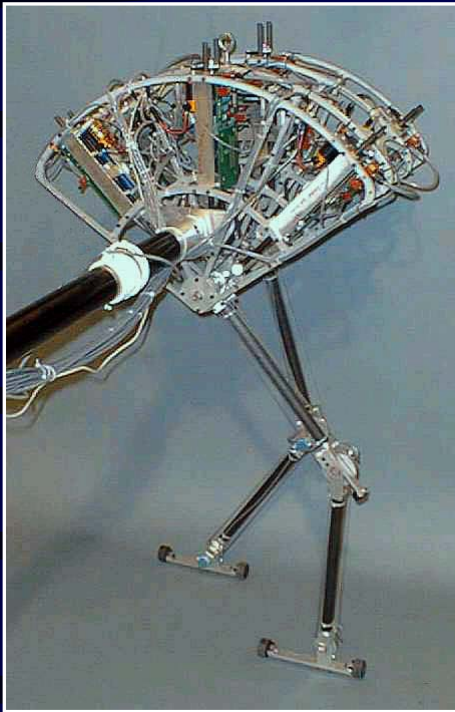
# 1. ที่มาของงานวิจัย



หุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ใช้ในสายการผลิตโดยพื้นฐานถูกยึดอยู่กับที่



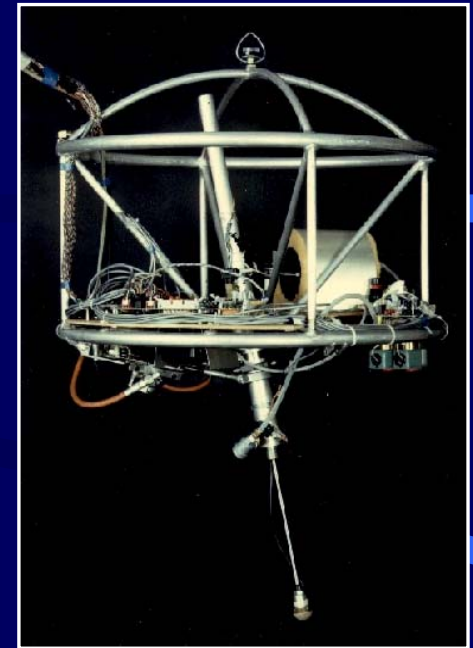
ลักษณะของหุ่นยนต์ที่ใช้ล้อในการเคลื่อนที่



Biped walking  
robot

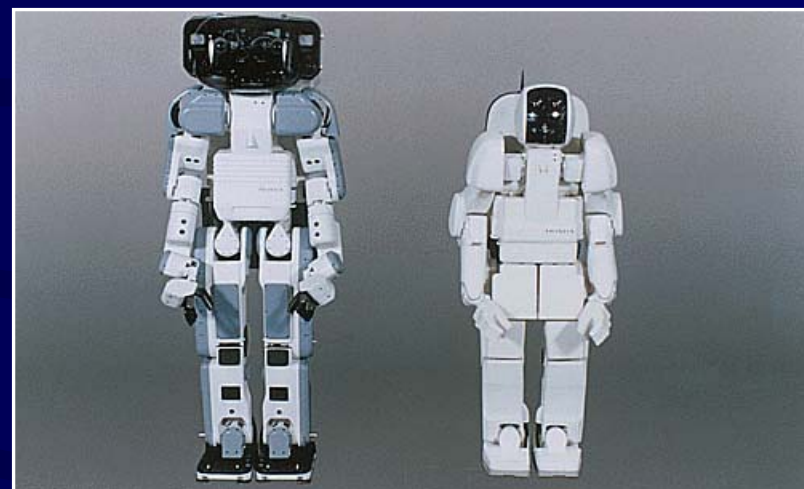
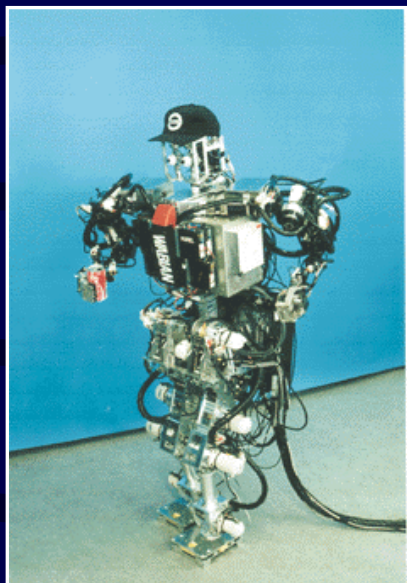
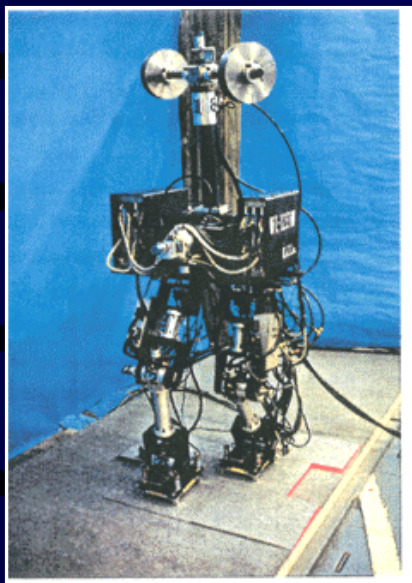


Quadruped  
running robot



One-legged  
hopping robot

ลักษณะของหุ่นยนต์ที่ใช้ขาในการเคลื่อนที่  
ของ Leg Lab แห่ง MIT ประเทศอเมริกา



หุ่นยนต์ WABIAN แห่งมหาวิทยาลัยวาเซดะ

หุ่นยนต์ P2 และ P3 ของบริษัทฮอนด้า

หุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์ที่สร้างในประเทศญี่ปุ่น



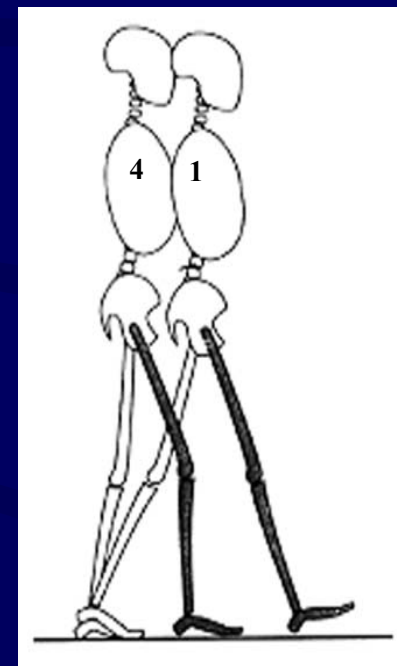
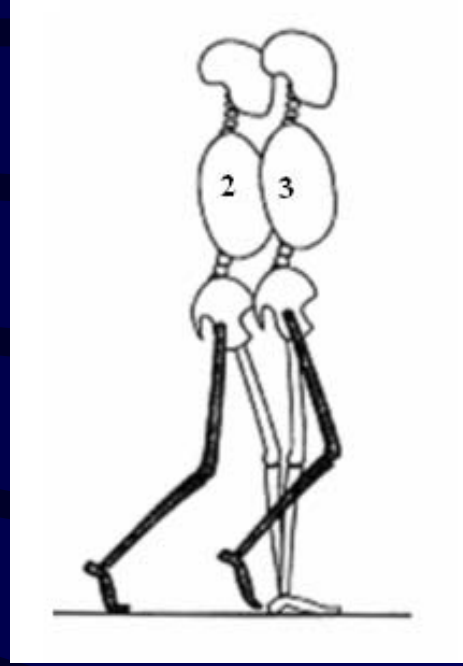
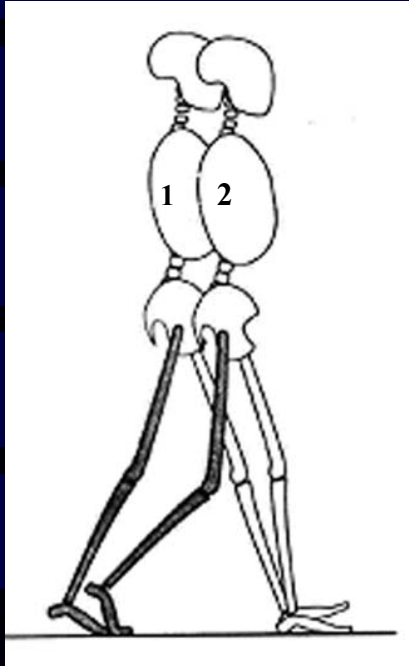
หุ่นยนต์ ASIMO ของบริษัทฮอนด้า เป็นหุ่นยนต์  
ชีวแมนนอยด์ที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ใกล้เคียง  
เคียงมนุษย์มากที่สุดในปัจจุบัน



# ประเด็นเริ่มต้นในการทำวิจัยของหุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์

1. พื้นที่อยู่ราบมีเพียงขนาดของฝ่าเท้าซึ่งไม่ถูกยึดอยู่กับพื้น ส่งผลให้มีโอกาสล้มลงได้ตลอดเวลาเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่
2. เพื่อให้หุ่นยนต์มีความสามารถในการเดินเคลื่อนที่แบบปกติ (Normal gaits) ได้เหมือนมนุษย์ จำนวนองศาอิสระของขาหนึ่งข้างต้องมีอย่างน้อย 6 องศาอิสระ อีกทั้งในขณะที่หุ่นยนต์เดินเคลื่อนที่ ขาแต่ละข้างจะมีทั้งช่วงลอยอยู่ในอากาศและสัมผัสพื้นสลับไปมา ส่งผลให้การออกแบบระบบกลไกการเดินและระบบควบคุมมีความสลับซับซ้อนมากกว่าหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั่วไป

## 2. ทฤษฎีเสถียรภาพของหุ่นยนต์ชีวแมนนอยด์

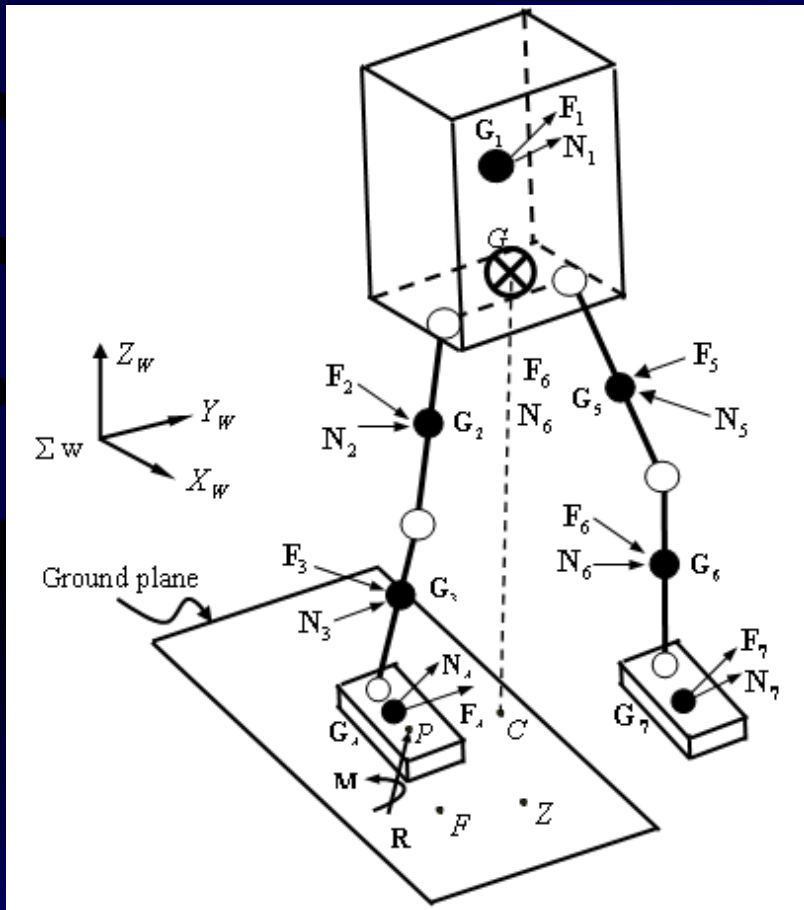


วัฏจักรการก้าวเดินไปข้างหน้าของมนุษย์ ( Human walking gait)

# ระบบพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ชีวแมนนอยด์

$$\mathbf{R} + \sum_{i=1}^7 m_i \mathbf{g} = \sum_{i=1}^7 \mathbf{F}_i$$

$$\mathbf{M} + \overline{\mathbf{WP}} \otimes \mathbf{R} + \sum_{i=1}^7 \overline{\mathbf{WG}}_i \otimes m_i \mathbf{g} = \sum_{i=1}^7 \mathbf{N}_i + \sum_{i=1}^7 \overline{\mathbf{WG}}_i \otimes \mathbf{F}_i$$



⊗ แทน การคูณของเวกเตอร์ (Cross product)  $\sum w$  คือ พิกัดอ้างอิงหลัก  $\mathbf{g}$  คือ เวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำที่

จุดศูนย์กลางมวล  $G_i$  ของข้อขา (Link) ที่  $i$  ( $i=1, \dots, 7$ )

$\mathbf{R}$  และ  $\mathbf{M}$  คือเวกเตอร์ของแรงปฏิกิริยาและ โมเมนต์ปฏิกิริยาซึ่งเกิดจาก แรงเสียดทานกระทำกับเท้าที่จุด  $P$  ตามลำดับ

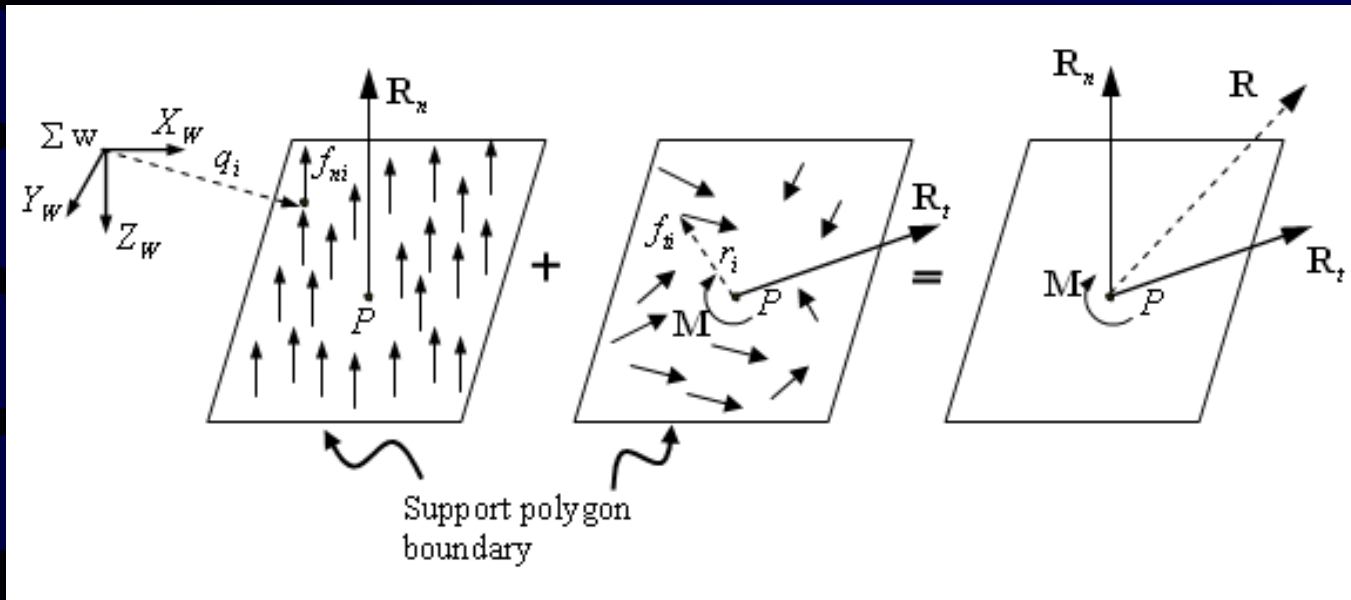
$\overline{\mathbf{WP}}$  และ  $\overline{\mathbf{WG}}_i$  คือเวกเตอร์ตำแหน่งจากพิกัดอ้างอิงมายังจุด  $P$

และจุดศูนย์กลางมวล  $G_i$  ตามลำดับ

$\sum_{i=1}^7 \mathbf{F}_i$  และ  $\sum_{i=1}^7 \mathbf{N}_i$  คือผลรวมของแรงเฉื่อยและผลรวมของ โมเมนต์เฉื่อย

ที่กระทำที่จุดศูนย์กลางมวลของแต่ละข้อขาของหุ่นยนต์

# จุดผลรวมของแรงปฏิกิริยา (Center of Pressure: CoP)



$$\mathbf{R}_n = \sum \mathbf{f}_{ni}$$

$$\mathbf{R}_t = \sum \mathbf{f}_{ti}$$

$$\overline{\mathbf{WP}} = \frac{\sum \mathbf{q}_i \mathbf{f}_{ni}}{\sum \mathbf{f}_{ni}}$$

$$\mathbf{M} = \sum \mathbf{r}_i \otimes \mathbf{f}_{ti}$$

$\mathbf{R}_n$  คือ ผลรวมเวกเตอร์แรงปฏิกิริยา  $\mathbf{f}_{ni}$  ของพื้นที่ที่กระทำกับเท้าในแนวตั้ง

$\mathbf{R}_t$  คือ ผลรวมเวกเตอร์แรงปฏิกิริยา  $\mathbf{f}_{ti}$  ที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างเท้ากับพื้นในแนวราบ

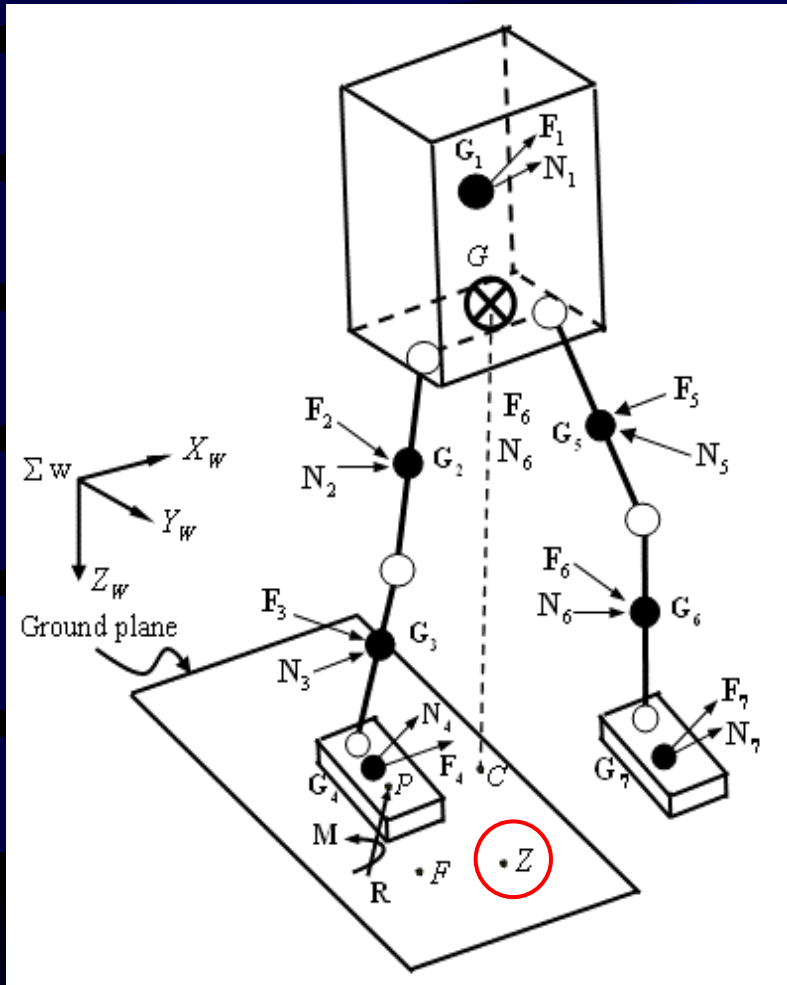
$\mathbf{M}$  คือ โมเมนต์ปฏิกิริยาที่เกิดจากแรงเสียดทานกระทำระหว่างพื้นกับฝ่าเท้า



# การวิเคราะห์เสถียรภาพ โดยใช้ทฤษฎีจุดผลรวม โมเมนต์ เป็นศูนย์ (Zero moment point: ZMP) → นำเสนอโดย M. Vukobratovic

ZMP เป็นจุดที่อยู่บนพื้นที่รองรับการเดินของหุ่นยนต์ โดยผลรวมของ โมเมนต์ที่เกิดจากแรงเฉื่อย (Inertia force) รวมถึง โมเมนต์ที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity force) ที่จุดดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์

สมดุลต่อการหมุนแบบ  
พลศาสตร์ (Rotational  
dynamic equilibrium)



## Rotational dynamic equation( Newton-Euler )

$$\mathbf{M} + \overline{\mathbf{W}\mathbf{P}} \otimes \mathbf{R} + \sum_{i=1}^7 \overline{\mathbf{W}\mathbf{G}_i} \otimes m_i \mathbf{g} = \sum_{i=1}^7 \mathbf{N}_i + \sum_{i=1}^7 \overline{\mathbf{W}\mathbf{G}_i} \otimes \mathbf{F}_i$$

## Rotational dynamic equilibrium equation

### (D'Alembert )

$$\mathbf{M} + \overline{\mathbf{W}\mathbf{P}} \otimes \mathbf{R} + \sum_{i=1}^7 \overline{\mathbf{W}\mathbf{G}_i} \otimes (m_i \mathbf{g} - \mathbf{F}_i) - \sum_{i=1}^7 \mathbf{N}_i = \mathbf{0}$$

กำหนดจุด Z คือ จุด ZMP

$$\mathbf{M} + \sum_{i=1}^7 \overline{\mathbf{Z}\mathbf{P}} \otimes \mathbf{R} + \sum_{i=1}^7 \overline{\mathbf{Z}\mathbf{G}_i} \otimes (m_i \mathbf{g} - \mathbf{F}_i) - \sum_{i=1}^7 \mathbf{N}_i = \mathbf{0}$$

แรงเสียดทานระหว่างเท้ากับ  
พื้นมีมากพอที่ป้องกันไม่ให้  
เท้าหุ้ยนยนต์เกิดการลื่นไถล



$$\left( \sum_{i=1}^7 \overline{ZP} \otimes R + \sum_{i=1}^7 \overline{ZG}_i \otimes (m_i \mathbf{g} - \mathbf{F}_i) - \sum_{i=1}^7 \mathbf{N}_i \right)_t = 0$$

จุดที่ทำให้เกิดการหมุนสมดุลแบบ  
พลศาสตร์คือ  $Z = P$  ( $R \neq 0$ )



$$\left( \sum_{i=1}^7 \overline{ZG}_i \otimes (m_i \mathbf{g} - \mathbf{F}_i) - \sum_{i=1}^7 \mathbf{N}_i \right)_t = 0$$

ตำแหน่ง ZMP เทียบกับพิกัดหลัก  $W$



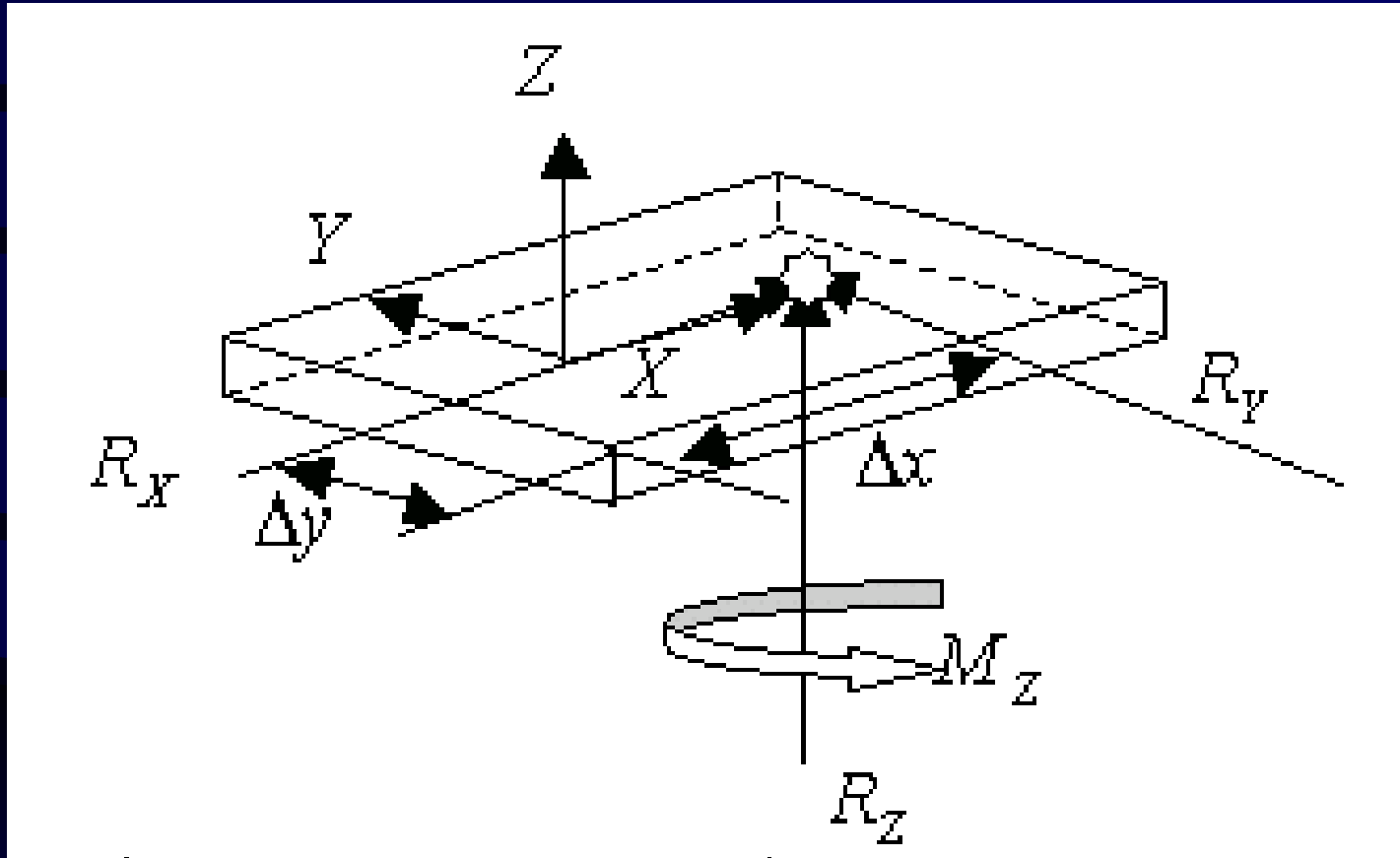
$$\left( \sum_{i=1}^7 \overline{WG}_i \otimes (m_i \mathbf{g} - \mathbf{F}_i) - \sum_{i=1}^7 \overline{WZ} \otimes (m_i \mathbf{g} - \mathbf{F}_i) - \sum_{i=1}^7 \mathbf{N}_i \right)_t = 0$$



$$X_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^7 (F_{zi} + m_i g) G_{xi} - \sum_{i=1}^7 F_{xi} G_{zi} + \sum_{i=1}^7 N_{yi}}{\sum_{i=1}^7 (F_{zi} + m_i g)}$$

$$Y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=1}^7 (F_{zi} + m_i g) G_{yi} - \sum_{i=1}^7 F_{xi} G_{zi} + \sum_{i=1}^7 N_{xi}}{\sum_{i=1}^7 (F_{zi} + m_i g)}$$

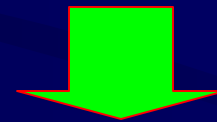
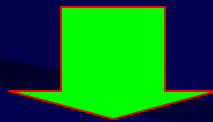
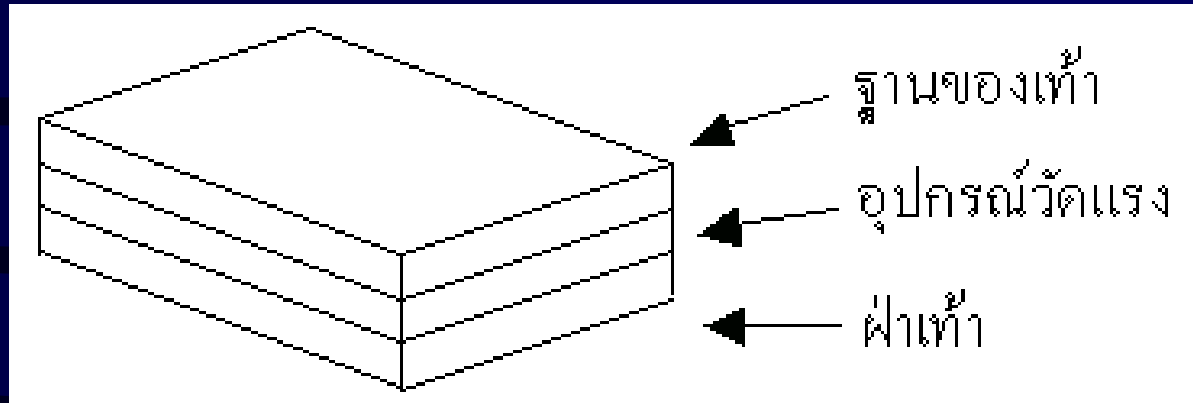
### 3. การวิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์วัดแรง



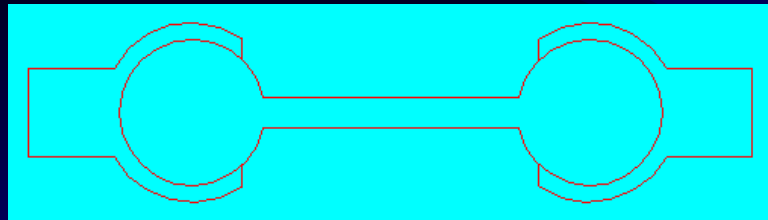
จุดผลรวมของแรงปฏิกิริยาและโมเมนต์ปฏิกิริยา (ZMP)



# หลักการออกแบบเบื้องต้น

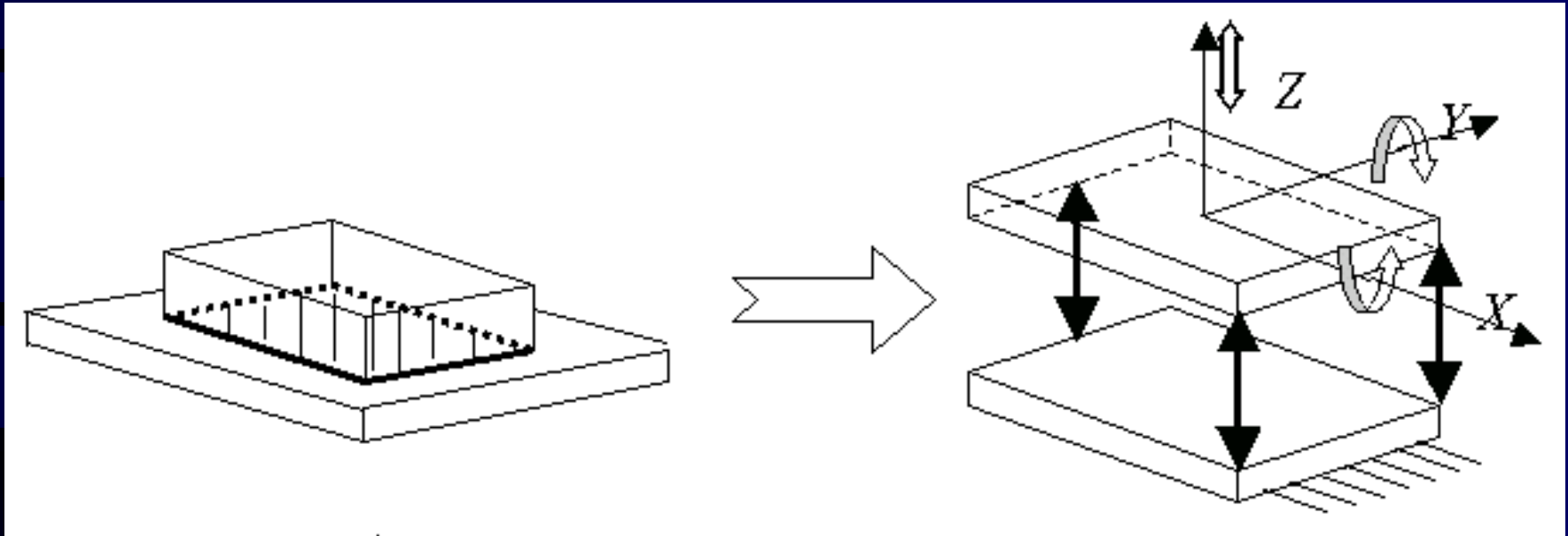


**Ball Joint**

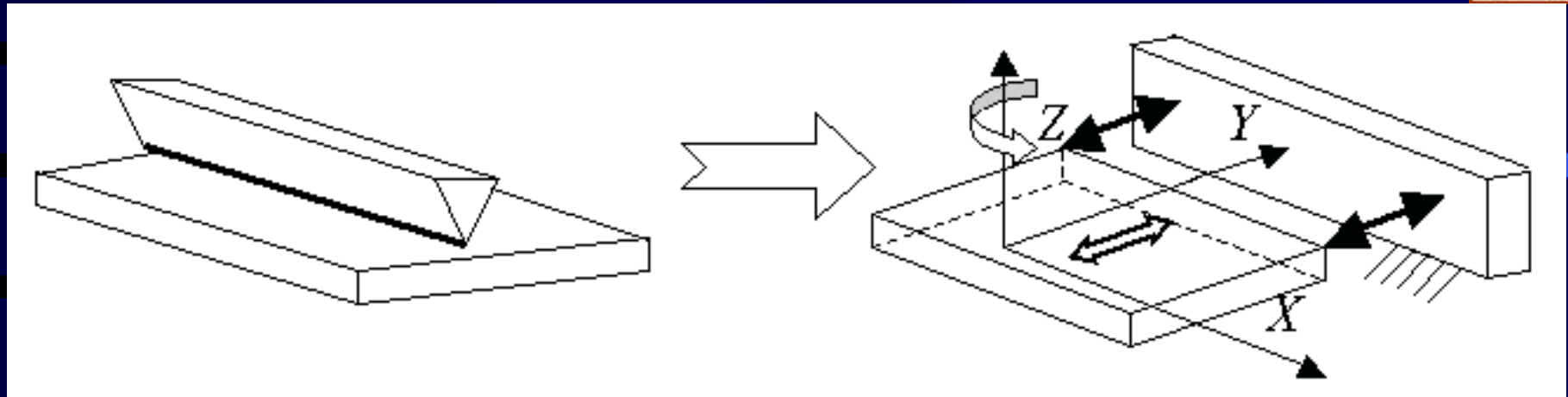


**วาง Sensor แบบตั้งฉาก**

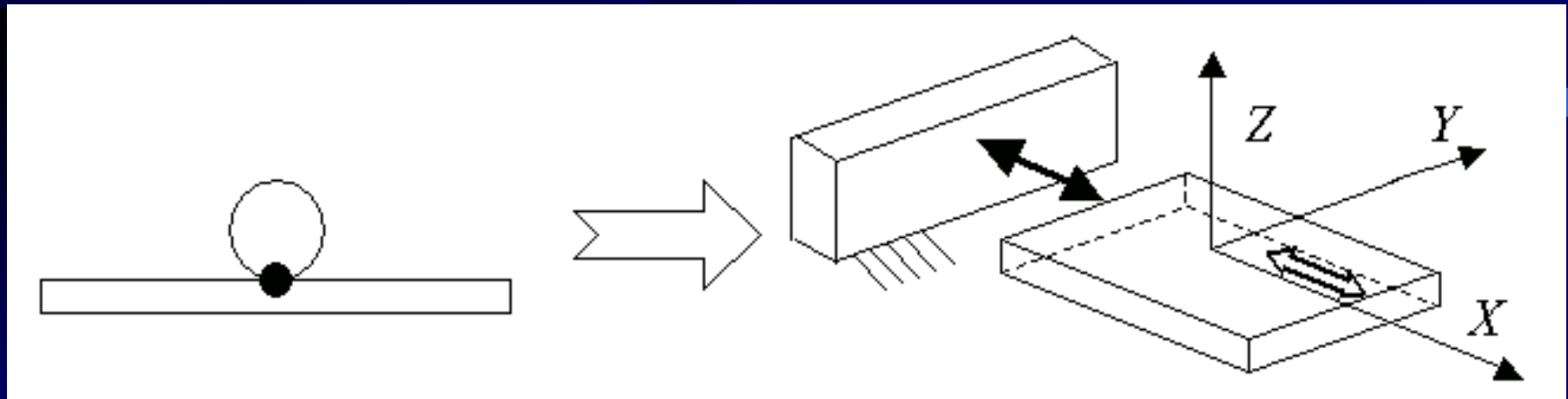
# การบังคับแรงแบบสามจุด



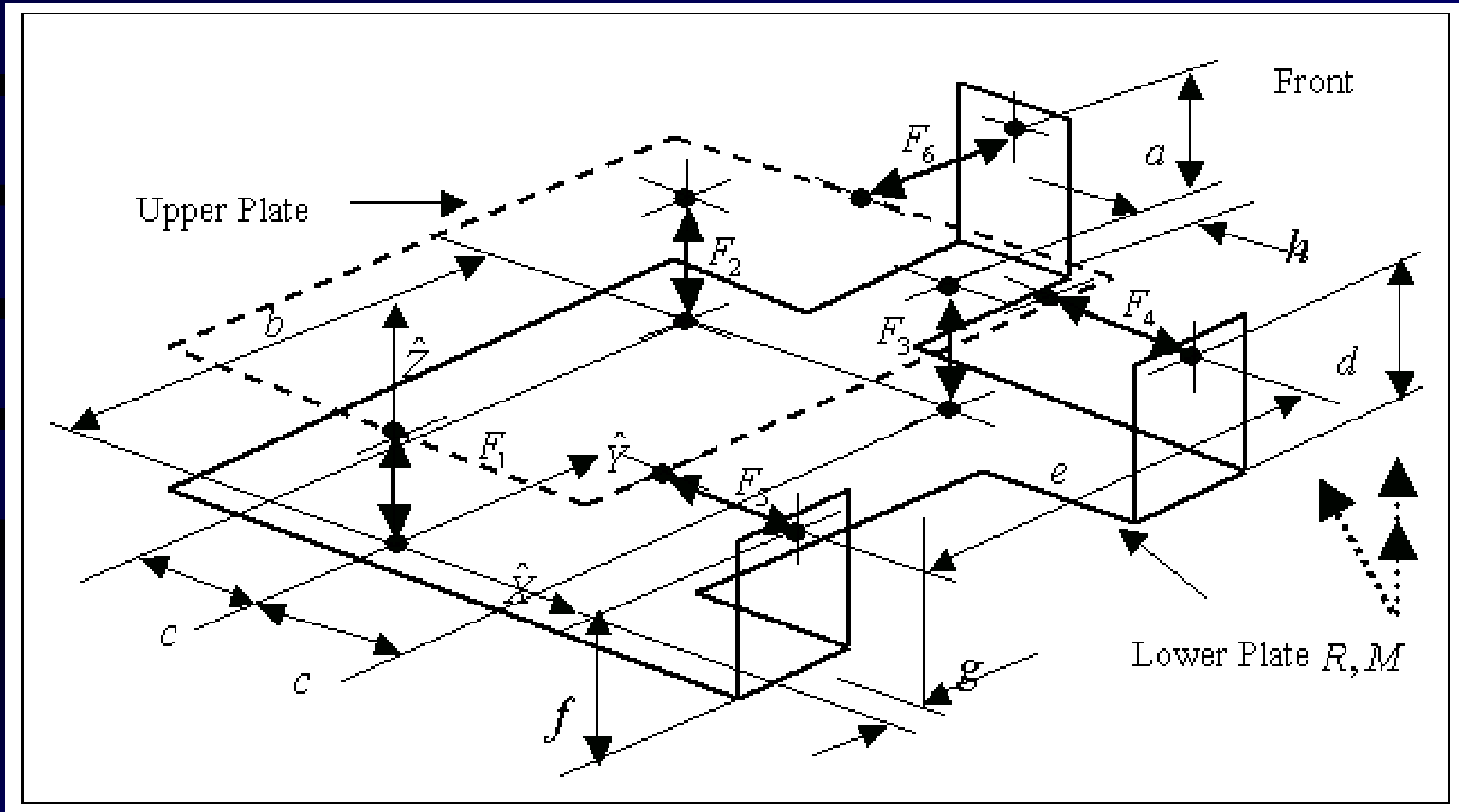
# การบังคับแรงแบบสองจุด



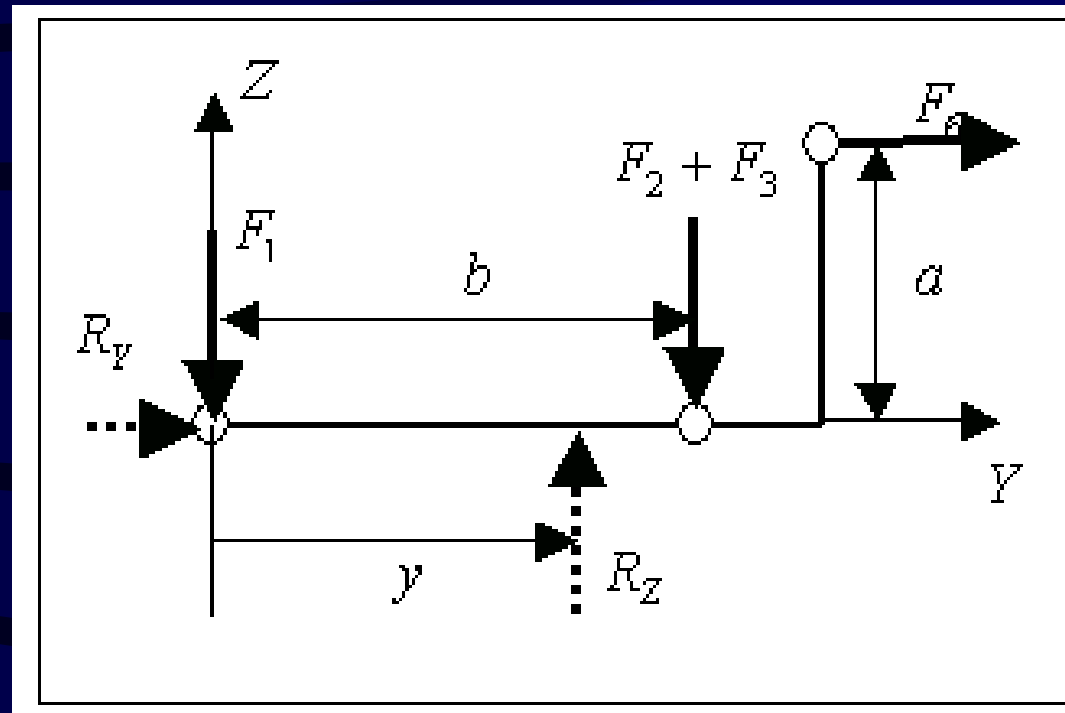
# การบังคับแรงแบบหนึ่งจุด



# แบบจำลองการออกแบบแบบ Force Sensors



# การวิเคราะห์แรงและโมเมนต์บนระนาบ ZY

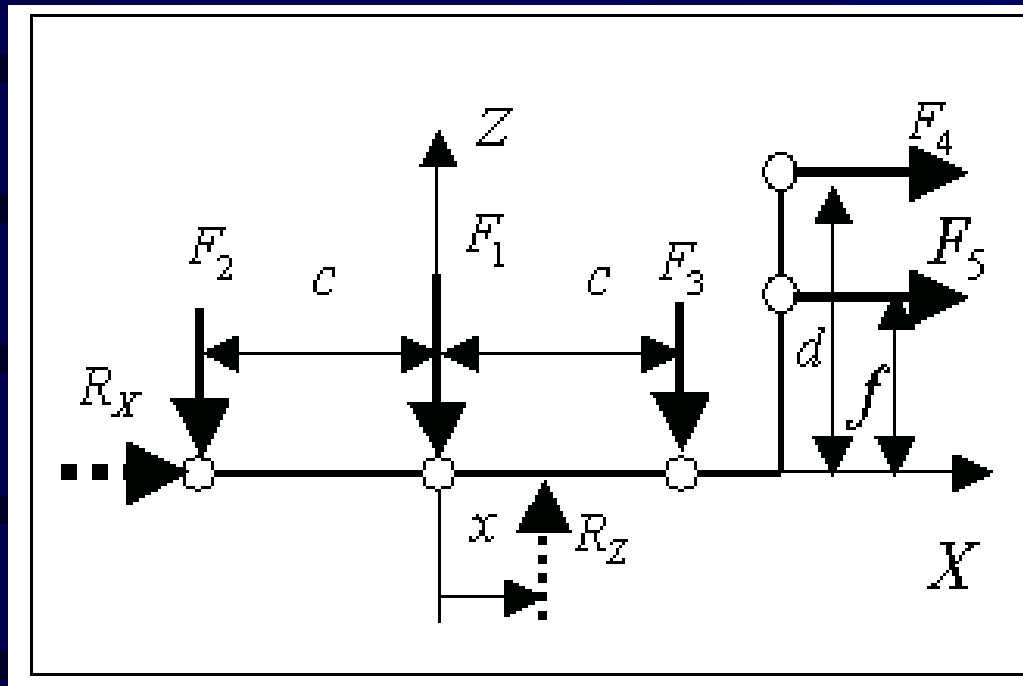


$$\sum F_Y = 0; \quad F_6 + R_Y = 0$$

$$R_Y = -F_6$$

$$\sum M_X = 0; \quad R_Z y - F_6 a - (F_2 + F_3)b = 0$$

# การวิเคราะห์แรงและโมเมนต์บนระนาบ ZX



$$\sum F_X = 0; \quad -R_X + F_4 + F_5 = 0$$

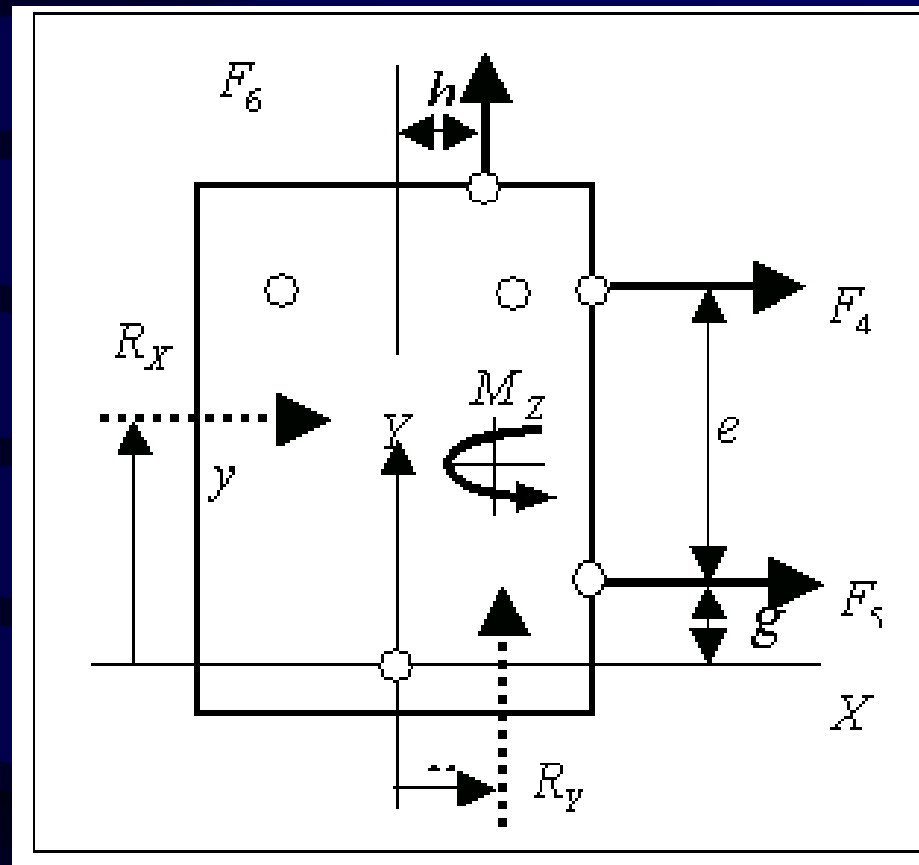
$$R_X = F_4 + F_5$$

$$\sum F_Z = 0; \quad R_Z - (F_1 + F_2 + F_3) = 0$$

$$R_Z = (F_1 + F_2 + F_3)$$

$$\sum M_Y = 0; \quad R_Z x - F_4 d - F_5 f + (F_2 - F_3)c = 0$$

# การวิเคราะห์แรงและโมเมนต์บนระนาบ XY



$$\sum M_Z = 0; \quad R_Y x - R_X y + M_Z - F_4(e + g) - F_5 g + F_6 h = 0$$

# สมการการแปลงแรงแบบตรง

$$R_x = F_4 + F_5$$

$$R_y = -F_6$$

$$R_z = (F_1 + F_2 + F_3)$$

$$X_{ZMP} = \frac{(F_4d + F_5f - (F_2 - F_3)c)}{(F_1 + F_2 + F_3)}$$

$$Y_{ZMP} = \frac{(F_6a + (F_2 + F_3)b)}{(F_1 + F_2 + F_3)}$$

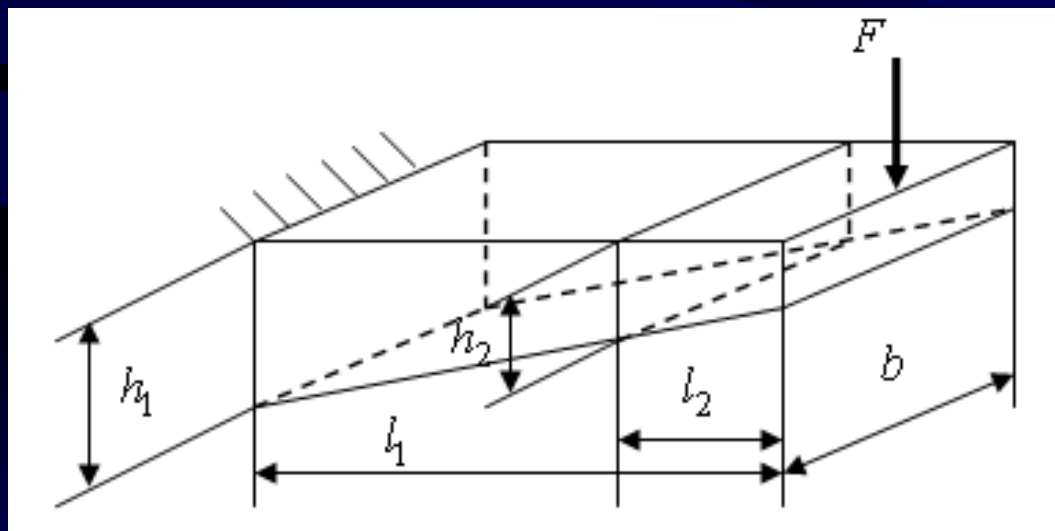
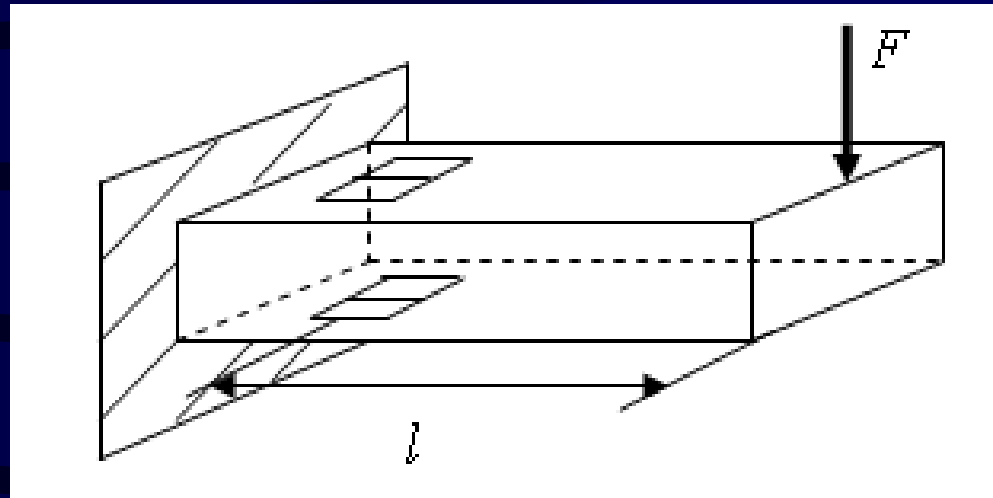
$$M_x = R_z \otimes Y_{ZMP}$$

$$M_y = R_z \otimes X_{ZMP}$$

$$M_z = F_6 \frac{(F_4d + F_5f - (F_2 - F_3)c)}{(F_1 + F_2 + F_3)} + (F_4 + F_5) \frac{(F_6a + (F_2 + F_3)b)}{(F_1 + F_2 + F_3)} + F_4(e + g) + F_5g - F_6h$$



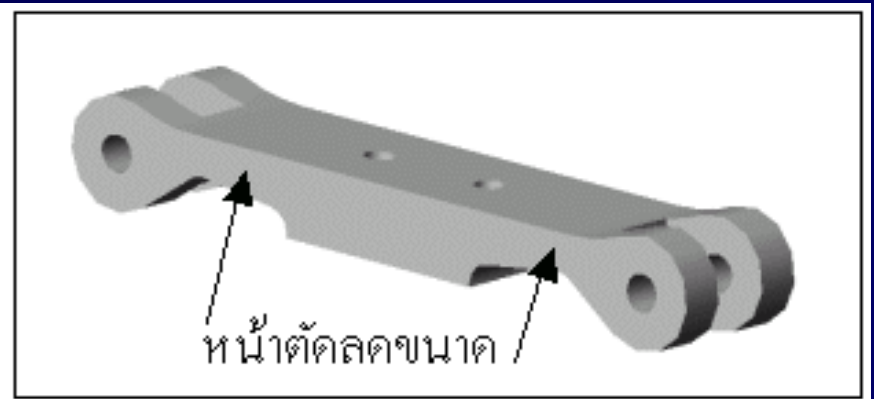
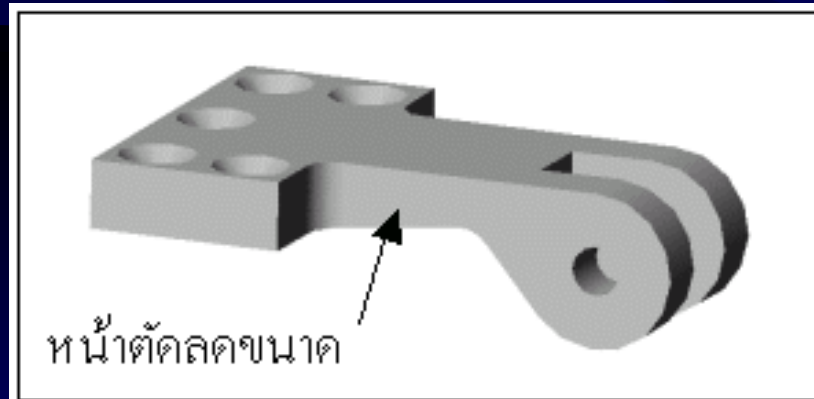
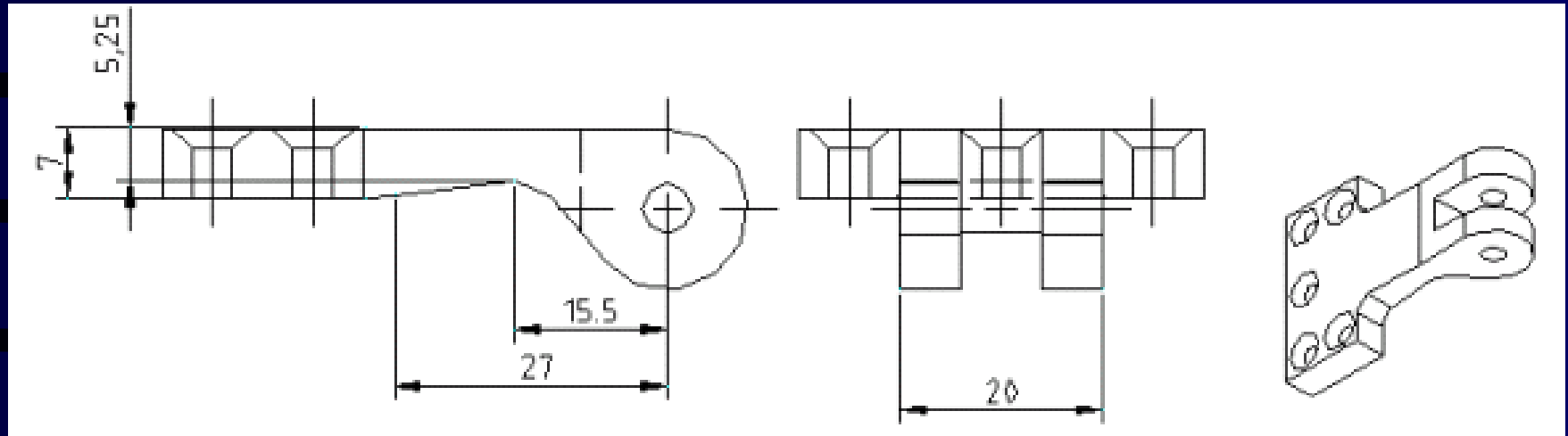
# การออกแบบคานของอุปกรณ์วัดแรง



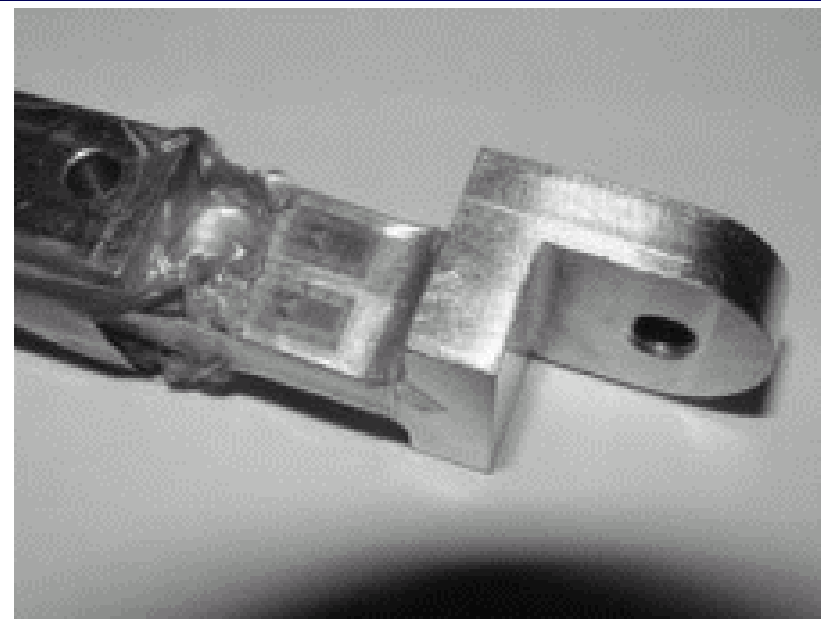
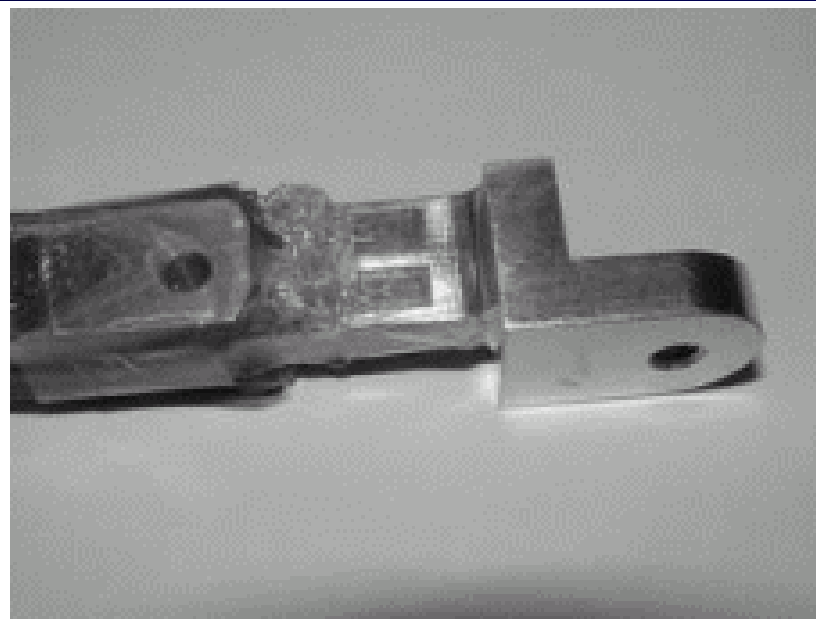
$$\sigma_{b1} = \frac{6Fl_1}{bh_1^2} \quad \sigma_{b2} = \frac{6Fl_2}{bh_2^2}$$

$$h_2 = \sqrt{\frac{l_2 h_1^2}{l_1}}$$

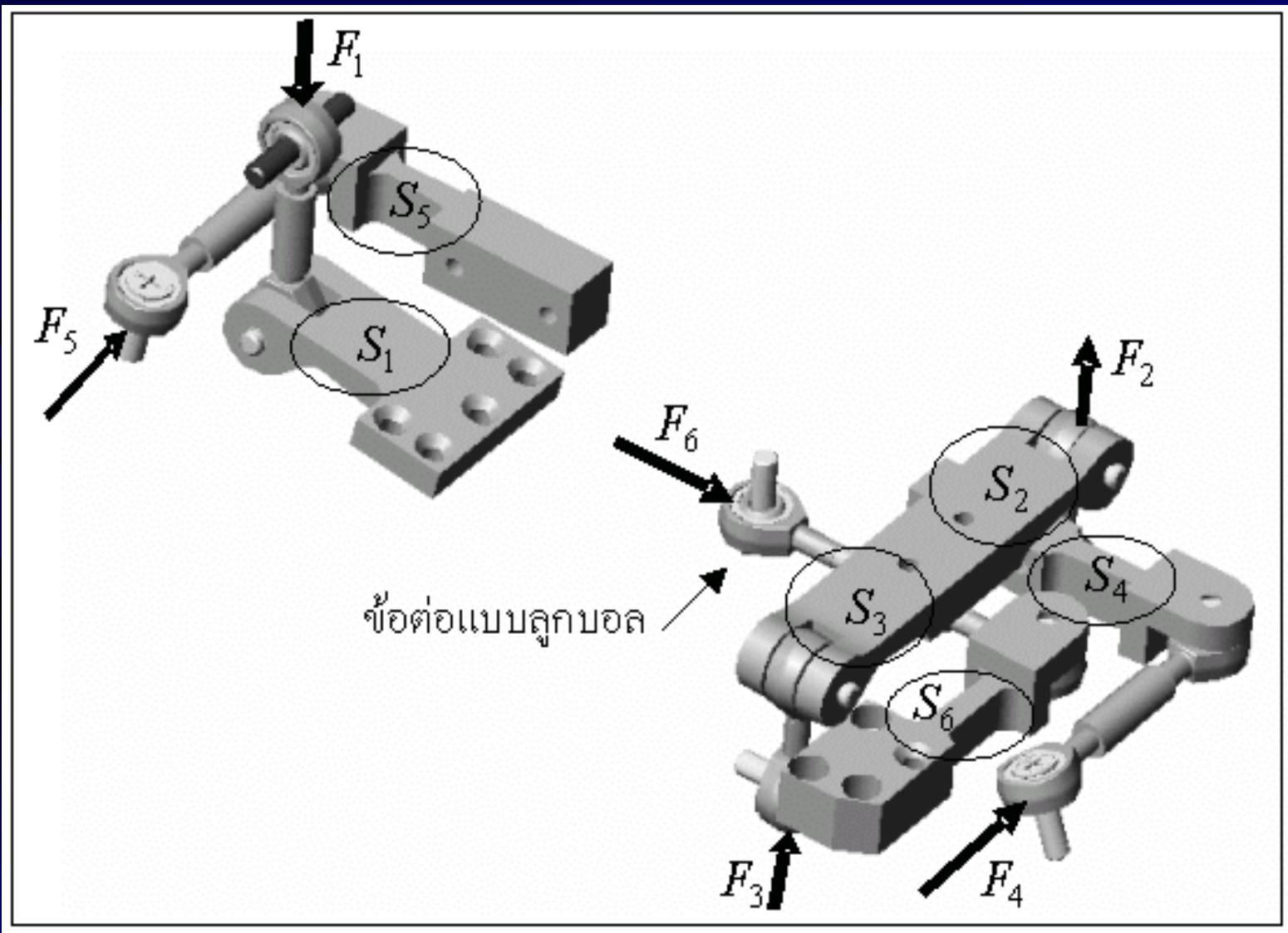
# ลักษณะงานจากการออกแบบ

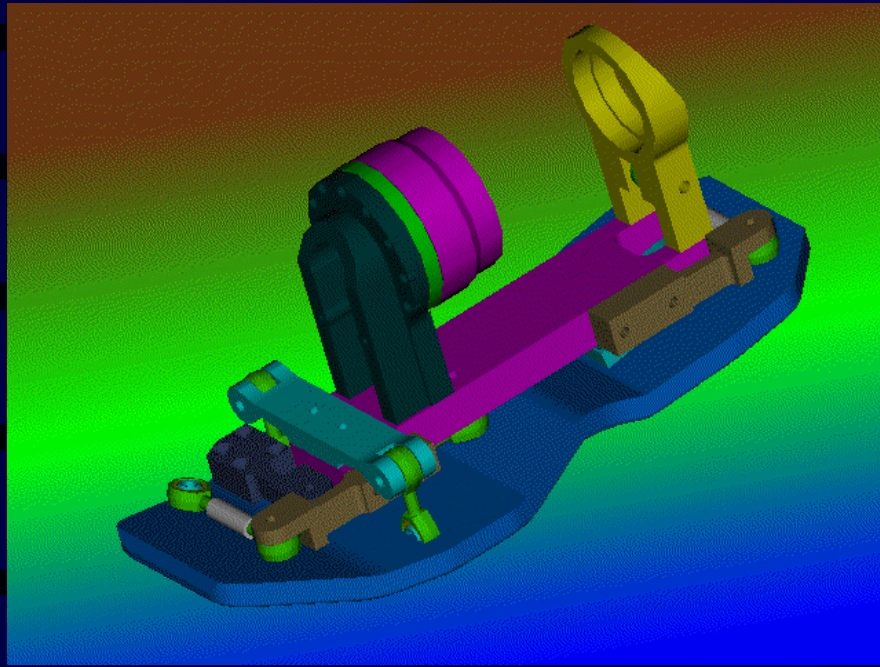


# การติดตั้ง Strain Gage บนคานที่ออกแบบขึ้นมา

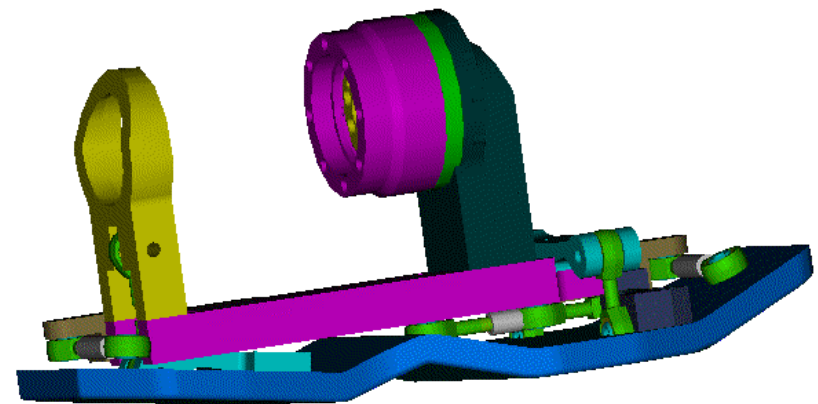
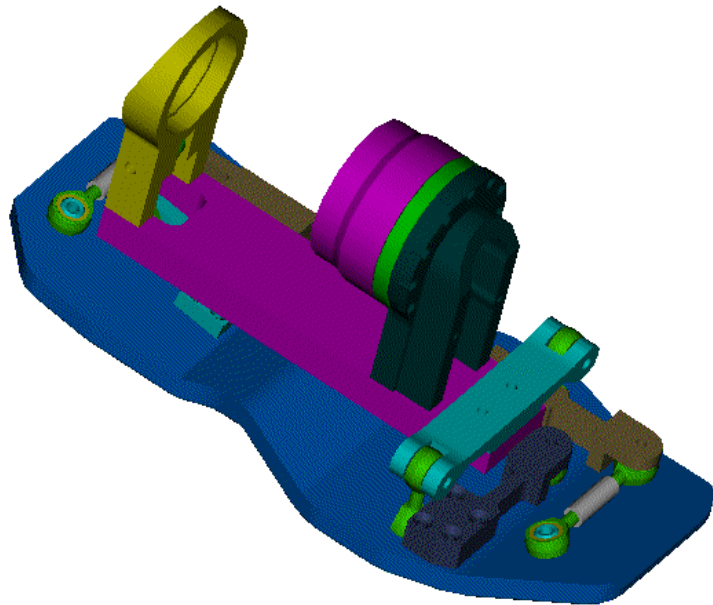


# การวางอุปกรณ์วัดแรงแบบตั้งฉาก





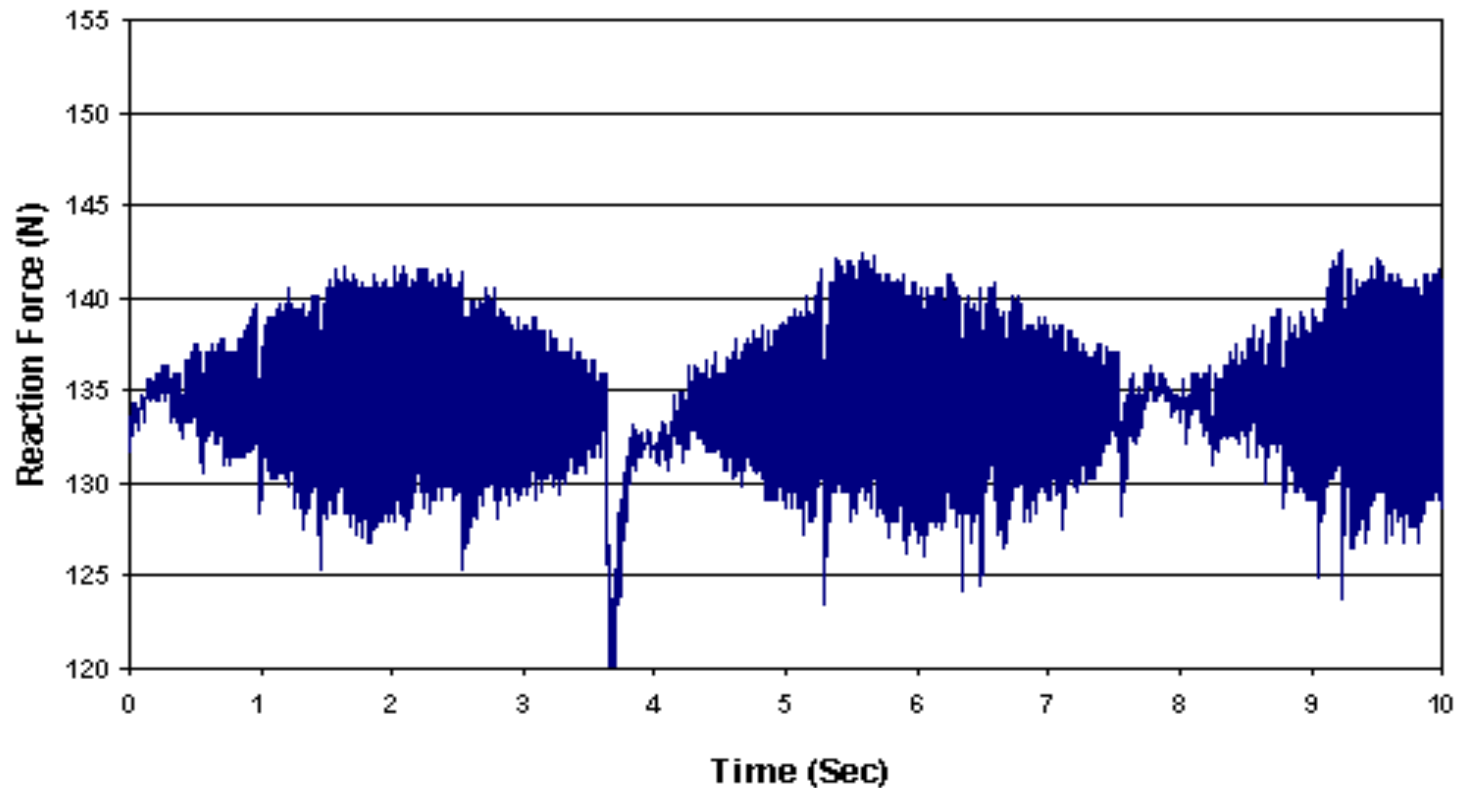
ระยะ	มิติเมตร
<i>a</i>	27.5
<i>b</i>	151.5
<i>c</i>	43
<i>d</i>	36.5
<i>e</i>	214
<i>f</i>	40
<i>g</i>	16
<i>h</i>	10



# 4. การทดลองอุปกรณ์วัดแรงกับหุ่นยนต์ต้นแบบ

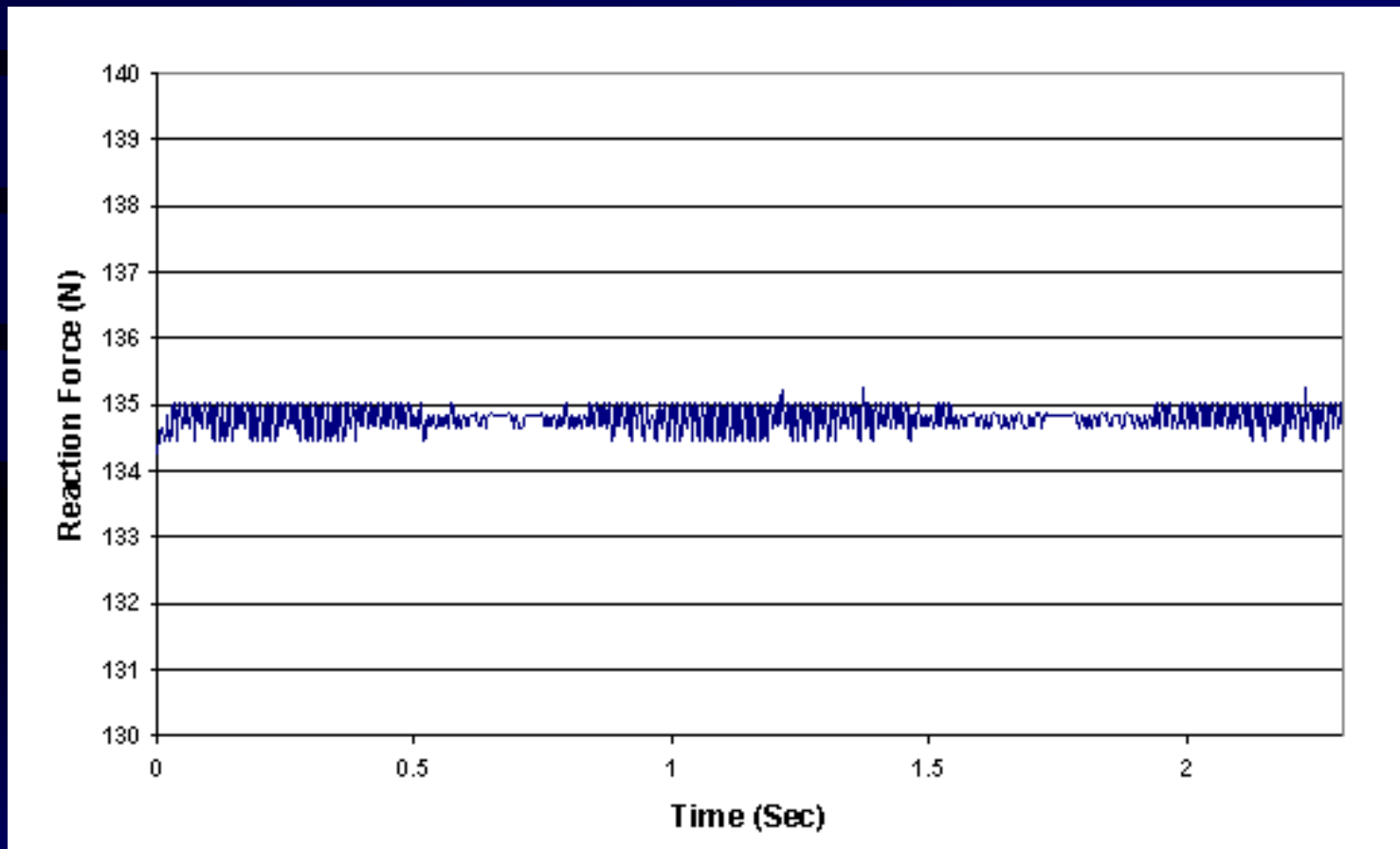


# ผลการวัดโดยให้น้ำหนัก 13.5 kg และ ยังไม่มีอาการรองสัญญาณ



# ผลการวัดโดยให้น้ำหนัก 13.5 kg มีการกรองสัญญาณ ด้วย RC Filter

$$R = 220K\Omega, C = 1\mu f$$

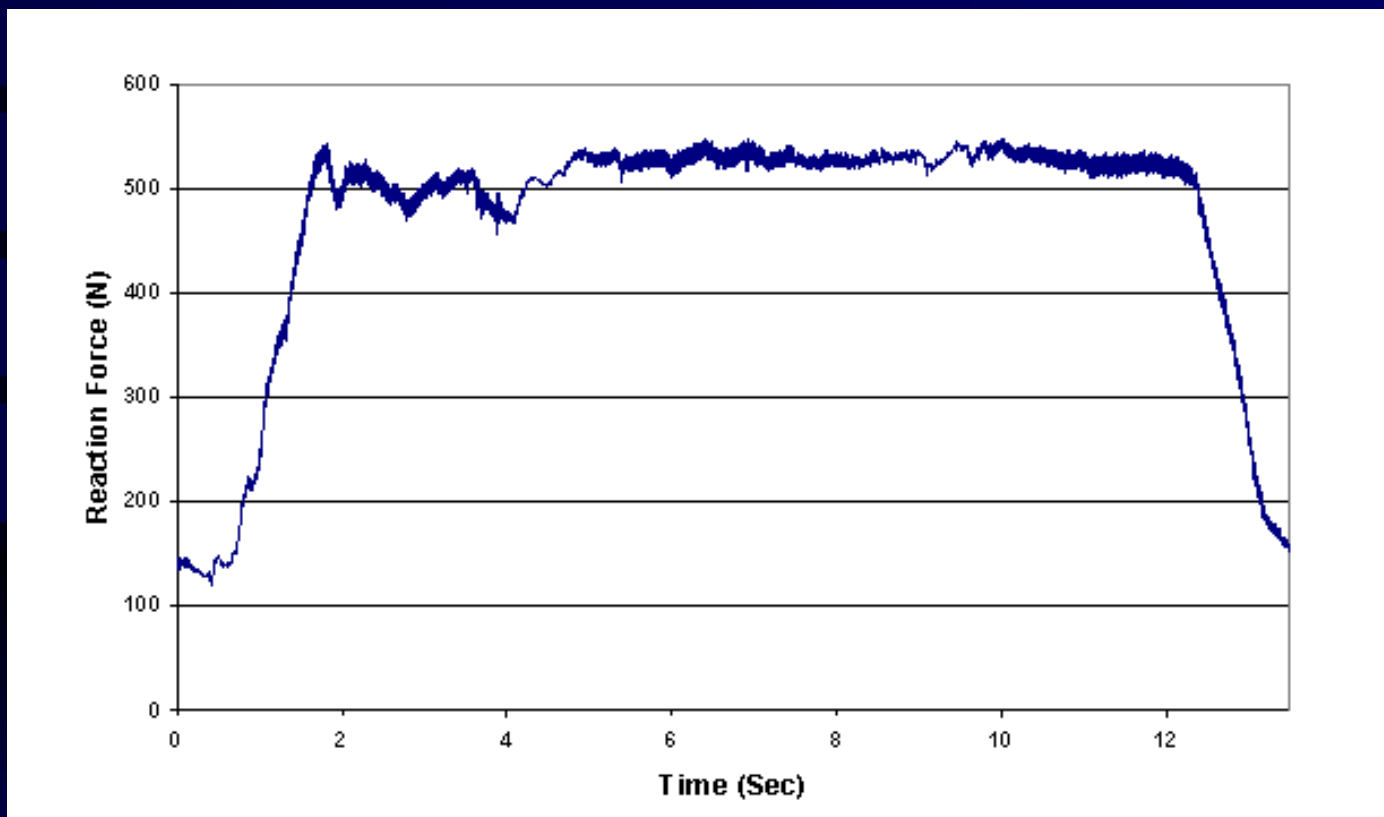




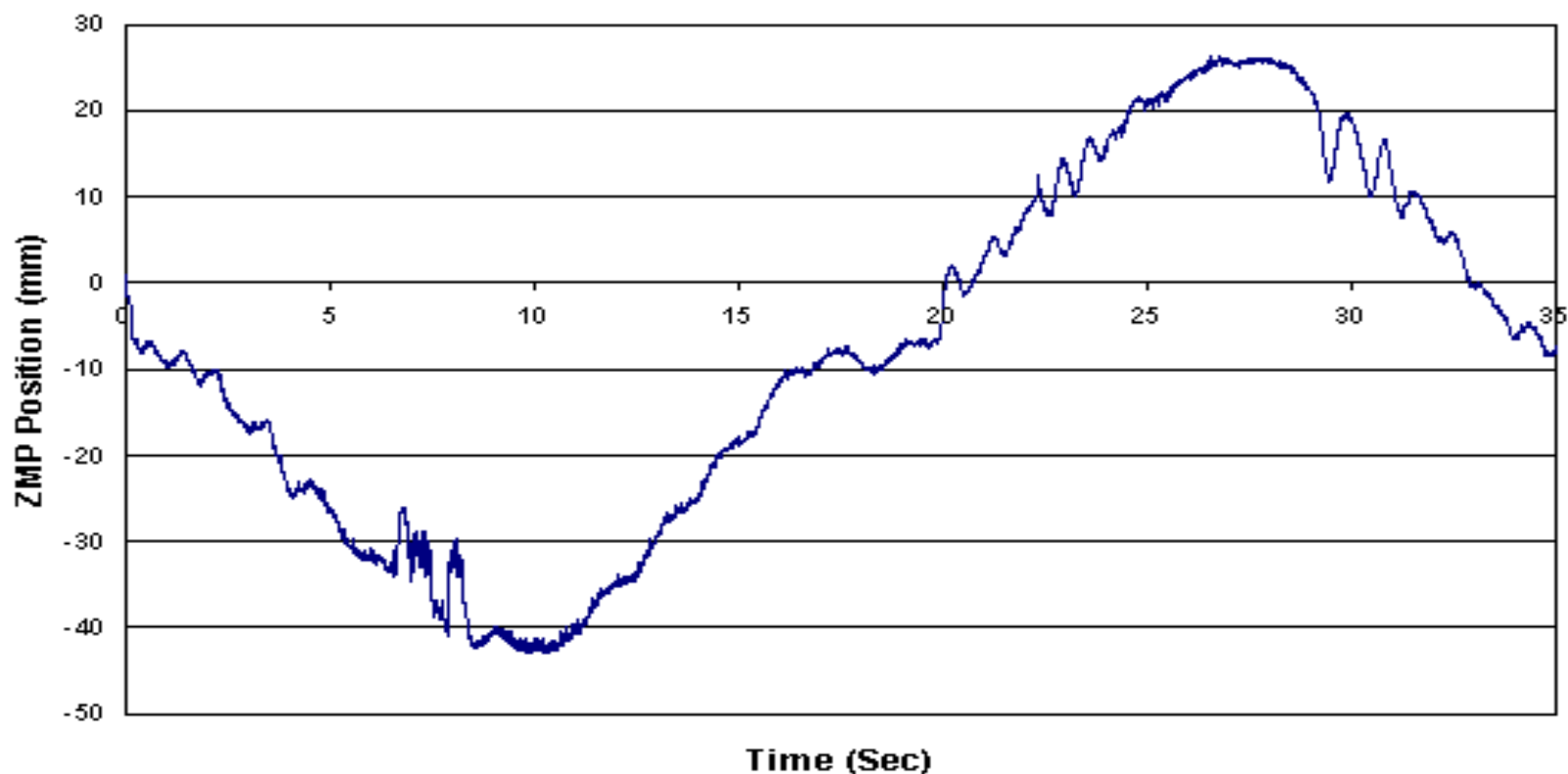


# ผลการวัดแบบโดยการให้น้ำหนัก 50 kg มีการกรอง สัญญาณด้วย RC Filter

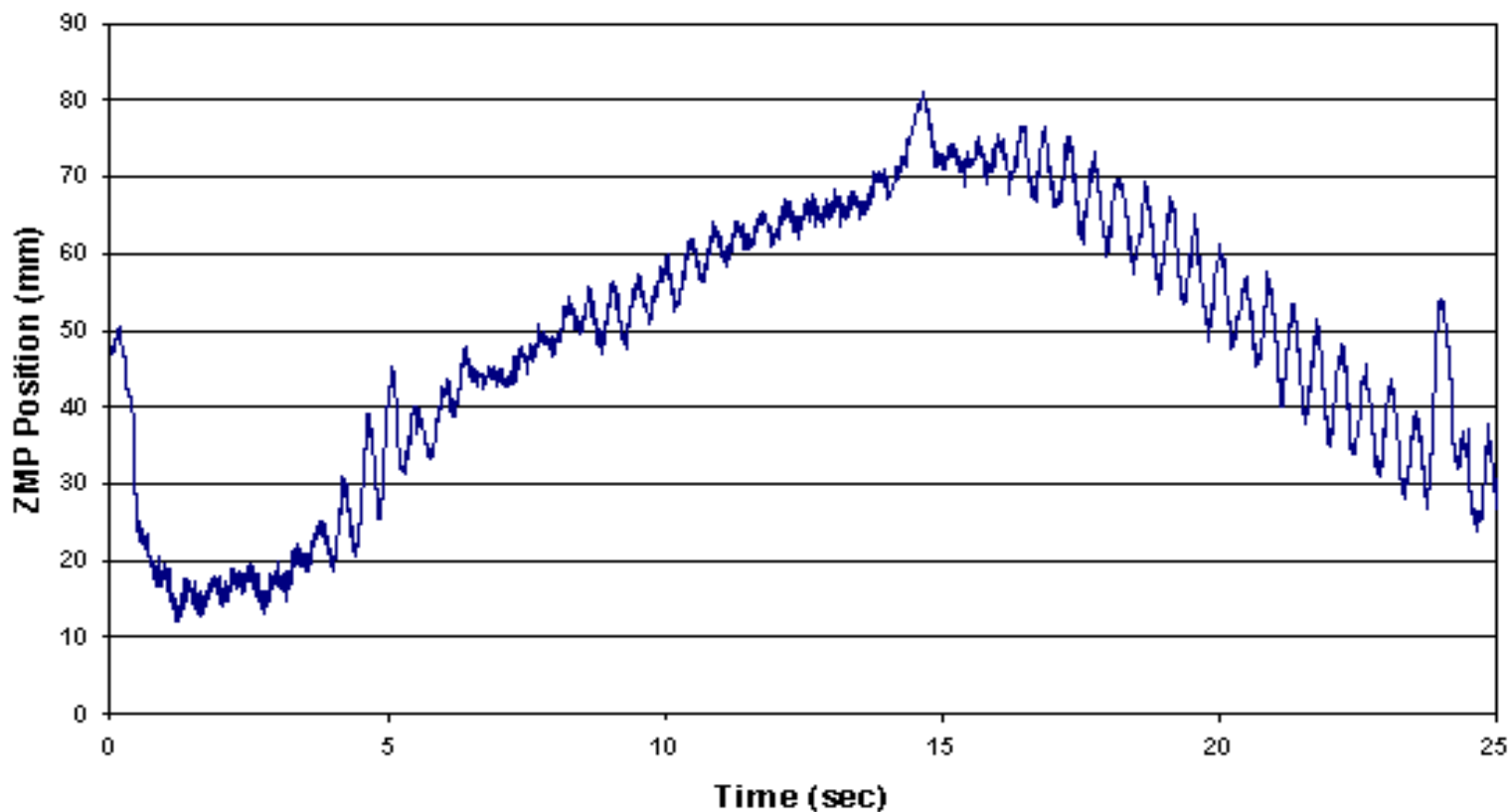
$$R = 220 K\Omega, C = 1 \mu f$$



# ผลการวัดตำแหน่ง ZMP โดยโยกขาหุ่นยนต์ ไปด้านหน้าและหลัง



# ผลการวัดตำแหน่ง ZMP โดยโยกขาหุ่นยนต์ ไปด้านข้างซ้ายและขวา



## 5. ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. มีสัญญาณรบกวนเข้ามาในข้อมูลการวัดบ่อยครั้ง

2. Strain Gauge ที่ติดตั้งเข้าไปเกิดการหลุดตัวจากโลหะทำให้ข้อมูลจากการวัดผิดพลาด

จากเหตุผลทั้งสองข้อ ควรนำอุปกรณ์มาตรฐานทางอุตสาหกรรมมาใช้ เช่น Load Cell รวมถึงชุดขยายสัญญาณข้อมูลที่ได้จากการวัดที่มีตัวกรองสัญญาณรบกวนได้ดี



## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุนศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์  
และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) ที่ให้การ  
สนับสนุนการทำวิจัยเรื่องการเคลื่อนที่โดยอาศัย  
สัญญาณภาพของหุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์  
(Image Guided Motion of A Humanoid Robot)



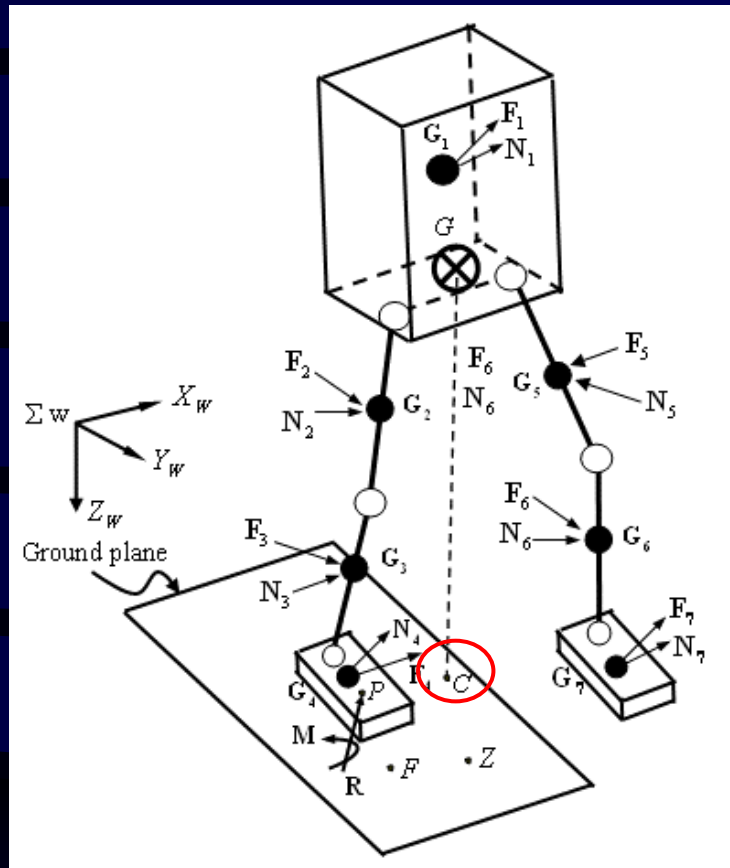
**A Cradle of Future Leaders in Robotics**











$$\overline{PC} \otimes \sum_{i=1}^7 m_i \mathbf{g} = \sum_{i=1}^7 \mathbf{N}_i + \sum_{i=1}^7 \overline{PG}_i \otimes \mathbf{F}_i$$

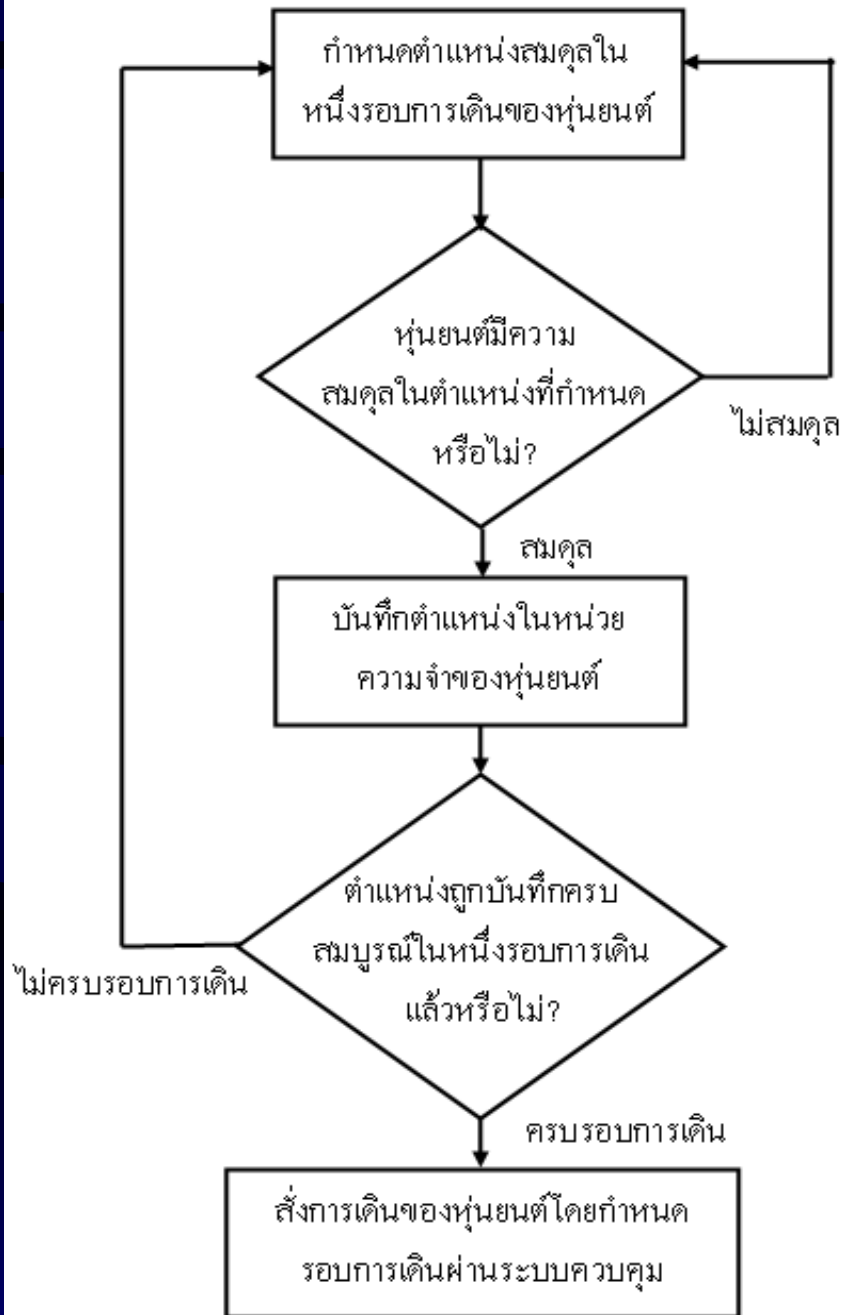
# การทดลองเดินโดยการรักษาสมดุลแบบสถิตศาสตร์



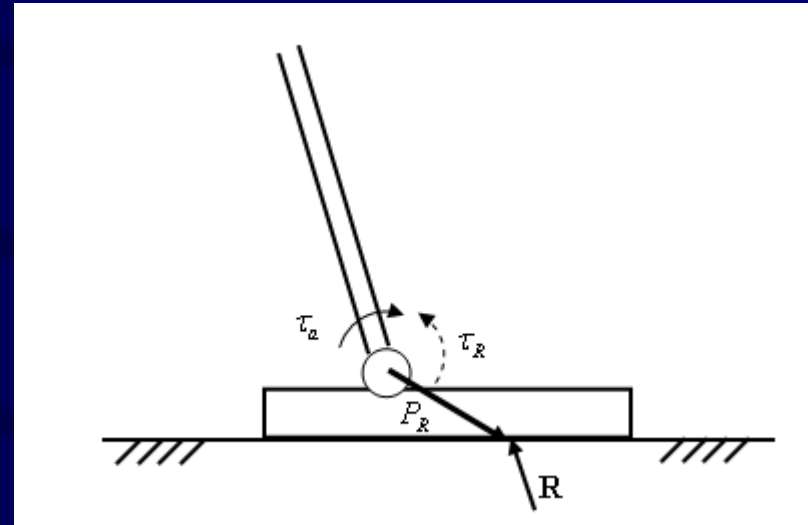
Motion controller & Amplifier



Stand alone computer



การทดลองเดินโดยการรักษาสมดุลง  
แบบสถิติศาสตร์

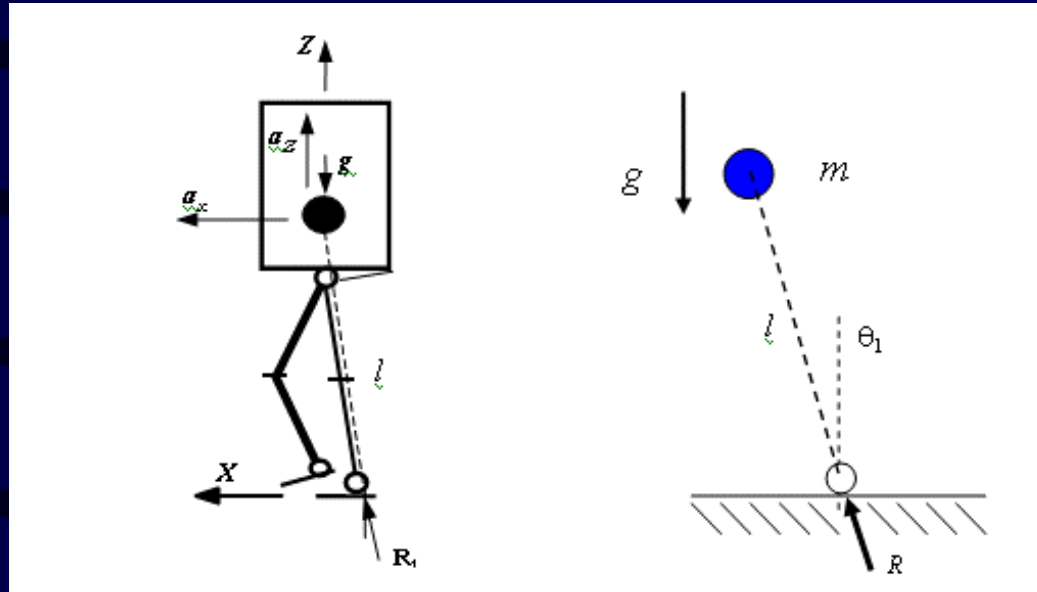


ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการทดลอง  
การเดินรักษาสมดุลแบบสถิตศาสตร์

# หัวข้อที่น่าสนใจ

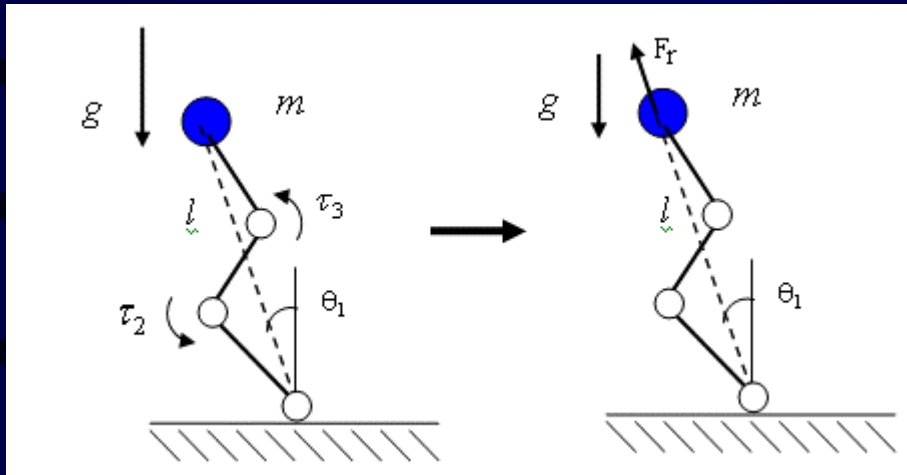
1. ที่มาของงานวิจัย
2. ทฤษฎีเสถียรภาพของหุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์
- 3. การวิเคราะห์หาตัวแปรที่มีผลต่อการรักษาเสถียรภาพ
4. การออกแบบระบบควบคุมและการทดสอบบนคอมพิวเตอร์
5. การทดลองระบบควบคุมกับหุ่นยนต์ต้นแบบที่สร้างขึ้นมา
6. สรุป

### 3. การวิเคราะห์ห้หาตัวแปรที่มีผลต่อการรักษาเสถียรภาพ



สมการพลศาสตร์ของเพนดูลัมแบบผกผัน

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{g}{l} \sin\theta_1$$



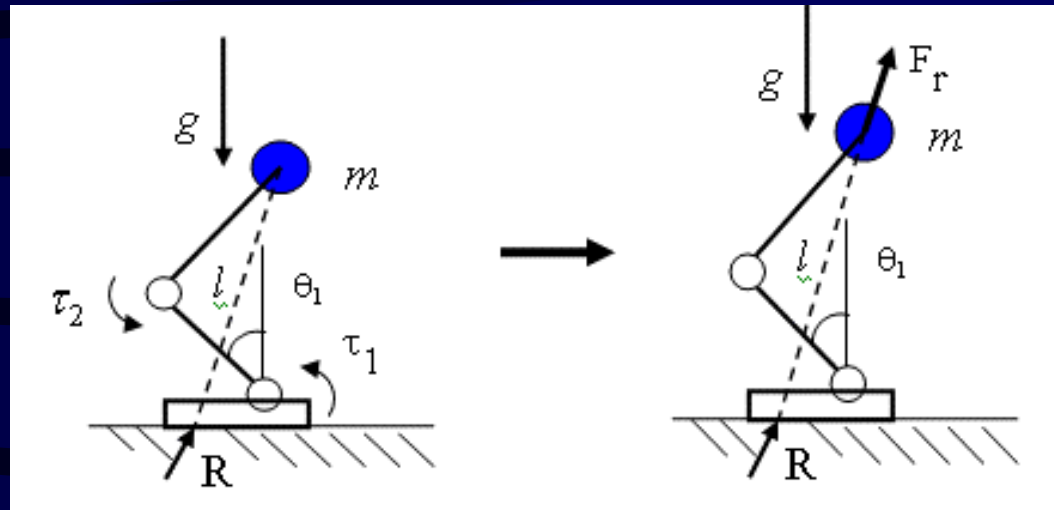
$$F_r = \frac{\tau}{R_{\text{lever}}}$$

$$\tau = f(\tau_2, \tau_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3)$$

$$ml^2 \ddot{\theta}_1 = mgl \sin \theta_1 - 2ml \dot{\theta}_1^2$$

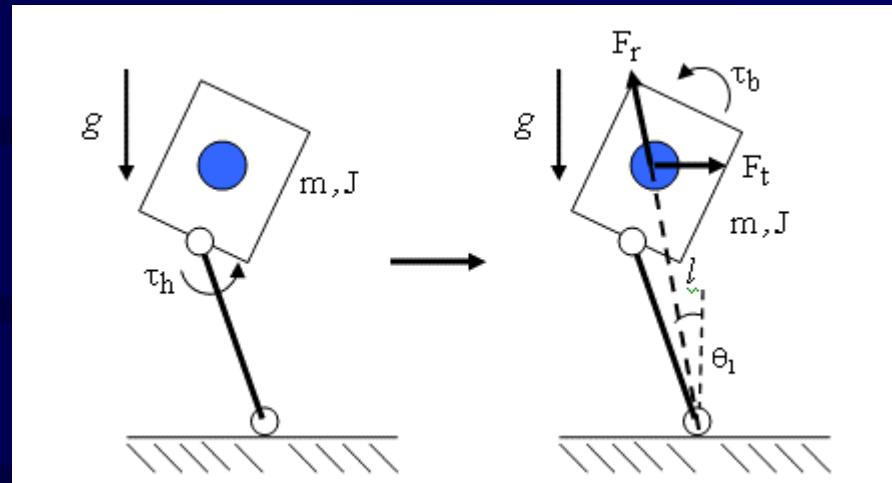
$$m \ddot{l} = f(\tau_1, \tau_2, q_1, q_2, q_3) - mg \cos \theta_1 + ml \dot{\theta}_1^2$$





ถ้าแรงปฏิกิริยาอยู่ด้านซ้ายของจุดศูนย์กลางมวล หุ่นยนต์จะล้มไปทางขวา

ถ้าแรงปฏิกิริยาอยู่ด้านขวาของจุดศูนย์กลางมวล หุ่นยนต์จะล้มไปทางซ้าย

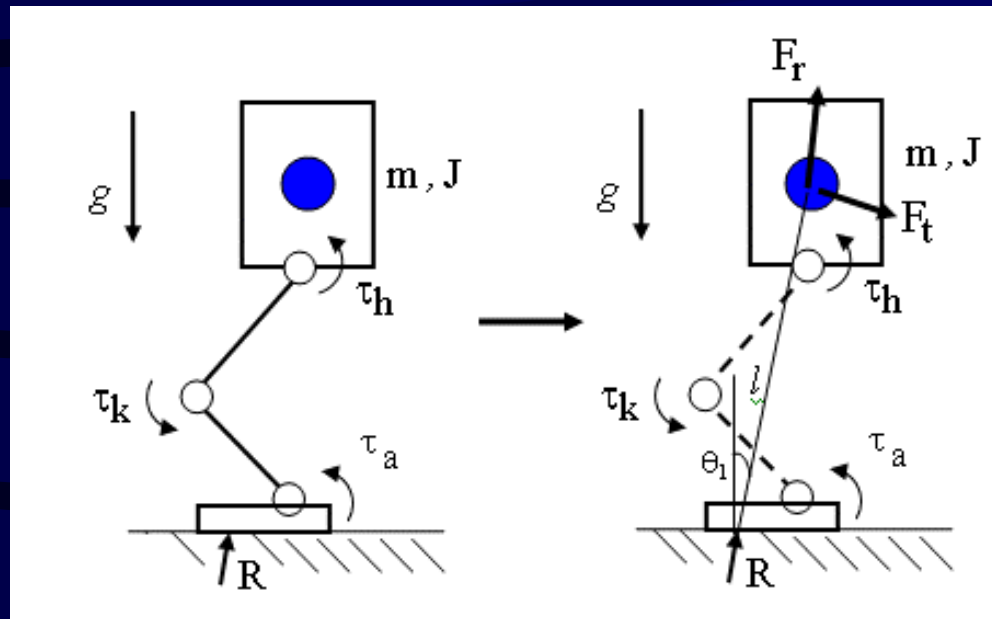


$$ml^2 \ddot{\theta}_1 = mgl \sin \theta_1 - 2ml\dot{\theta}_1 - \tau_h$$

$$m\ddot{l} = ml\dot{\theta}_1^2 - mg \cos \theta_1 + \frac{\tau_h}{R_{level}}$$

$$J\ddot{\theta}_b = \tau_b$$

$$\text{เมื่อ } \tau_h = \tau_b \text{ และ } F_r = \frac{\tau_h}{R_{level}} \text{ และ } F_t = \frac{\tau_h}{l}$$



$$ml^2\ddot{\theta}_1 = mgl\sin\theta_1 - 2ml\dot{\theta}_1 - lF_t$$

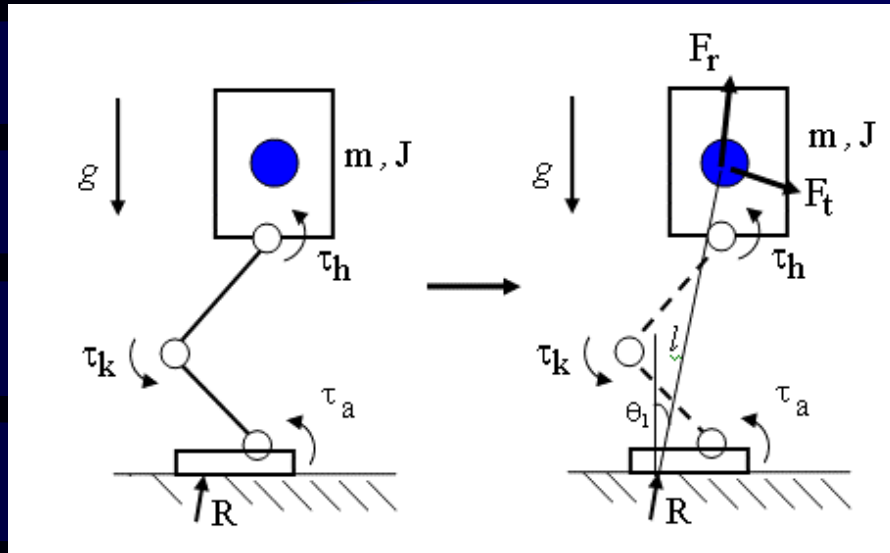
$$m\ddot{l} = F_r - mg\cos\theta_1 + ml\dot{\theta}_1^2$$

$$J\ddot{\theta}_b = \tau_b$$

$$F_t = f_1(\tau_a, \tau_k, \tau_h, q_a, q_k, q_h)$$

$$F_r = f_2(\tau_a, \tau_k, \tau_h, q_a, q_k, q_h)$$

$$\tau_b = f_3(\tau_a, \tau_k, \tau_h, q_a, q_k, q_h)$$

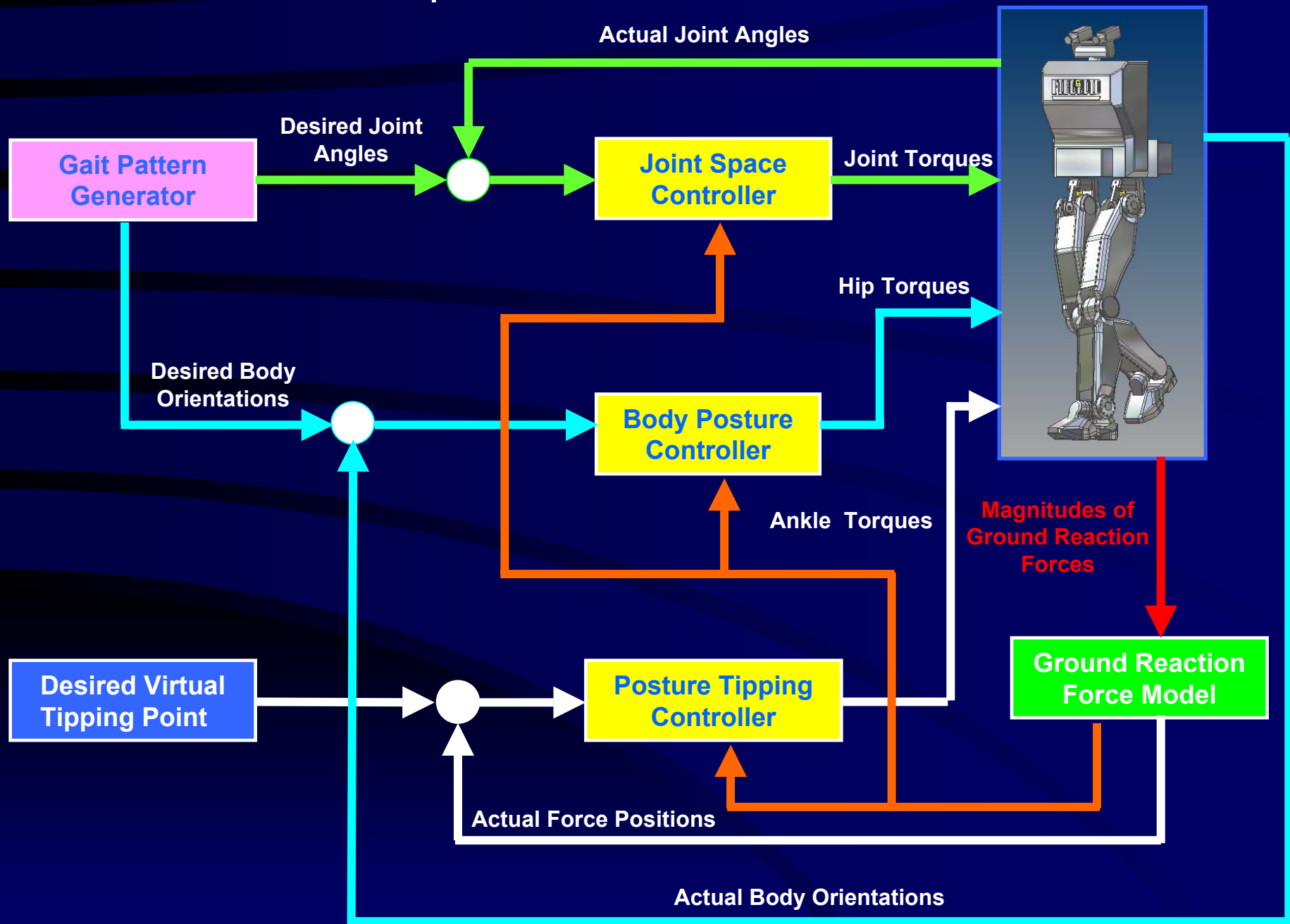


$$ml^2 \ddot{\theta}_1 = mgl \sin \theta_1 - 2ml \dot{\theta}_1 - J \ddot{\theta}_b$$

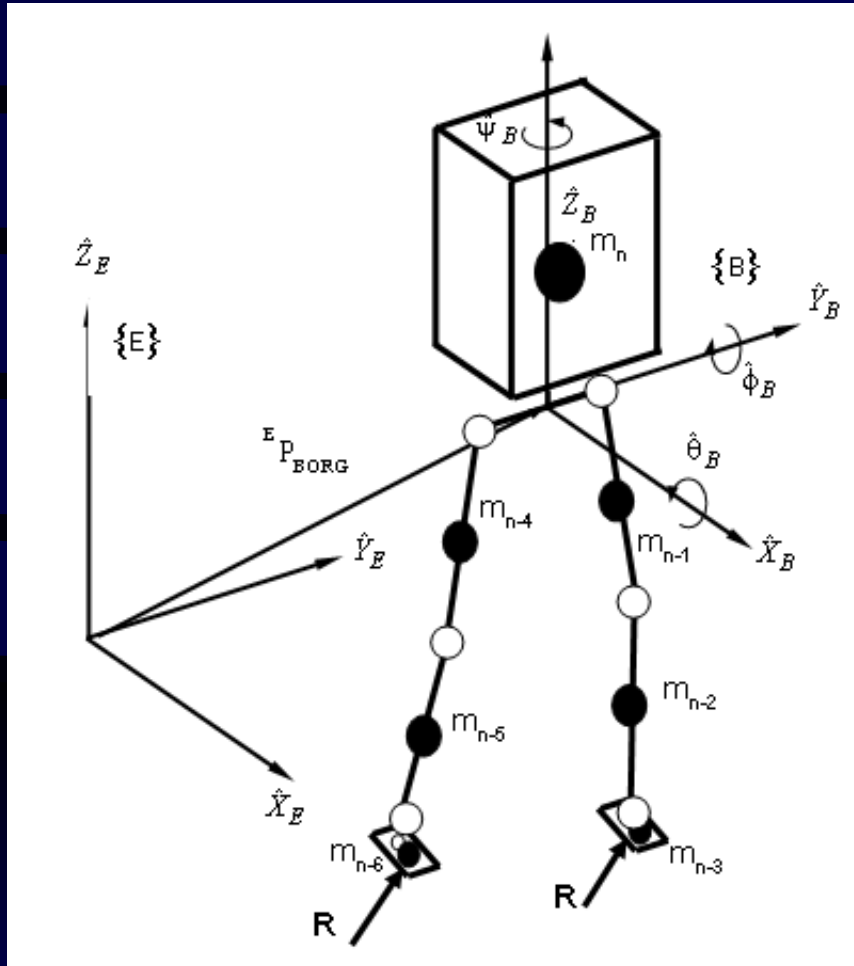
ตัวแปรที่มีผลต่อการล้มของหุ่นยนต์คือ

1. การเคลื่อนที่ในส่วนของลำตัวด้วยอัตราเร่งสูง
2. การเคลื่อนที่แบบขึ้นลง
3. การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเท้ากับพื้น

# 4. การออกแบบระบบควบคุมและการทดสอบบนคอมพิวเตอร์



# แบบจำลองการเคลื่อนที่แบบพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ชีวแมนนอยด์



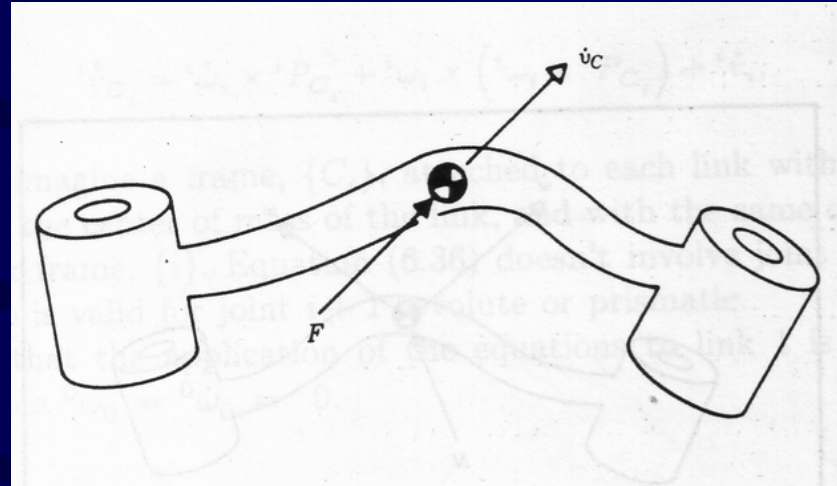
## *Assumptions*

1. Lump mass model
2. Rigid link
3. Neglect the frictions at all joints
4. No slip motion

# การสร้างสมการการเคลื่อนที่แบบพลศาสตร์โดยวิธีนิวตันและออยเลอร์

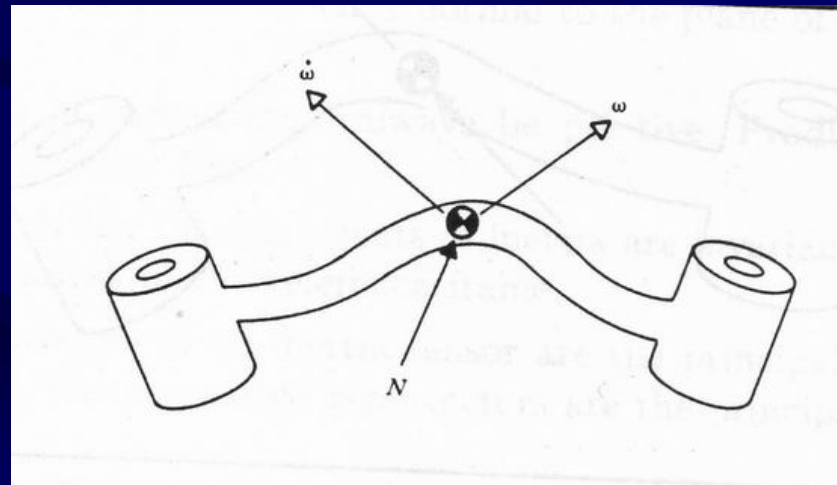
## 1. Newton's equation

$$F = m\ddot{v}_C$$



## 2. Euler's equation

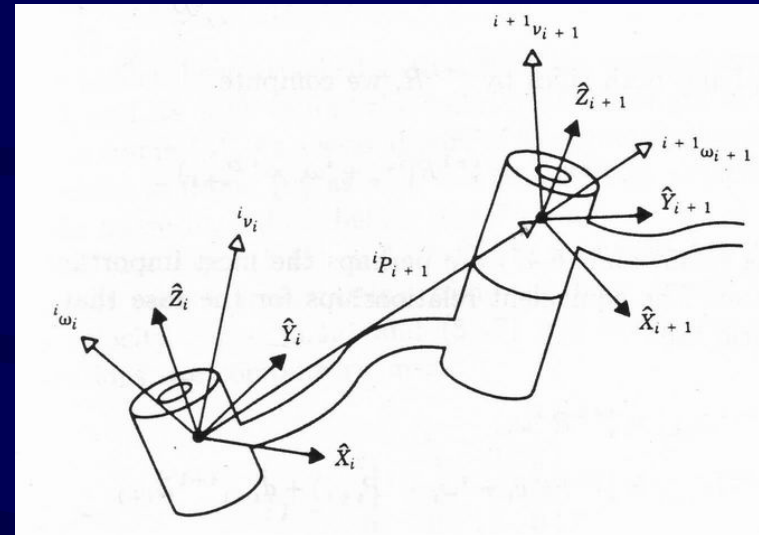
$$N = {}^C I \dot{\omega} + \omega \times {}^C I \omega$$



# Iterative Newton-Euler dynamic formulation

## 1. Outward iterations

คำนวณหาความเร็วและความเร่ง



*Angular velocities and angular accelerations*

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^i R^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1}$$

$${}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} = {}^i R^i \dot{\omega}_i + {}^i R^i \omega_i \times \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1}$$

*Linear accelerations*

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} = & {}^i R^i (\dot{\omega}_i \times {}^i P_{i+1} + \omega_i \times (\omega_i \times {}^i P_{i+1}) + \dot{v}_i) \\ & + 2 {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times d_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \ddot{d}_{i+1} \end{aligned}$$

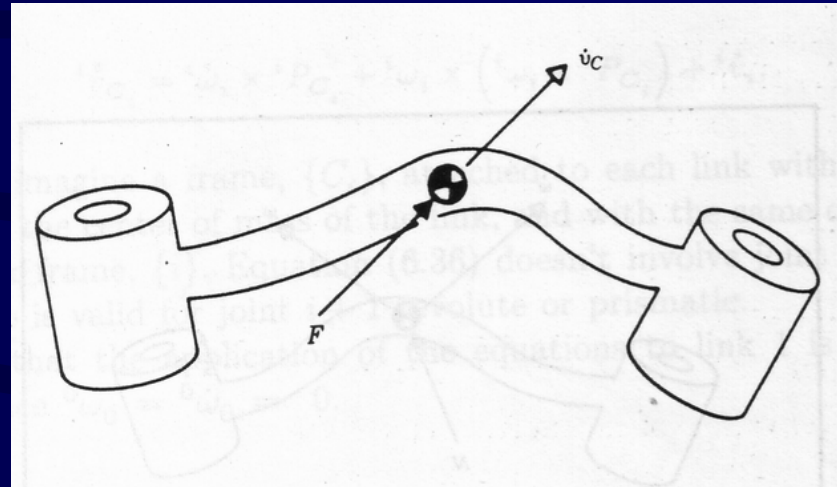
$${}^{i+1}\dot{v}_{C,i+1} = {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C,i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times ({}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{i+1}P_{C,i+1}) + {}^{i+1}\dot{v}_{i+1}$$



## 2. คำนวณหาแรงและโมเมนต์ที่จุดศูนย์กลางมวล

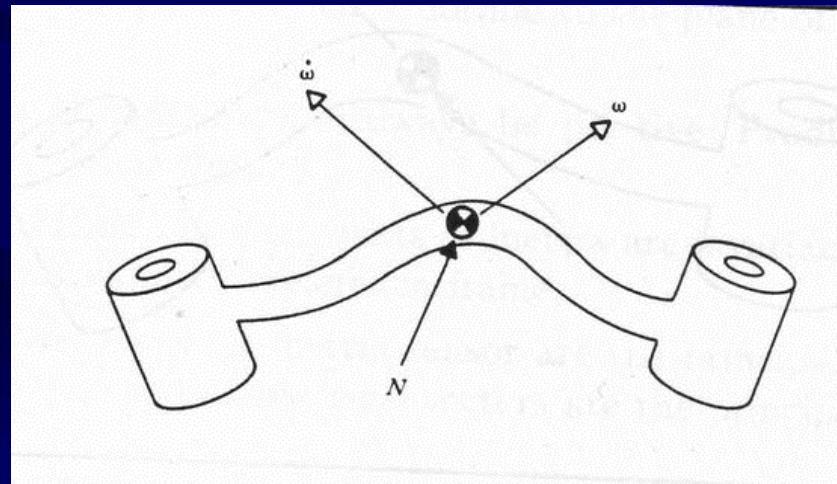
$$F_i = m\ddot{v}_{C_i}$$

$$N_i = {}^{C_i}I\dot{\omega}_i + \omega_i \times {}^{C_i}I\omega_i$$



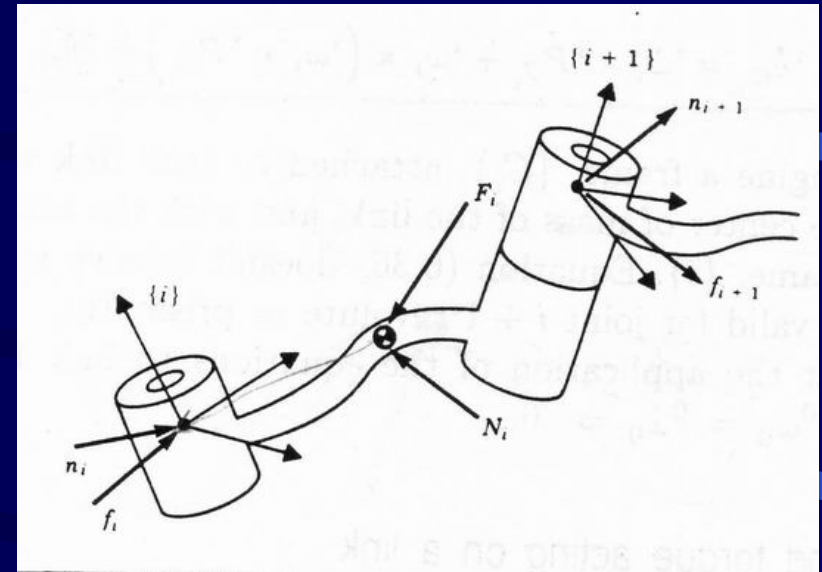
## 3. คำนวณหาแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น

$$|R| = -\sum_{i=1}^n {}^wR_i^i F_i$$



#### 4. Inward iterations

คำนวณหาแรงและโมเมนต์ที่ข้อหมุน



$${}^i f_i = {}_{i+1}^i R^{i+1} f_{i+1} + {}^i F_i$$

$${}^i n_i = {}^i N_i + {}_{i+1}^i R^{i+1} n_{i+1} + ({}^i P_{C_i} \times {}^i F_i) \\ + ({}^i P_{i+1} \times {}_{i+1}^i R^{i+1} f_{i+1})$$

then, select force and torque on the rotational axis at each coordinate



$$\tau_i = {}^i n_i^T \hat{z}_i$$

## รูปแบบของสมการพลศาสตร์

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{N}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{J}^T \mathbf{R}$$

$\boldsymbol{\tau}$  คือเวกเตอร์ของแรงบิดที่พิกัดข้อหมุน

$\boldsymbol{\theta}$ ,  $\dot{\boldsymbol{\theta}}$  และ  $\ddot{\boldsymbol{\theta}}$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของพิกัดข้อหมุน

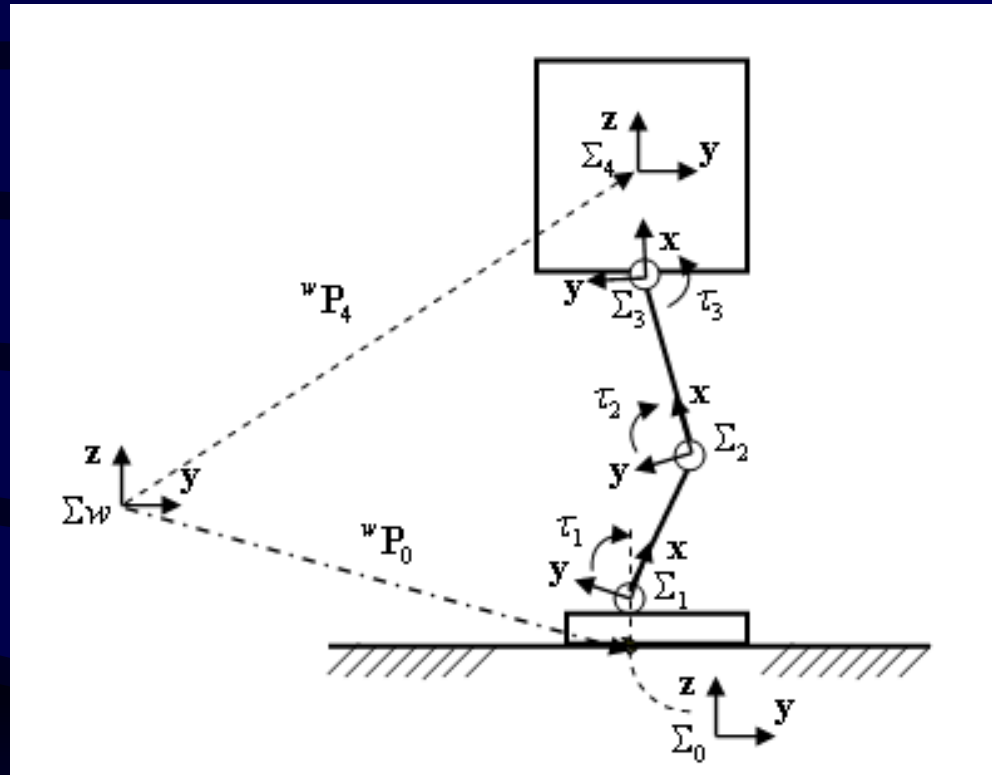
$\mathbf{M}(\boldsymbol{\theta})$  คือเมตริกซ์ความเฉื่อย (Inertia Matrix)

$\mathbf{N}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$  คือเวกเตอร์ของแรง Centrifugal และ Coriolis

$\mathbf{G}(\boldsymbol{\theta})$  คือเวกเตอร์ของแรงโน้มถ่วง

$\mathbf{J}^T$  คือเมตริกซ์ถ่ายโอนของแรงปฏิกิริยา  $\mathbf{R}$  ที่เกิดขึ้นระหว่างเท้ากับพื้น

# สมการทางพลศาสตร์ของขาหนึ่งขาและลำตัวของหุ่นยนต์อีวแมนนอยด์บนระนาบ



## เมตริกซ์ถ่ายโอน (Transformation Matrix)

$${}^i T_{i+1} = \begin{bmatrix} {}^i R_{i+1} & {}^i P_{i+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0 T_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_1 & -c_1 & 0 & 0 \\ c_1 & -s_1 & 0 & 0.108 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1 T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & 0.35 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2 T_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & 0.38 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3 T_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0.3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

## มวล ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลและเทนเซอร์ความเฉื่อย

$$m_0 = 1.27 \text{ kg} \quad m_1 = 5.61 \text{ kg} \quad m_2 = 6.48 \text{ kg} \quad \text{และ} \quad m_3 = 16.11 \text{ kg}$$

$${}^0P_{C_0} = [0 \quad 0.04 \quad 0.04]^T \quad {}^1P_{C_1} = [0.186 \quad 0.02 \quad 0]^T$$

$${}^2P_{C_2} = [0.189 \quad -0.016 \quad 0]^T \quad {}^3P_{C_3} = [0.295 \quad 0.018 \quad 0]^T$$

$${}^0I_C = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix}$$

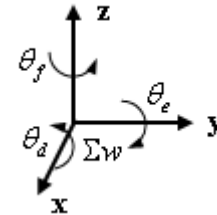
$${}^1I_C = \begin{bmatrix} 0.013 & 0 & 0 \\ 0 & 0.062 & 0 \\ 0 & 0 & 0.06 \end{bmatrix}$$

$${}^2I_C = \begin{bmatrix} 0.015 & 0 & 0 \\ 0 & 0.081 & 0 \\ 0 & 0 & 0.081 \end{bmatrix}$$

$${}^3I_C = \begin{bmatrix} 0.171 & 0 & 0 \\ 0 & 0.373 & 0 \\ 0 & 0 & 0.242 \end{bmatrix}$$

## การหามุมการเอียงตัวของลำตัวเทียบกับพิกัดหลัก

$$R_{d,e,f} = \begin{bmatrix} c\theta_f c\theta_e & c\theta_f s\theta_e s\theta_d - s\theta_f c\theta_d & c\theta_f s\theta_e c\theta_d + s\theta_f s\theta_d \\ s\theta_f c\theta_e & s\theta_f s\theta_e s\theta_d + c\theta_f c\theta_d & s\theta_f s\theta_e c\theta_d - c\theta_f s\theta_d \\ -s\theta_e & c\theta_e s\theta_d & c\theta_e c\theta_d \end{bmatrix}$$



$${}^w R = {}^w R^0 R_1^1 R_2^2 R_3^3 R_4^4 R = \begin{bmatrix} {}^w R_{(1,1)} & {}^w R_{(1,2)} & {}^w R_{(1,3)} \\ {}^w R_{(2,1)} & {}^w R_{(2,2)} & {}^w R_{(2,3)} \\ {}^w R_{(3,1)} & {}^w R_{(3,2)} & {}^w R_{(3,3)} \end{bmatrix}$$

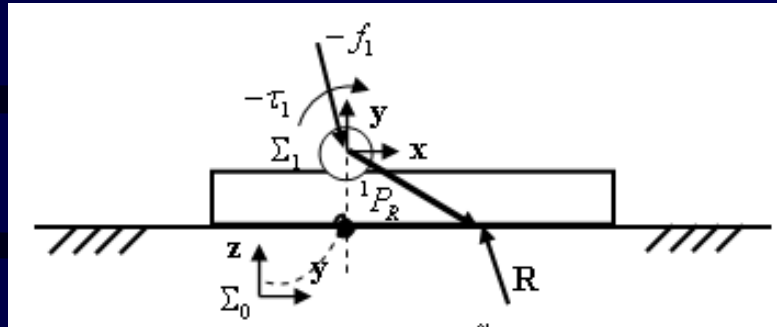


$$\begin{aligned} \theta_e &= -\arcsin({}^w R_{(3,1)}) \\ \theta_d &= \arcsin\left(\frac{{}^w R_{(3,2)}}{\cos \theta_e}\right) \\ \theta_f &= \arcsin\left(\frac{{}^w R_{(2,1)}}{\cos \theta_e}\right) \end{aligned}$$



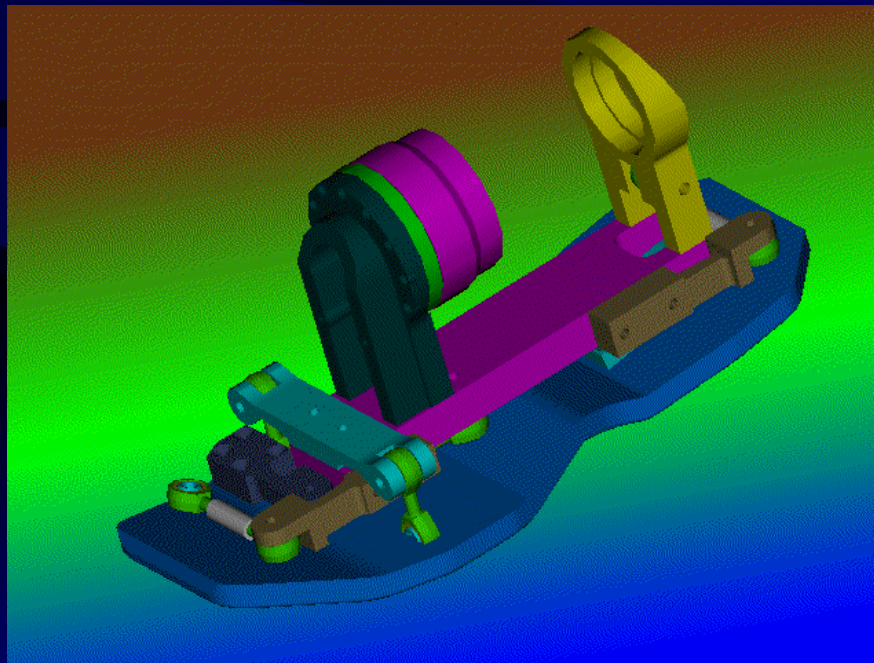
← Inclinometer

# การคำนวณหาตำแหน่งของแรงปฏิกิริยา



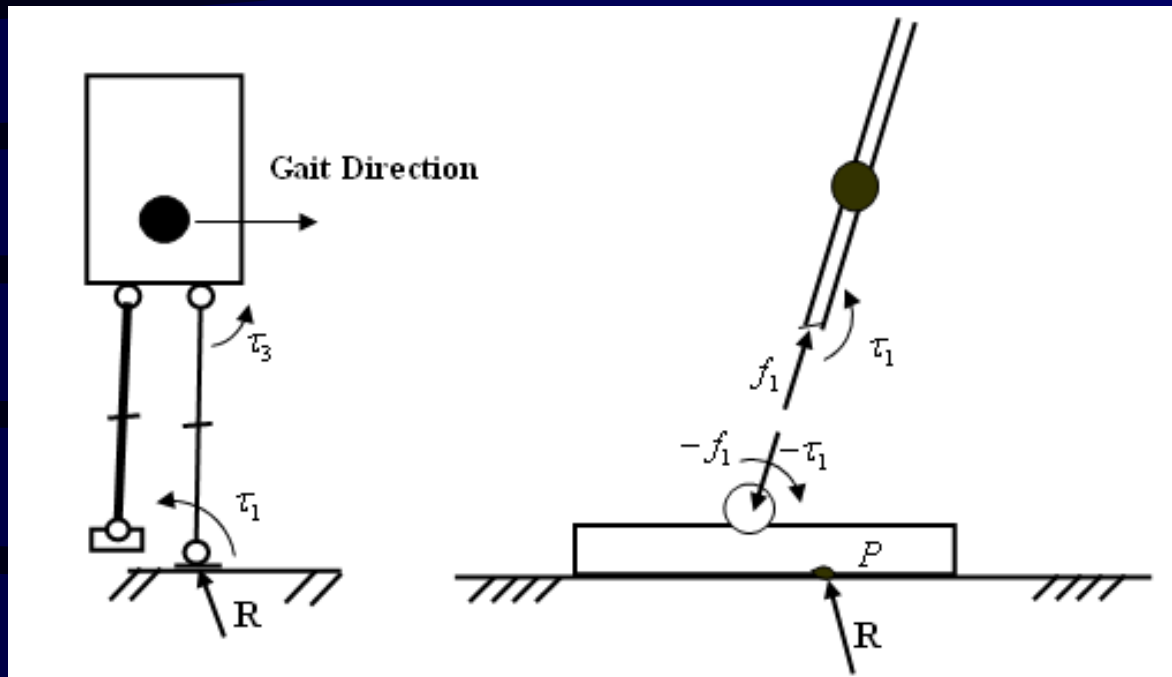
$$-\tau_1 = {}^1P_R \times R$$

$$P_{Ry} = \frac{(-\tau_1 - P_{Rz}R_y)}{R_z}$$

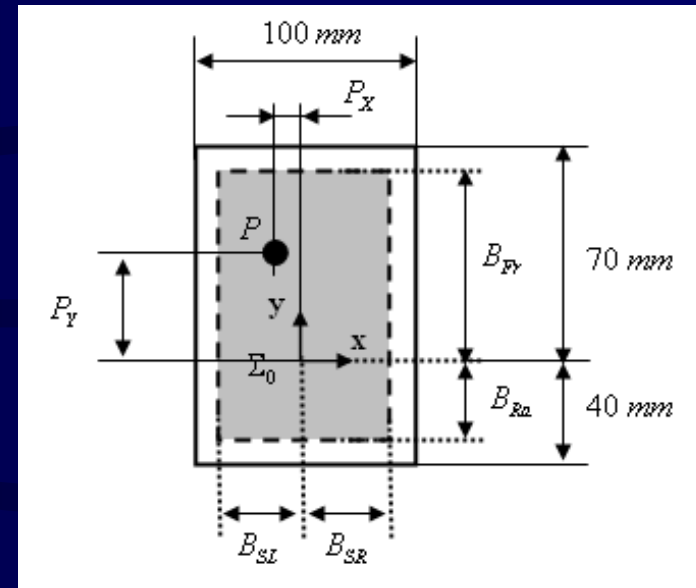
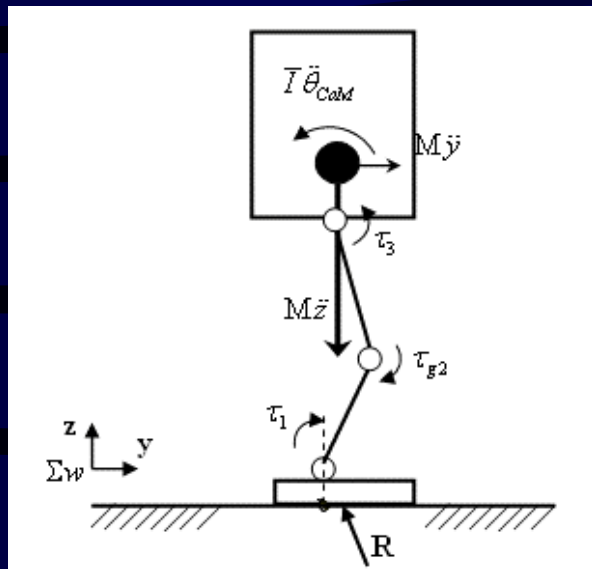


เซ็นเซอร์วัดแรง 6 แกน





การควบคุมตำแหน่งของแรงปฏิกิริยาและตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของข้อเท้าโดยการให้แรงบิดไปที่ข้อเท้า จะไม่สามารถควบคุมตำแหน่งดังกล่าวได้พร้อมกัน

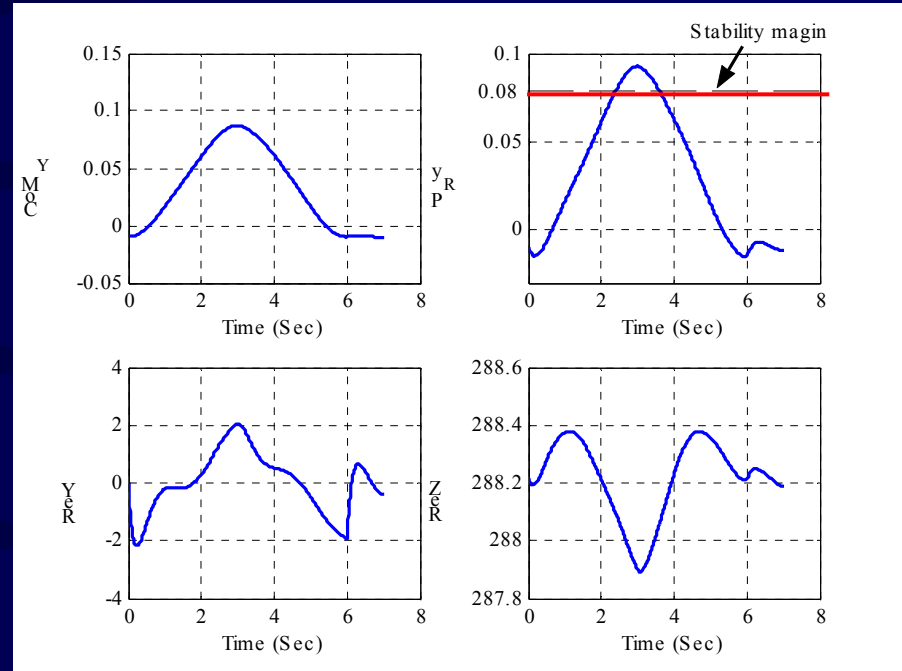
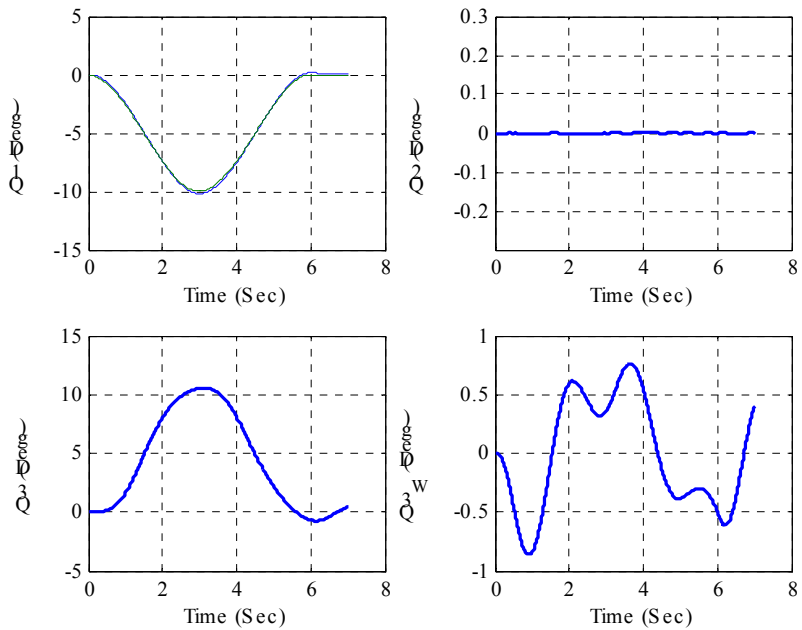


$$\tau_1 = \tau_{g1}(1 - w) + \tau_5(w)$$

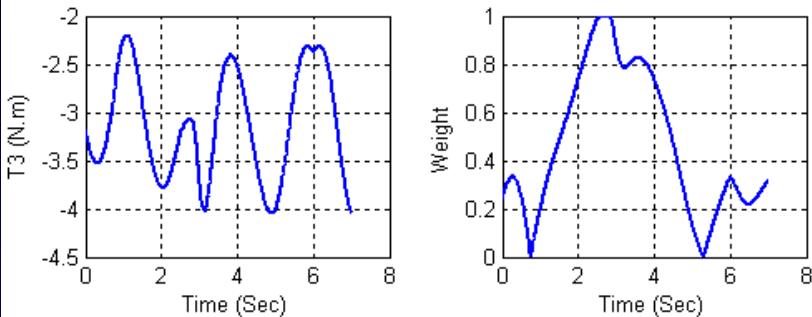
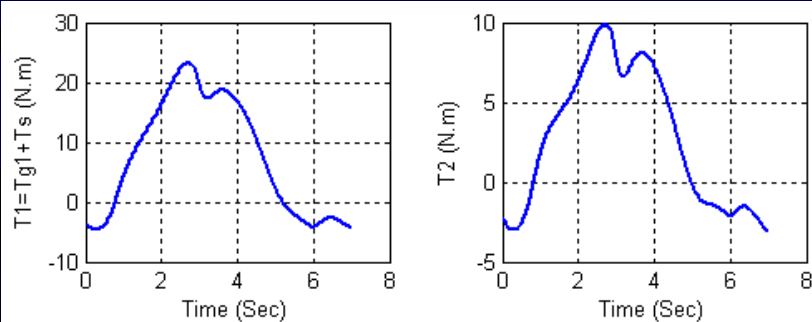
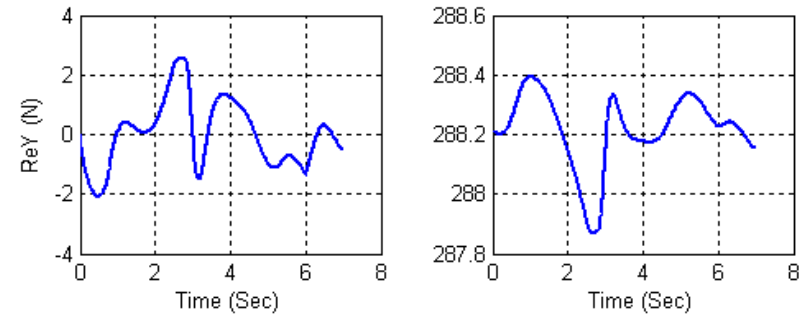
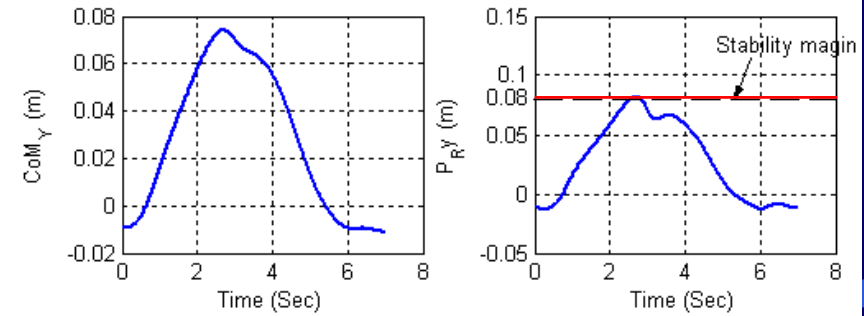
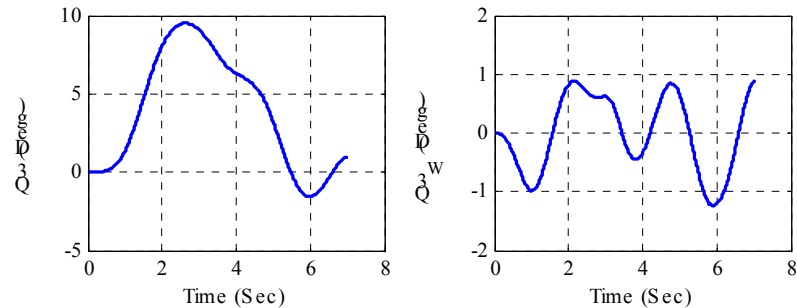
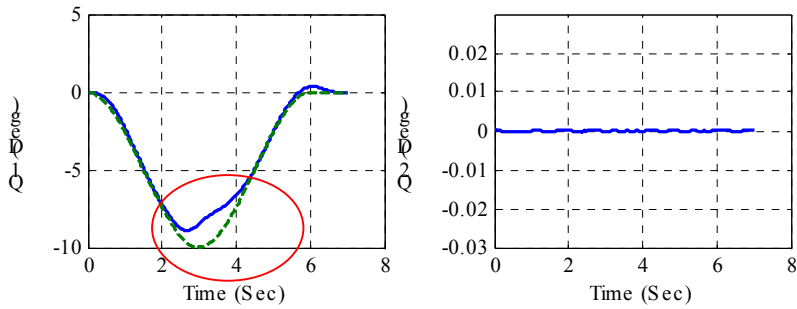
$$\tau_3 = \tau_{g3}(1 - w) + \tau_5(w)$$

$$w_x = \begin{cases} \frac{P_x}{B_{SR\_Max}} & \text{if } P_x \geq 0 \\ \frac{P_x}{B_{SL\_Min}} & \text{if } P_x \leq 0 \\ 1 & \text{if } P_x \geq B_{SR\_Max} \text{ or } P_x \leq B_{SL\_Min} \end{cases}$$

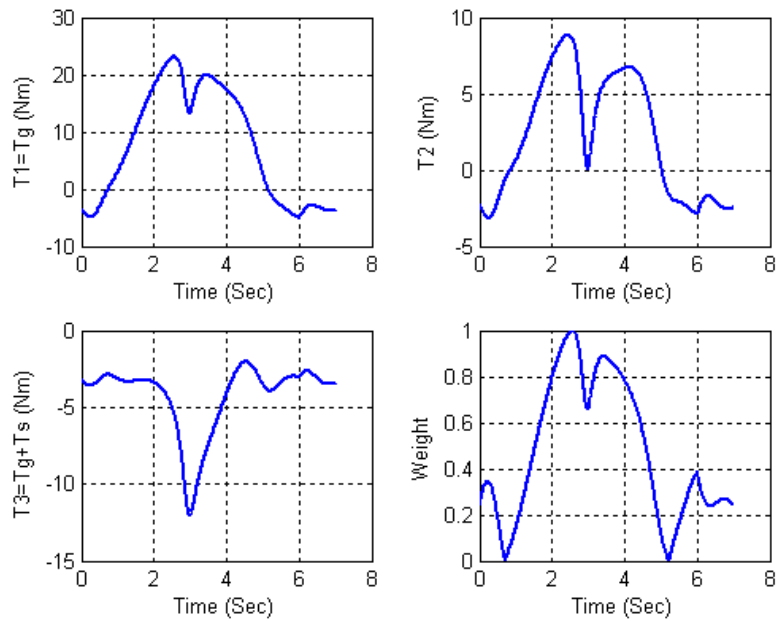
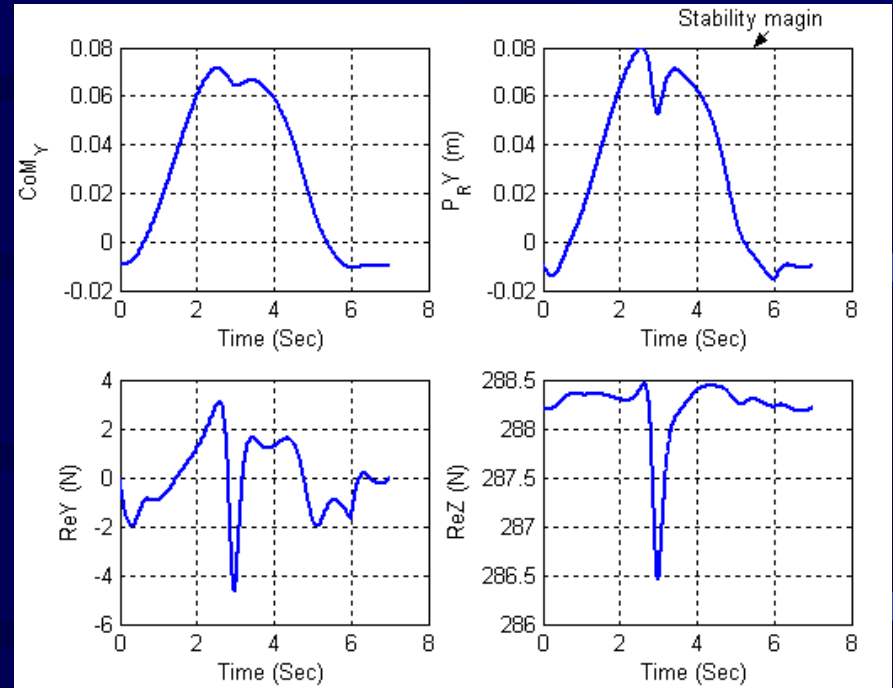
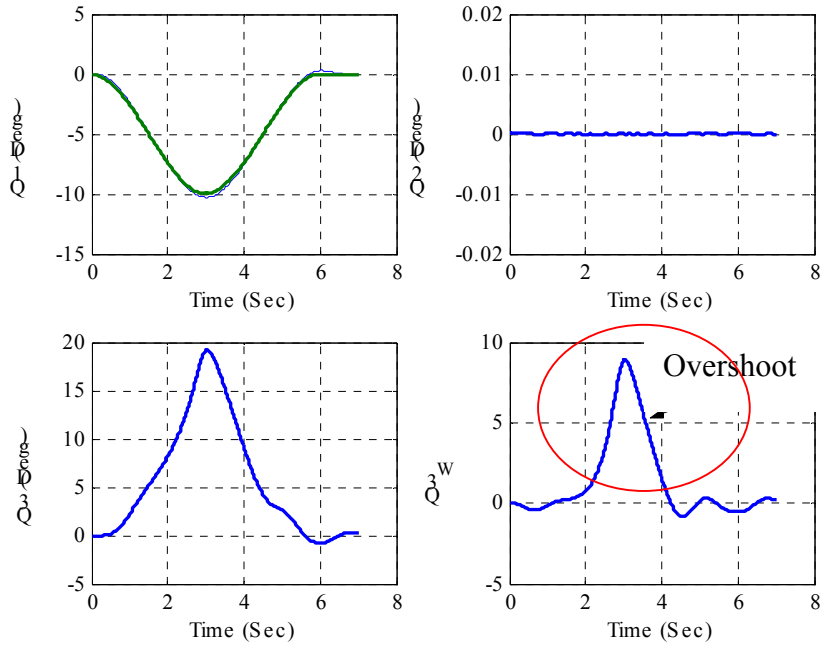
$$w_y = \begin{cases} \frac{P_y}{B_{Fr\_Max}} & \text{if } P_y \geq 0 \\ \frac{P_y}{B_{Ra\_Min}} & \text{if } P_y \leq 0 \\ 1 & \text{if } P_y \geq B_{Fr\_Max} \text{ or } P_y \leq B_{Ra\_Min} \end{cases}$$



ผลจำลองโดยไมควบคุมตำแหน่งของแรงปฏิกิริยา



ผลจำลองการเคลื่อนที่เมื่อ  
ทำการควบคุมตำแหน่งของ  
แรงปฏิกิริยาและการเคลื่อน  
ที่ของข้อเท้าโดยการให้แรง  
บิดไปที่ข้อเท้า



ผลจำลองการเคลื่อนที่เมื่อทำการควบคุมตำแหน่งของแรงปฏิกิริยาโดยให้แรงบิดไปที่สะโพก

# 5. การทดลองระบบควบคุมกับหุ่นยนต์ต้นแบบที่สร้างขึ้นมา

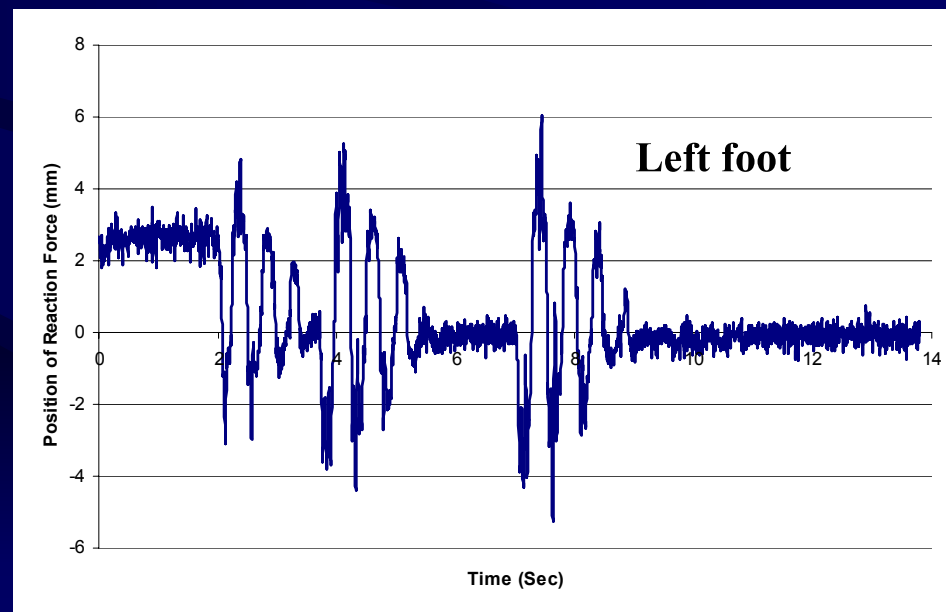
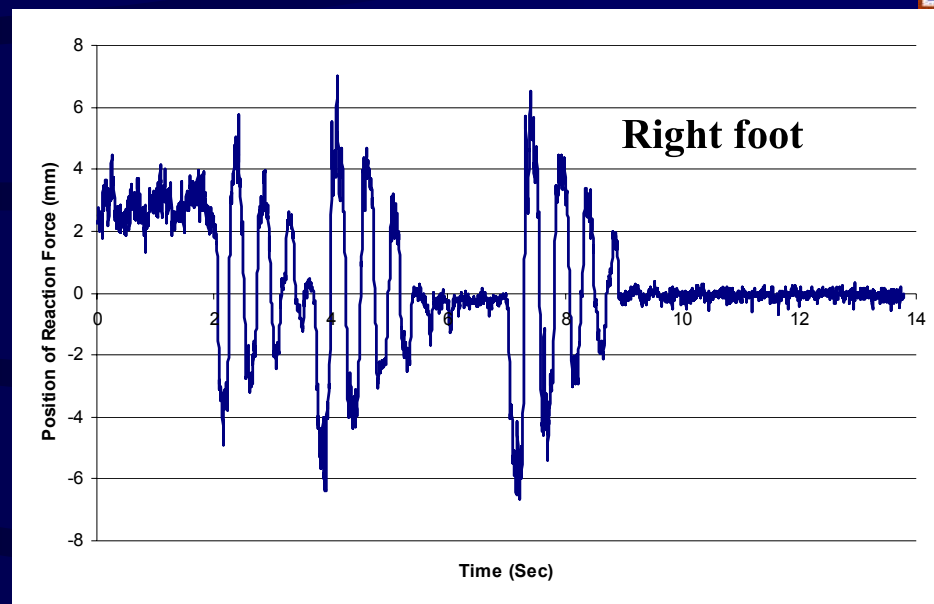
ลักษณะหุ่นยนต์ต้นแบบที่  
ใช้ในการทดลอง

ท่าทางของหุ่นยนต์  
ก่อนเริ่มทดสอบ

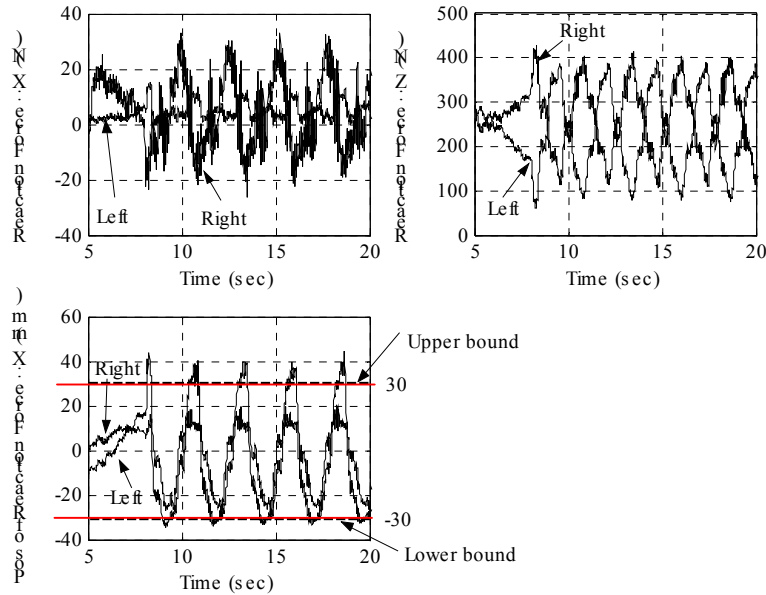


## 5.1 การทดลองปรับตำแหน่งของแรงปฏิกิริยา

ผลการทดลองการปรับ  
ตำแหน่งของแรงปฏิกิริยา

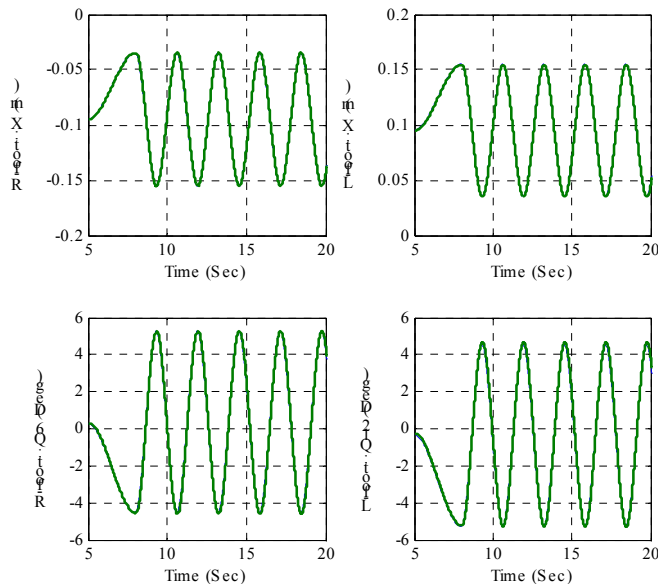


# 5.2 การทดลองการรักษาสมดุลโดยการโยกตัวไปและกลับ

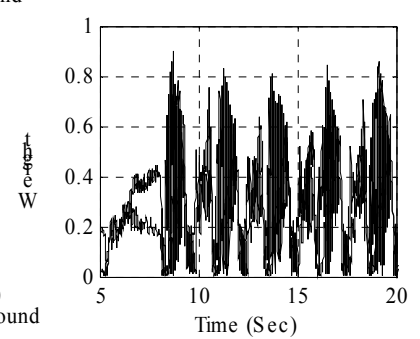
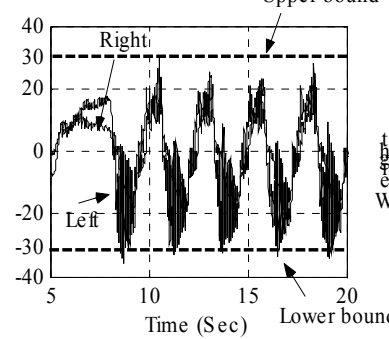
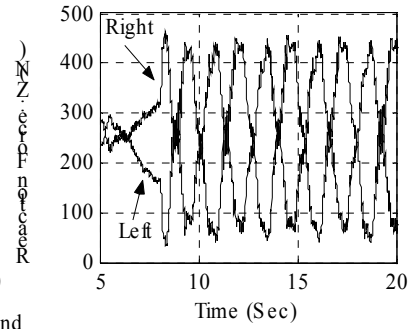
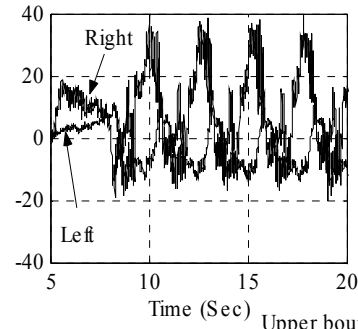
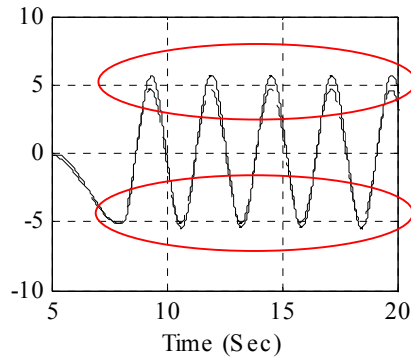
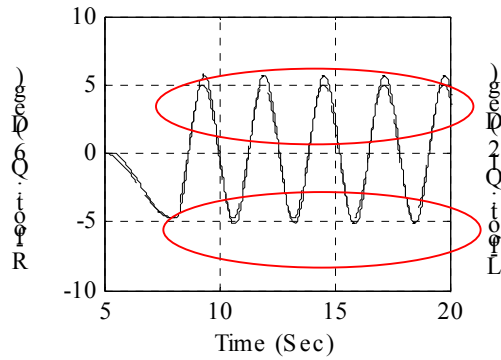
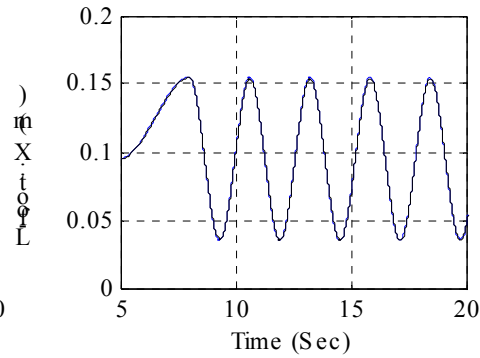
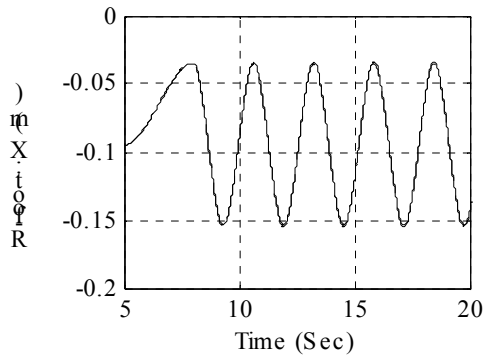


ระยะทางไปกลับ 0.06 เมตร  
ภายในระยะเวลา 1.3 วินาที

การทดลองการโยกตัว  
ไปกลับ







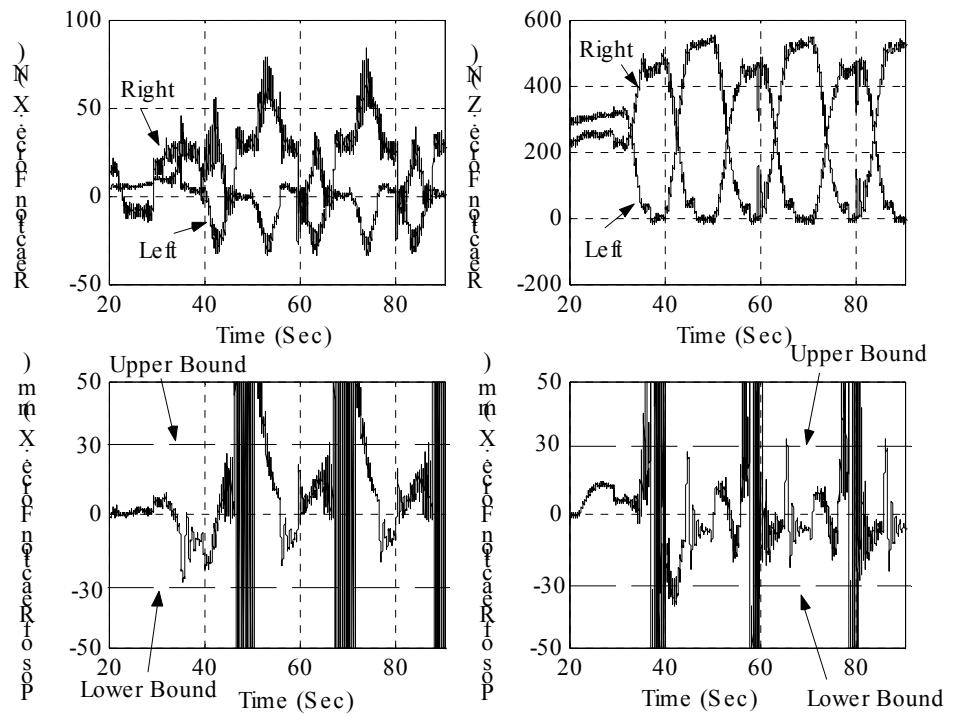
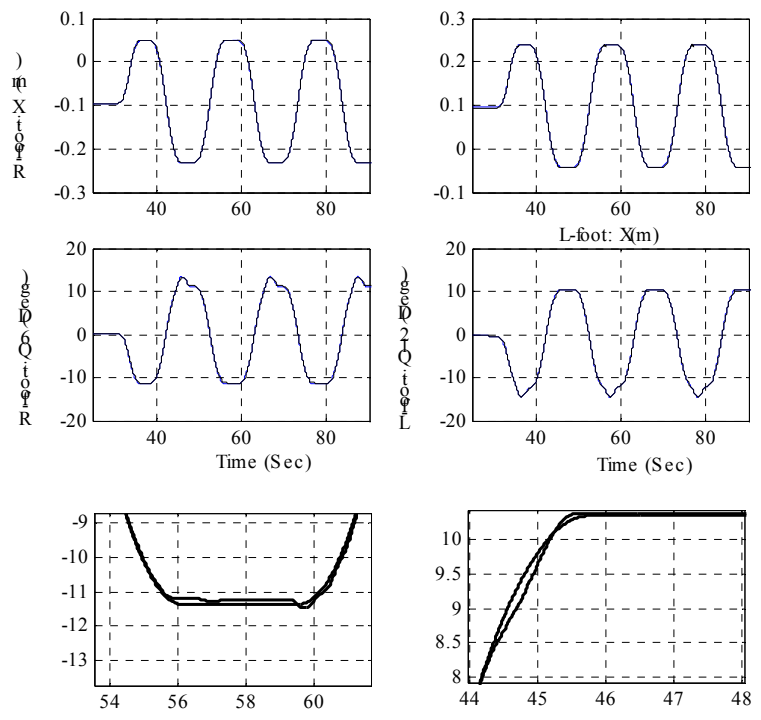
ผลการทดลองโยกตัวไปกลับโดยการ  
ควบคุมตำแหน่งของแรงปฏิกิริยา

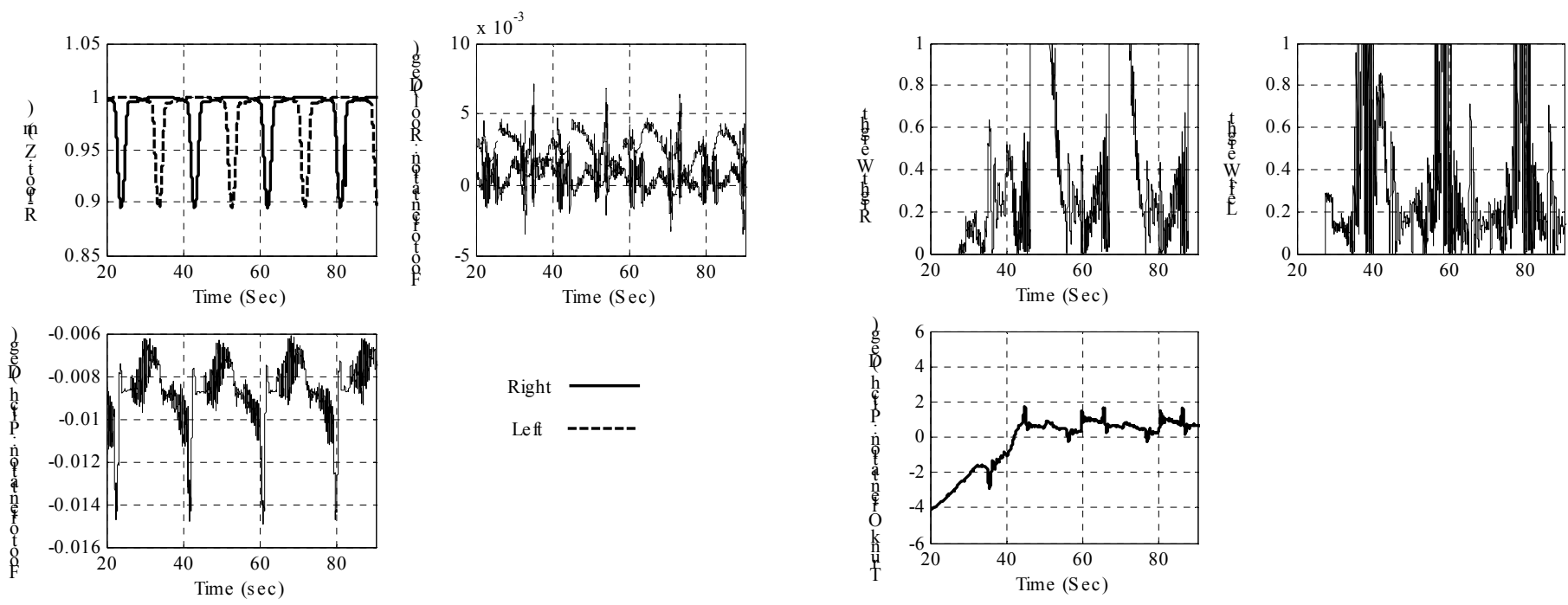
## 5.3 การทดสอบการรักษาสมดุลง่ายอยู่กับที่

### ช่วงการควบคุมแบ่งเป็นสามขั้น

1. ช่วงถ่ายเทน้ำหนัก ผลการทดลอง 1
2. ช่วงยกเท้าลอย ผลการทดลอง 2
3. ช่วงกำหนดตำแหน่งการวางเท้า

ในหนึ่งรอบของการย่อเท้าใช้เวลาในการเคลื่อนที่ 14 วินาที  
ด้วยระยะทาง 0.14 เมตร





## 6. สรุป

1. หุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์เป็นหุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยอาศัยการเดินเลียนแบบมนุษย์ เนื่องจากพื้นที่ฐานไม่ถูกยึดอยู่กับที่ ทำให้มีโอกาสล้มลงได้ตลอดเวลา
2. เสถียรภาพของหุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์เกิดขึ้นเมื่อจุดผลรวมของ โมเมนตัมที่เกิดจากแรงเฉื่อย (Inertia force) รวมถึง โมเมนตัมที่เกิดจากอัตราเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity) ตกอยู่ในพื้นที่รองรับของฝ่าเท้าซึ่งเป็นจุดเดียวกับจุดผลรวมของแรงปฏิกิริยา
3. ในการควบคุมการรักษาสมดุลของหุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์ทั้งในขณะเคลื่อนที่และหยุดนิ่งจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของแรงปฏิกิริยาเพื่อทำการควบคุมไม่ให้เคลื่อนที่เกินขอบเขตพื้นที่ของฝ่าเท้า
4. การควบคุมตำแหน่งของแรงปฏิกิริยาสามารถทำได้จากการให้แรงบิดไปที่ข้อเท้าซึ่งสามารถโยกย้ายตำแหน่งของแรงปฏิกิริยาได้โดยตรง และการให้แรงบิดที่สะโพกซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราเร่งเชิงมุมของระบบมากที่สุดแต่มีโอกาสส่งผลของการเกิด Overshoot ที่มุมการเอียงของลำตัวหุ่นยนต์

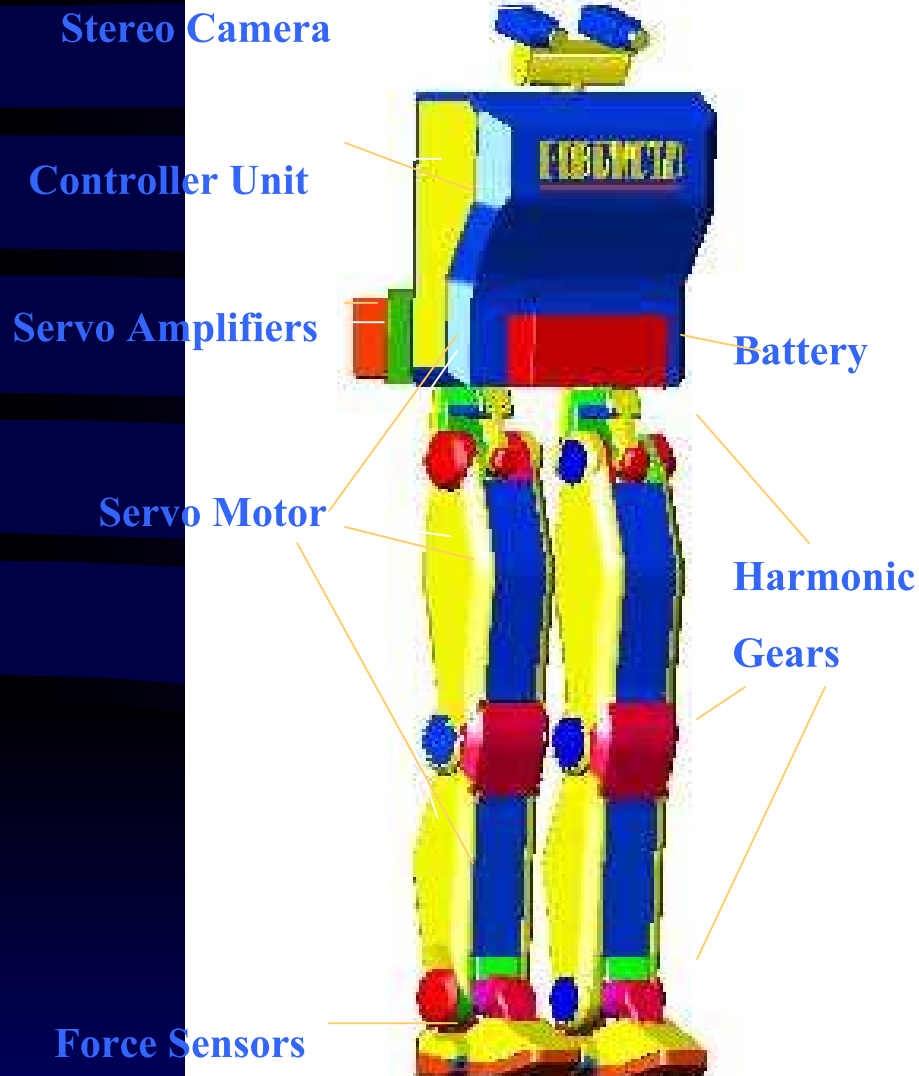


5. การควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ และการควบคุมตำแหน่งของแรงปฏิกิริยา โดยให้แรงบิดไปที่ข้อเท้าที่เดียวจะไม่สามารถควบคุมตำแหน่งดังกล่าวพร้อมกันได้ แต่สามารถใช้ค่านำหนักในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งดังกล่าว โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ค่านำหนักแบบเชิงเส้น โดยทั้งผลการจำลองและผลการทดลองกับหุ่นยนต์ต้นแบบพบว่าหุ่นยนต์สามารถรักษาได้ทั้งเสถียรภาพและตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของข้อต่อที่ข้อเท้า

# หุ่นยนต์ชีวแมนนอยด์ที่สร้างขึ้นที่ฟิโบบั



# ลักษณะของหุ่นยนต์ต้นแบบที่สร้างขึ้น



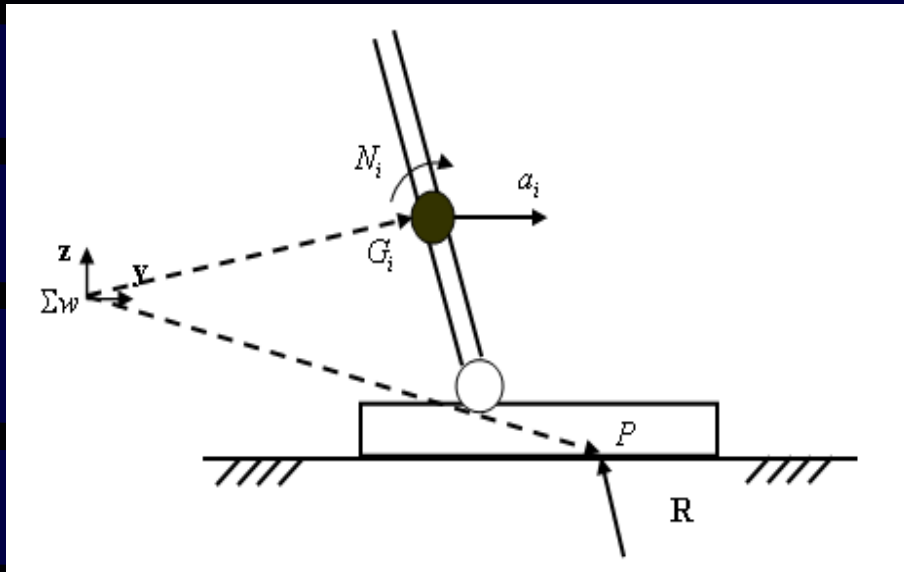
Height	1450 mm.
Width	305 mm.
Depth	344 mm.
Weight	53 kg.
Leg DOF	2 x 6
Actuator	Harmonic Gear + Pancake Servo ,DC Servo
Gear Housing Material	Aluminum
Link Material	Aluminum
Link Cover	Fiber Glass
Sensor	Incremental Encoder , Force Sensor , Inclinometer , CCD Camera ,
CPU	Pentium III 600 X 2
Motion Controller	4 Axis Motion Controller x 4
Servo Amplifier	
Leg	PWM Servo Amplifier x 12
Pantilt	PWM Servo Amplifier x 3
Battery	12 V 2Ah x 5



# หัวข้อที่นำเสนอ

1. เสถียรภาพของหุ่นยนต์อีวีแมนนอยด์
2. ระบบควบคุมการเดินแบบพลศาสตร์
3. การทดสอบการทำงานของระบบควบคุมแบบพลศาสตร์

# 1. เสถียรภาพของหุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์ ( นำเสนอโดย M. Vukobratovic )



สมการพลศาสตร์ของหุ่นยนต์สองขาสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\overline{w}p \otimes \overline{R} + \sum \overline{w}G_i \otimes m_i \overline{g} = \sum \overline{N}_i + \sum \overline{w}G_i \otimes m_i \overline{a}_i$$

$\overline{R}$  คือ เวกเตอร์ของแรงปฏิกิริยาระหว่างเท้ากับพื้น

$m_i$  คือ มวลของลิงค์ที่  $i$

$\overline{w}p$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของแรงปฏิกิริยาเทียบกับพิกัดอ้างอิง  $\sum w$

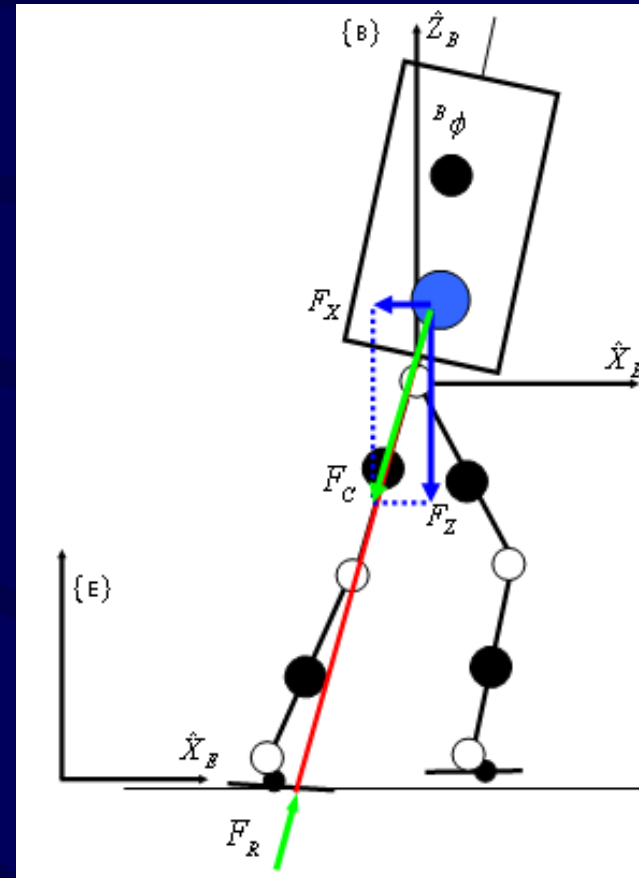
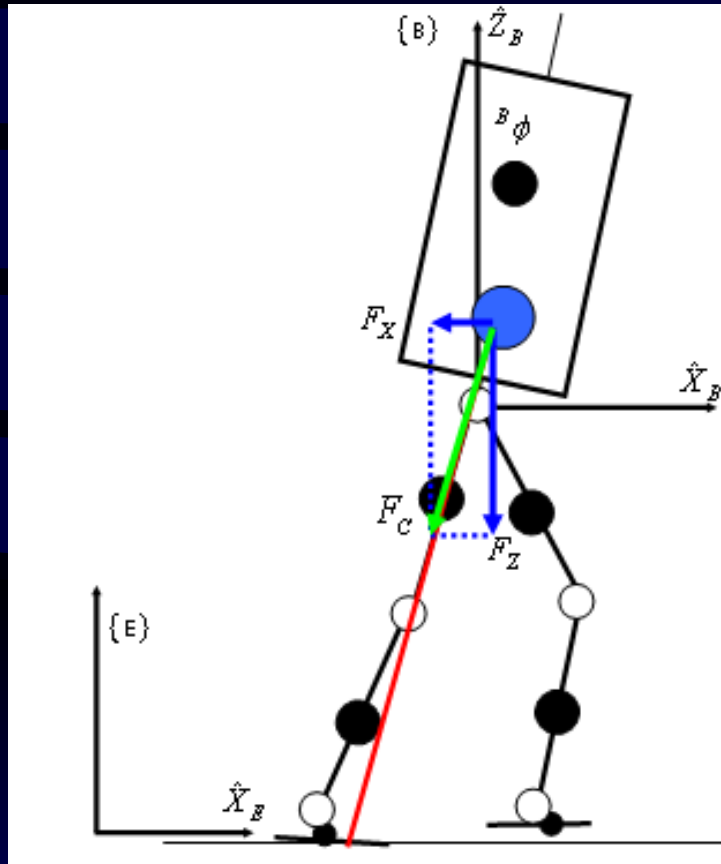
$\overline{w}G_i$  คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลที่  $i$  เทียบกับพิกัดอ้างอิง  $\sum w$

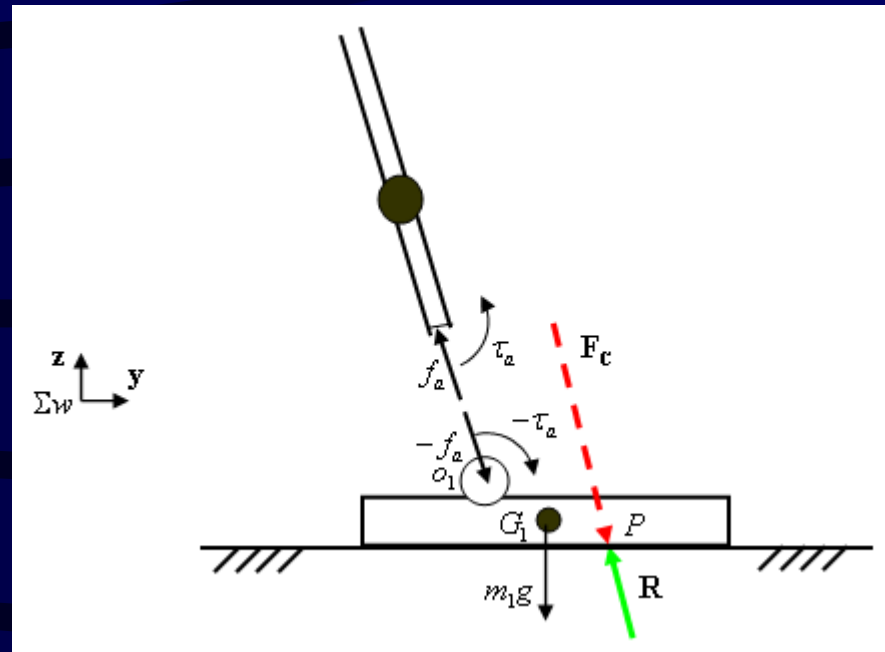
$m_i \overline{a}_i, \overline{N}_i$  คือ แรงและโมเมนต์ความเฉื่อยที่จุดศูนย์กลางมวล

$${}^c I \dot{\omega} + \omega \times {}^c I \omega$$



# แรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างเท้ากับพื้น

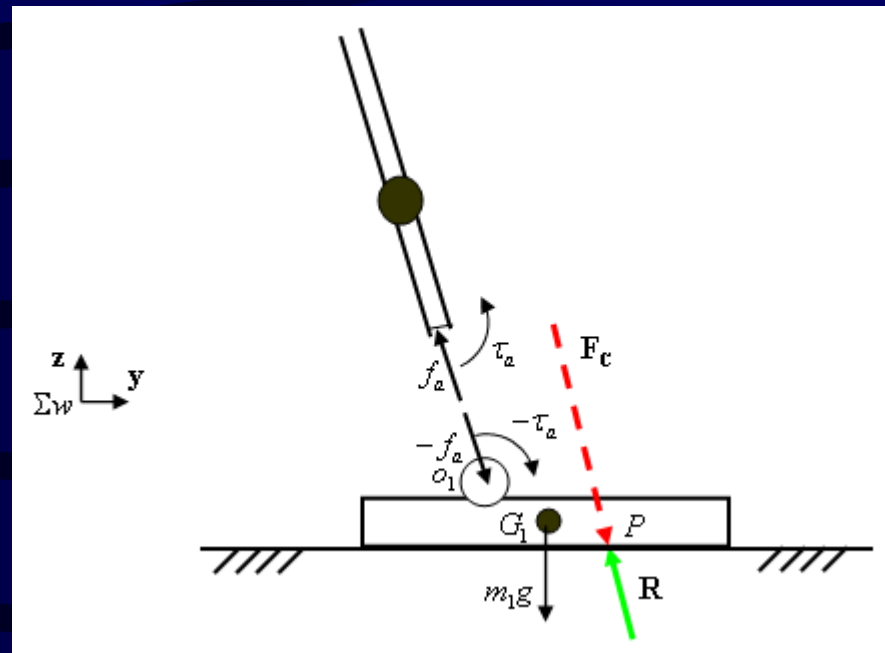




สมการพลศาสตร์ของแท่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\overline{wP} \otimes \overline{R} + \overline{wG_1} \otimes m_1 \overline{g} - \overline{\tau_a} - \overline{wO_1} \otimes \overline{f_a} = \overline{N_1} + \overline{wG_1} \otimes m_1 \overline{a_1}$$

โดยที่  $\overline{f_a}$ ,  $\overline{\tau_a}$  คือ แรงและแรงบิดที่ข้อเท้า



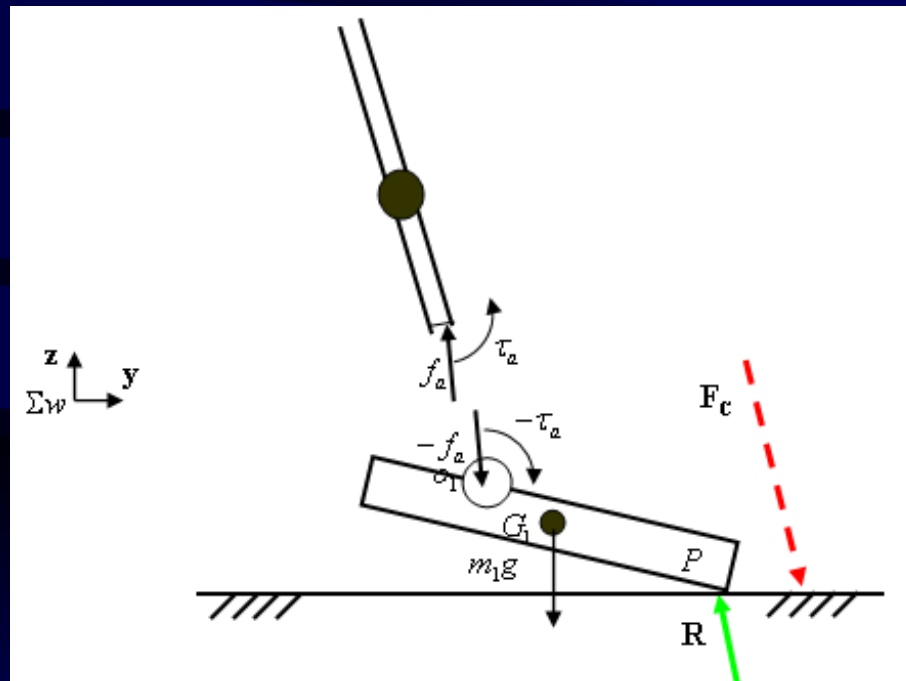
สมการพลศาสตร์ของแท่งในกรณีที่แท่งไม่เกิดการเคลื่อนที่ใดก็ได้แก่

$$\overline{\mathbf{w}}_P \otimes \overline{\mathbf{R}} + \overline{\mathbf{w}}_{G_1} \otimes m_1 \overline{\mathbf{g}} - \overline{\boldsymbol{\tau}}_a - \overline{\mathbf{w}}_{O_1} \otimes \overline{\mathbf{f}}_a = \mathbf{0}$$

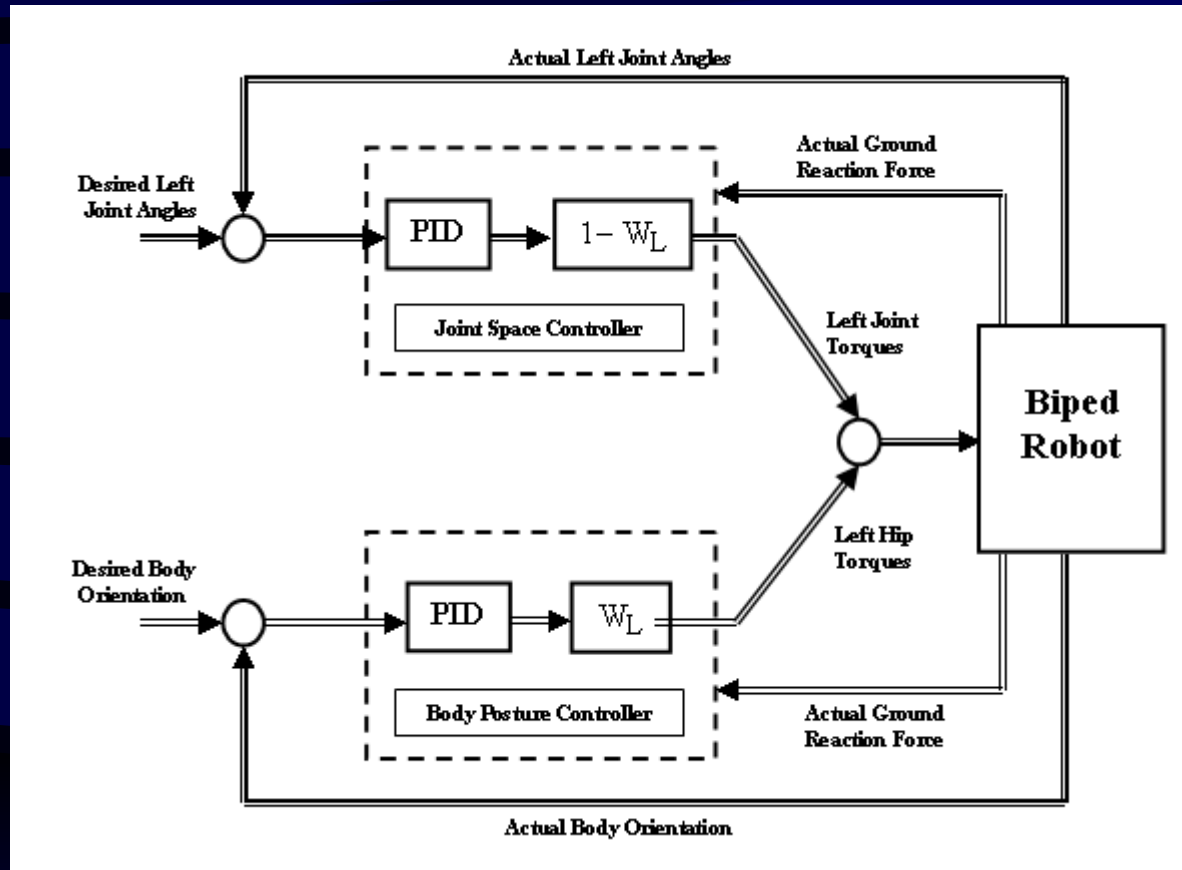
เมื่อพิจารณาจุด **P** เป็นจุดหมุน สมการพลศาสตร์ของแท่ง  
ในกรณีที่แท่งไม่เกิดการเคลื่อนที่ใดก็ได้แก่

$$\overline{\mathbf{p}}_{G_1} \otimes m_1 \overline{\mathbf{g}} - \overline{\boldsymbol{\tau}}_a - \overline{\mathbf{p}}_{O_1} \otimes \overline{\mathbf{f}}_a = \mathbf{0}$$

ถ้าแนวของแรง  $F_c$  ไม่ตัดผ่านพื้นที่รองรับของเท้า  
จะทำให้เท้าเกิดการหมุนทันที

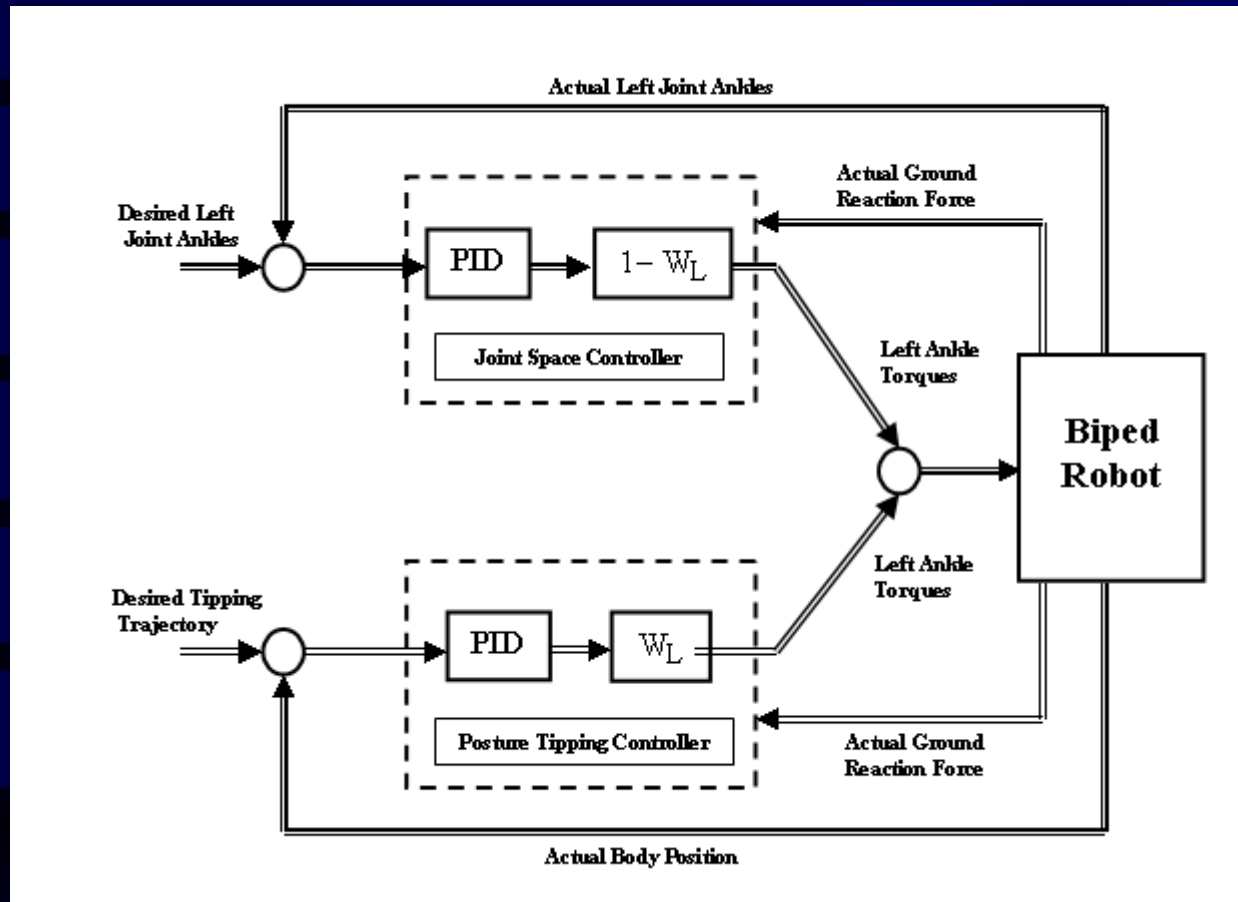


Postural unstable

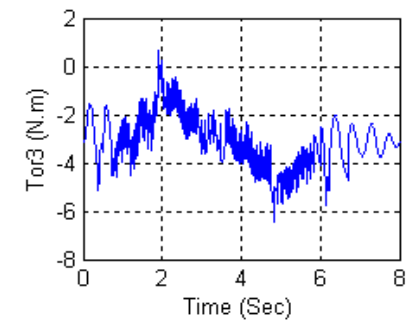
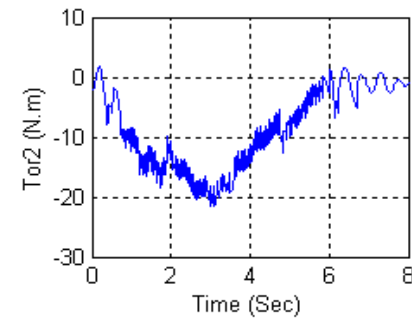
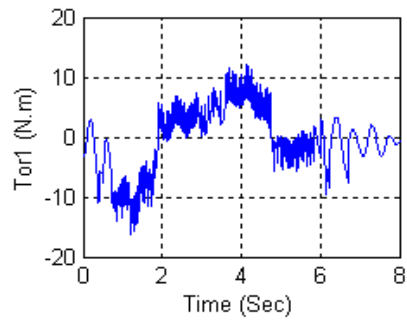
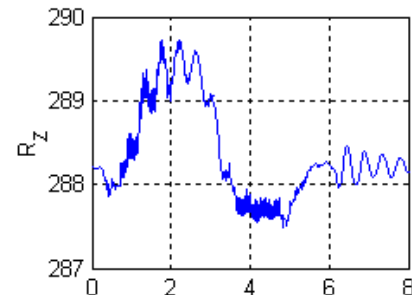
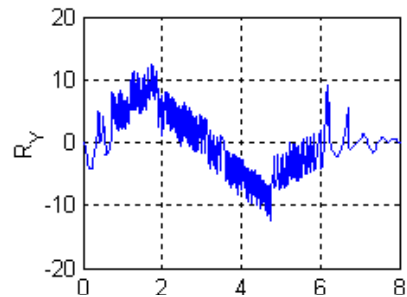
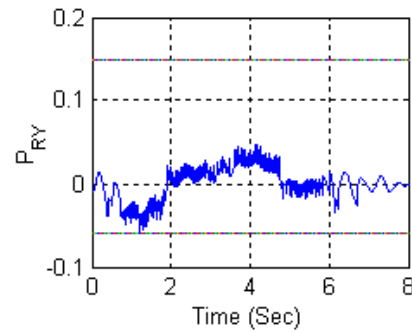
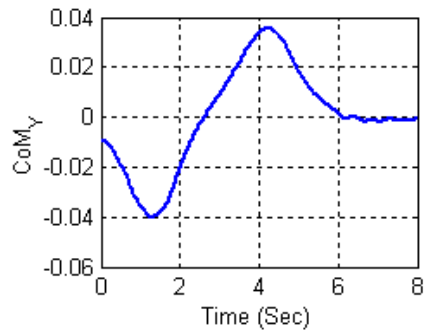


$$W_L = \frac{R_L}{R_L + R_R}$$

$$W_R = \frac{R_R}{R_R + R_L}$$





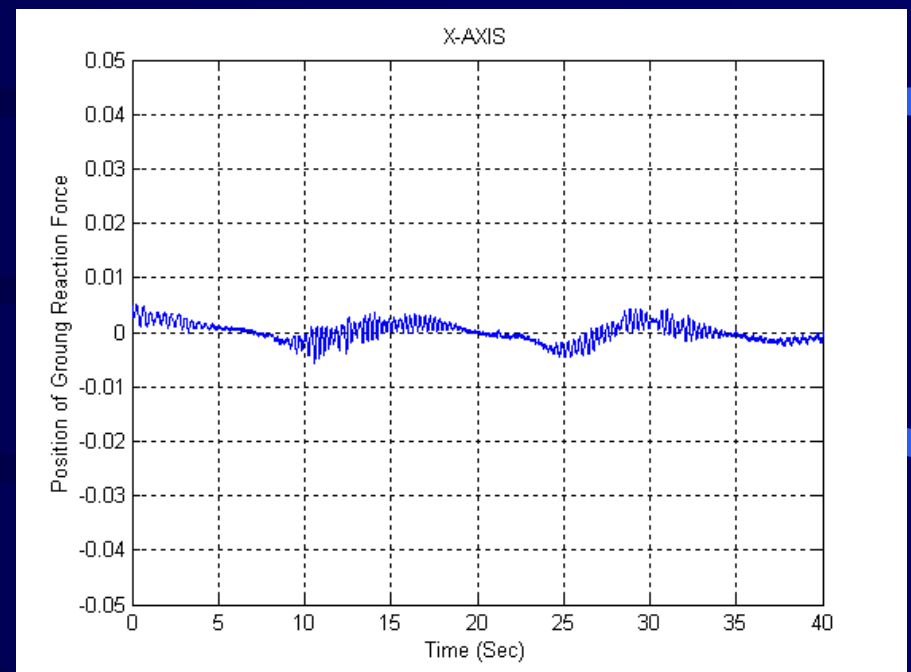
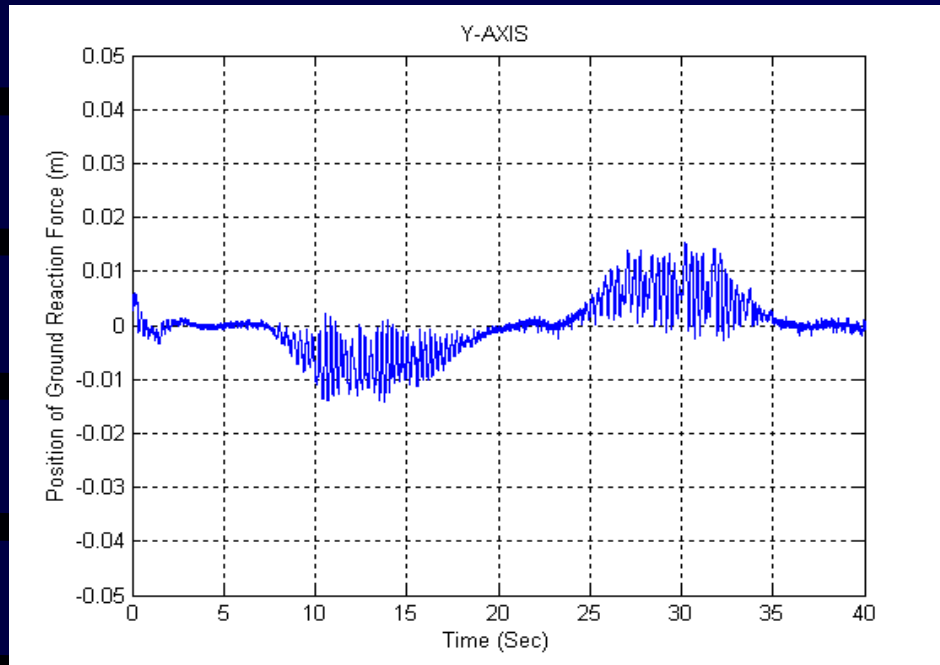


**Control position of  
ground reaction force**

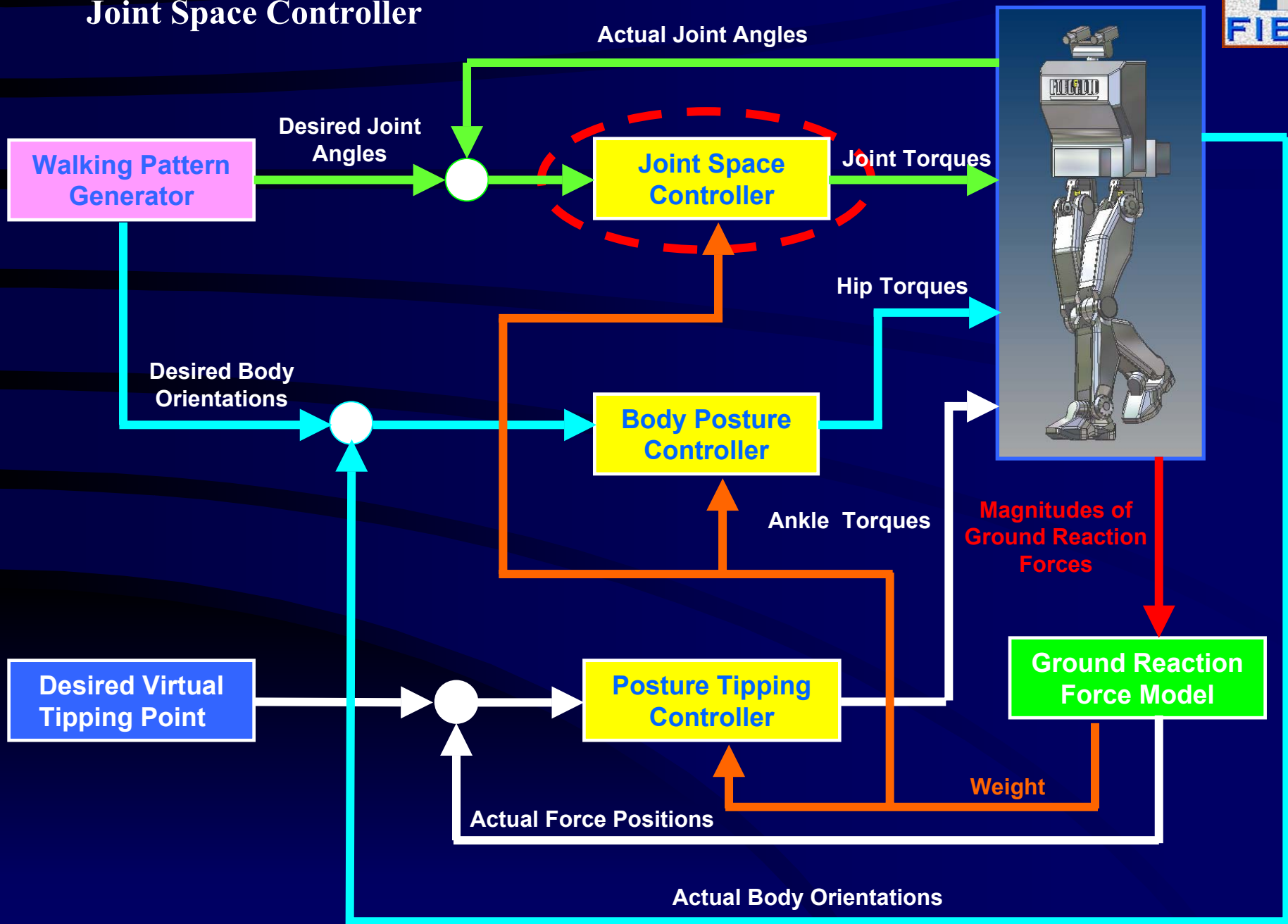
**VEDIO 1**

**VEDIO 2**

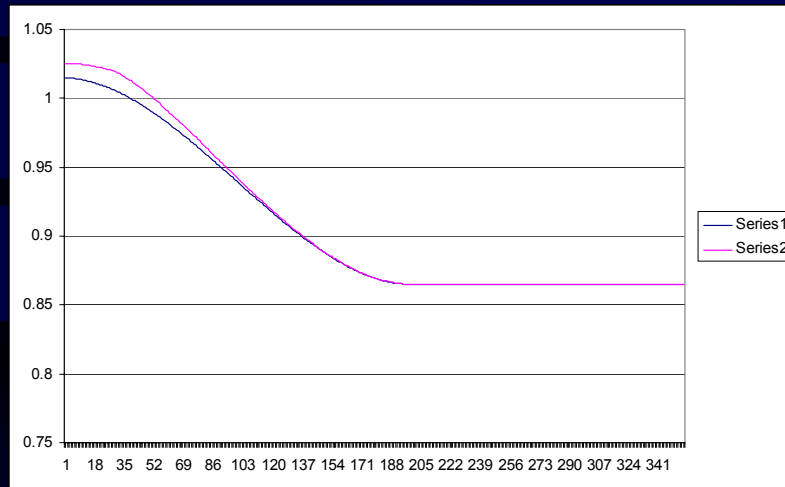
# ผลการทดลองการย่อขนาด



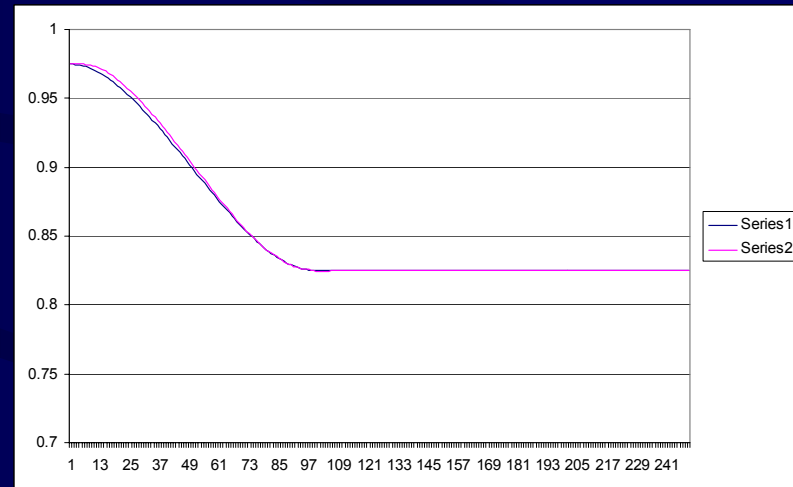
# Joint Space Controller



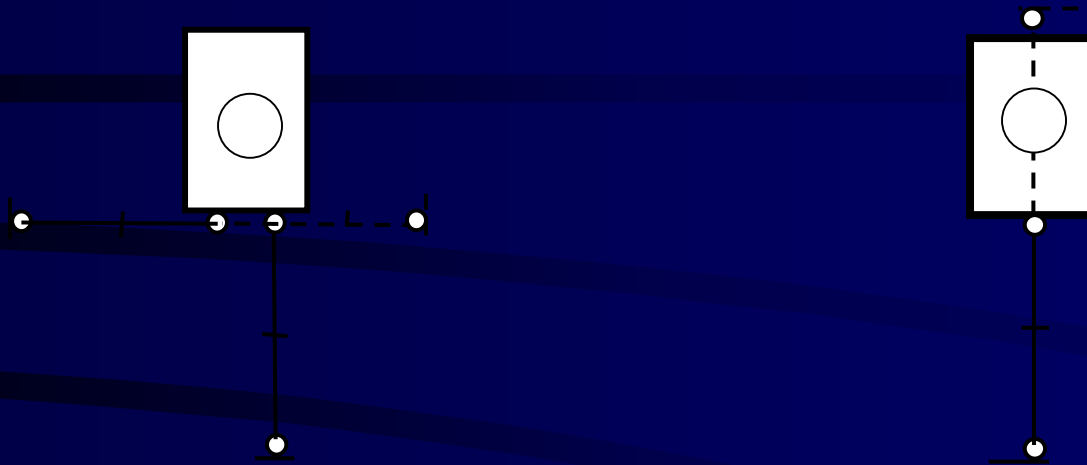
## Joint Controller with singular configuration

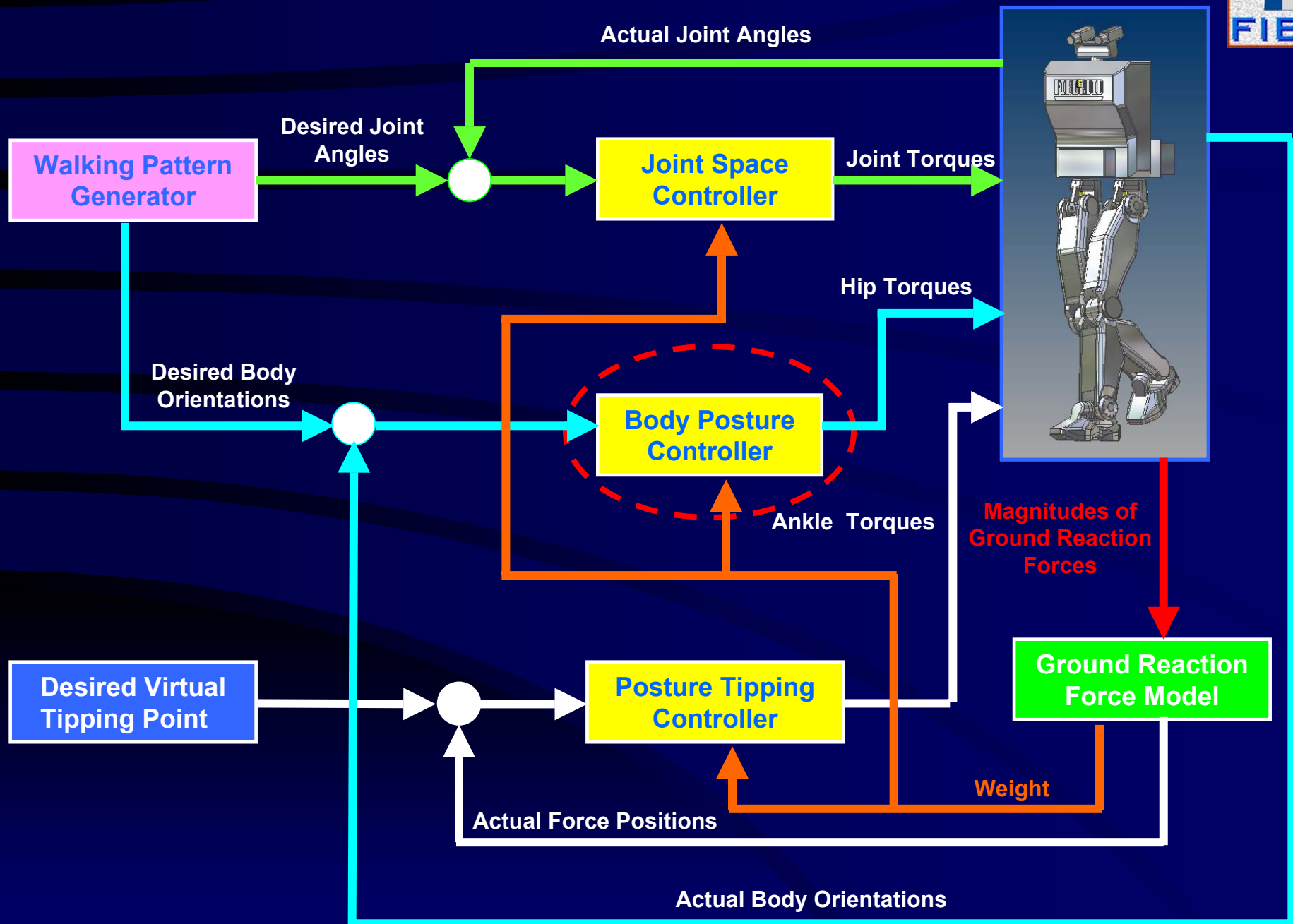


## Joint Controller with singular avoidance configuration

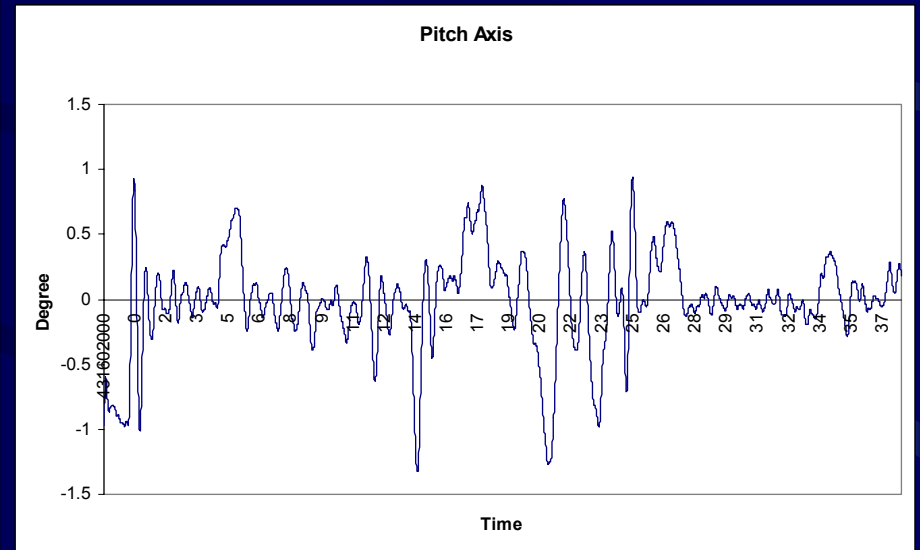
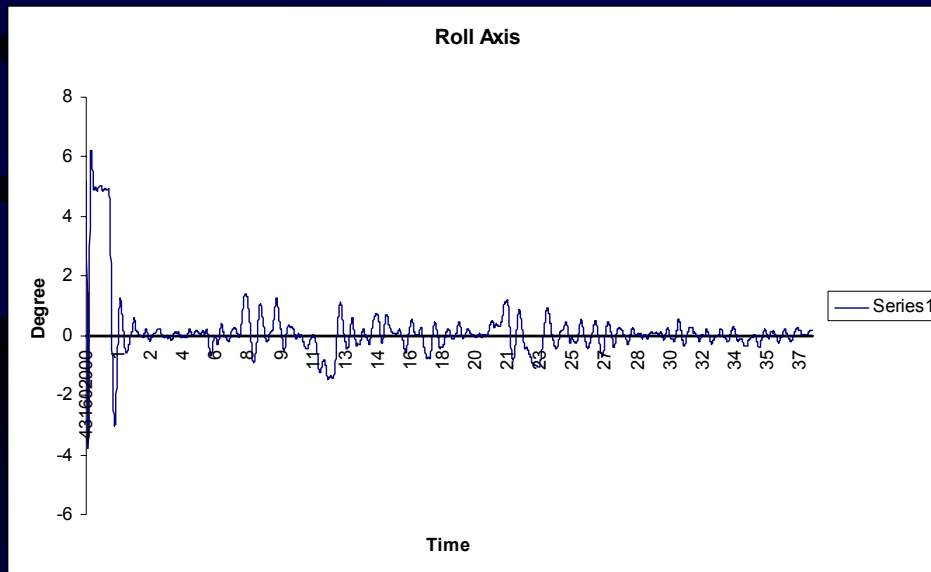


# Singular Configuration



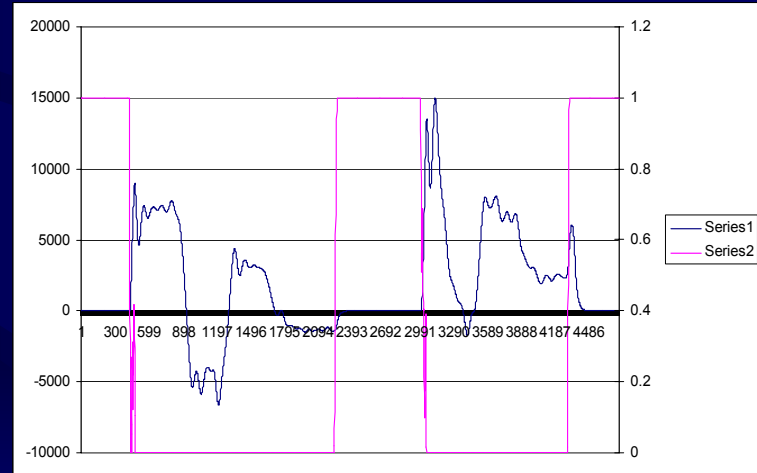
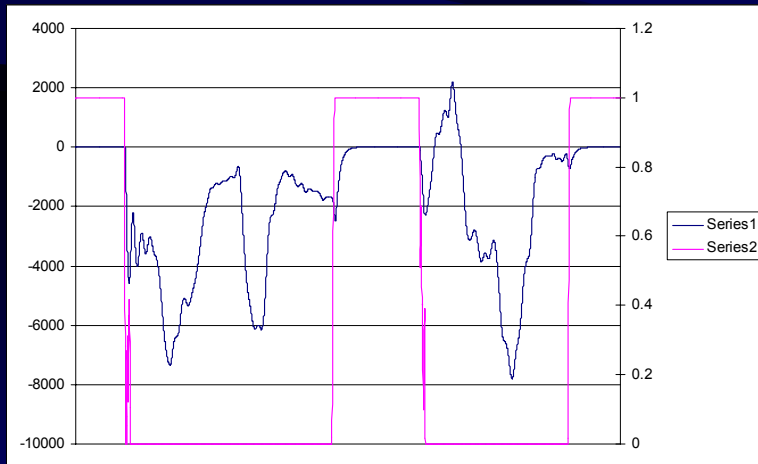
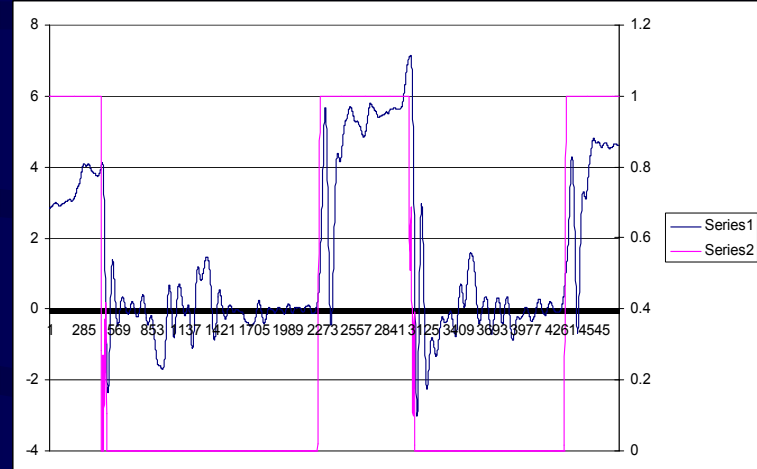
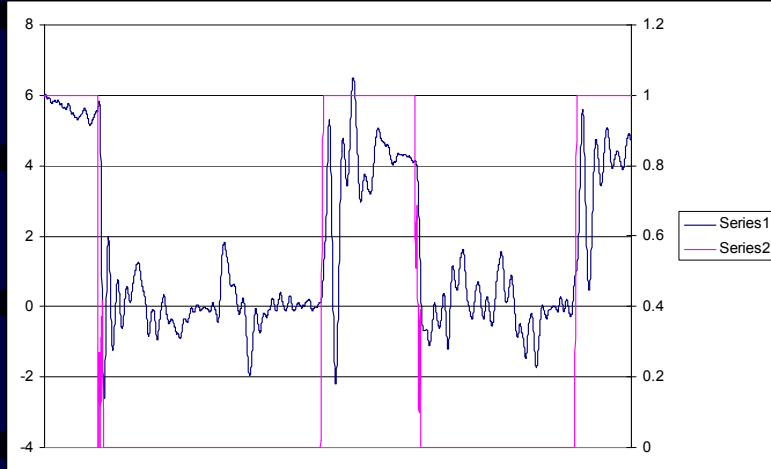


# Body Posture Controller



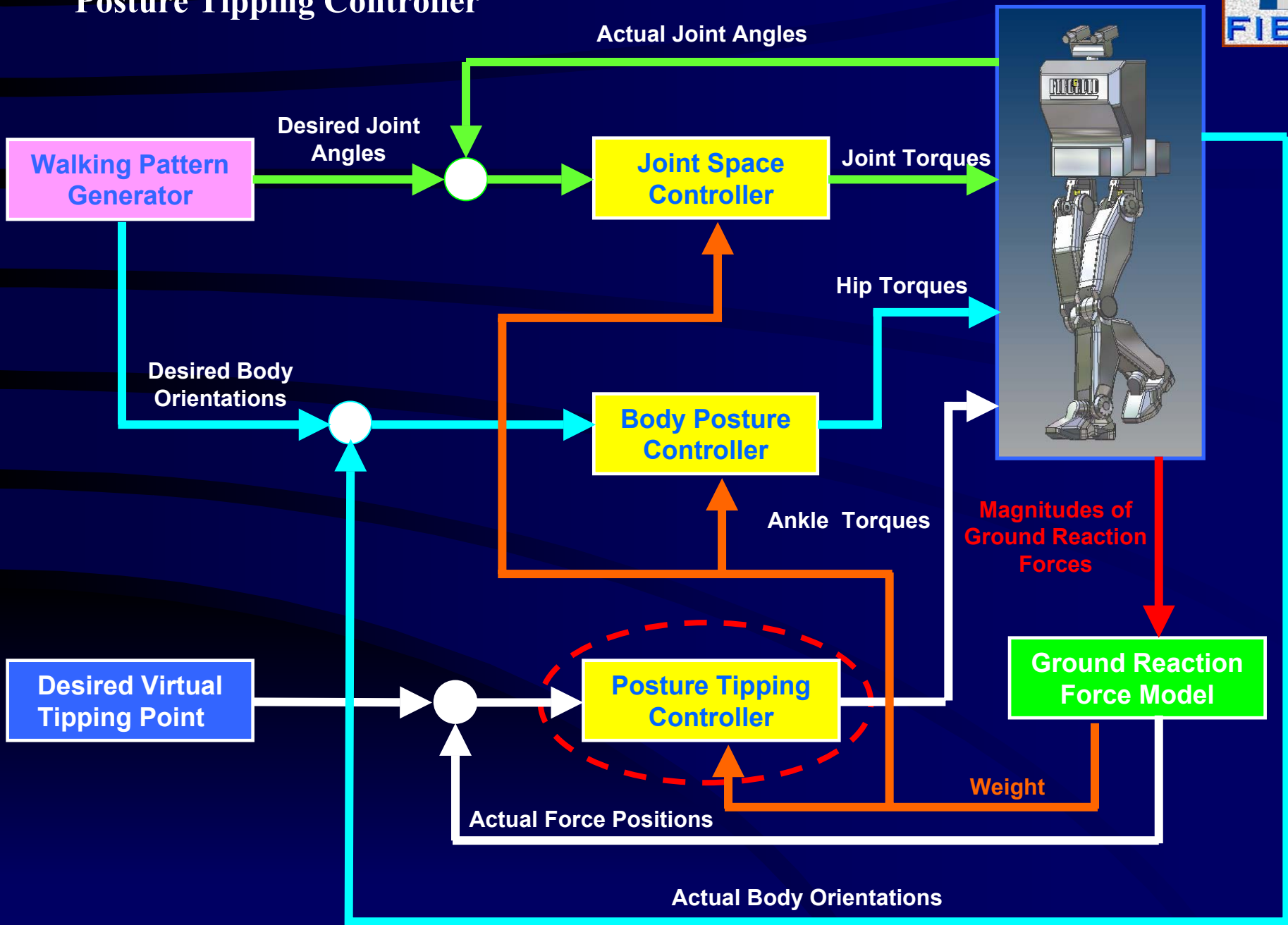
# Body Orientation and Joint Control

$$W = \frac{F_{max} - F_z}{F_{max}}$$

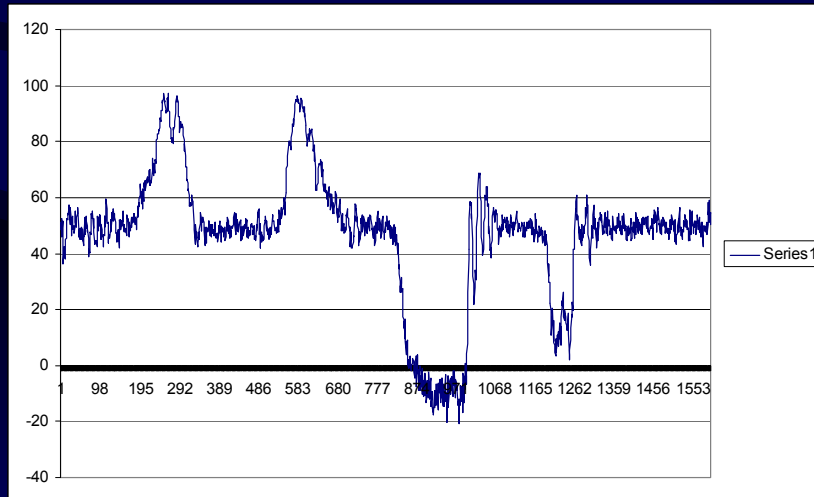
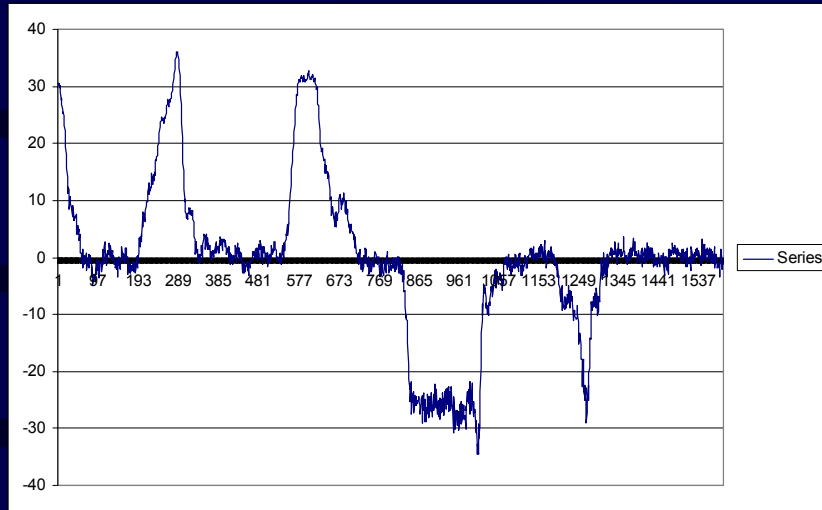




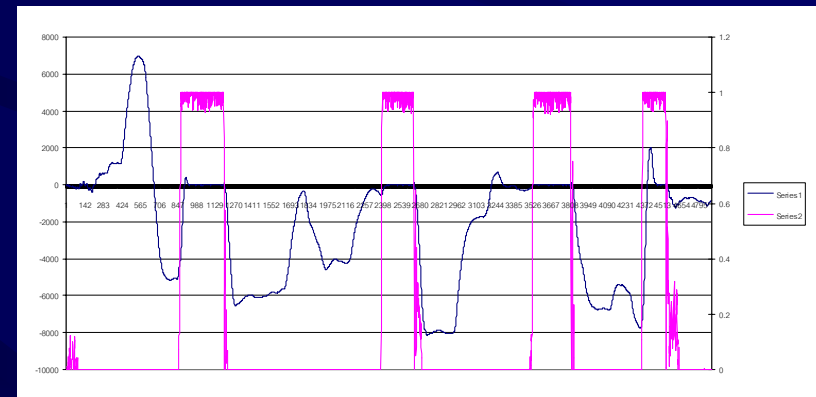
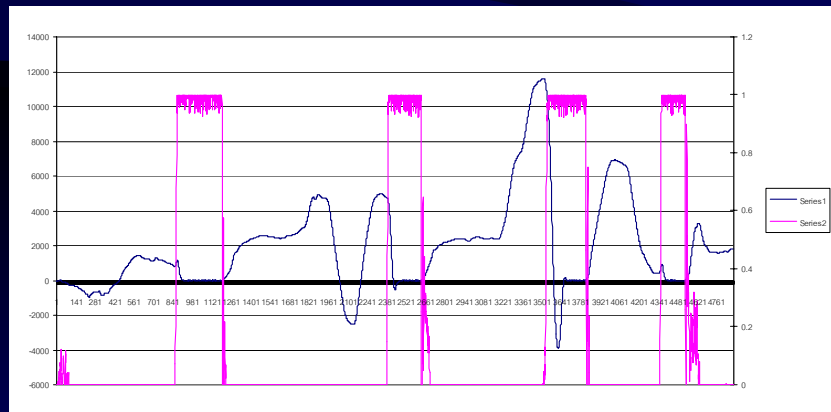
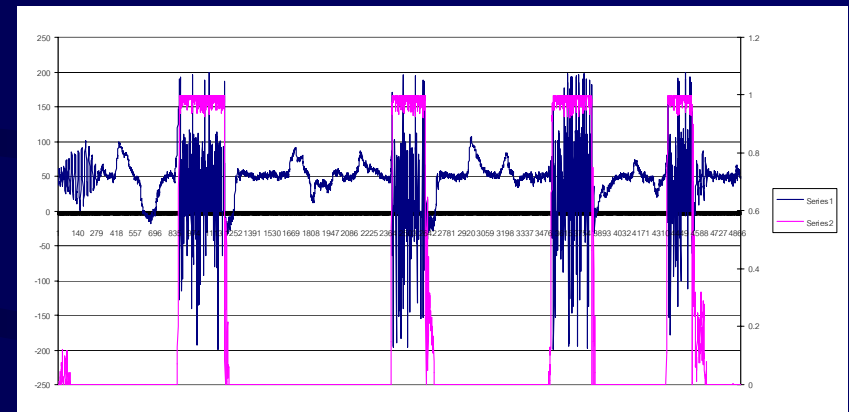
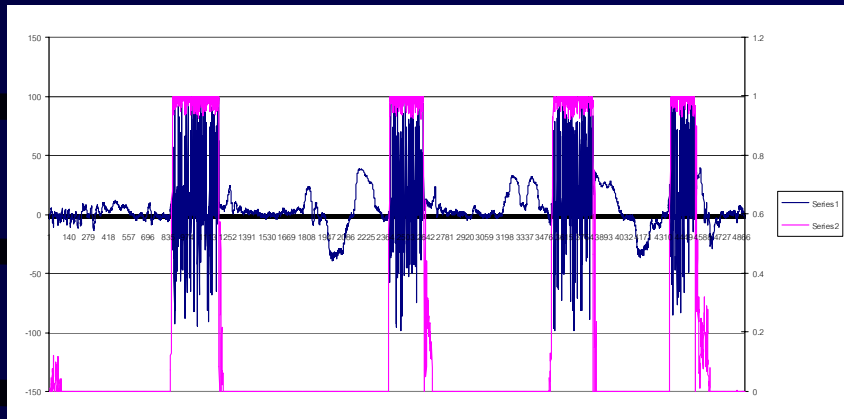
# Posture Tipping Controller



# Position of Force Control



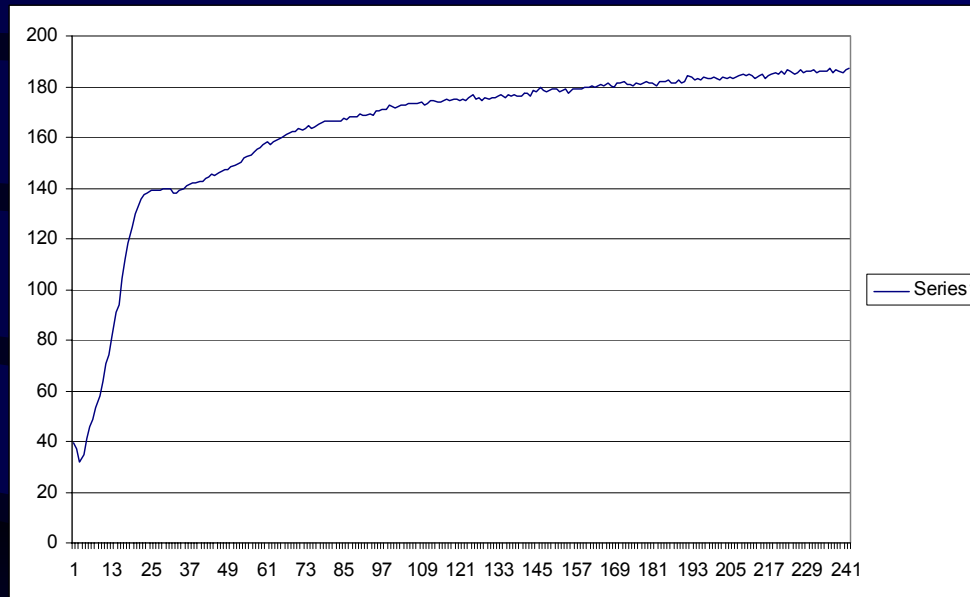
# Position of Force and Joint Control



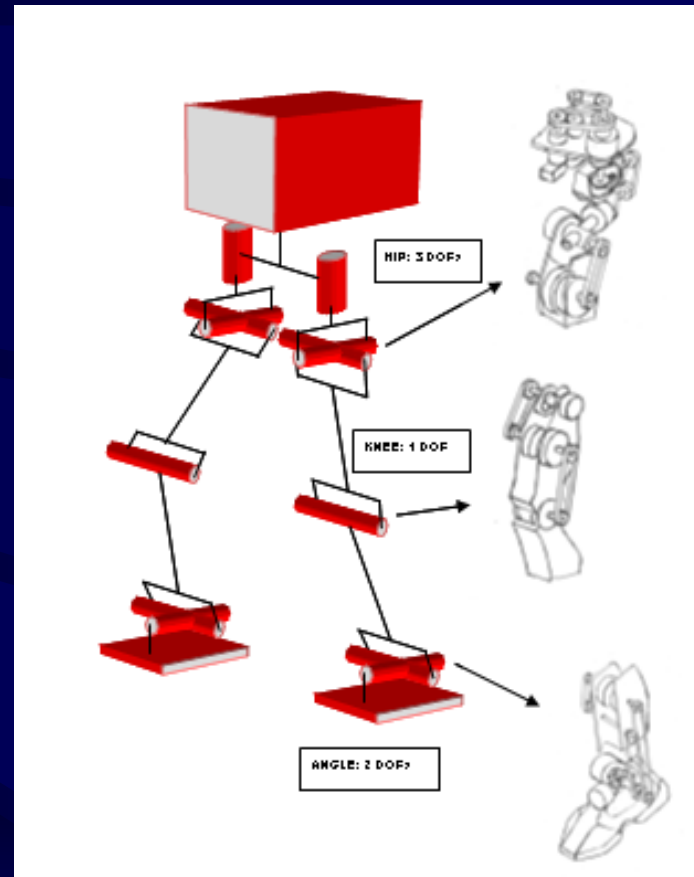
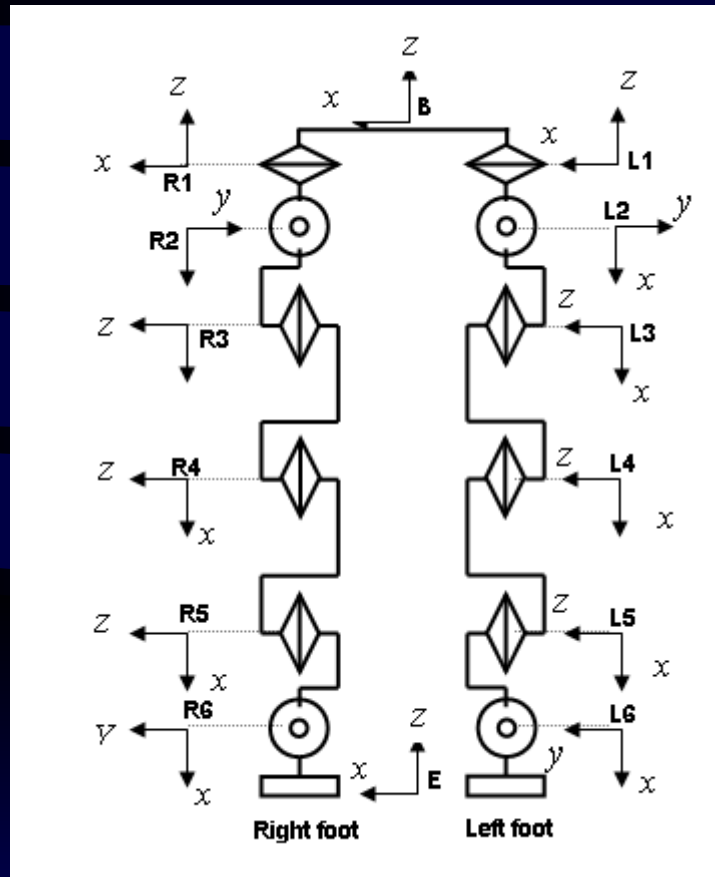
Postural Unstable: 1

Postural Unstable: 2

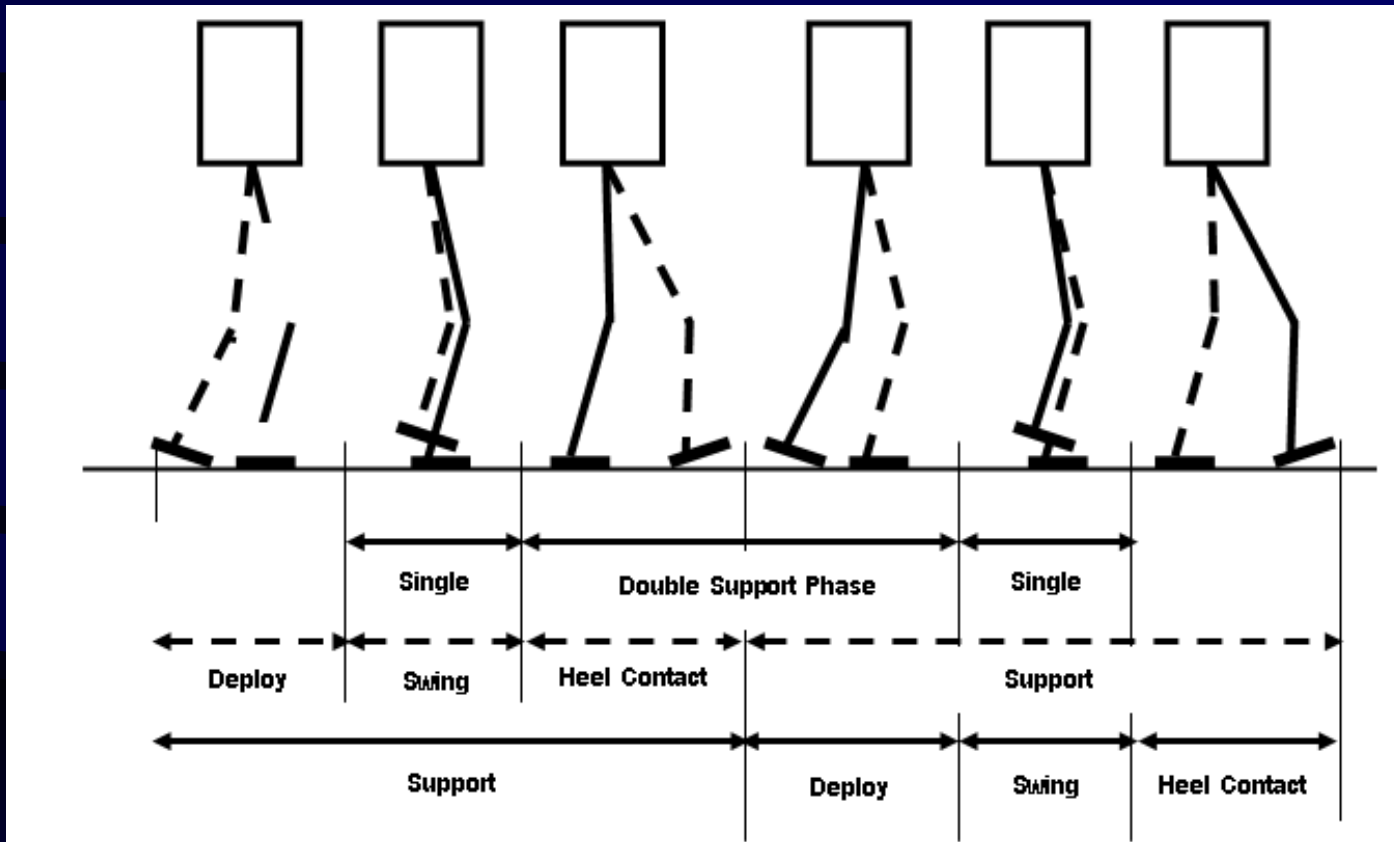
Postural Unstable: 3



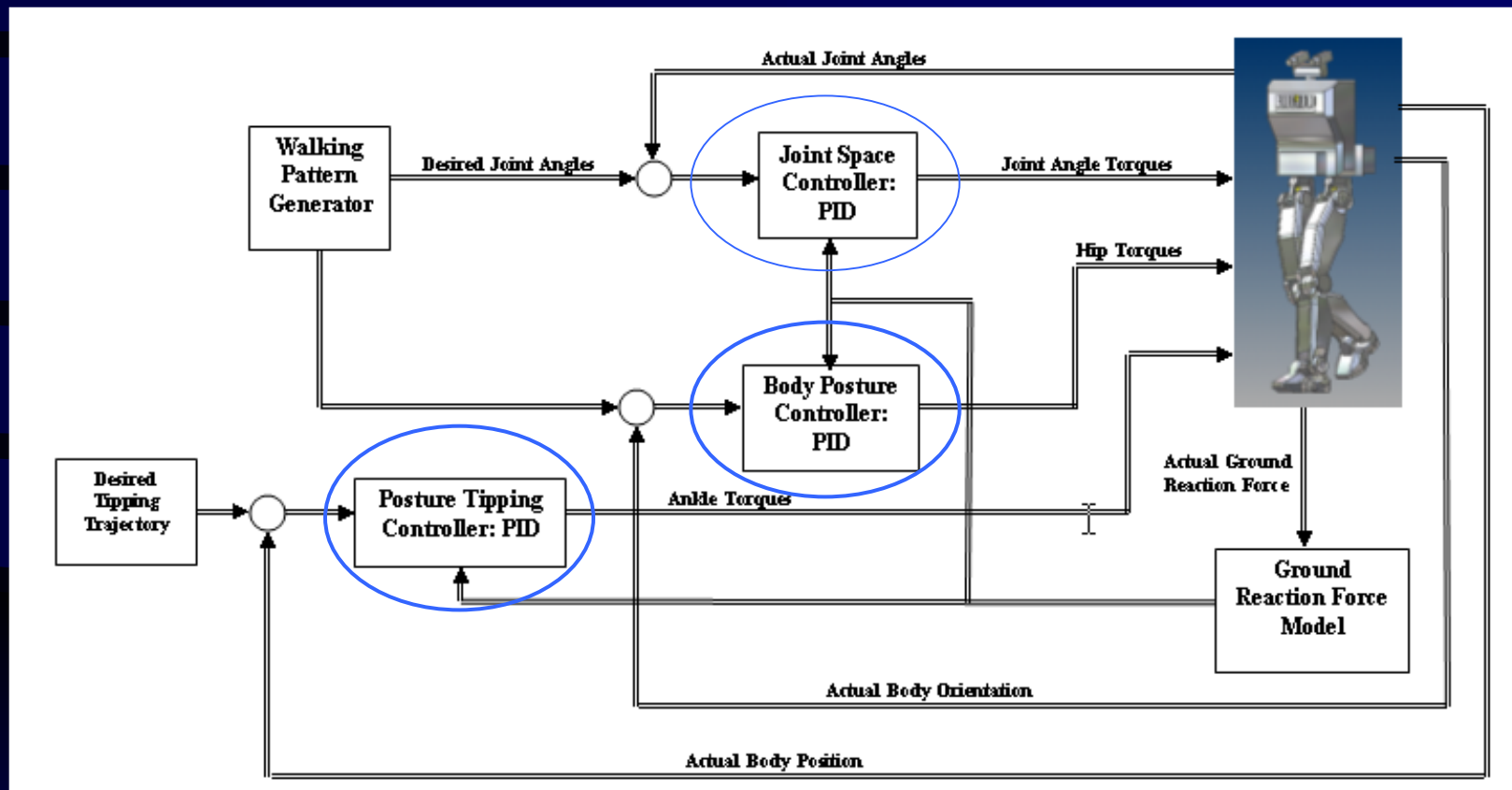
# Frame assignments for humanoid robot



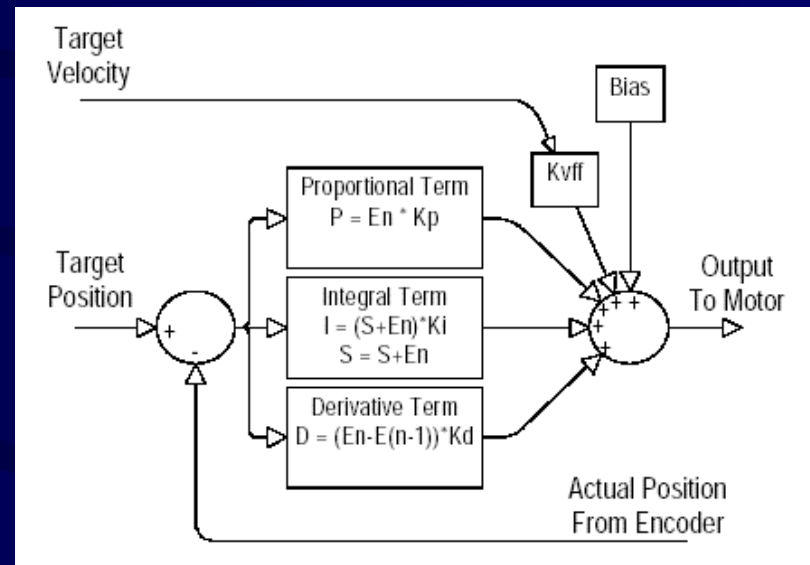
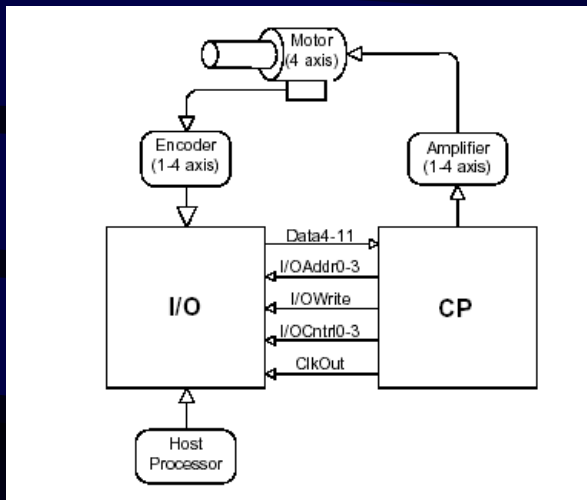
# วัฏจักรการเดินของมนุษย์แบบปกติ



## 2.4 ชุดควบคุมของหุ่นยนต์



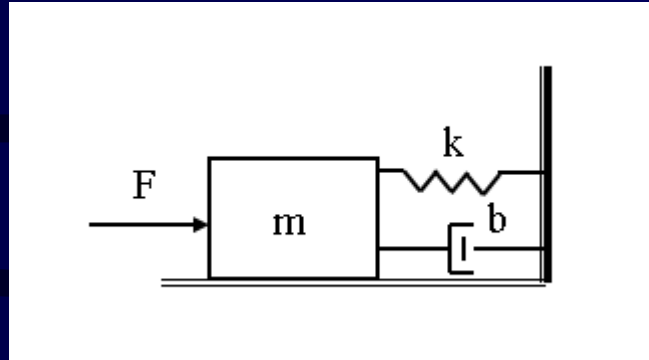
# Linear PID control ที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรม







## Linear PID control



จากรูป สามารถเขียนสมการ  
การเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$F - b\dot{x} - kx = m\ddot{x}$$

$$F = m\ddot{x} + b\dot{x} + kx$$

$F$  คือ แรงที่ป้อนให้กับระบบ

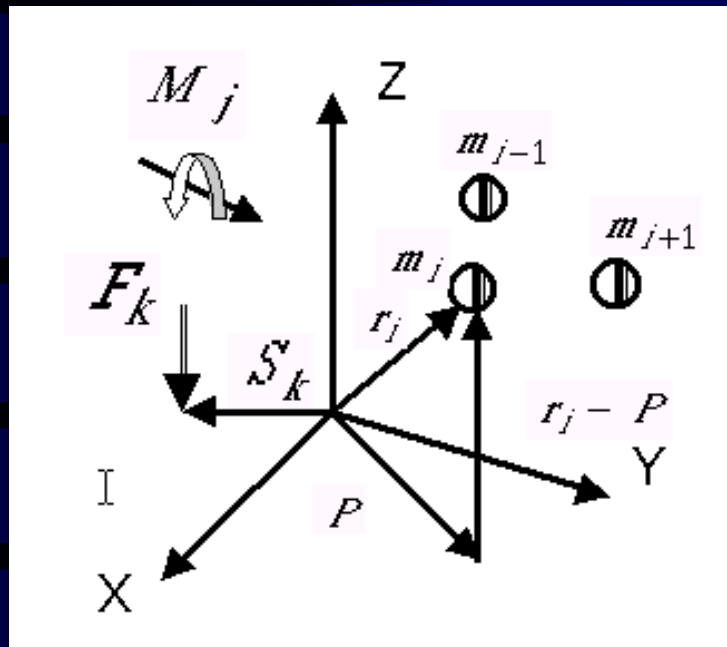
$M$  คือ มวลของระบบ

$B$  คือ ค่าคงที่ของการหน่วงของระบบ

$K$  คือ ค่าคงที่ของสปริงของระบบ

$\ddot{x}, \dot{x}, x$  คือ ค่าความเร่ง ความเร็ว  
และตำแหน่ง ของมวล ตามลำดับ

# การวิเคราะห์การเดินแบบพลศาสตร์โดยใช้หลักการ ZMP



## D'Alembert Principle

$$\sum_i m_i (r_i - P) \times (\ddot{r}_i + G) + T - \sum_j M_j - \sum_k (S_k - P) \times F_k = 0$$

$r_i$ : position vector of particle  $i$

$P$ : position vector  $P$

$G$ : gravitational acceleration

$m_i$ : mass of particle  $i$

$T$ : total torque acted on  $P$

$M_j$ : external moment  $j$

$F_k$ : external force  $k$

$S_k$ : position vector where external force  $k$  is put

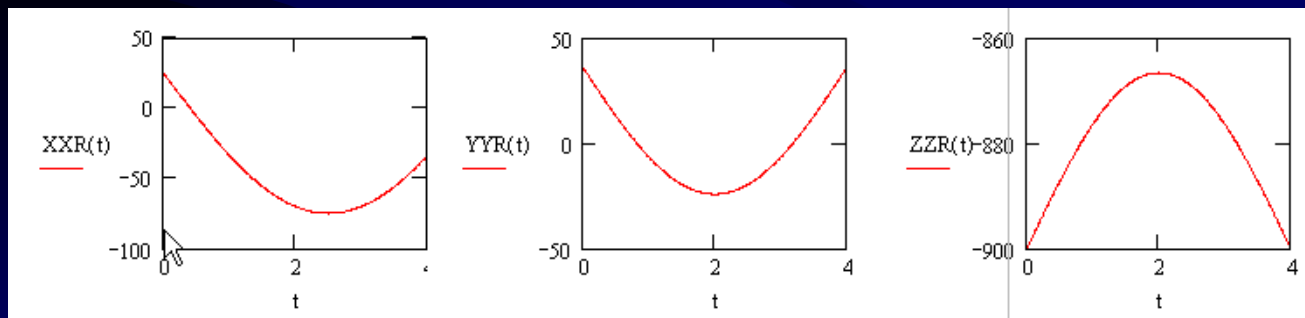
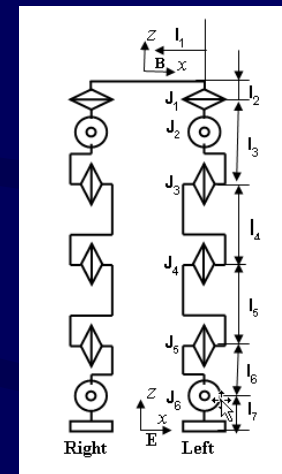
# Sinusoidal gait generation

การเคลื่อนที่ของเท้าขวาระนาบคาร์ทีเซียน(บนพื้นราบ)

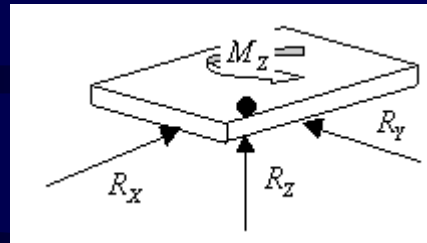
$$XX_R(t) = 25 - \frac{X_L}{3} \sin(\pi\omega(0.8t))$$

$$YY_R(t) = \frac{179}{5} + 0.75Y_L \sin(\pi\omega t)$$

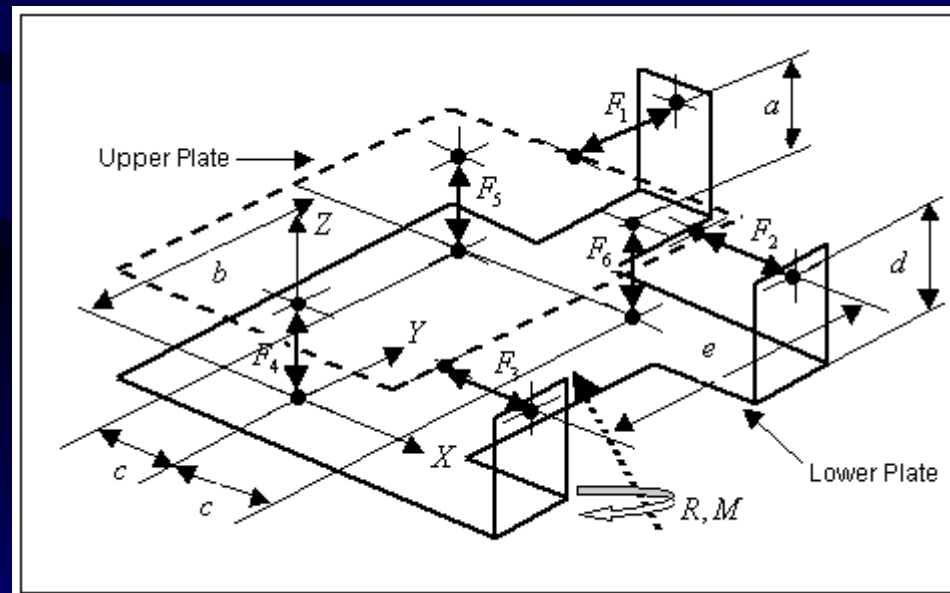
$$ZZ_R(t) = -900 + \frac{Z_L}{3} \sin(\pi\omega t)$$



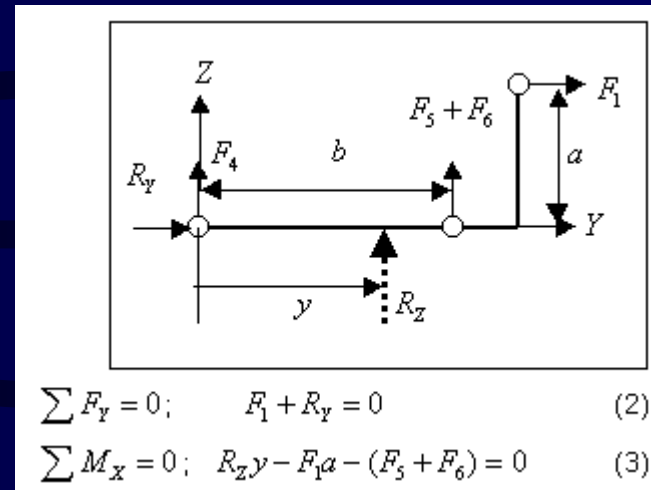
# Force Torque Sensor Design



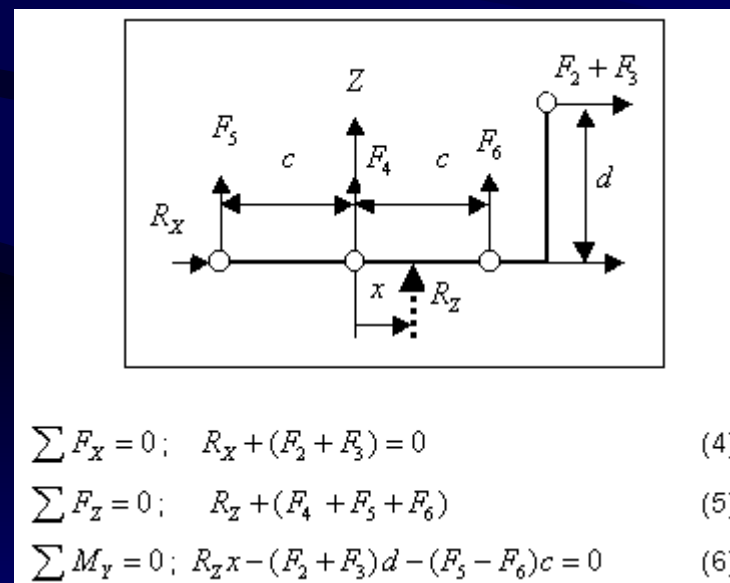
## แบบจำลองในการออกแบบ Force Sensor



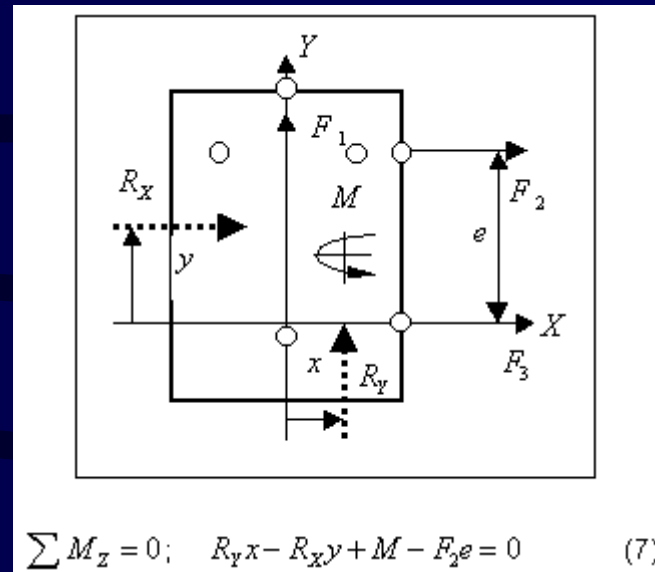
• ระนาบ(Y,Z)



• ระนาบ(X,Z)



- ระบาย(X,Y)



# จากสมการที่ (1) - (7) เราสามารถหาแรงลัพธ์ของ แรงปฏิกิริยา และ โมเมนต์ตามแนวแกนต่างๆ ได้ดังนี้



จากสมการที่ (4)  $R_x = -F_2 - F_3$

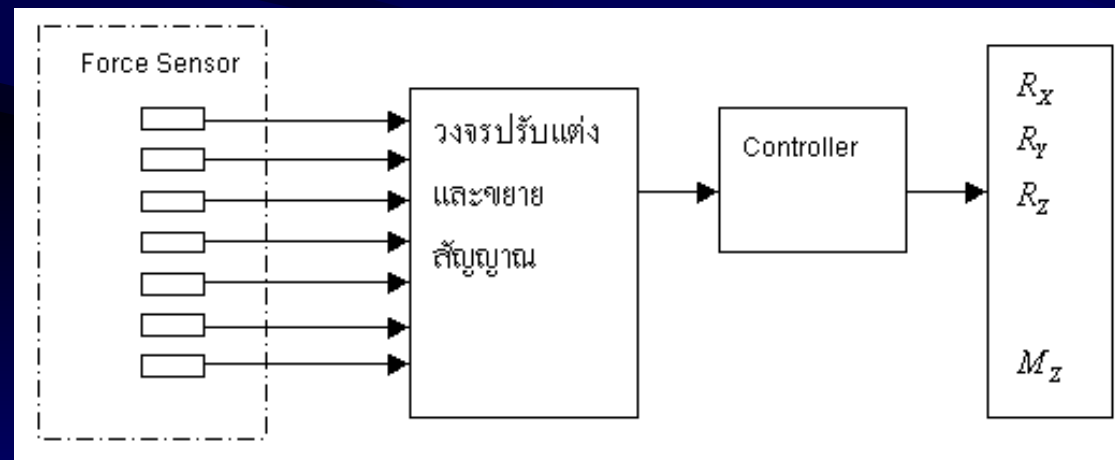
จากสมการที่ (2)  $R_y = -F_1$

จากสมการที่ (5)  $R_z = -F_4 - F_5 - F_6$

จากสมการที่ (6)  $x = -\frac{((F_2 + F_3)d + (F_5 - F_6)c)}{(F_4 + F_5 + F_6)}$

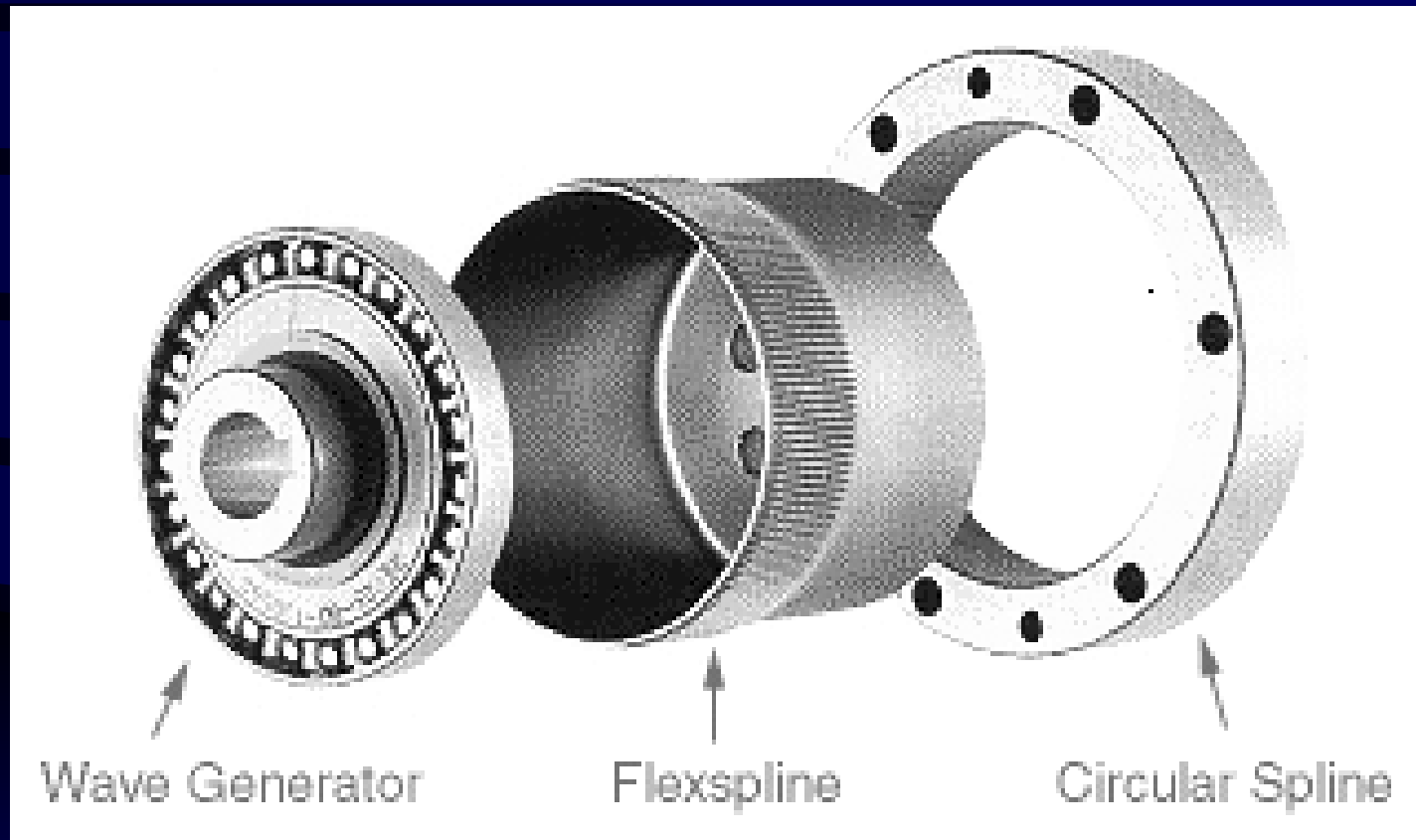
จากสมการที่ (3)  $y = -\frac{(F_1a - (F_5 + F_6)b)}{(F_4 + F_5 + F_6)}$

จากสมการที่ (7)  $M_z = \frac{(F_1a - (F_5 + F_6)b)(F_2 + F_3)}{(F_4 + F_5 + F_6)} - \frac{F_1((F_2 + F_3)d + (F_5 - F_6)c)}{(F_4 + F_5 + F_6)} + F_2e$

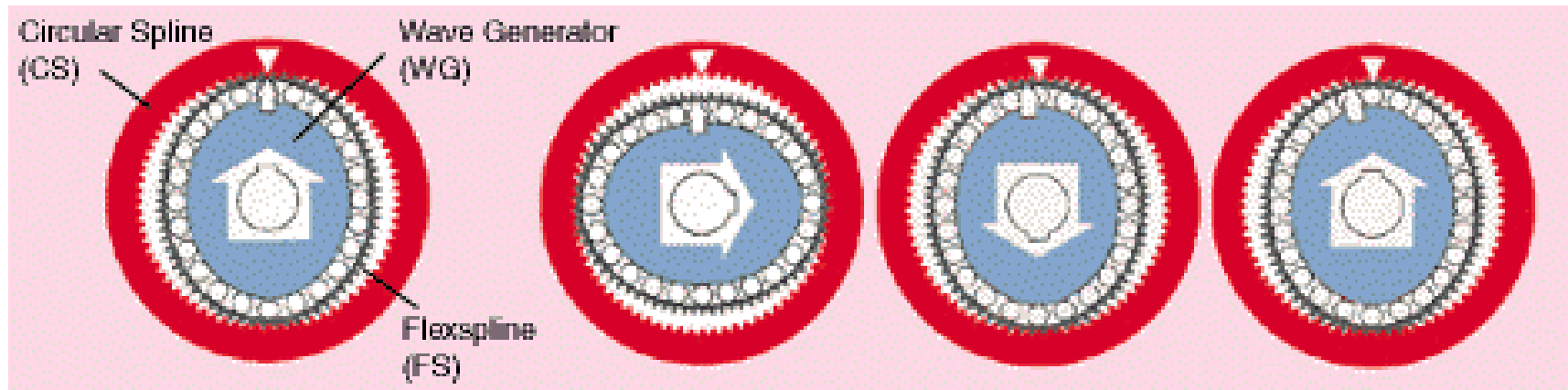




## 2.4 การขับเคลื่อนด้วยเฟืองแบบฮาร์โมนิก



# หลักการทำงานของ *Harmonic Gear*



Your competent partner in "Total Motion Control"



# ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของข้อต่อขณะทำการเดินของมนุษย์

