

## บทที่ 5

### การออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระ

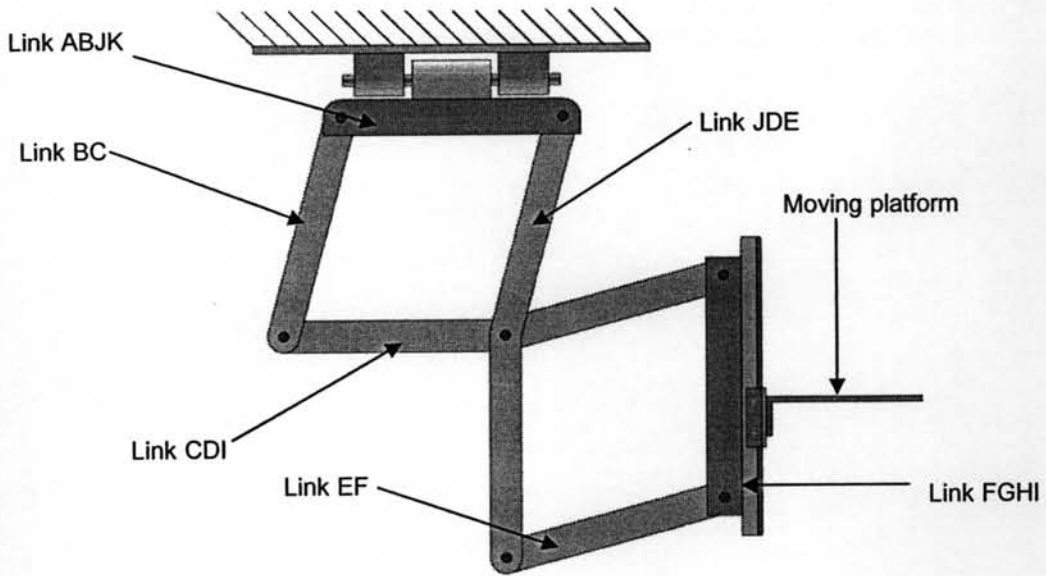
บทนี้จะพิจารณาถึงรายละเอียดการออกแบบกลไก CMS สำหรับเครื่องจำลองการเคลื่อนที่สำหรับหนึ่งคนนั่ง เนื่องจากกำหนดภาระน้ำหนักคนนั่งไว้ 100 กิโลกรัม ทำให้ภาระภายในที่เกิดขึ้นกับก้านข้อต่อแต่ละชั้น และแรงที่ต้องใช้ในการขับให้กลไกเคลื่อนที่สูง ดังนั้นการออกแบบกลไกหลักของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ จึงต้องเสริมความแข็งแรงของกลไกด้วยการนำกลไกแบบ CMS ประกอบเป็นคู่ แต่การกระทำดังกล่าวทำให้น้ำหนักรวมของกลไกเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการออกแบบนี้จึงใช้เหล็กกล่องเป็นโครงสร้างหลักของกลไก ในบทนี้อธิบายถึงโครงสร้างกลไกของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่ประยุกต์จากกลไก CMS และหัวข้อที่ 5.2 เป็นการหาภาระภายในที่เกิดขึ้นในข้อต่อ เพื่อจะนำมาออกแบบก้านต่อของกลไกแต่ละชั้น หัวข้อที่ 5.3 และ 5.4 อธิบายถึงวิธีขับเคลื่อนกลไกของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ และหัวข้อที่ 5.5 จะแสดงแบบของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระที่สมบูรณ์

#### 5.1 โครงสร้างกลไกของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

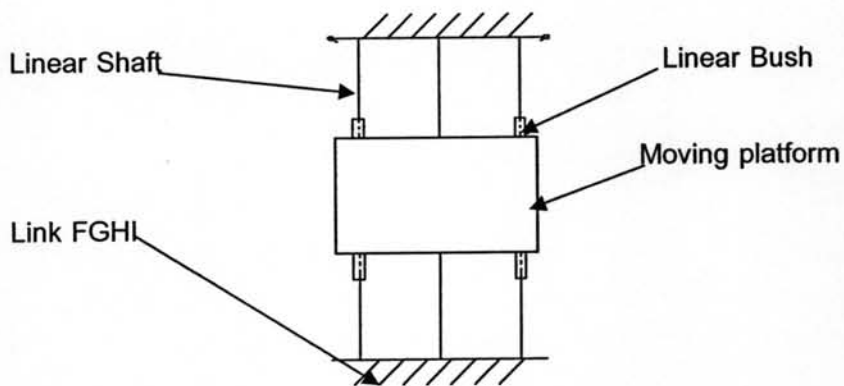
โครงสร้างของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบ่งเป็น 3 ส่วนคือ หนึ่ง ส่วนกลไกการหมุน สอง ส่วนกลไกเลื่อนที่ในแนวตั้ง และ สาม ส่วนฐาน

ในส่วนกลไกการหมุน ใช้โครงสร้างของ CMS จอยส์ ตัวโครงสร้างของกลไกประกอบไปด้วยก้านต่อ 6 ชั้นคือ ก้านต่อ FGHI ,ก้านต่อ EF ,ก้านต่อ CDI ,ก้านต่อ ABJK ,ก้านต่อ BC และ ก้านต่อ JDE อย่างละชั้น มีลักษณะดังรูปที่ 5.1

ส่วนกลไกการเลื่อนที่ในแนวตั้งนั้นจะติดตั้งอยู่ที่ปลายของกลไก CMS จอยส์ซึ่งมีหน้าที่เคลื่อนเบาที่นึ่งผู้ขับขึ้นลงในแนวแกน เนื่องจากรับภาระมากโครงสร้างของกลไกจะเสริมความแข็งแรงด้วยเพลาดตรง 2 ชั้นยึดติดกับ ก้านต่อ FGHI และแต่ละตัวของเพลาดตรงจะมีบูช 2 ตัว ที่ยึดติดกับ Moving platform รวมอยู่ การออกแบบดังกล่าวเพื่อให้โครงสร้างสามารถรับโมเมนต์และภาระแรงที่เกิดจากน้ำหนักคนได้ โครงสร้างเป็นดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่



รูปที่ 5.2 กลไกจำลองความเร่งในแนวดิ่ง

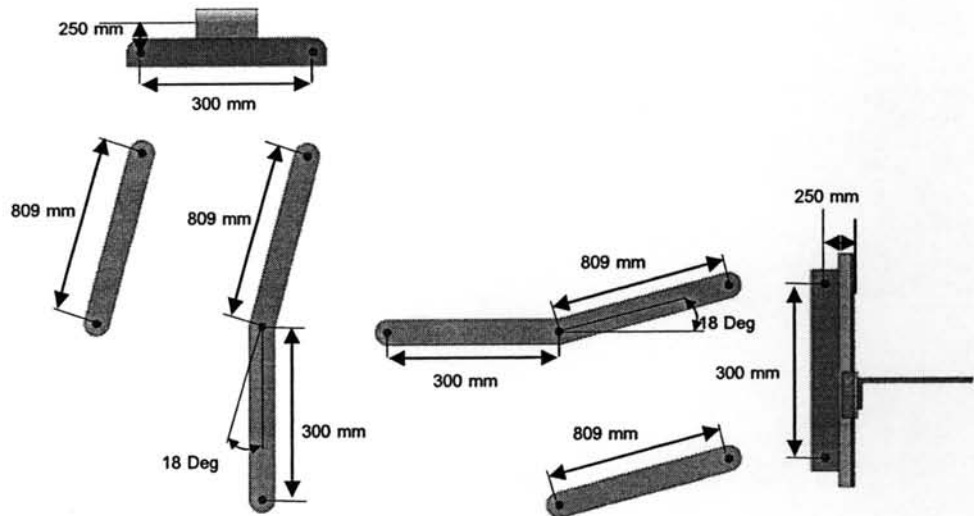
ความยาวของก้านต่อแต่ละชั้นมีความสัมพันธ์กับระยะของจุดหมุน ซึ่งตามที่กำหนดไว้ในตอนต้นคือ ต้องให้กลไกส่วนหมุนมีจุดหมุนห่างจาก Moving platform เป็นระยะ 1.2 เมตร ซึ่งพิจารณารูปที่ 5.3 ตัวแปรของโครงสร้างที่มีผลต่อความยาวของก้านต่อแต่ละชั้นเป็นดังสมการ 5.1 ถึง 5.5 [32]

$$\phi = \tan^{-1} \frac{L3}{L1} \quad (5.1)$$

$$|BC| = |JD| = |DI| = |EF| = Lx = \frac{L3}{\sin \phi} \quad (5.2)$$

$$|AB| = |KJ| = |IH| = |FG| = L3 \quad (5.3)$$



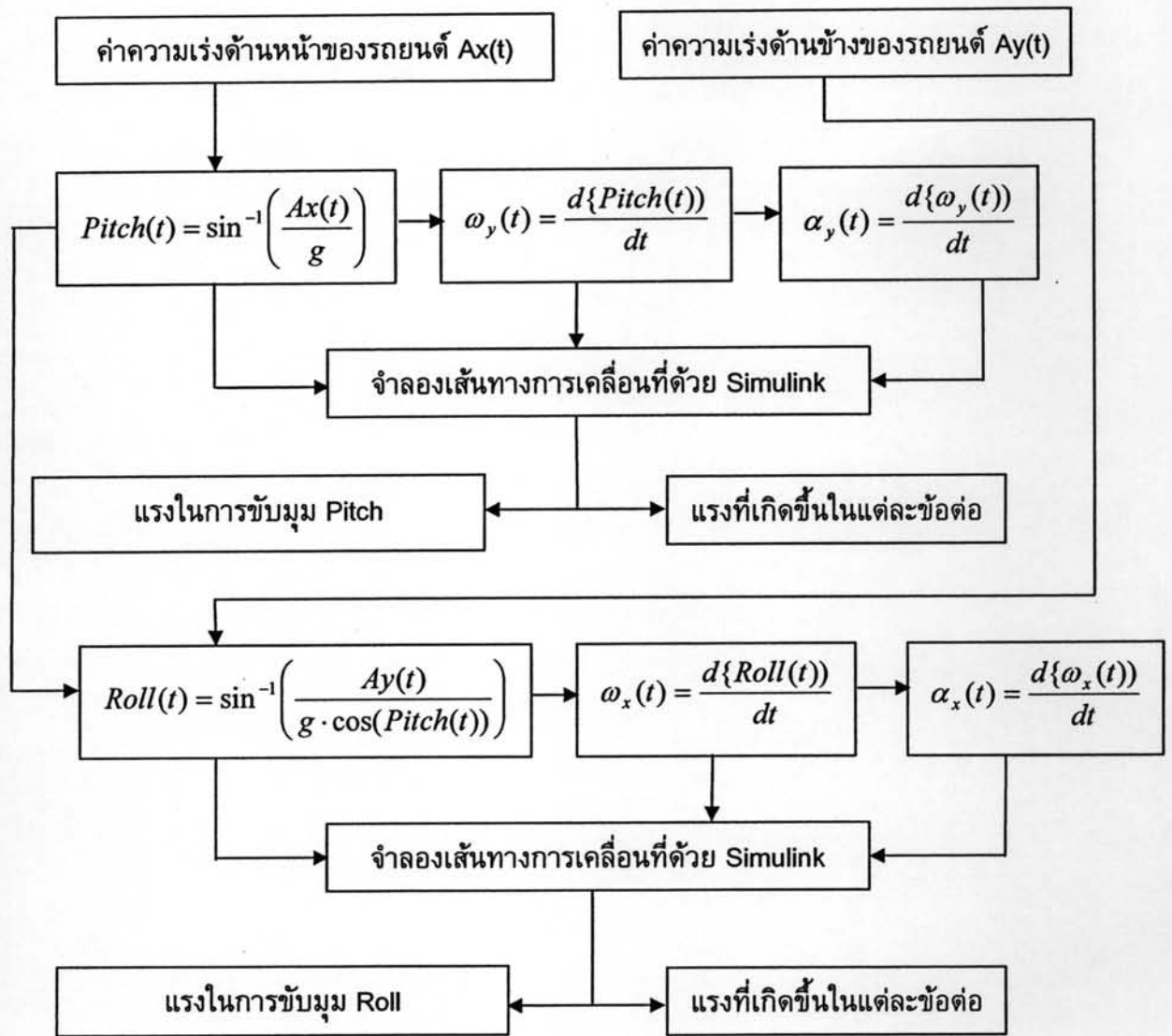


รูปที่ 5.4 ความยาวของก้านต่อแต่ละชั้น

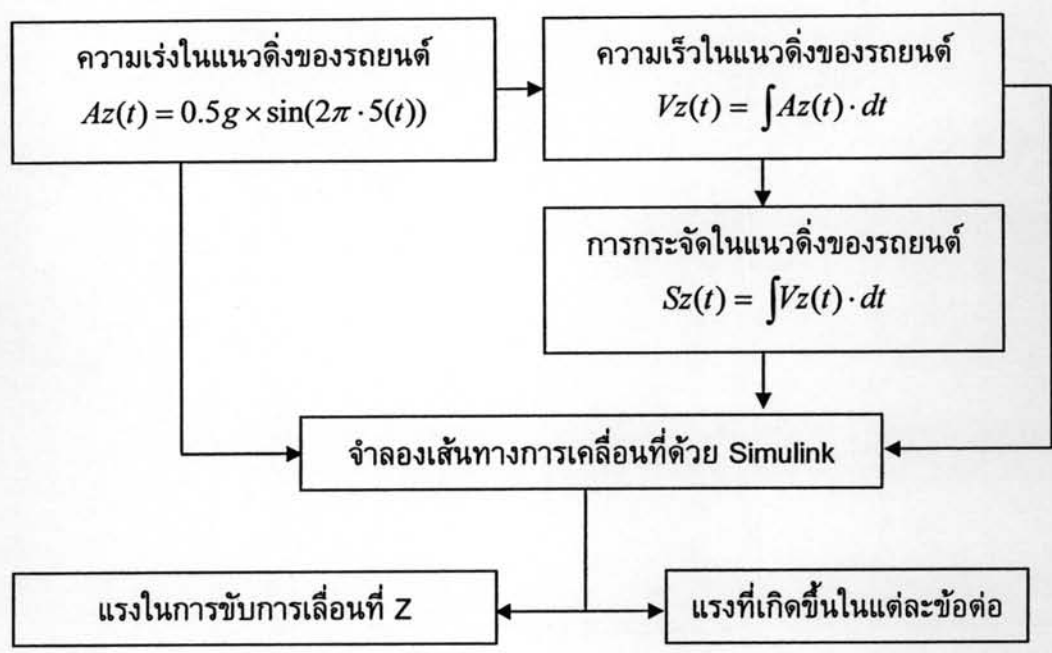
## 5.2 การวิเคราะห์ภาระภายในของก้านต่อ

การวิเคราะห์ภาระภายในของกลไกเพื่อนำภาระภายในไปออกแบบก้านต่อแต่ละชั้นให้มีความสามารถในการรับโหลดภายในที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของกลไกได้เพียงพอ วิธีหนึ่งในการหาภาระภายในของก้านต่อได้จากการนำค่าความเร่งของรถยนต์ที่กล่าวในบทที่ 4 มาจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ในโมเดลคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม Sim Mechanic ซึ่งตัวโปรแกรมสามารถคำนวณหาค่าแรงภายใน และโมเมนต์ภายในที่เกิดขึ้นขณะเคลื่อนที่ได้

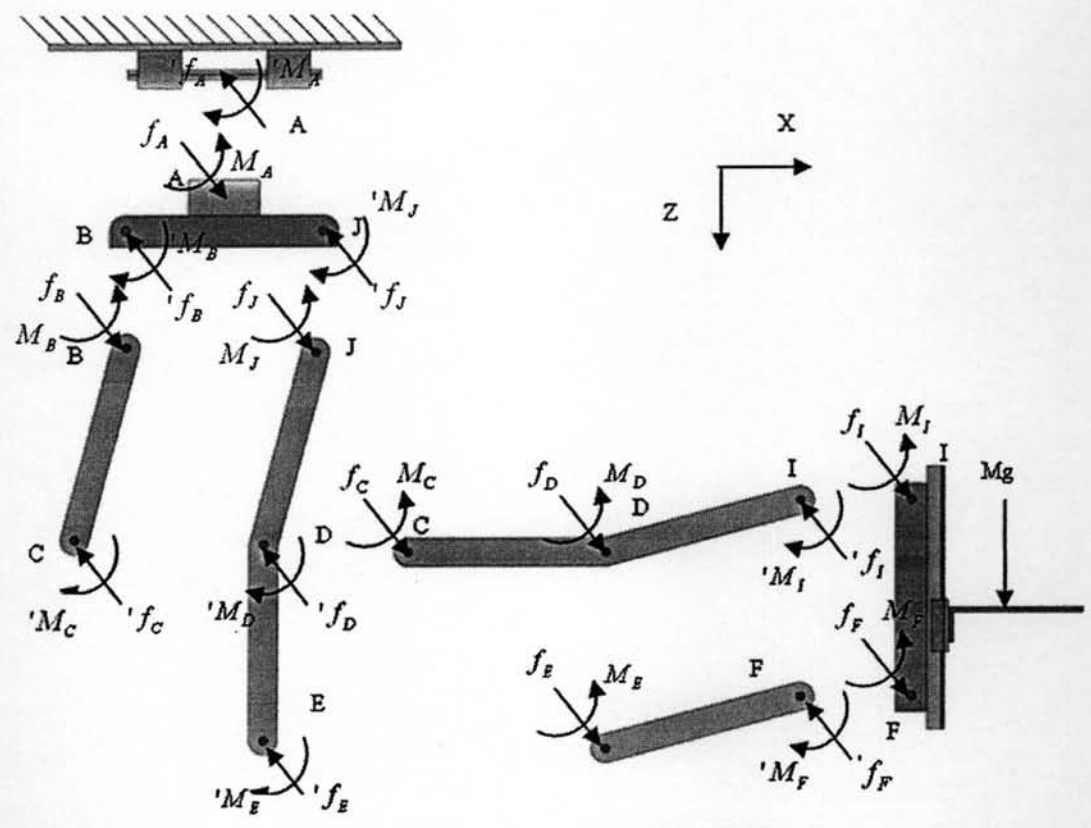
ขั้นตอนการคำนวณแรงเป็นดังรูปที่ 5.5 เริ่มต้นนำค่าความเร่งด้านหน้าและค่าความเร่งด้านข้างที่ได้จากการทดสอบ มาแปลงเป็นมุม *Pitch* (เพื่อจำลองความเร่งด้านหน้าของรถยนต์) และแปลงเป็นมุม *Roll* (เพื่อจำลองความเร่งด้านข้างของรถยนต์) จากนั้นนำค่าของมุมที่ได้มาคำนวณหาค่าความเร็ว และค่าความเร่งเชิงมุมของกลไก เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาแรงที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนกลไกให้เคลื่อนที่ตามที่กำหนด ส่วนการวิเคราะห์หาแรงภายในของแนวแกน Z นั้นจะเป็นดังรูปที่ 5.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์จะแตกต่างจากส่วนจำลองความเร่งด้านหน้าและความเร่งด้านข้าง เพราะค่าความเร่งที่ใช้ในการกำหนดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z นั้นจะสมมุติเป็น ฟังก์ชันของ sine wave ที่ความถี่ 5 Hz [35] ซึ่งค่าความถี่ที่ได้นี้ได้จากการทดลองเคลื่อนที่ผ่านถนนขรุขระ



รูปที่ 5.5 การคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นจากความเร่งด้านหน้าและความเร่งด้านข้างด้วยโปรแกรม simulink



รูปที่ 5.6 การคำนวณหาแรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนที่ในแนวแกน Z



รูปที่ 5.7 Free body diagram ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

จากรูปที่ 5.7 กำหนดให้

$f_F$  คือ แรง Action ที่เกิดขึ้นที่จุด F

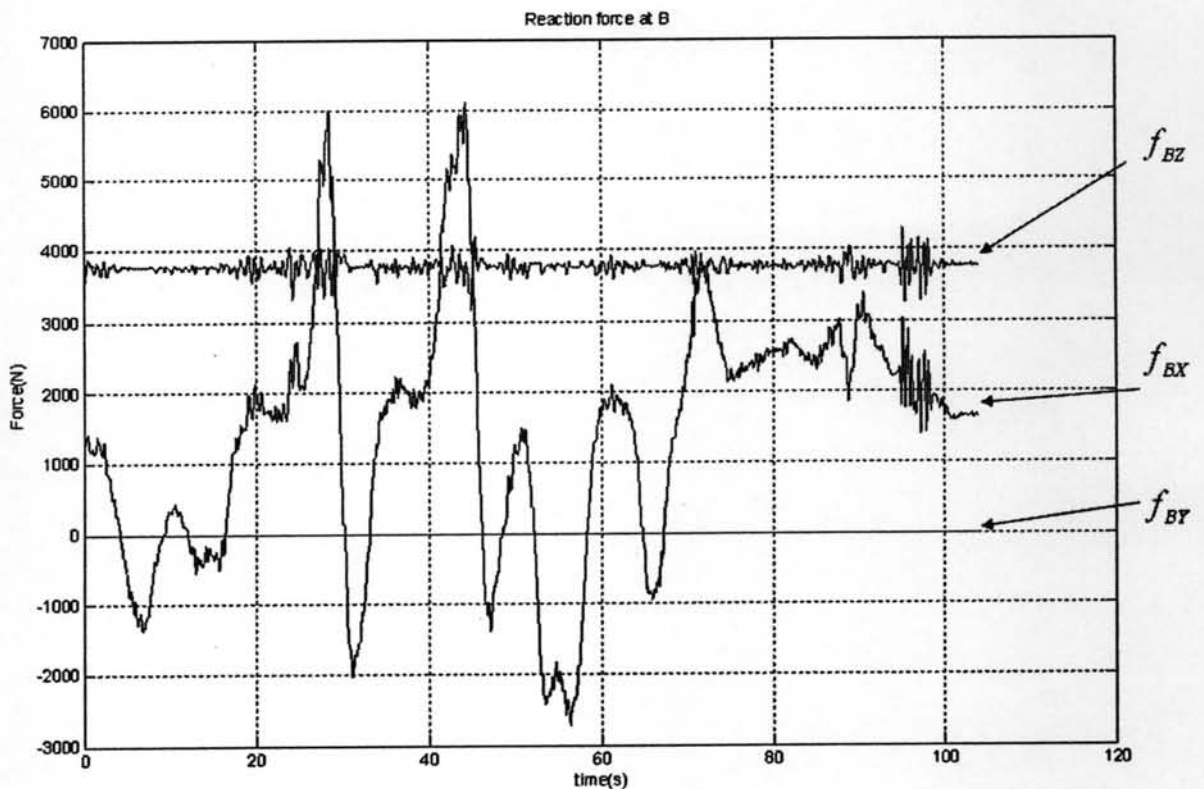
$'f_F$  คือ แรง Reaction ที่เกิดขึ้นที่จุด F

$M_F$  คือ แรงบิด Action ที่เกิดขึ้นที่จุด F

$'M_F$  คือ แรงบิด Reaction ที่เกิดขึ้นที่จุด F

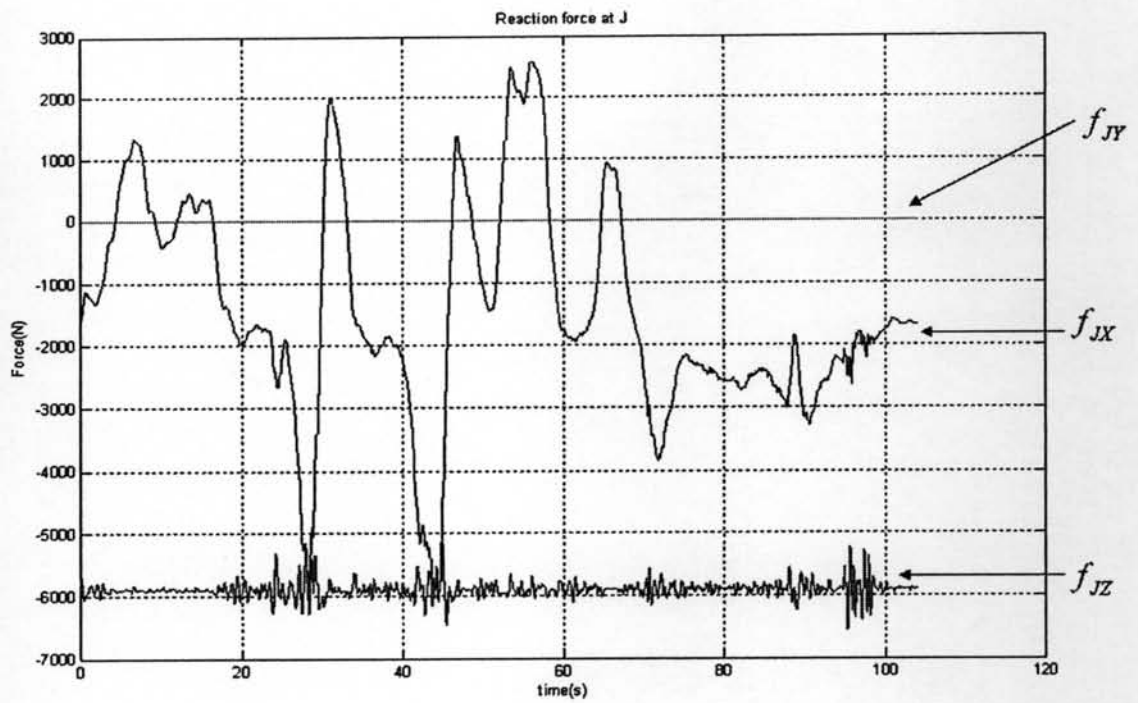
พิจารณารูปที่ 5.7 แสดง Free body diagram ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ การคำนวณหาโหลดภายในของข้อต่อทั้งหมด 8 จุด เพื่อความง่ายในการคำนวณกำหนดให้แรงที่เกิดขึ้นจาก Moving platform เคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวแกน Z เป็นค่าคงที่ 1500 นิวตัน คิดจากค่าแรงสูงสุดที่เกิดจาก Moving platform เคลื่อนที่ด้วยความเร่งสูงสุด

จากผลคำนวณที่ได้พบว่าโหลดภายในที่จุด D, B, A, J จะมีค่าสูงกว่าข้อต่อจุดอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 ถึง 5.12

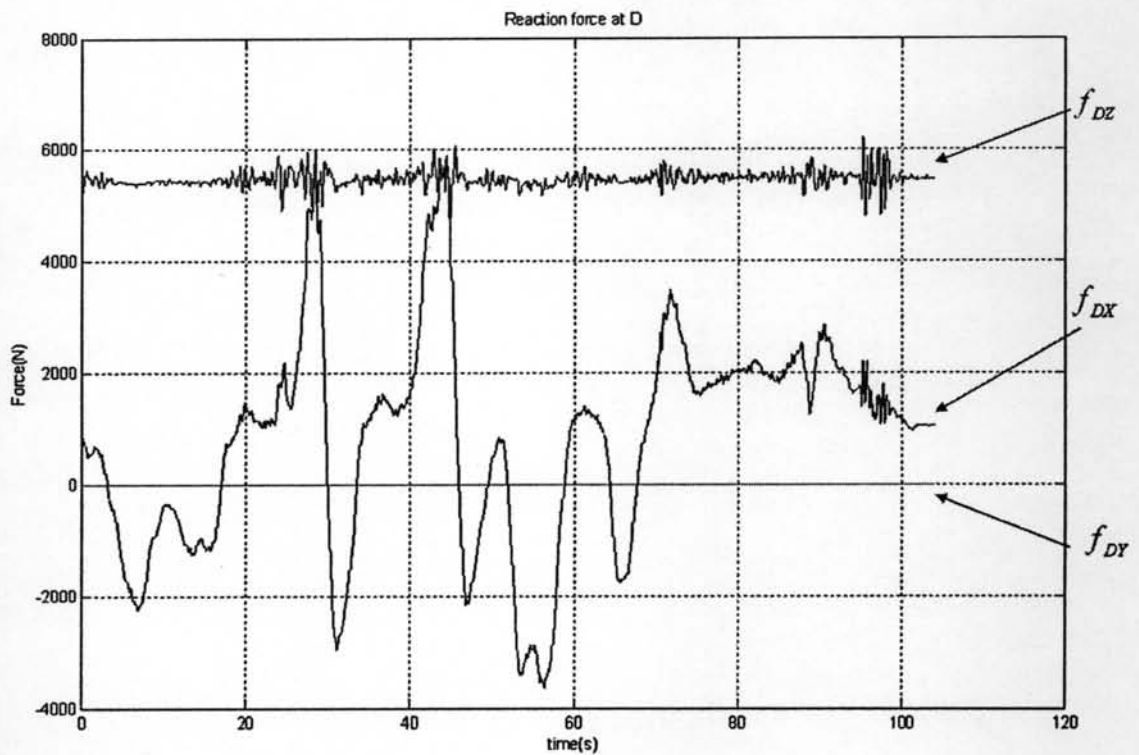


รูปที่ 5.8 แรงภายในที่จุด B



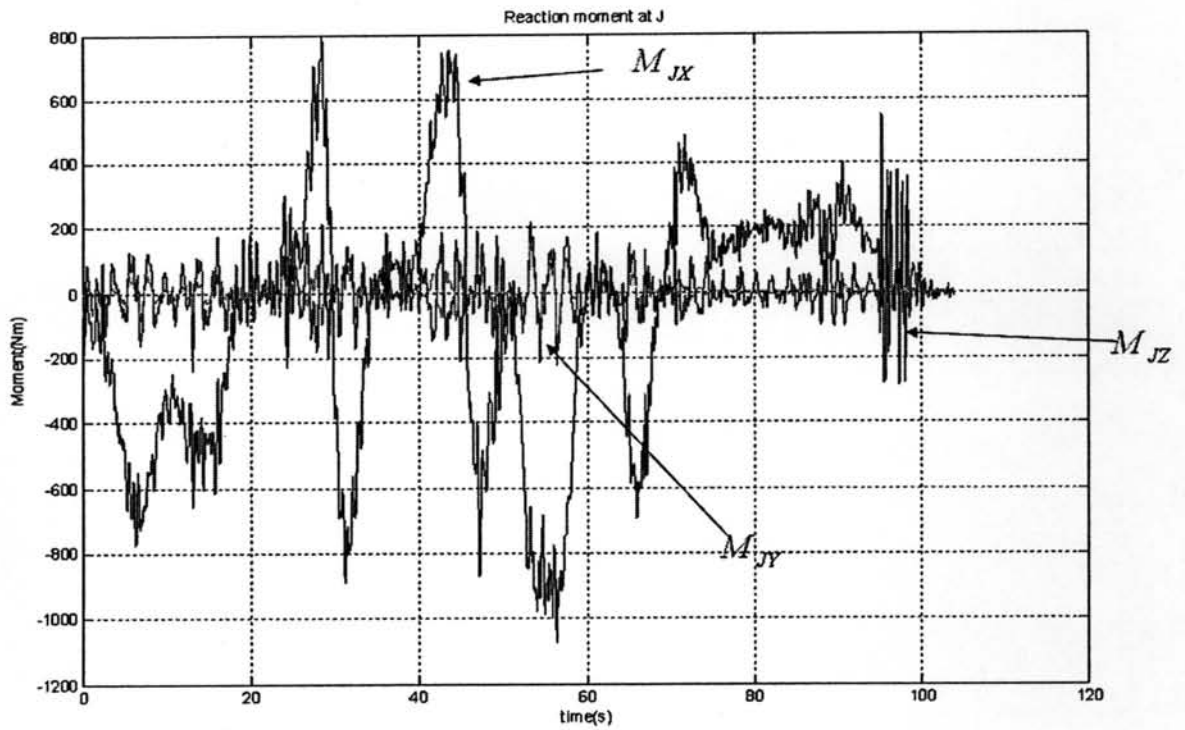


รูปที่ 5.9 แรงภายในของจุด J

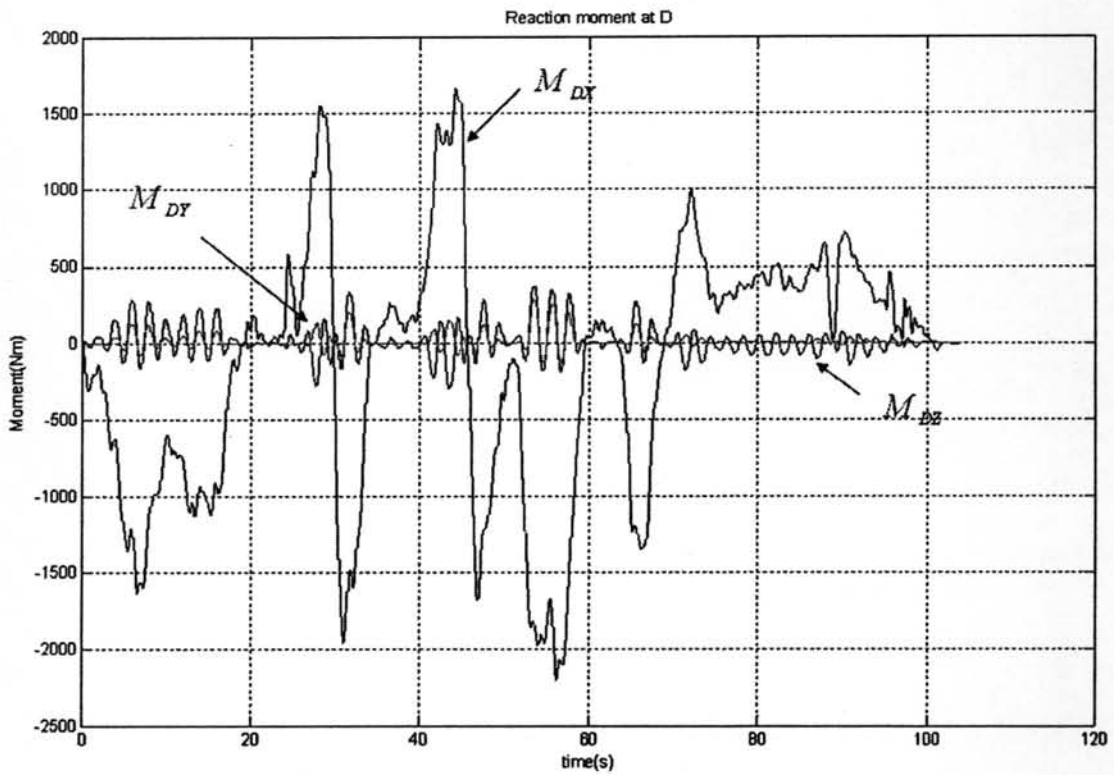


รูปที่ 5.10 แรงภายในของจุด D





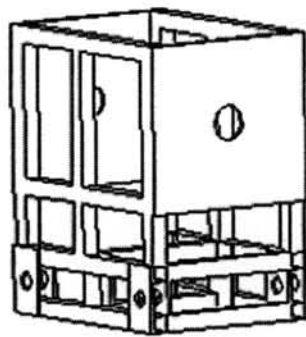
รูปที่ 5.11 โมเมนต์ภายในที่จุด J



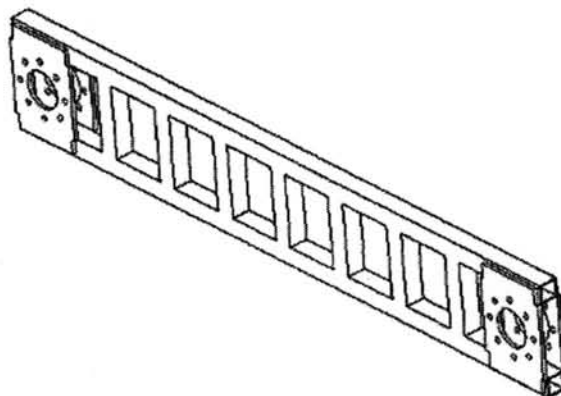
รูปที่ 5.12 โมเมนต์ภายในที่จุด D

### 5.3 การออกแบบโครงสร้างของก้านต่อในเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

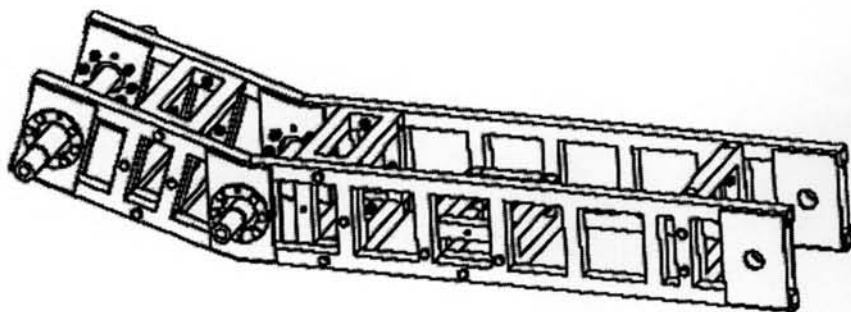
จากที่อธิบายในข้างต้นว่ากลไกของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก คือ กลไกส่วนหมุนเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้าและด้านข้าง กลไกส่วนเลื่อนที่เพื่อจำลองความเร่งในแนวตั้ง และส่วนฐาน การวิเคราะห์แรงและโมเมนต์ภายในของโครงสร้างในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่ากลไกส่วนหมุนที่กลไก CMS เป็นกลไกหลักนั้นต้องรับภาระโหลดภายในสูง ดังนั้นจึงเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยการเพิ่มกลไก CMS เป็น 2 ชุดขนานกันโดยเชื่อมต่อโครงสร้างเข้าด้วยกัน ทำให้โครงสร้างของกลไกทั้งหมดประกอบไปด้วยก้านต่อ 8 ชั้นคือ ก้านต่อ FGHI , ก้านต่อ EF , ก้านต่อ CDI และก้านต่อ ABJK อย่างละ 1 ชั้น ส่วนก้านต่อ BC และก้านต่อ JDE อย่างละ 2 ชั้น และเพื่อให้น้ำหนักโครงสร้างของข้อต่อแต่ละชั้นมีน้ำหนักเบา จึงขึ้นรูปก้านต่อทั้งหมดด้วยเหล็กกล่อง ยกเว้นก้านต่อ FGHI จะขึ้นรูปด้วยอลูมิเนียมแผ่น อย่างไรก็ตามช่วงจุดหมุนข้อต่อจำเป็นต้องมีสำหรับแกนเพลลาและชุดลูกปืน จึงเสริมความแข็งแรงด้วยเหล็กแผ่นที่บริเวณดังกล่าว โครงสร้างของก้านต่อทั้งหมดที่ออกแบบจะเป็นดังรูป



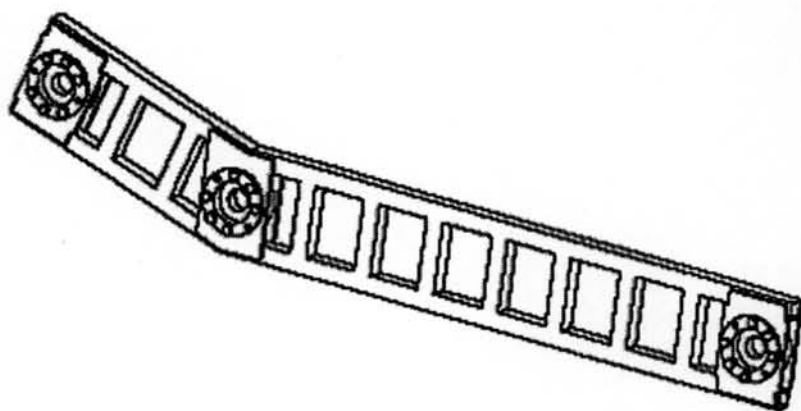
รูปที่ 5.13 ก้านต่อ ABJK



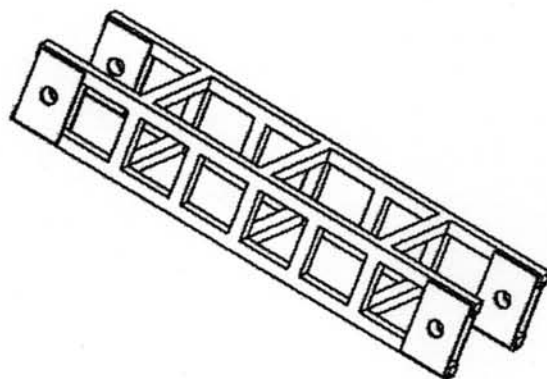
รูปที่ 5.14 ก้านต่อ BC



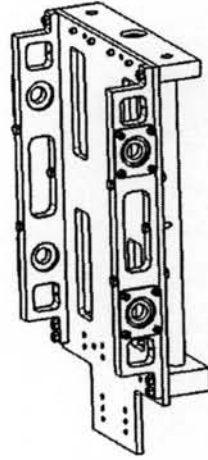
รูปที่ 5.15 ก้านต่อ CDI



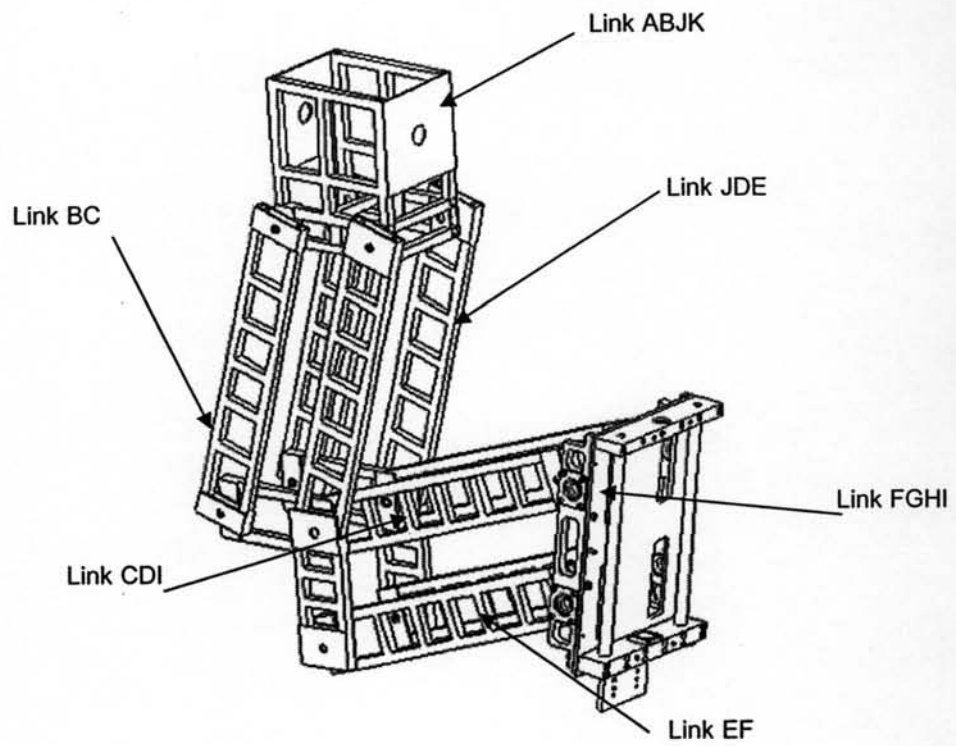
รูปที่ 5.16 ก้านต่อ JDE



รูปที่ 5.17 ก้านต่อ EF

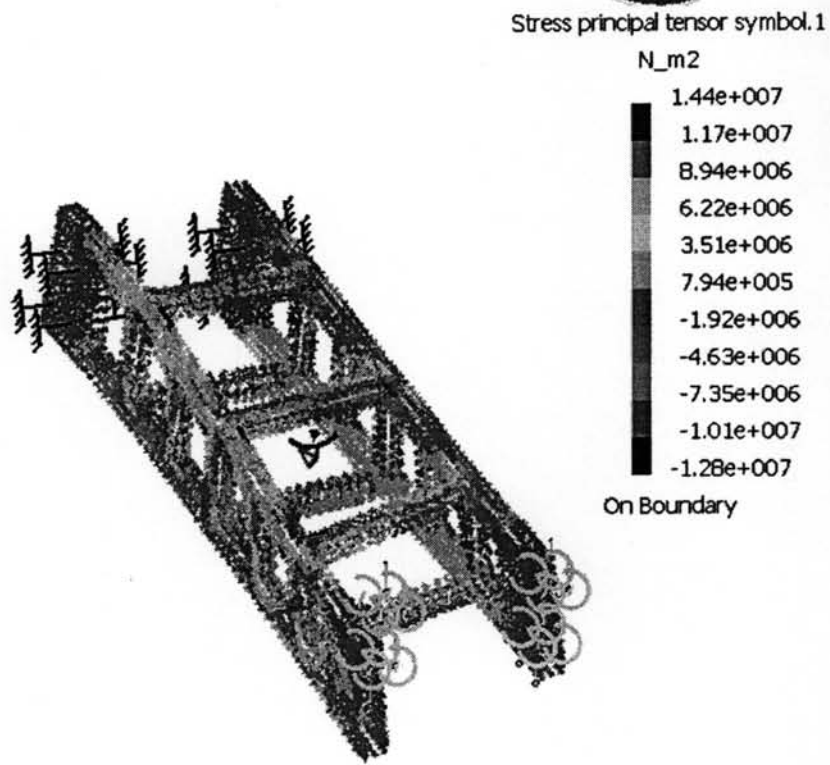


รูปที่ 5.18 ก้านต่อ FGHI

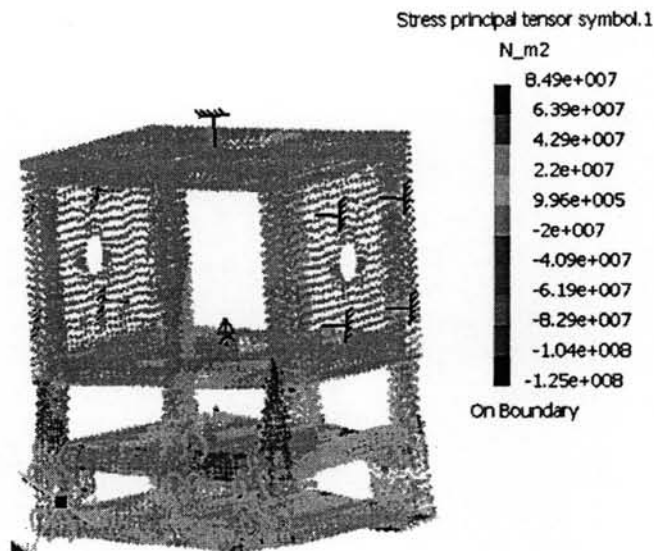


รูปที่ 5.19 โครงสร้างกลไกส่วนหมุนหลังจากเสริมความแข็งแรง

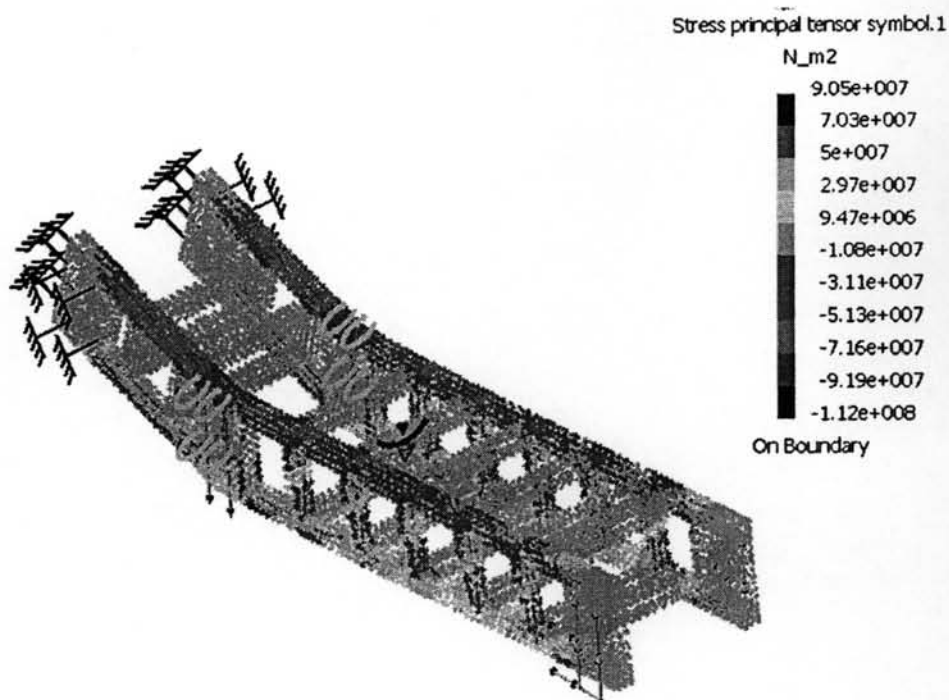
เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของกันข้อต่อที่ได้ออกแบบตอนแรก จึงวิเคราะห์หาค่าความเค้นภายในของกันข้อต่อแต่ละชั้นด้วยโปรแกรม Catria ซึ่งผลคำนวณของกันข้อต่อแต่ละชั้นเป็นดังรูปที่ 5.20 ถึง 5.24



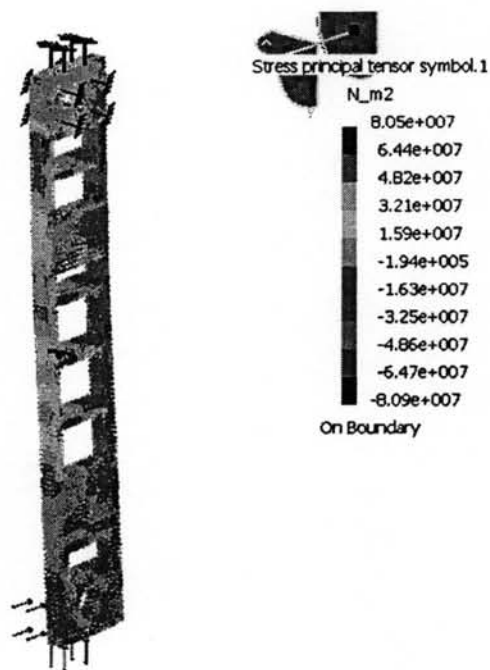
รูปที่ 5.20 การวิเคราะห์ค่าความเค้นของกันข้อต่อ EF



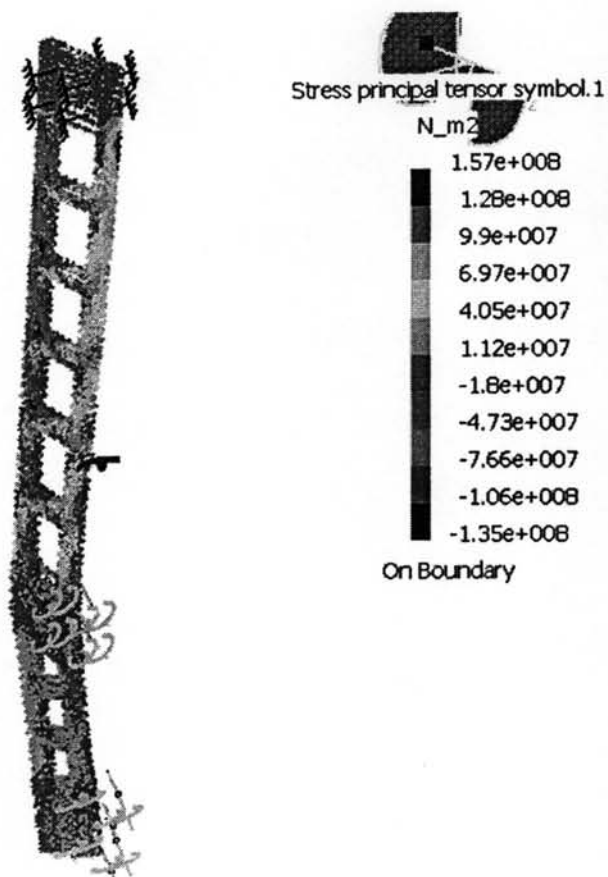
รูปที่ 5.21 การวิเคราะห์ค่าความเค้นของกันข้อต่อ ABJK



รูปที่ 5.22 การวิเคราะห์ความเค้นของ ก้านต่อ CDI



รูปที่ 5.23 การวิเคราะห์ค่าความเค้นของก้านต่อ BC



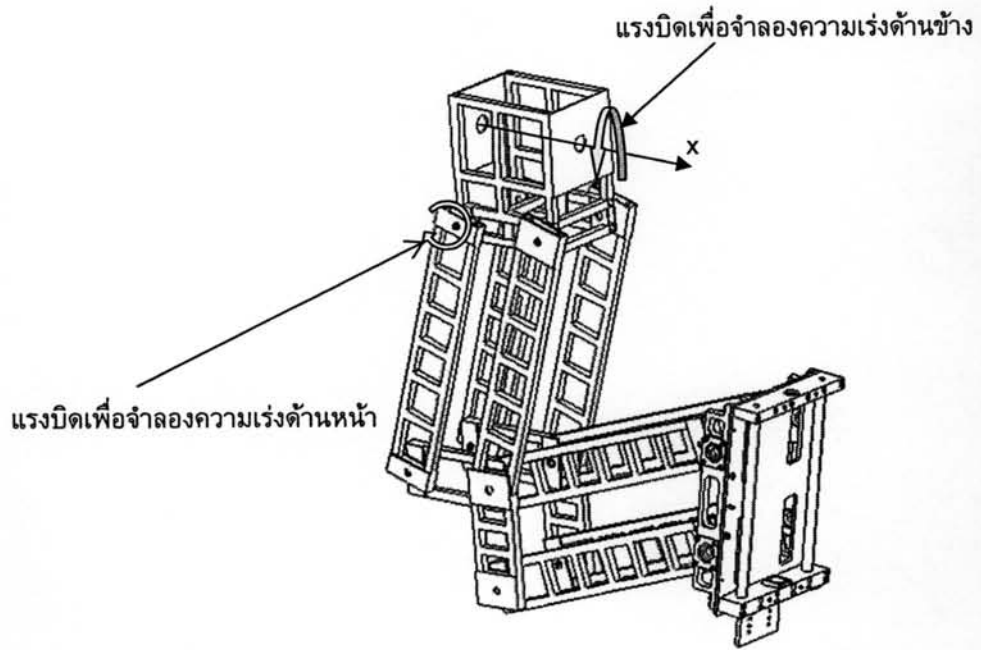
รูปที่ 5.24 การวิเคราะห์ความเค้นของก้านต่อ JDE

ค่าความเค้นในก้านต่อแต่ละชั้นเมื่อนำไปคำนวณหาค่าความปลอดภัยของโครงสร้าง จะได้รูปร่างของก้านต่อทั้งหมดดังแสดงในภาคผนวก ค.

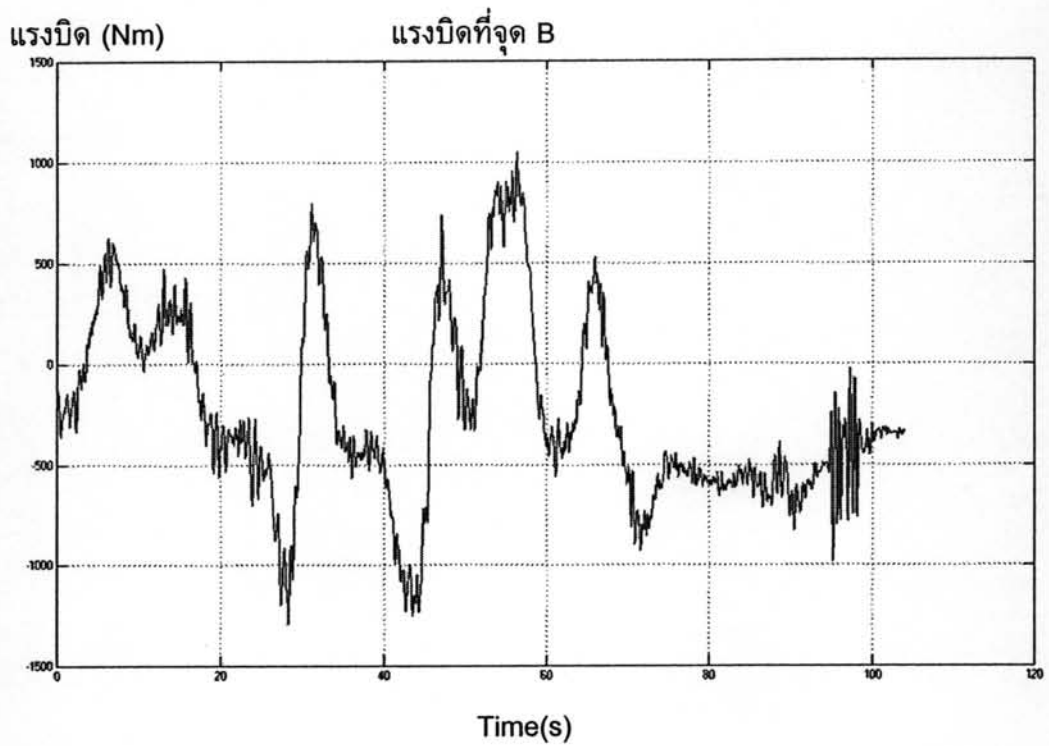
#### 5.4 การออกแบบส่วนขับเคลื่อนของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

จากผลในการคำนวณแรงภายในที่ผ่านมามีทราบว่าเพื่อจำลองการเคลื่อนที่ตามค่าความเร่งที่ทดลองค่าแรงบิดที่ต้องใส่ที่เพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า และความเร่งด้านข้างของรถยนต์ จะเป็นดังรูปที่ 5.25

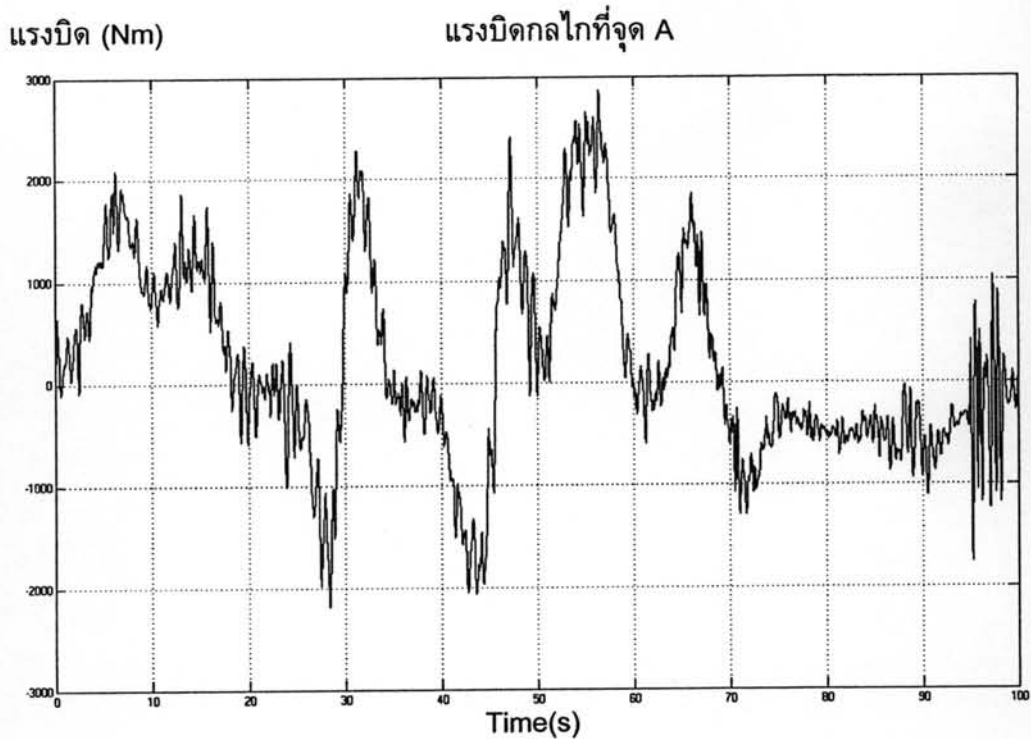




รูปที่ 5.25 จุดที่ใส่แรงบิดเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า และด้านข้าง



รูปที่ 5.26 แรงบิดเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้าของรถยนต์



รูปที่ 5.27 แรงบิดเพื่อจำลองความเร่งด้านข้างของรถยนต์

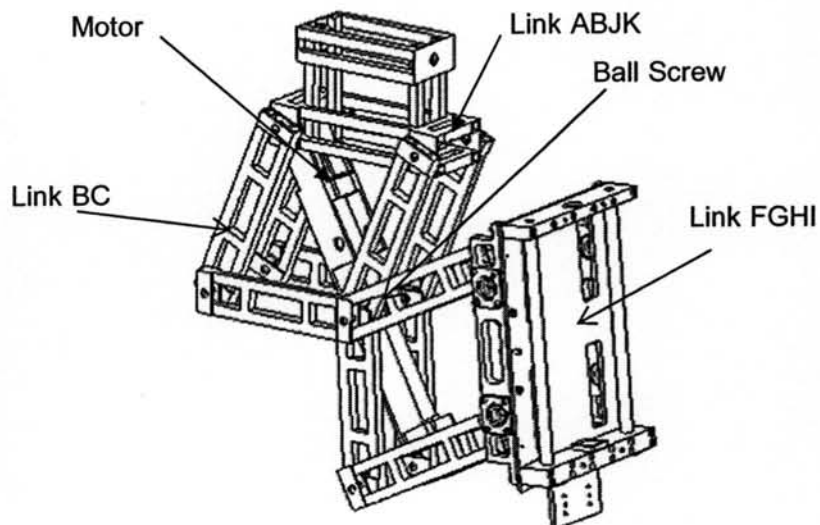
จากกราฟรูปที่ 5.26 และรูปที่ 5.27 พบว่าแรงบิดสูงสุดที่ต้องใช้ในการจำลองความเร่งด้านหน้าและความเร่งด้านข้างเป็น 1200 และ 2000 นิวตันเมตรตามลำดับ ซึ่งแรงบิดขนาดนี้เป็นแรงบิดที่สูงมาก ซึ่งจำเป็นต้องใช้เกียร์ทดที่มีอัตราทดสูงๆ เกียร์ทดที่มีอัตราทดสูงๆ นั้นมีน้ำหนักมากมีขนาดใหญ่ไม่เหมาะกับโครงสร้างของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่มีกลไกเป็นแบบอนุกรม อีกทั้งเกียร์มีราคาสูง จากปัญหาที่พบจึงต้องศึกษาหาวิธีขับเคลื่อนกลไกของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม การวิเคราะห์วิธีการขับเคลื่อนกลไกนั้นมีปัจจัยในการตัดสินใจหลายอย่างคือ แรงในการขับเคลื่อนกลไกที่ต้องได้รับจากตัวขับ, น้ำหนัก, ความแข็งแรง, ราคา และความง่ายในการควบคุมการเคลื่อนที่ของกลไก

เนื่องจากกลไกเครื่องจำลองการเคลื่อนที่มีโครงสร้างเป็นแบบอนุกรม ดังนั้นเพื่อความง่ายในการวิเคราะห์จะแบ่งพิจารณากลไกเป็นส่วนๆ คือ พิจารณาตัวขับเคลื่อนของมุม Pitch ถัดไปจะพิจารณาตัวขับเคลื่อนของมุม Roll และสุดท้ายพิจารณาตัวขับเคลื่อนของแกน Z

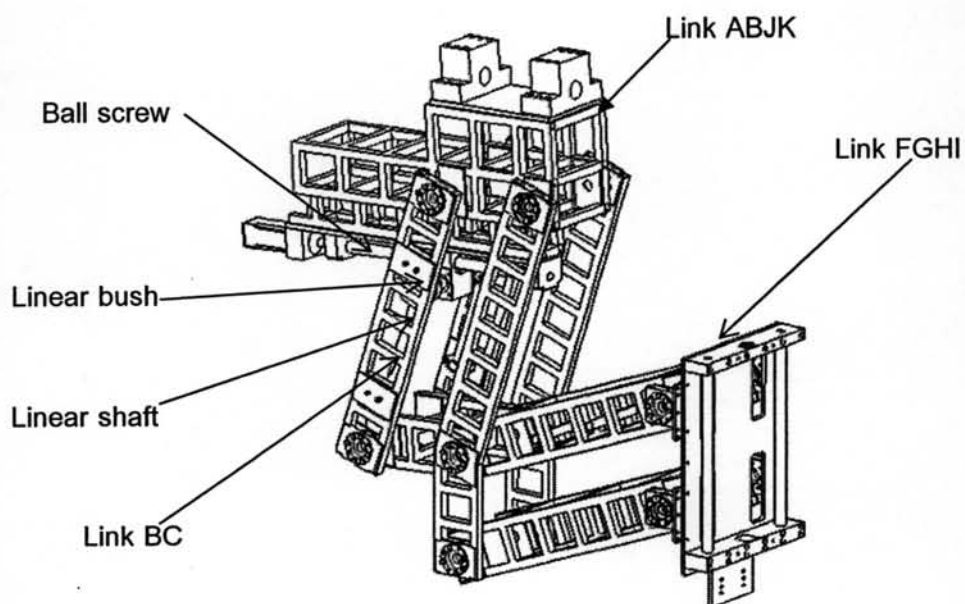
ดังที่กล่าวข้างบนว่า แรงบิดที่ใช้มีขนาดสูงมากถ้าใช้มอเตอร์ขับที่แกนเพลลาโดยตรงต้องใช้เกียร์ทดที่มีอัตราทดสูงมาก อย่างไรก็ตาม ได้พิจารณาการใช้ระบบทดแรงด้วยบอลสกรูพบว่าสามารถสร้างอัตราทดได้สูงแต่เปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงมุมไปเป็นเชิงเส้น ดังนั้นในส่วนต่อไปนี้เป็นการศึกษาใช้บอลสกรูสำหรับกลไกขับในแกนต่างๆ

#### 5.4.1 การออกแบบส่วนขับเคลื่อนมุม Pitch ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

ตัวอย่างกลไกขับเคลื่อนมุม Pitch ในที่นี้กำหนดเป็น 2 รูปแบบ ทั้งสองแบบได้จากการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการสร้างกลไกจริง ลักษณะของกลไกทั้งสองแบบสามารถใช้งานได้ มีลักษณะแตกต่างกันดังรูปที่ 5.28 และ 5.29



รูปที่ 5.28 กลไกการขับเคลื่อนมุม Pitch รูปแบบที่ 1



รูปที่ 5.29 กลไกการขับเคลื่อนมุม Pitch รูปแบบที่ 2

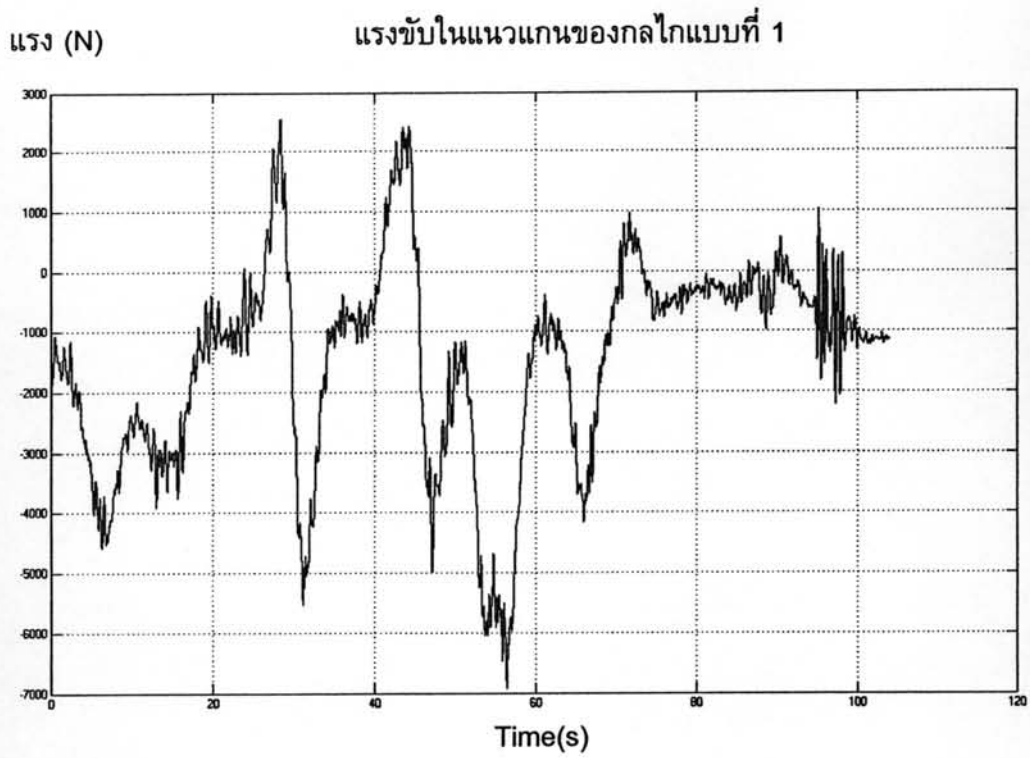
พิจารณารูปที่ 5.28 กลไกของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่ถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยชุดบอลสกรูที่ติดตั้งระหว่างจุด B และจุด D โดยติดตั้งส่วนฐานของตัวแกนสกรูยึดติดกับจุด B ด้วยข้อต่อแบบหมุน และส่วนตัวลูกปืนติดกับจุด D ด้วยข้อต่อแบบหมุน การทำงานของกลไก เมื่อมอเตอร์หมุนตัวลูกปืนจะเคลื่อนที่ตามแนวแกนของสกรู ทำให้ระยะระหว่างจุด B และจุด D เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ ก้านต่อ FGHI เกิดการหมุนเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า ข้อดีของกลไกแบบนี้คือ น้ำหนักของชุดขับเคลื่อนเบา อย่างไรก็ตามการติดตั้งชุดบอลสกรูในตำแหน่งดังกล่าวทำให้การควบคุมยากขึ้น เพราะความสัมพันธ์ระหว่างระยะของจุด B และ D ไม่เป็นเชิงเส้นกับมุมของการหมุน

พิจารณารูปที่ 5.29 กลไกของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่ถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยชุดบอลสกรูเช่นเดียวกับ โดยตำแหน่งในการติดตั้งฐานของชุดบอลสกรูจะแตกต่างกัน ในแบบที่ 2 ฐานจะถูกยึดติดกับก้านต่อ ABJK และส่วนตัวบอลของชุดบอลสกรูจะติดกับบูชด้วยข้อต่อหมุน ซึ่งบูชเองติดกับเพลาดรตรงด้วยข้อต่อเลื่อน ซึ่งตัวเพลาดรจะถูกยึดติดกับก้านต่อ BC

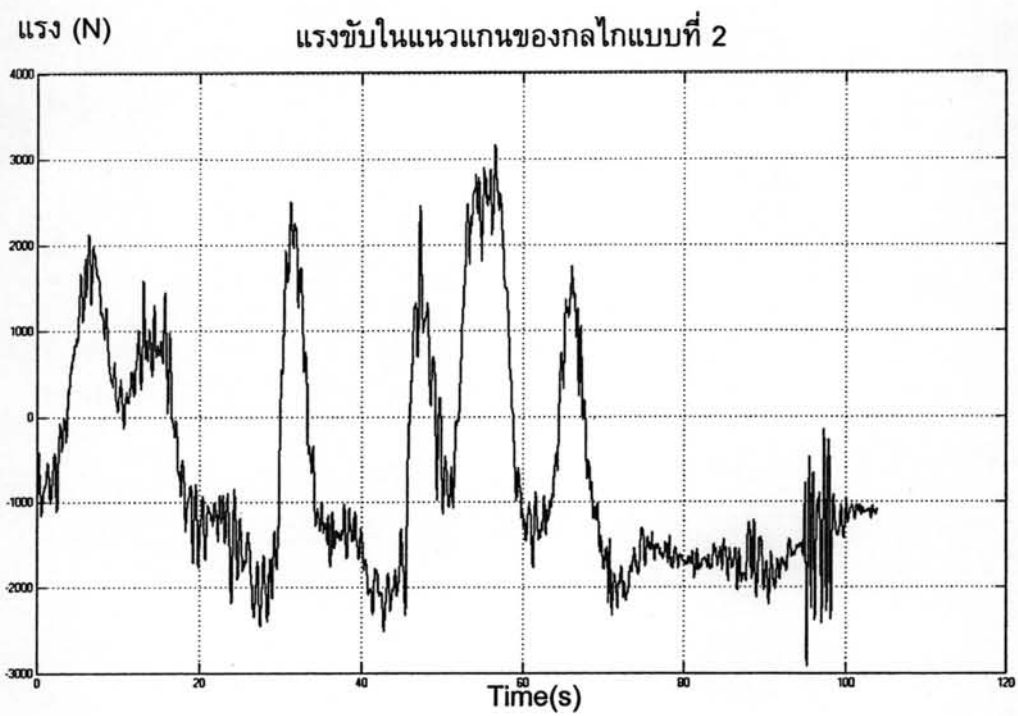
เมื่อตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นเกิดการเคลื่อนที่จะผลักให้ก้านต่อ BC เคลื่อนที่หมุนรอบจุด B เมื่อก้านต่อ BC หมุนทำให้ก้านต่อ FGHI เกิดการหมุนเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า ข้อดีและข้อเสียของกลไกทั้งสองแบบจะเหมือนกัน

เมื่อนำกลไกการขับเคลื่อน *Pitch* ทั้งสองแบบมาวิเคราะห์หาแรงในการขับเคลื่อนพบว่า แรงที่ต้องใช้ในการเคลื่อนที่ของแบบที่ 1 แบบที่ 2 เป็นดังรูปที่ 5.30 และรูปที่ 5.31 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.30 และรูปที่ 5.31 พบว่าแรงในแนวแกนที่ตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นต้องขับให้เครื่องจำลองการเคลื่อนที่จำลองความเร่งด้านหน้าของรถยนต์นั้น ในแบบที่หนึ่งต้องใช้แรงขับถึง 7000 นิวตัน และในส่วนของแบบที่สองนั้น แรงขับสูงสุดประมาณ 3000 นิวตัน ดังนั้น การออกแบบกลไกขับเคลื่อนนั้นจะเลือกแบบที่สองเป็นกลไกสำหรับเครื่องจำลองการเคลื่อนที่



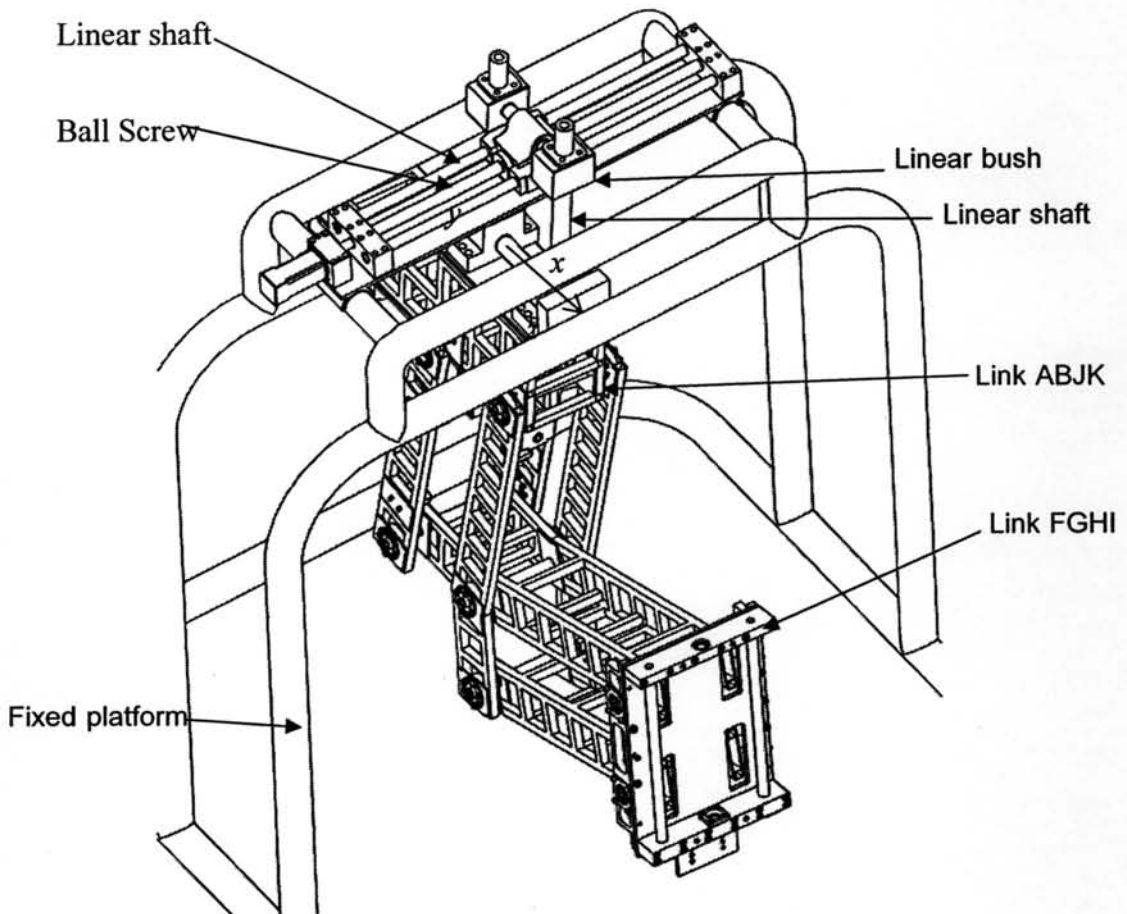
รูปที่ 5.30 แรงขับในการเคลื่อนที่ของกลไกแบบที่ 1



รูปที่ 5.31 แรงขับในการเคลื่อนที่ของกลไกแบบที่ 2

#### 5.4.2 การออกแบบส่วนขับเคลื่อนมุม *Roll* ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

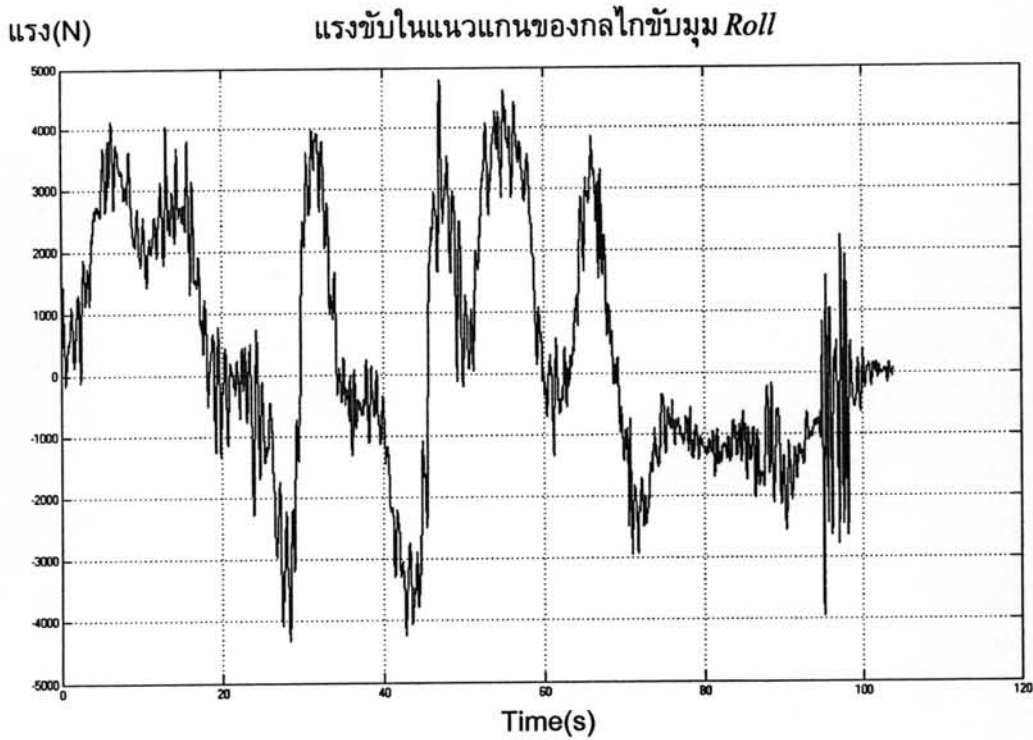
การขับเคลื่อนมุม *Roll* ใช้หลักการเดียวกันกับวิธีขับเคลื่อนมุม *Pitch* พิจารณารูปที่ 5.32 แสดงการติดตั้งชุดบอลสกรูเพื่อขับเคลื่อนให้ก้านต่อ ABJK หมุนเพื่อจำลองความเร่งด้านข้าง โดยส่วนตัวบอลสกรูต่อกับบูชด้วยข้อต่อหมุน และตัวบูชสวมกับตัวเพลาดร้งด้วยข้อต่อเลื่อน ตัวเพลาดร้งยึดติดกับก้านต่อ ABJK จากการต่อกันของโครงสร้างดังกล่าวนี้ ทำให้เมื่อตัวบอลสกรูเลื่อน จะผลักให้บูชเลื่อน เป็นผลให้ ก้านต่อ FGHI หมุนรอบแกน  $x$  และเพื่อลดภาระภายในของบอลสกรู จะเสริมโครงสร้างส่วนตัวขับเคลื่อนด้วยเพลาดร้งหนึ่งคู่ โดยติดตั้งทั้งด้านซ้ายและขวาของบอลสกรู



รูปที่ 5.32 กลไกขับเคลื่อนมุม *Roll*

เมื่อนำกลไกขับเคลื่อนดังกล่าวมาวิเคราะห์หาแรงที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ผลจะเป็นดังรูปที่ 5.31 พบว่าแรงขับเคลื่อนสูงสุดเป็น 4000 นิวตัน





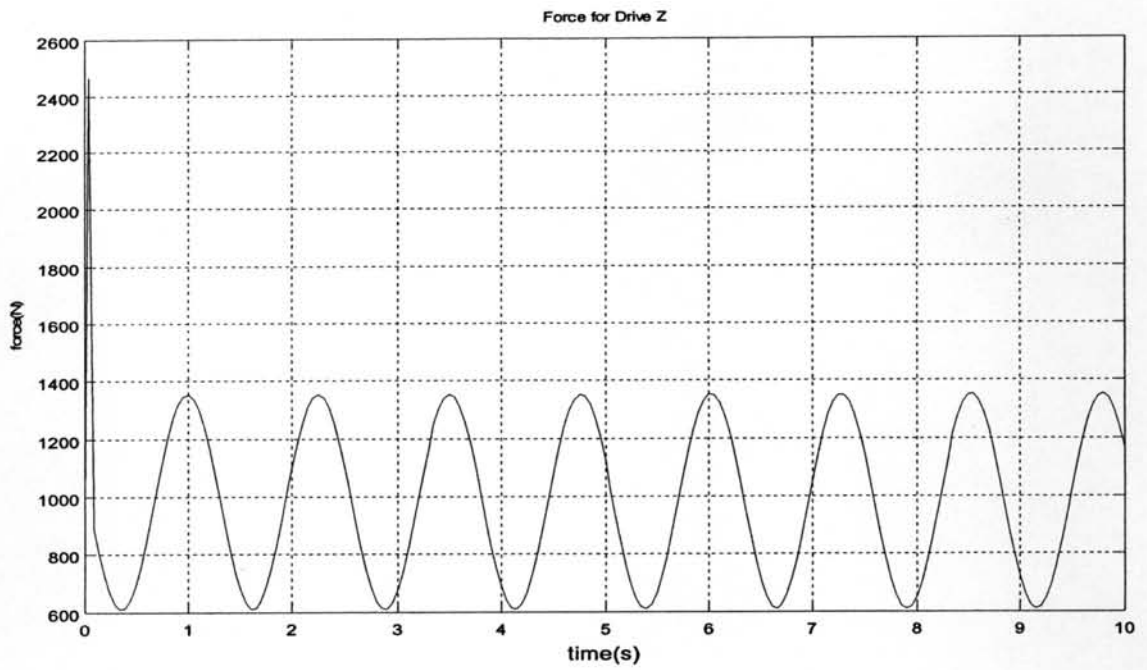
รูปที่ 5.33 แรงในการขับเคลื่อน *Roll*

#### 5.4.3 การออกแบบส่วนขับเคลื่อนแกน Z ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

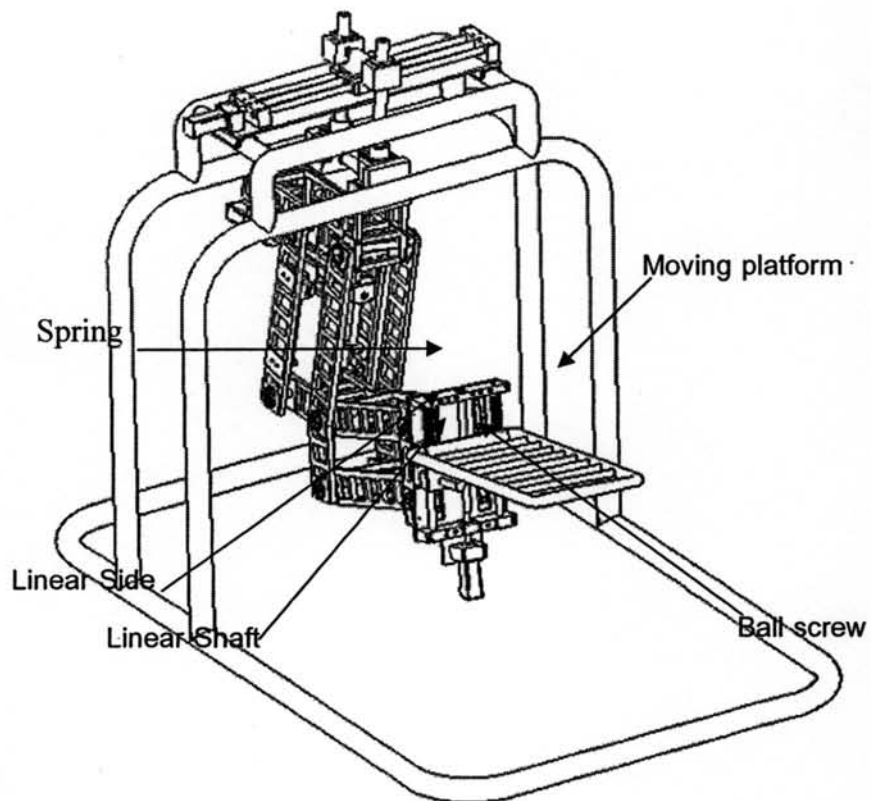
เช่นเดียวกัน การออกแบบกลไกการจำลองความเร่งในแนวที่ตั้งฉากกับที่นั่งของยานพาหนะใช้ชุดบอลสกรูเป็นตัวขับเคลื่อนที่ขึ้นลง และเพื่อความเสริมความแข็งแรงจะนำลูกปืนเชิงเส้น 4 ตัว และเพลาดร 2 ชั้นในการรับภาระที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของ Moving platform การติดตั้งกลไกนี้จะติดตั้งเข้าไปในตำแหน่งปลายแขนของกลไกเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ ซึ่งเมื่อไปวิเคราะห์หาแรงที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนเป็นดังรูป ที่ 5.34

จากรูปที่ 5.34 แสดงแรงที่ต้องใช้ในการดันให้ Moving platform เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง  $0.5g \cdot \sin(2\pi \cdot 5t)$  พิจารณาพบว่าเมื่อ Moving platform หยุดนิ่งจะมีแรงที่ตัวขับเคลื่อนจ่ายให้กับ Moving platform ตลอดเวลาที่มีขนาดเป็น 1000 นิวตันแรงดังกล่าวคือแรงเนื่องจากน้ำหนักของคนขับ เพื่อให้ตัวขับเคลื่อนจ่ายแรงขับเคลื่อนตลอดเวลา การออกแบบจึงได้นำชุดสปริงมาชดเชยน้ำหนักของผู้ขับขี่ โดยสปริงจะติดตั้งขนานคู่กับบอลสกรู โดยที่ปลายทั้งสองด้านของสปริงจะยึดติดกับตัวยึดของเพลาดร และปลายอีกด้านจะยึดติดกับ Moving platform ดังรูปที่ 5.35 อย่างไรก็ตามการติดตั้งสปริงเข้าไปในตำแหน่งนี้ จะเป็นผลให้ขณะหมุนเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า Moving platform จะเคลื่อนที่ในแนวตั้งด้วยเพราะตำแหน่งสมดุลของสปริงจะเปลี่ยนแปลงไปตามมุมที่เอียงไปเมื่อเทียบกับทิศทางแนวตั้งของแรงโน้มถ่วง





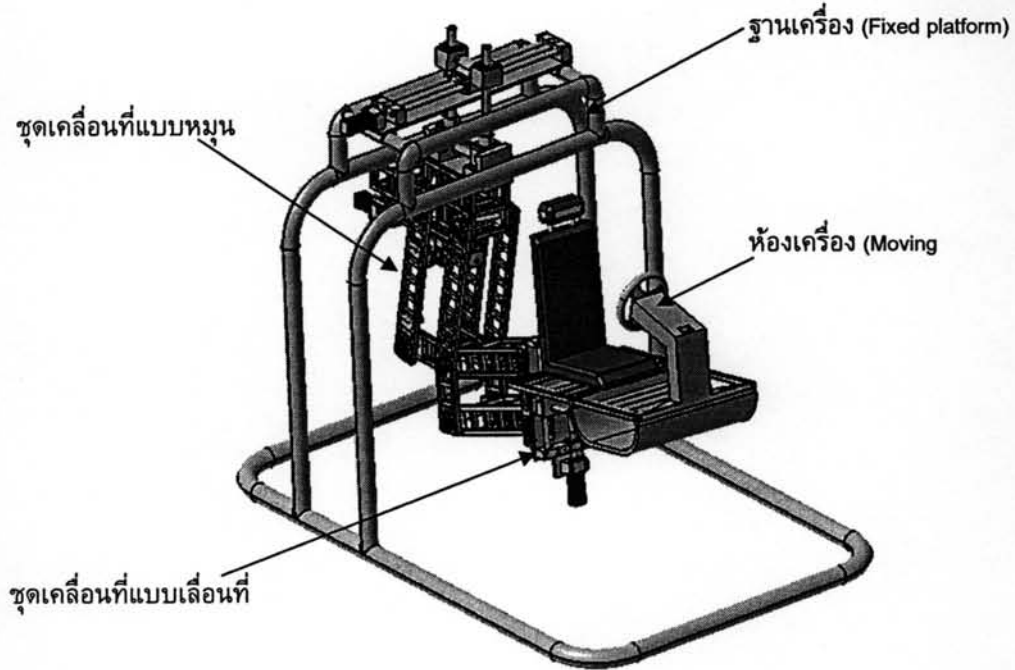
รูปที่ 5.34 แรงในการขับเคลื่อน Z



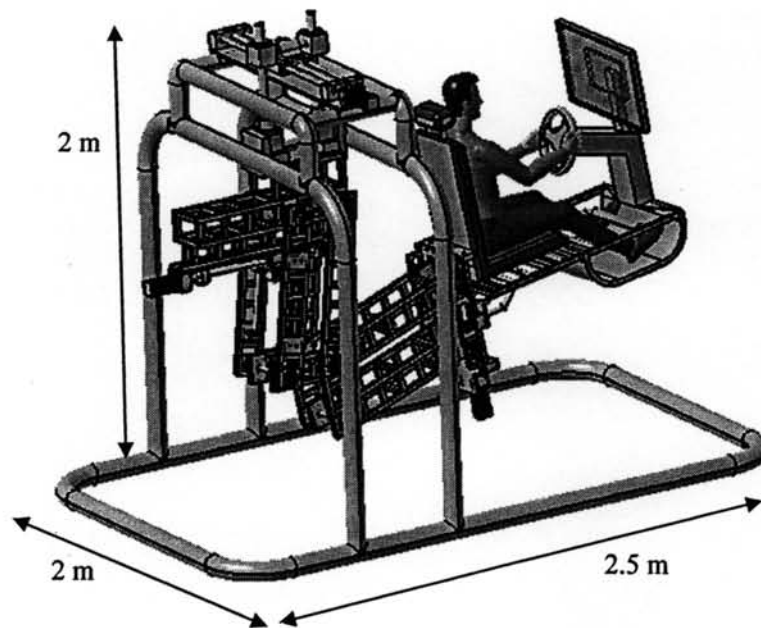
รูปที่ 5.35 กลไกขับเคลื่อนที่ในแนว Z

### 5.5 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่อย่างสมบูรณ์

เมื่อนำก้านต่อและส่วนขับเคลื่อนรวมกันจะได้รูปร่างที่สมบูรณ์ดังรูปที่ 5.36 ส่วนขนาดของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่แสดงไว้ดังรูปที่ 5.37



รูปที่ 5.36 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระ



รูปที่ 5.37 ขนาดของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระ