บทที่ 4

ขอบเขต แนวคิด และการศึกษากลไก สำหรับออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

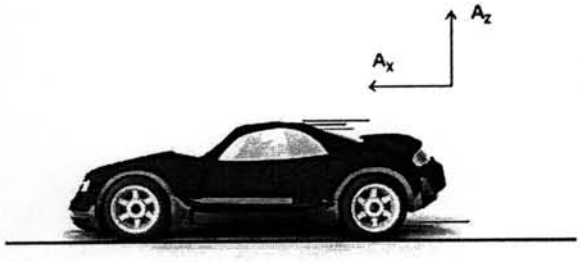
เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่สร้างความรู้สึกเสมือนจริงนั้นจะประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ 3 ส่วนคือ ส่วนการแสดงภาพ ส่วนเสียง และส่วนเคลื่อนที่ ในวิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อออกแบบ และพัฒนาส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่เป็นหลัก ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์นั้นต้องคำนึงถึง ลักษณะการเคลื่อนที่ของรถยนต์ที่จะเกิดขึ้นจริงกับคนขับ ดังนั้นเพื่อครอบคลุมถึงสภาวะที่จะเกิดขึ้นกับคนขับในแต่ละกรณีให้ได้มากที่สุด การออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ต้องพิจารณาถึง แนวคิดของหลักการในการจำลองการเคลื่อนที่ ซึ่งจะกล่าวไว้ในส่วนที่ 4.1จากนั้นจะศึกษาขอบเขตการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่มีอยู่ในปัจจุบัน ในหัวข้อ 4.2 อธิบายถึงแนวคิดหัวข้อที่ 4.3 และในหัวข้อที่ 4.4 จะแสดงถึงตัวอย่างการกลไกในปัจจุบันของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ เพื่อศึกษาดัดแปลงและพัฒนาเป็นกลไกที่นำมาเป็นเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ในงานนี้

4.1 แนวคิดของหลักการในการจำลองการเคลื่อนที่

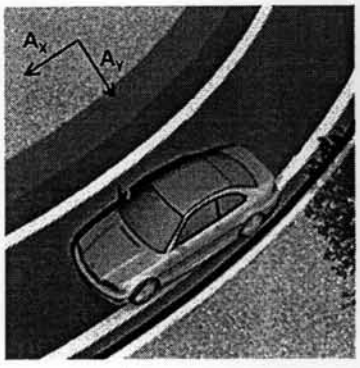
ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 มนุษย์นั้นมีความสามารถรับรู้การเคลื่อนที่ได้ 3 ส่วนหลักๆ คือ ระบบกล้ามเนื้อและข้อต่อ ระบบการทรงตัว และการมองเห็น ดังนั้นการจะจำลองสภาวะให้มีความรู้สึกเสมือนจริงมากที่สุด ทั้ง 3 ส่วนของเหตุการณ์จริงและเหตุการณ์จำลองต้องสอดคล้องกัน จากการศึกษาพบว่าในส่วนของแรงที่มากระทำกับร่างกายจะเกี่ยวข้องกับระบบกล้ามเนื้อและข้อต่อของมนุษย์ ส่วนความเร่งที่เป็นสาเหตุของการเกิดแรงนั้นจะเกี่ยวข้องโดยตรงระบบการทรงตัว เพราะระบบการทรงตัวของมนุษย์จะประกอบไปด้วยอวัยวะวัดความเร่งเชิงเส้น และตัววัดความเร่งเชิงมุม ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอเฉพาะ ส่วนของการจำลองความเร่งของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่เป็นหลัก จะไม่กล่าวถึงการจำลองของภาพ

หลักการจำลองความเร่งของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่มีหลายๆแบบขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสภาวะที่ไปจำลอง ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึง 2 แบบหลักๆ คือ หนึ่งสร้างความเร่งให้เหมือนกับความเร่งที่จำลอง หมายความว่า กรณีที่ต้องการจำลองความเร่งด้านหน้าของยานพาหนะ เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ก็จะเคลื่อนที่ด้วยความเร่งแบบเดียวกัน เพื่อให้คนที่นั่งอยู่รู้สึกเสมือนจริง ในแบบที่สองคือ อาศัยหลักการของการเอียงของเบาะนั่งคนขับเพื่ออาศัยแรงโน้มถ่วงโลกมาสร้างความเร่งเสมือน จึงเป็นหลักการหลักในการใช้ออกแบบในงานวิจัยนี้ จากรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งจริงที่จำลอง และความเร่งเสมือนที่เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ได้รับจากการเอียงเบาะนั่งคนขับ พิจารณาจากรูป 4.1 แสดงการเอียงเบาะนั่งคนขับเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า และด้านข้างของรถ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเร่ง

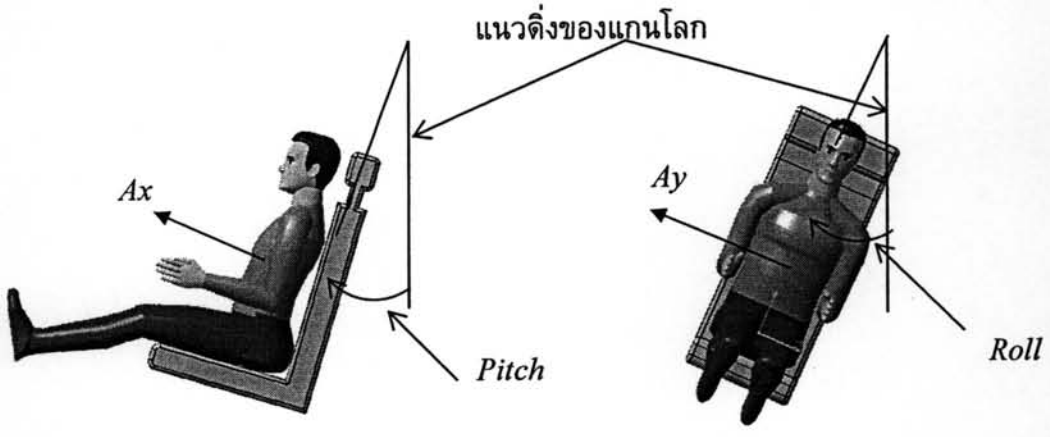
ด้านหน้า *Ax* กับมุมที่เอียงเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า *Pitch* และความสัมพันธ์ของความเร่งด้านข้างกับมุมที่เอียงเพื่อจำลองความเร่งด้านข้าง *Roll* จะเป็นดังสมการต่อไปนี้



ที่มา : จาก [25]



ที่มา : จาก [26]



ขณะจำลองความเร่งด้านหน้า

ขณะจำลองความเร่งด้านข้าง

รูปที่ 4.1 การจำลองการเคลื่อนที่ด้วยการเอียงเบาะนั่งขณะจำลองความเร่งของรถยนต์

กำหนดให้

Ax คือ ความเร่งด้านหน้ารถ

Ay คือ ความเร่งด้านข้างรถ

Pitch คือ มุมที่เกิดจากการหมุนเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้ารถ

Roll คือ มุมที่เกิดจากการหมุนเพื่อจำลองความเร่งด้านข้างรถ

g คือ ความแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเป็น 9.81m/s^2

t คือ เวลา มีหน่วยเป็น วินาที

$$Pitch(t) = \sin^{-1}\left(\frac{Ax(t)}{g}\right) \qquad (4.1)$$

$$Roll(t) = \sin^{-1}\left(\frac{Ay(t)}{g \cdot \cos(Pitch(t))}\right) \quad (4.2)$$

ตัวอย่างเช่น ถ้าความเร่งด้านหน้า และด้านข้างรถวัดได้ 0.5g และ 0.6g ตามลำดับ เครื่องจำลองการเคลื่อนที่จะหมุนมุม *Pitch* จำลองความเร่งด้านหน้าเป็นมุม 30 องศา และหมุนมุม *Roll* เพื่อจำลองความเร่งด้านข้างเป็นมุม 44 องศา

วิทยานิพนธ์นี้จะเสนอการจำลองความเร่งของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์ด้วยการเอียงเบาะนั่งคนขับ เพราะในแง่ของขนาดของโครงสร้าง และความสามารถในการจำลองความเร่งจากการเอียงเหมาะสมกับการนำไปจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์ ถึงแม้ว่าในแง่ของการสร้างความรู้สึกเสมือนจริงของแบบนี้จะน้อยกว่าการจำลองความเร่งในแบบแรกก็ตาม การออกแบบแนวคิดเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบนี้สามารถสร้างความรู้สึกเสมือนจริงได้โดยอาศัยหลักการระบบการรับรู้ของมนุษย์ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อ 4.3 และเพื่อให้เครื่องจำลองการเคลื่อนที่สามารถจำลองความเร่งของรถยนต์ได้จึงศึกษาถึงขอบเขตของความเร่งเพื่อจะนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ในการกำหนดขอบเขตการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

4.2 ขอบเขตการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

การกำหนดขอบเขตของการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่นั้นมีความสัมพันธ์ต่อขีดความสามารถของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ ซึ่งเพื่อให้ได้ขอบเขตที่เหมาะสมในการนำมาออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ ในการกำหนดการเคลื่อนที่อาศัยข้อมูลหลักๆอยู่ 3 ส่วนคือ ขอบเขตจากการทดสอบวัดความเร่งรถยนต์ในสนามแข่งรถ ขอบเขตจากตัวอย่างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ในปัจจุบัน และขอบเขตจากระบบการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์

4.2.1 ขอบเขตจากการทดสอบวัดความเร่งรถยนต์ในสนามแข่งรถ

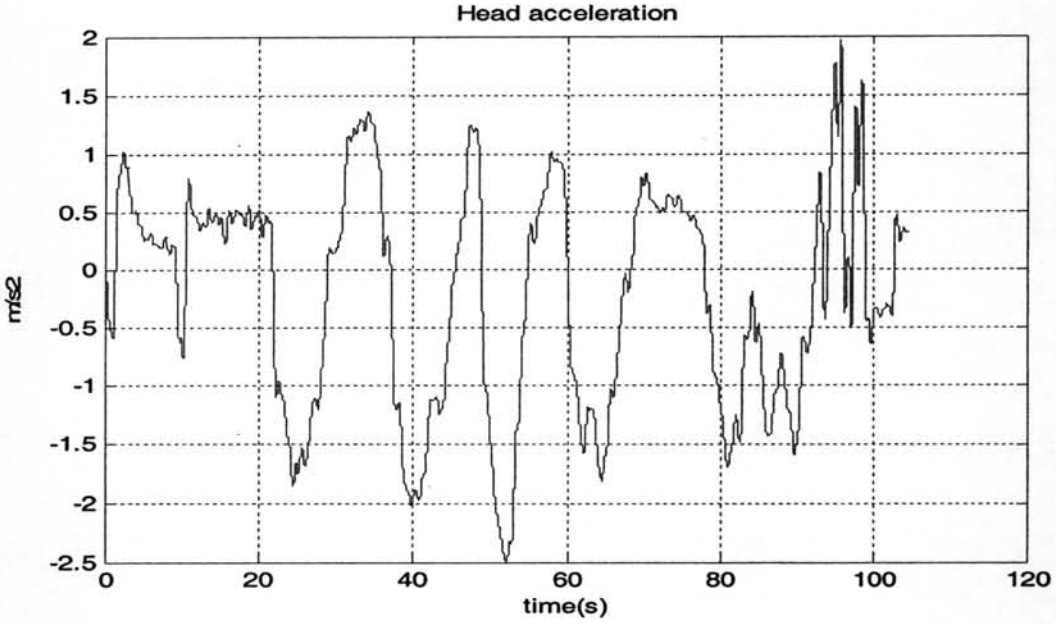
การศึกษาพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถยนต์ที่ได้ข้อมูลออกมาเชิงปริมาณทางฟิสิกส์นั้น สามารถบ่งบอกและจำแนกลักษณะพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงได้ ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองวัดค่าข้อมูลที่ต้องการจากรถจริง โดยนำอุปกรณ์ไปติดตั้งและวัดบันทึกข้อมูลการขับขี่ ซึ่งการทดลองนี้ต้องการทราบค่าความเร่งที่เกิดขึ้นกับตัวรถในตำแหน่งของผู้ขับขี่(ตำแหน่งใต้เบาะคนขับ) ข้อมูลที่ได้จะบ่งบอกลักษณะพฤติกรรมของตัวรถที่ส่งผลต่อตำแหน่งผู้ขับขี่โดยตรง ในการทดลองนั้นจะวัดเฉพาะความเร่งในแนวแกนสำคัญคือ ความเร่งในแนวแกนด้านหน้ารถ และความเร่งในแนวแกนด้านข้างรถ

เนื่องจากจุดประสงค์การทดลองคือต้องการค่าขอบเขตสูงสุดของความเร่งและความหน่วงด้านหน้า และด้านข้างของรถ เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์กำหนดขอบเขตการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่สำหรับรถยนต์ ดังนั้นสถานที่ทดลองจึงใช้เป็นสนามแข่งรถจริงและใช้นักขับมืออาชีพเป็นคนขับรถ รถที่ใช้ขับจะติดตั้งเครื่องวัดความเร่งในแนวด้านหน้าและด้านข้าง รถที่ใช้จะเป็นรถมินิ ดังแสดงในรูป 4.2 ในส่วน

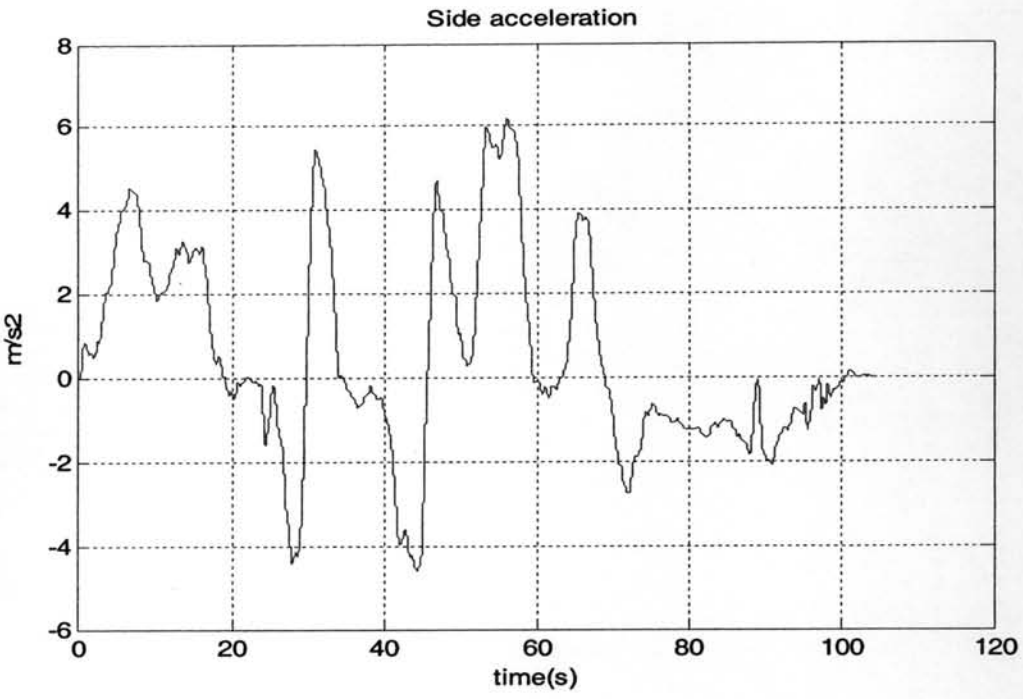
ของตัววัดความเร่งใช้ตัววัดความเร่งแบบสองแนวแกน คือความเร่งด้านหน้าและความเร่งด้านข้าง โดยผลการวัดความเร่งจะวัดในช่วงที่เป็นทางตรงและทางโค้ง ในส่วนของทางตรงจะมีการเคลื่อนที่แบบเปลี่ยนเลนไปมา

รูปที่ 4.2 รถยนต์ที่ทดลอง [ขอขอบคุณบริษัท กรังปรีซ์ และบริษัท BMW]

ในการทดลองนั้นจะให้รถยนต์เคลื่อนที่ไปรอบสนามหนึ่งรอบแล้วเก็บค่าความเร่งที่เกิดขึ้นซึ่งความเร่งที่วัดได้ทั้งสองแนวแกนนั้นจะมีรายละเอียดดังรูปที่ 4.3 ถึง 4.4



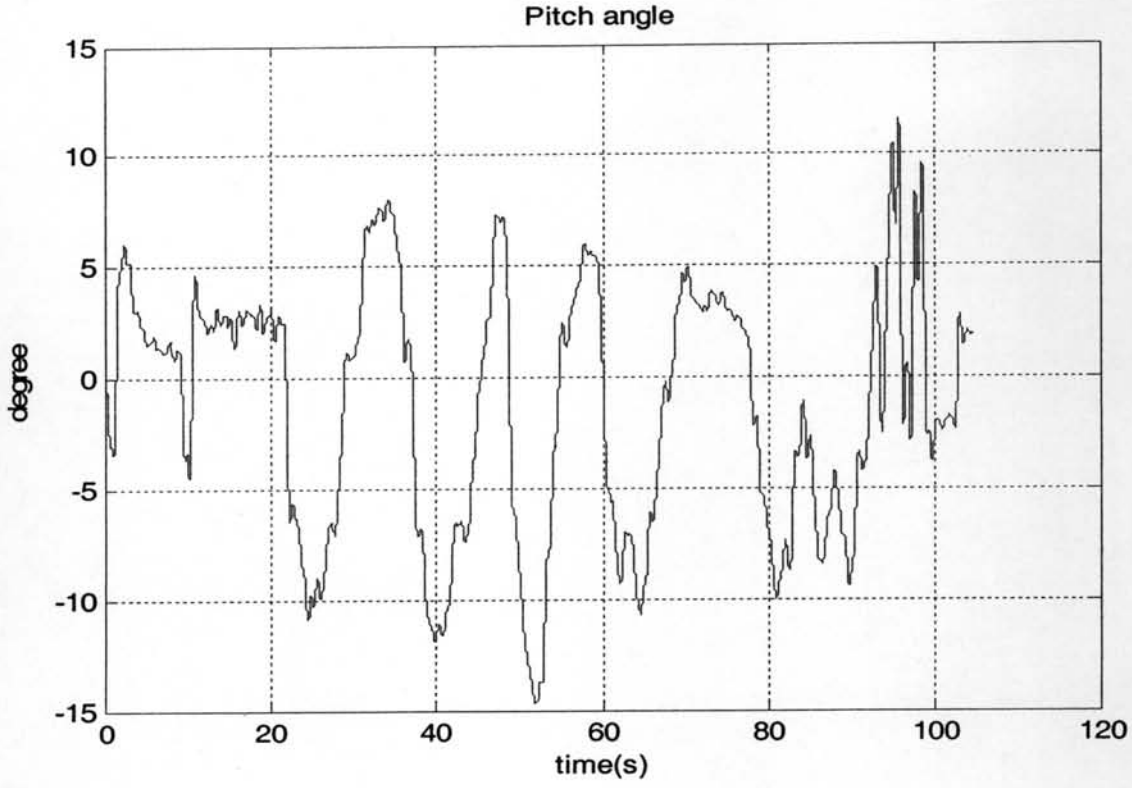
รูปที่ 4.3 ความเร่งด้านหน้ารถที่วัดได้



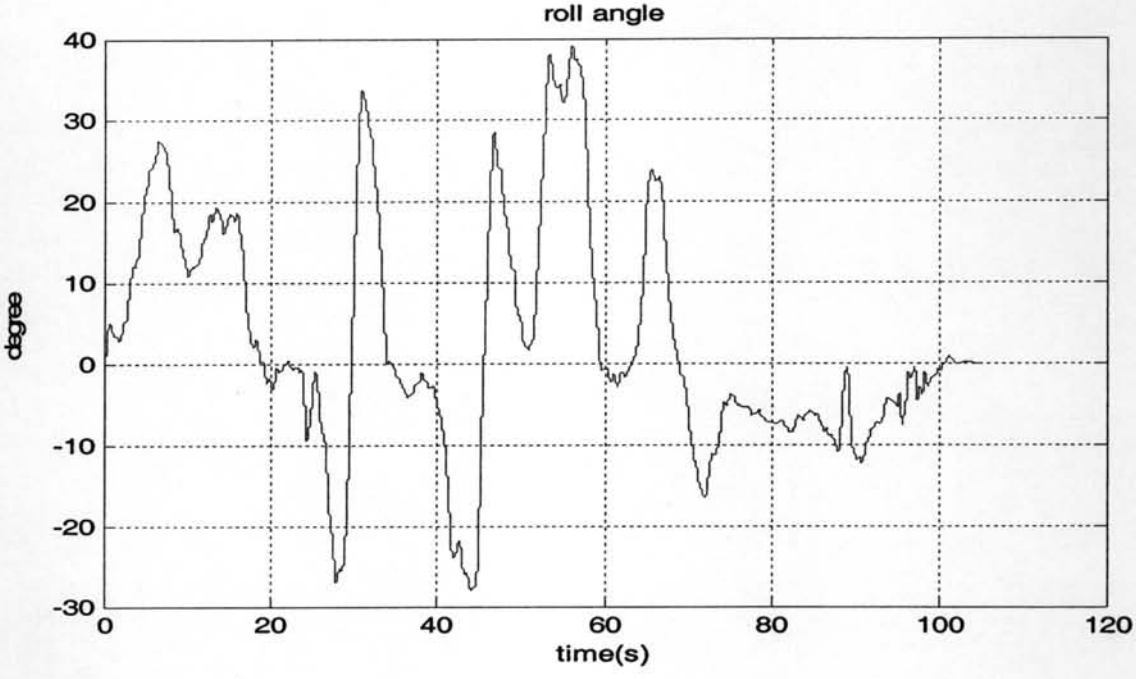
รูปที่ 4.4 ความเร่งด้านข้างรถที่วัดได้

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าความเร่งด้านหน้าและด้านข้างมีขนาดสูงสุดเท่ากับ 2.5 และ 6 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง ตามลำดับ และเมื่อนำข้อมูลนี้ไปแทนในสมการที่ 4.1 และ4.2 เพื่อเปลี่ยนเป็นค่ามุมที่ต้องเอียงเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า *Pitch* และมุมที่ต้องเอียงเพื่อจำลองความเร่งด้านข้าง *Roll* ซึ่งผลที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 4.4 และ4.5 ตามลำดับ

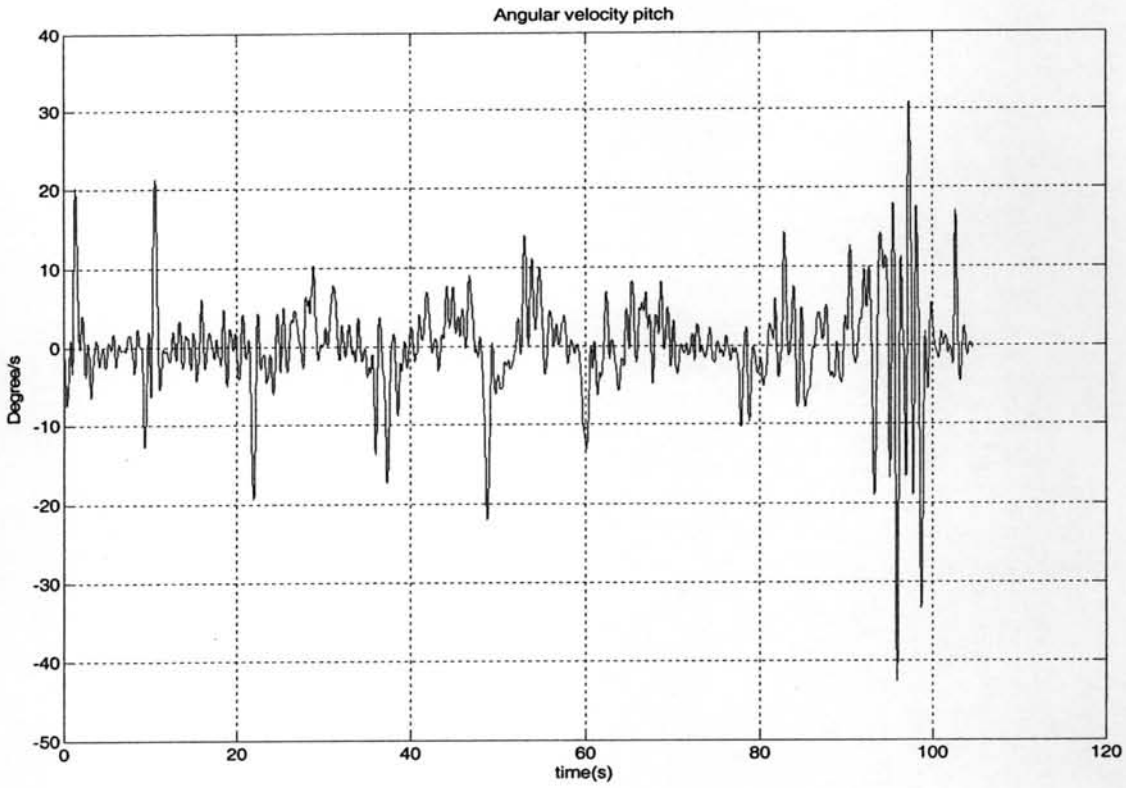
จากรูปที่ 4.5 และ4.6 มุมที่ต้องเอียงเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้านั้นจะมากสุดที่ 15 องศา และมุมที่ต้องเอียงเพื่อจำลองความเร่งนั้นจะมากสุดที่ 45 องศา ซึ่งค่ามุมนี้จะนำไปวิเคราะห์ประกอบกับหัวข้อ 4.2.2 และ4.2.3 เพื่อหาขอบเขตที่เหมาะสมกับเครื่องจำลองการเคลื่อนที่สำหรับยานยนต์ และเพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์จึงหาความสัมพันธ์ของความเร็วเชิงมุม และความเร่งเชิงมุมของมุมที่จำลองความเร่งด้านหน้า และมุมที่จำลองความเร่งด้านข้าง ผลเป็นดังกราฟ 4.7 ถึง 4.10



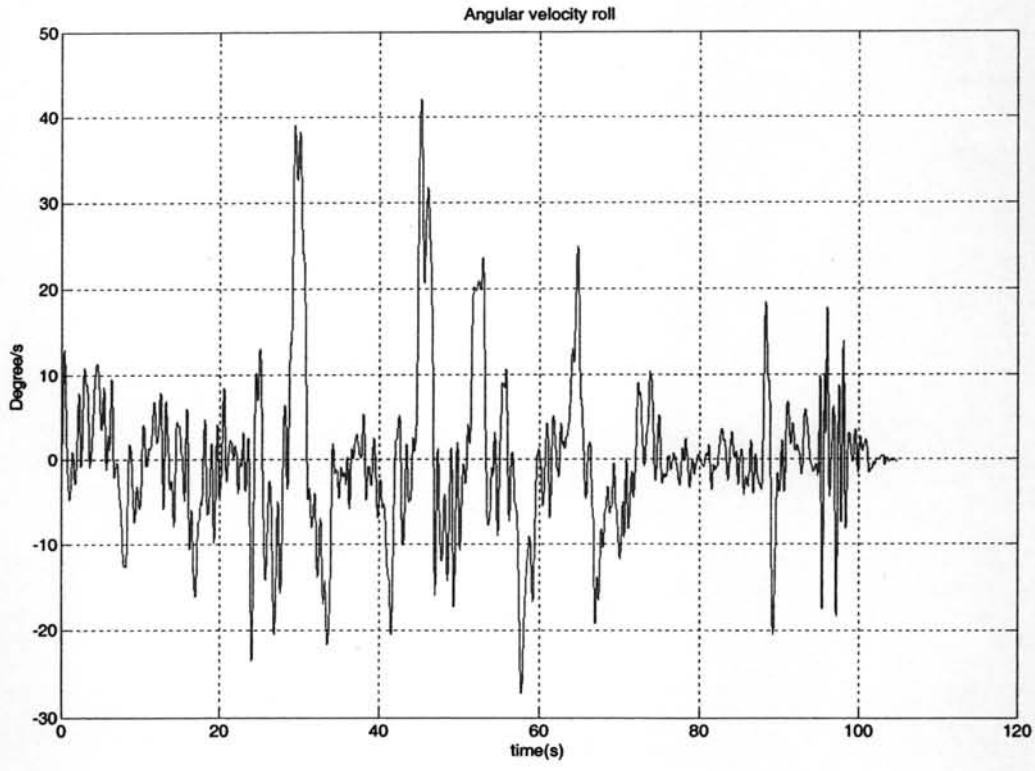
รูปที่ 4.5 ขนาดของมุมเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า



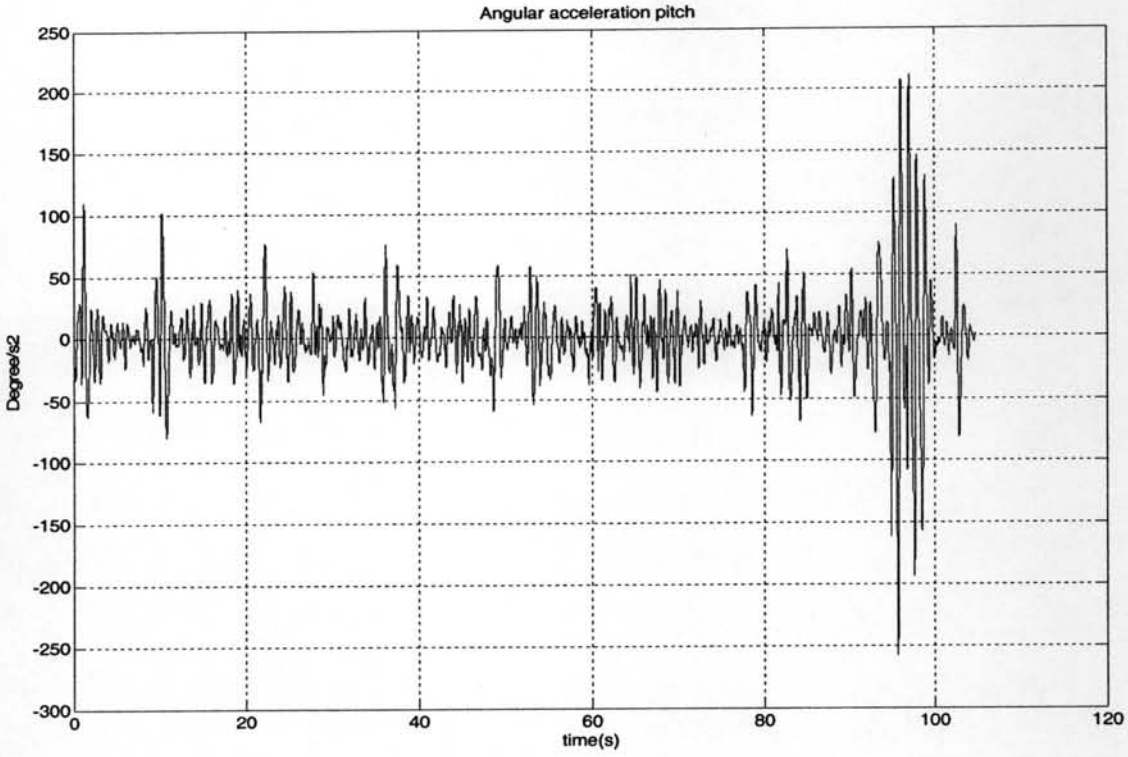
รูปที่ 4.6 ขนาดของมุมเพื่อจำลองความเร่งด้านข้าง



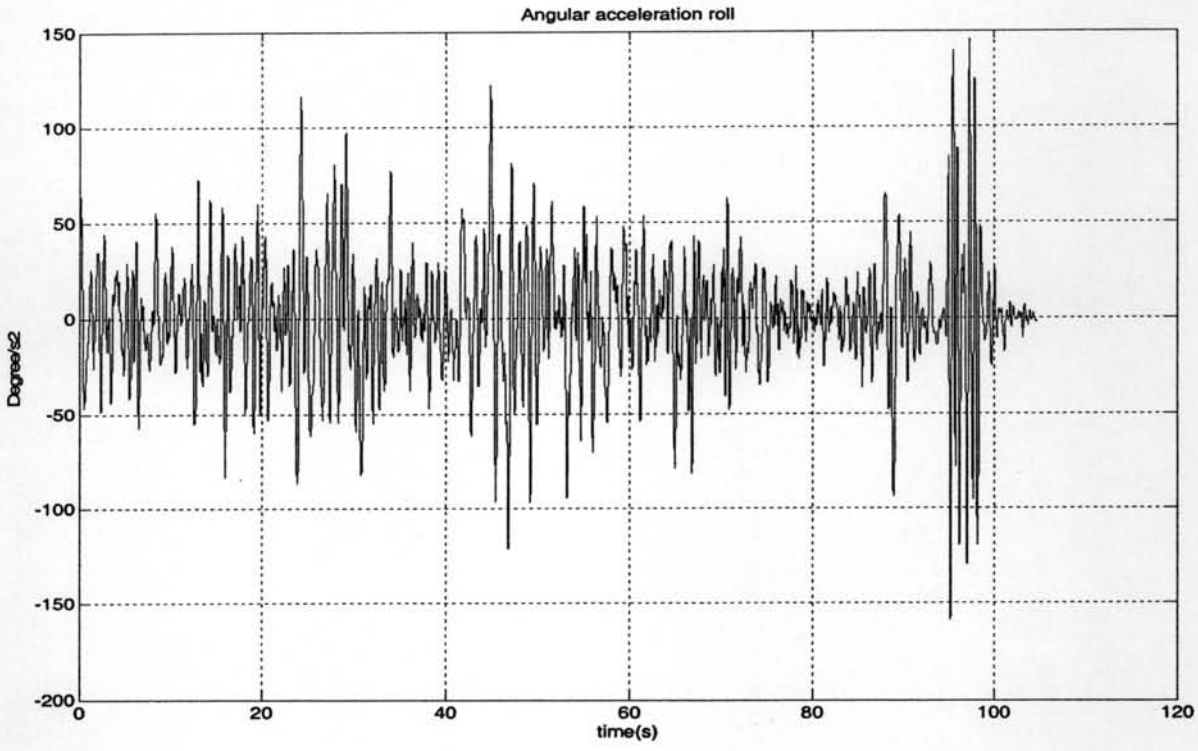
รูปที่ 4.7 ความเร็วเชิงมุมเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า



รูปที่ 4.8 ความเร็วเชิงมุมเพื่อจำลองความเร่งด้านข้าง



รูปที่ 4.9 ความเร่งเชิงมุมเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า



รูปที่ 4.10 ความเร่งเชิงมุมเพื่อจำลองความเร่งด้านข้าง

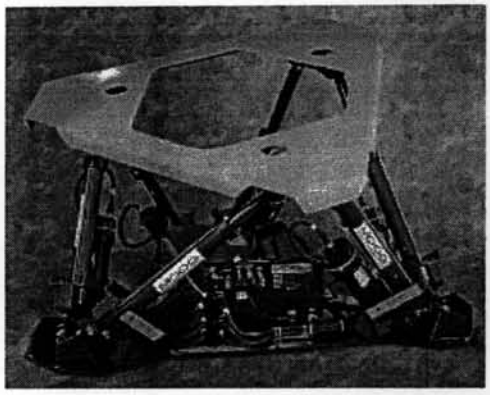
4.2.2 ขอบเขตจากตัวอย่างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ในปัจจุบัน

จากการศึกษาเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ในปัจจุบันดังที่แสดงในบทที่สอง รูปแบบของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่จะขึ้นกับการใช้งานเป็นหลัก เช่น ถ้าต้องการจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องบินมักนิยมใช้ แบบจำลองการเคลื่อนที่แบบ 6 องศาอิสระ หรือบางกรณีใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระ ซึ่งการตัดสินใจในการนำแบบจำลองการเคลื่อนที่ไปใช้จะขึ้นอยู่กับหลายๆปัจจัย ในกรณีของการจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์นั้น แบบจำลองการเคลื่อนที่มีหลายรูปแบบ เช่นกัน รูปแบบที่ได้รับความนิยมจะเป็นแบบ 3 องศาอิสระ และแบบ 6 องศาอิสระ ซึ่งเมื่อพิจารณาขอบเขตการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ในปัจจุบันสามารถสรุปขอบเขตการเคลื่อนที่ได้ดังตารางที่ 4.1ในส่วนรายละเอียดของโครงสร้างนั้นจะอยู่ในรูปที่ 4.11

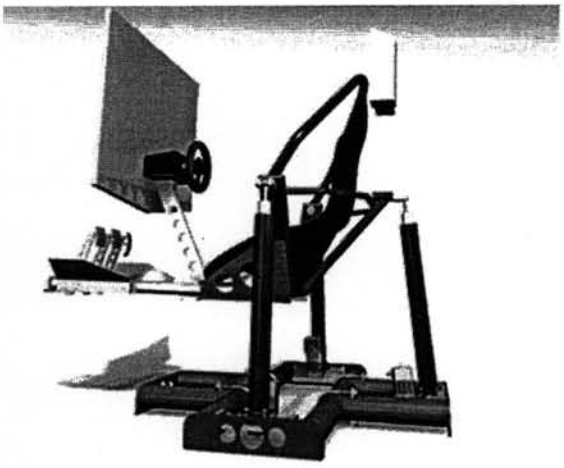
Model	3D100	3D180	In motion 6 DOF	301	In motion 3DOF	simulie
DOF	3	3	6	3	3	3
ความเร่งแกน z	0.8G	0.7G	0.5G	1G	0.8G	0.5G
ความเร็วแกน z	0.5m/s	0.5m/s	0.3m/s	0.6m/s	0.3m/s	0.5m/s
การกระจัดแกน z	±50mm	±75mm	±125mm	±229mm	±127mm	±72mm
ความเร่งแกน y			0.3G			
ความเร็วแกน y			0.3m/s			
การกระจัดแกน y			±125mm			
ความเร่งแกน x			0.3G			
ความเร็วแกน x			0.3m/s			
การกระจัดแกน x			±125mm			
pitch acceleration	±340°/s²	±330°/s²	±60°/s²	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	±500°/s²
pitch velocity	±130°/s	±90°/s	±20°/s	±80°/s	±90°/s	±70°/s
pitch angle	±18°	±18°	±25°	±30°	±25°	±17.4°
roll acceleration	±330°/s²	±320°/s²	±60°/s²	ไม่ระบุ	ไม่ระบุ	±500°/s²
roll velocity	±150°/s	±100°/s	±20°/s	±80°/s	±100°/s	±70°/s
roll angle	±15°	±15°	±25°	±30°	±25°	±20.2°
yaw acceleration			±60°/s²			
yawl velocity			±20°/s			
yaw angle			±25°			

ตารางที่ 4.1 ขอบเขตการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ในปัจจุบัน

(a) Model In motion 3 DOF ที่มา: จาก [3]



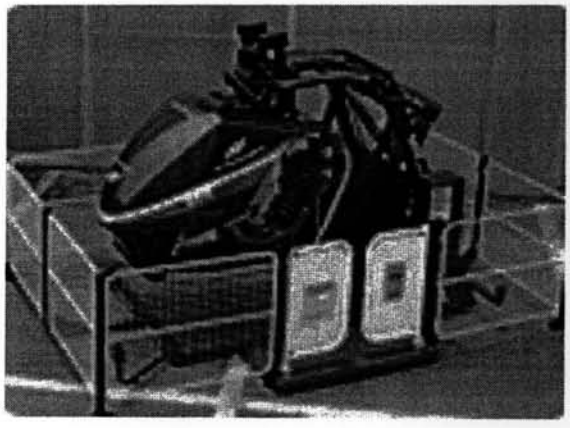
(b) Model In motion 6 DOF ที่มา: จาก [3]



(c) Model 301 ที่มา: จาก [1]

(d) Model 3D100 ที่มา: จาก [27]

(e) Model 3D180 ที่มา: จาก [27]



(f) Model simulie ที่มา: จาก [28]

รูปที่ 4.11 ตัวอย่างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ในปัจจุบัน

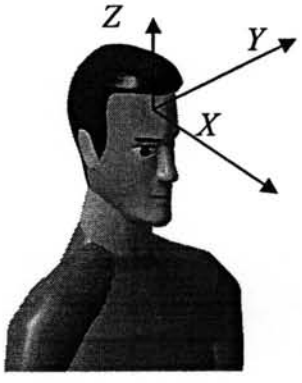
4.2.3 ขอบเขตระบบการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์

ขอบเขตการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์ มีประโยชน์อย่างมากในการกำหนดรูปแบบ และการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลอง ประเด็นที่น่าสนใจคือ ขีดความสามารถในการรับรู้ความเร่งเชิงเส้น และความเร่งเชิงมุมที่มนุษย์สามารถจับความรู้สึกได้ ค่าขอบเขตนี้เกี่ยวข้องโดยตรงกับวิธีการจำลองเป็นเงื่อนไขขอบเขตเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ ตัวอย่างการนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ เช่น ในกรณีที่เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ต้องการเคลื่อนกับมาที่ตำแหน่งเดิม โดยต้องการให้มนุษย์ไม่รู้สึกอัตราเร่งในการเคลื่อนกลับตำแหน่งการเคลื่อนที่ต้องไม่มากกว่าขอบเขตต่ำสุดของการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์ หรือในกรณีที่ต้องพิจารณาขอบเขตขั้นต่ำในการจำลองการเคลื่อนที่ของแต่ละแนวแกน ค่าของความเร่งที่เข้ามาต้องมากกว่าขอบเขตการรับรู้ของมนุษย์ เครื่องจำลองการเคลื่อนที่จึงจะเคลื่อนที่ เพราะไม่มีประโยชน์อะไรถ้าเคลื่อนที่แล้วมนุษย์ไม่รู้สึก

จากการศึกษาระบบการรับรู้ของมนุษย์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถแสดงขอบเขตการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์ได้ดังตารางที่ 4.2 จากรูปซึ่งสัมพันธ์กับตำแหน่งการวางแกนเมื่อเทียบกับศีรษะมนุษย์ในรูปที่ 4.12

ประเภทการรับรู้	ขอบเขตการรับรู้
ขอบเขตการรับรู้ความเร่งแกน X	$\pm$ 0.17 เมตร/วินาที^{2}
ขอบเขตการรับรู้ความเร่งแกน Y	$\pm$ 0.17 เมตร/วินาที^{2}
ขอบเขตการรับรู้ความเร่งแกน Z	$\pm$ 0.28 เมตร/วินาที^{2}
ขอบเขตการรับรู้ความเร่งเชิงมุมแกน X	$\pm$ 2 องศา/วินาที^{2}
ขอบเขตการรับรู้ความเร่งเชิงมุมแกน Y	$\pm$ 2 องศา/วินาที^{2}
ขอบเขตการรับรู้ความเร่งเชิงมุมแกน Z	$\pm$ 2 องศา/วินาที^{2}

ตารางที่ 4.2 ขอบเขตการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์ [23]



รูปที่ 4.12 การวางแกนบนศีรษะมนุษย์

4.2.4 สรุปขอบเขตการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

จากข้อมูลที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ 4.2.1 ถึง 4.2.3 สามารถสรุปได้ว่า เครื่องจำลองการเคลื่อนที่สำหรับรถยนต์นั้น ต้องสามารถจำลอง ความเร่งด้านหน้า ความเร่งด้านข้าง และความเร่งในแนวดิ่งได้ เพราะความเร่งเหล่านี้เป็นความเร่งที่เกิดขึ้นมากกว่าขอบเขตการรับรู้ที่กล่าวถึงในหัวข้อ 4.1.3

เบื้องต้นสำหรับการออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่สามารถกำหนดได้ว่าเครื่องจำลองการเคลื่อนที่สำหรับรถยนต์ควรสามารถเคลื่อนที่ได้ 3 องศาอิสระ เพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า ด้านข้าง และความเร่งในแนวดิ่งของรถยนต์ และจากการศึกษาพบว่าการจำลองความเร่งด้านหน้า และด้านข้างรถยนต์นั้น สามารถทำได้ 2 รูปแบบ

รูปแบบที่หนึ่ง สร้างความเร่งในแนวที่ต้องการโดยตรงจากเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ หมายถึง ถ้าต้องการจำลองความเร่งด้านหน้า ก็ต้องเคลื่อนที่ไปด้านหน้าให้เท่ากับความเร่งที่จำลอง วิธีนี้มีข้อดีที่จำลองความเร่งได้ตรงกับที่ต้องการ ข้อเสียคือ ในกรณีที่ต้องการจำลองความเร่งคงที่ พื้นที่ในการเคลื่อนที่เพื่อจำลองเร่งนั้นต้องมากตามไปด้วย จึงทำให้โครงสร้าง และเนื้อที่ในการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองมีขนาดใหญ่ไม่เหมาะสม

รูปแบบที่สอง คืออาศัยการเอียงของเบาะนั่งของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ เพื่ออาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก เป็นตัวสร้างความเร่งเสมือนแม้ว่า ทำให้ความรู้สึกเสมือนจริงน้อยกว่าแบบที่หนึ่ง ข้อดีของวิธีนี้คือ โครงสร้างของกลไกจะมีขนาดเล็กว่า และสามารถจำลองสภาวะที่ความเร่งคงที่ได้นานกว่า

จากเหตุผลที่กล่าวในข้างต้นสามารถกำหนดได้ว่า เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่ออกแบบนี้มี 3 องศาอิสระ และจะใช้การจำลองในรูปแบบที่สอง คืออาศัยการเอียงเพื่อจำลองความเร่ง ส่วนความรู้สึกไม่เสมือนจริงที่จะเกิดขึ้นนั้น จะนำปัจจัยระบบรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์มาสร้างความรู้สึกเสมือนจริงมากขึ้น ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในหัวข้อที่ 4.3

รวมแล้วจากข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการศึกษาทดลอง ได้กำหนดขอบเขตการแสดงค่าความเร่ง ด้านหน้า ด้านข้าง และความเร่งในแนวดิ่งของรถยนต์สำหรับการออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่สามองศาอิสระ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยขอบเขตการเคลื่อนที่สำหรับ มุมที่เอียงเพื่อกำหนดความเร่งด้านหน้า และความเร่งด้านข้าง นั้นหมายถึง มุมที่เคลื่อนจำลองการเคลื่อนที่จะทำได้ ในส่วนของขอบเขตการเคลื่อนที่ของความเร่งในแนวดิ่งนั้น จะหมายถึงระยะการกระจัดในแนวดิ่งที่มากสุดที่สามารถเคลื่อนที่ได้

แกนการเคลื่อนที่ของกลไก	ความเร่งที่จำลอง	ขอบเขตการเคลื่อนที่
มุมที่เอียงเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า	$\pm 0.6g$	$\pm 45\text{deg}$
มุมที่เอียงเพื่อจำลองความเร่งด้านข้าง	$\pm 0.6g$	$\pm 45\text{deg}$
ความเร่งในแนวดิ่ง	$\pm 0.5g$	$\pm 150mm$

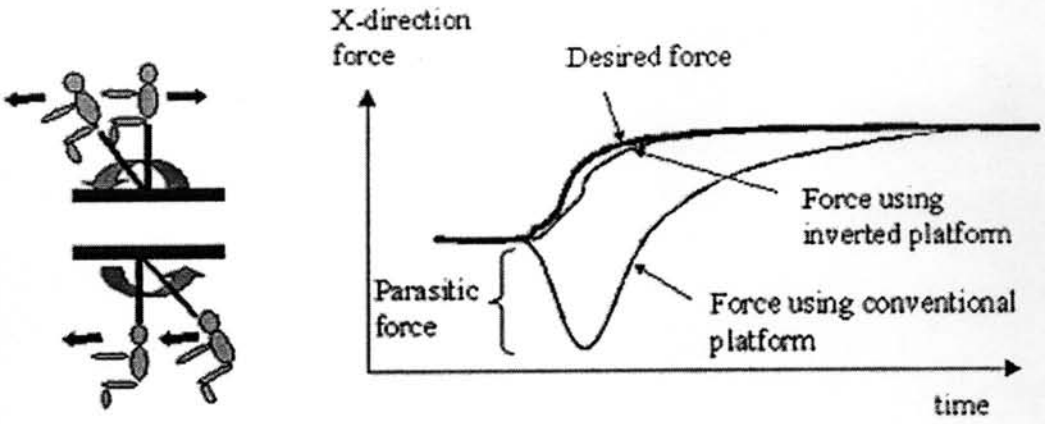
ตารางที่ 4.3 ขอบเขตการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

4.3 แนวความคิดในการออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

จากที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2 ว่าเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่ออกแบบ มี 3 องศาอิสระ โดยสามารถจำลองความเร่งด้านหน้า และความเร่งด้านข้างของรถยนต์ ด้วยการเอียงเบาะที่นั่งเพื่ออาศัยแรงโน้มถ่วงโลกมาสร้างความเร่งเสมือน ดังรูปที่ 4.1 และเพื่อให้เครื่องจำลองการเคลื่อนที่สามารถสร้างความรู้สึกเสมือนจริงได้มากที่สุด จะใช้ข้อมูลการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์เป็นเงื่อนไขสำคัญในการออกแบบ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการนำข้อมูลการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์มาสรุปเป็นแนวคิดในการออกแบบ เพื่อให้เครื่องจำลองการเคลื่อนที่หมุนแล้วมนุษย์รู้สึกเสมือนกำลังเคลื่อนที่ไปด้านหน้า หมุนแล้วมนุษย์รู้สึกเสมือนกำลังมีความเร่งด้านข้างมากระทำ และหมุนแล้วมนุษย์ไม่รู้สึกว่าโดนหมุน จากการศึกษาพบว่ามีปัจจัยที่เกี่ยวข้องอยู่ 3 ส่วนคือ จุดหมุนของการหมุน ขอบเขตการหมุน และอัตราของการหมุน

4.3.1 วิธีเลือกจุดหมุนของกลไกหลัก

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่อาศัยหลักการเอียงตัวมนุษย์เพื่อสร้างความเร่งเสมือนจากแรงโน้มถ่วง การเอียงเบาะที่นั่งของมนุษย์ขึ้นลงสามารถสร้างความรู้สึกเหมือนถูกเร่งขึ้นด้านหน้าหรือหน่วงลง ส่วนการเอียงเบาะด้านข้างสามารถสร้างความรู้สึกเหมือนถูกเร่งจากด้านข้าง(เช่นการเลี้ยวรถ) ดังในปัจจัยสำคัญที่ควรกำหนดในการออกแบบคือจุดหมุนของกลไก เพราะการเอียงรอบจุดหมุนใดๆ ส่งผลต่อความรู้สึกของมนุษย์ จุดที่ใช้หมุน จะมีผลอย่างมากในการสร้างความรู้สึกเสมือนจริง เพราะจุดหมุนจะส่งผลโดยตรงต่อแรงเริ่มต้นที่เกิดขึ้น แรงดังกล่าวเรียกว่าแรงด้านการเคลื่อนที่ของร่างกายมนุษย์ หมายความว่ามนุษย์จะพยายามรักษาตำแหน่งเดิมของร่างกาย ทำให้ร่างกายเกิดการเกร็งในช่วงขณะเริ่มต้นการเคลื่อนที่ ผลของแรงดังกล่าวเป็นสิ่งที่ควรพิจารณา ตัวอย่างในรูปที่ 4.13 แสดงกรณีที่จุดหมุนแตกต่างกัน คือ จุดหมุนอยู่บนศีรษะ และ จุดหมุนอยู่ล่างศีรษะ



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการวัดแรงที่เกิดขึ้นจากการเลือกจุดหมุน ที่มา: จาก [28]

จากรูปที่ 4.13 เมื่อ Desired force คือแรงที่ต้องการจากการจำลอง พบว่าแรงได้จากเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่จุดหมุนอยู่เหนือศีรษะจะใกล้เคียงกับแรงที่ต้องการมากกว่าแรงที่ได้จากเครื่องจำลองที่มีจุดหมุนอยู่ใต้ที่นั่ง ซึ่งแบบแรกทำให้มนุษย์รู้สึกเสมือนจริงมากกว่า

ในงานวิจัยเรื่องการพัฒนาเครื่องจำลองของจักรยานยนต์ของ Shingo และคณะ [29] พบว่า ในการจำลองการเคลื่อนที่ของจักรยานยนต์ จุดหมุนที่สามารถสร้างความรู้สึกเสมือนจริงได้มากที่สุดคือ ที่ศีรษะมนุษย์ ซึ่งทดสอบจากความรู้สึกของคนขับในขณะต้องเบรกรถกระทันหันเพื่อดูการตอบสนองขณะขับจริง เทียบกับขับบนเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ พบว่าจุดหมุนที่เหมาะสมที่สุดของกลไกเครื่องจำลองควรอยู่ที่ศีรษะมนุษย์ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาเรื่องปัจจัยการรับรู้ของมนุษย์ เพราะตำแหน่งของระบบการทรงตัวของมนุษย์อยู่ที่ศีรษะ ข้อดีอีกประการหนึ่งที่จุดหมุนอยู่ในตำแหน่งดังกล่าวคือ ตำแหน่งจุดหมุนนี้ศีรษะมีการเคลื่อนไหวน้อย ทำให้มีความปลอดภัยมากกว่า

4.3.2 ขอบเขตของการหมุน

จากการศึกษาถึงประสาทการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์ พบว่ามนุษย์นั้นมีขอบเขตและความละเอียดในการรับรู้ความเร่งโดยรายละเอียดลักษณะและขอบเขตของการรับรู้ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

การออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่ดีนั้น อาจกำหนดเงื่อนไขไว้ว่าขอบเขตการเอียงนั้นเพื่อจำลองความเร่งนั้น ต้องไม่เอียงโดยมนุษย์รู้สึกว่าโดนเอียง ซึ่งขอบเขตของการเอียงจะตั้งสมมุติฐานอยู่ที่ประสาทการรับรู้ความเร่งในแนวแกน Z จากข้อมูลในบทที่ 3 พบว่ามนุษย์จะเริ่มรู้สึกตัวเมื่อความเร่งแนวแกน Z เปลี่ยนแปลงไป 0.28 เมตรต่อวินาที^{2} ซึ่งเมื่อนำค่าความเร่งดังกล่าวไปเปลี่ยนเป็นมุมที่เอียงได้จะทำให้

ขอบเขตในการเอียงประมาณ 13.7 องศาซึ่งเป็นขอบเขตที่น้อยมาก และเป็นข้อจำกัดในการจำลองความเร่งด้านหน้า และด้านข้าง อย่างไรก็ตาม ขอบเขตความเร่งดังกล่าวเกิดจากมนุษย์รับรู้ความเร่งในแนวแกน Z อย่างเดียว แต่ในกรณีที่มนุษย์ได้รับความเร่งพร้อมกันหลายๆแกน และได้รับข้อมูลทางภาพ และเสียง เป็นผลให้มนุษย์ไม่รู้สึกว่าโดยเอียง ดังนั้นในการออกแบบเครื่องจำลองนี้จึงกำหนดให้ขอบเขตการเคลื่อนที่เป็นไปตามค่าที่สามารถจำลองสร้างค่าความเร่งได้เพียงพอกับข้อมูลงานวิจัยและข้อมูลจากการทดลองโดยกำหนดขอบเขตของมุมไว้ที่ 45 องศา

4.3.3 ขีดจำกัดของอัตราการเร่งเชิงมุม

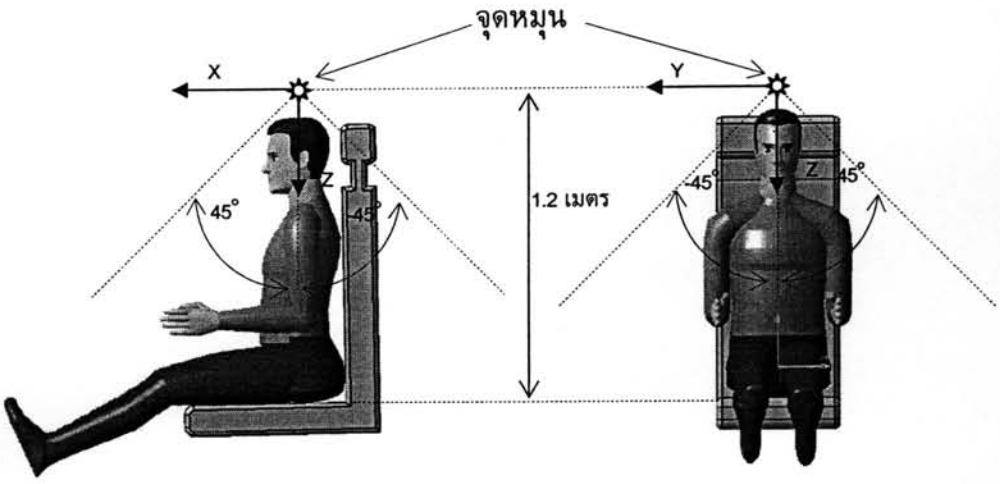
จากการศึกษาเกี่ยวกับประสาทการรับรู้ของมนุษย์นั้นพบว่ามนุษย์สามารถรับรู้ความเร่งเชิงมุมได้ มนุษย์มีขอบเขตความละเอียดของในการรับรู้ความเร่งเชิงมุม จากข้อมูลที่ได้รับในบทที่3 พบว่า มนุษย์ไม่สามารถรับรู้ความเร่งเชิงมุมที่น้อยกว่า 2 องศาต่อวินาทีกำลังสองได้ ดังนั้น ในกรณีที่ต้องการจำลองความเร่งด้านหน้า และด้านข้างโดยการหมุนนั้นจึงควรต้องพิจารณาร่วมกับปัจจัยอื่นๆด้วยว่าควรหมุนด้วยอัตราเร่งเชิงมุมที่มนุษย์ไม่รู้สึก

ประเด็นที่น่าสนใจอีกประการหนึ่งคือมนุษย์มีความรู้สึกที่เรียกว่าความเคยชิน กล่าวคือในกรณีที่มนุษย์ได้รับรู้ความเร่งเชิงมุมเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งจนความเร็วในการเคลื่อนที่ของของของเหลวภายในเซมิเซอคูลาร์เท่ากับความเร็วของศีรษะมนุษย์จะเข้าใจว่าสภาวะนั้นไม่มีความเร่งเชิงมุมเกิดขึ้น[14]

เมื่อนำหลักการในหัวข้อที่ 4.1 และขอบเขตของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ในหัวข้อที่ 4.2 และแนวคิดที่เสนอในหัวข้อที่ 4.3 พบว่ากลไกที่เหมาะสม ต้องเป็นกลไกที่สามารถ สร้างจุดหมุนที่บริเวณใกล้เคียงกับศีรษะมนุษย์ได้ และขอบเขตการเคลื่อนที่ของกลไกต้องสามารถเคลื่อนที่ได้ตามที่ต้องการคือ หมุนรอบแกนในแนวระนาบทั้งสองแนวแกนได้บวกลบ 45 องศา ซึ่งจากรูปที่ 4.14 จะแสดงถึงขอบเขตการเคลื่อนที่ของกลไกเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ต้องทำได้

พิจารณารูปที่ 4.14 การหมุนมุม *Pitch* คือมุมที่หมุนเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้าของรถยนต์ และการหมุนมุม *Roll* คือมุมที่หมุนเพื่อจำลองความเร่งด้านข้างของรถยนต์

กลไกที่ออกแบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นกลไกสำหรับหนึ่งคนนั่ง เมื่อพิจารณาถึงระยะความสูงของคนทั่วไป ทำให้สามารถประมาณระยะจากเบาะรถไปถึงตำแหน่งบริเวณศีรษะเป็น 1เมตร ดังนั้นกลไกที่ออกแบบต้องมีจุดหมุนสูงขึ้นไปจากเบาะรถไม่น้อยกว่า 1 เมตร แ ต่การพิจารณาต้องคิดที่จุดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z เคลื่อนที่ไปสูงสุดแล้วศีรษะของมนุษย์ต้องไม่อยู่ต่ำกว่าจุดหมุน จึงกำหนดให้จุดหมุนของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ต้องมีระยะจากเบาะที่นั่งไปจุดหมุนเป็น 1.2 เมตร



ขอบเขตการหมุนมุม Pitch ขอบเขตการหมุนมุม Roll

รูปที่ 4.14 การเคลื่อนที่ของกลไกสำหรับเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

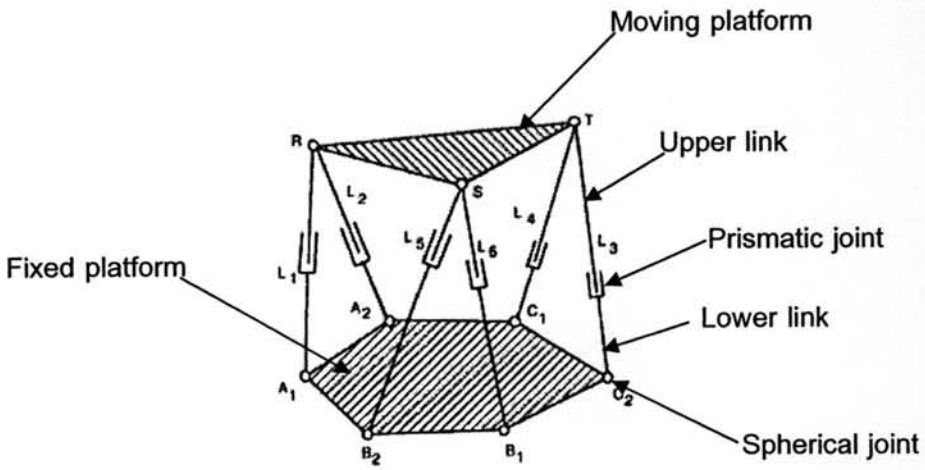
4.4 การศึกษากลไกปัจจุบันที่เหมาะสมกับเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดกลไกของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ ให้สามารถเคลื่อนที่ตามรูปที่ 4.14 ในส่วนนี้จึงศึกษาหากลไกแบบต่างๆ ที่เหมาะสม และอาจประยุกต์ใช้กับการออกแบบได้ ซึ่งตัวอย่างกลไกที่ศึกษามีดังต่อไปนี้

4.4.1 กลไกแบบ สจ๊วจ

กลไกสจ๊วจ คิดขึ้นในปี ค.ศ.1965 โดย D.Stewart กลไกประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสองส่วนคือ ส่วนที่เคลื่อนที่เรียกว่า moving platform และส่วนที่อยู่กับที่จะเรียกว่า Fixed platform ทั้งสองต่อกันด้วยขา 6 ขาที่มีลักษณะเหมือนกันคือประกอบด้วย Link 2 ชิ้นคือ Upper link และ Lower link ต่อกันด้วย Prismatic joint จากรูปที่ 4.15 ที่ปลายขาทั้งสองด้านของกลไกต่อกับ Moving platform และ Fixed platform ด้วย Spherical joint การเคลื่อนที่ของ Moving platform นั้นขึ้นอยู่กับความยาวที่เปลี่ยนแปลงของขาทั้ง 6 ดังนั้นตัวขับในตำแหน่ง Prismatic joint ต้องเป็นแบบเชิงเส้นข้อดีของกลไกดังกล่าวคือสามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ แต่ละตำแหน่งของการเคลื่อนที่ตัวขับของแต่ละขาสามารถช่วยกันรับภาระของโหลดที่เกิดขึ้น ทำให้ตัวขับมีขนาดเล็ก และเนื่องจากการเคลื่อนที่แต่ละขาต้องสัมพันธ์กัน จึงทำให้กลไกมีความปลอดภัยสูง จากเหตุผลดังกล่าวกลไกชนิดนี้เหมาะสมสำหรับเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แต่มีข้อจำกัด คือขอบเขตการเคลื่อนที่ของกลไก(ขอบเขตของกลไกขึ้นอยู่กับลักษณะการวางขาทั้งหกขา) เนื่องจากขาที่เพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่การเคลื่อนที่ของ moving platform น้อยลง และมีราคาสูง ปัจจุบันมีการพัฒนากลไก สจ๊วจแบบต่างๆเช่น

ปรับเปลี่ยนลักษณะการวางขา หรือรูปร่างของ moving platform และ Fixed platform เพื่อให้กลไกมีขอบเขตการเคลื่อนที่สูงขึ้น



รูปที่ 4.15 กลไกแบบสจ๊วจ ที่มา: จาก [30]

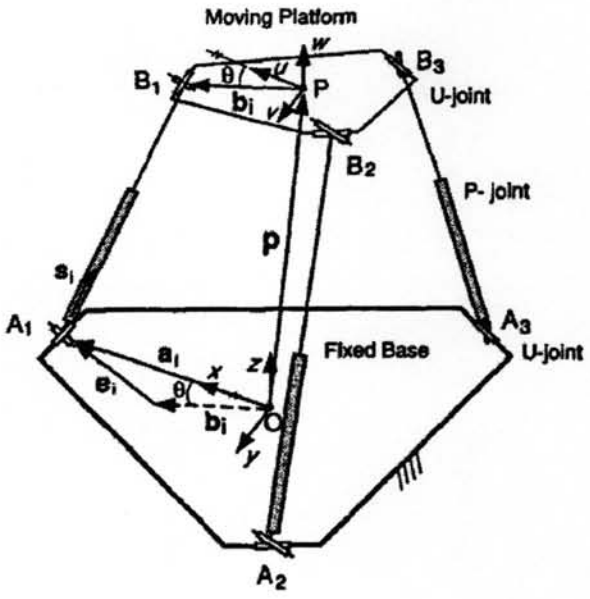
4.4.2 กลไกแบบ 3-UPU

กลไกแบบ 3-UPU (3 Leg-Universal Joint ,Prismatic Joint ,Universal Joint) เป็นกลไกขนาน 3 องศาอิสระ มีโครงสร้างคล้ายกลไกแบบสจ๊วจ แต่มี 3 ขา โครงสร้างหลักจะประกอบไปด้วย Moving platform ,Fixed platform และขา 3 ชุดมีลักษณะเหมือนกัน ขาทำหน้าที่เชื่อมต่อ Moving platform และ Fixed platform โครงสร้างของขาแต่ละขาจะเหมือนกัน คือประกอบด้วย Link 2 ชิ้นคือ Upper Link และ Lower Link ซึ่งทั้ง 2 ชิ้นจะเชื่อมต่อกันด้วย Prismatic Joint ปลายขาทั้งสองด้านจะยึด Moving platform และ Fixed ด้วย Universal Joint

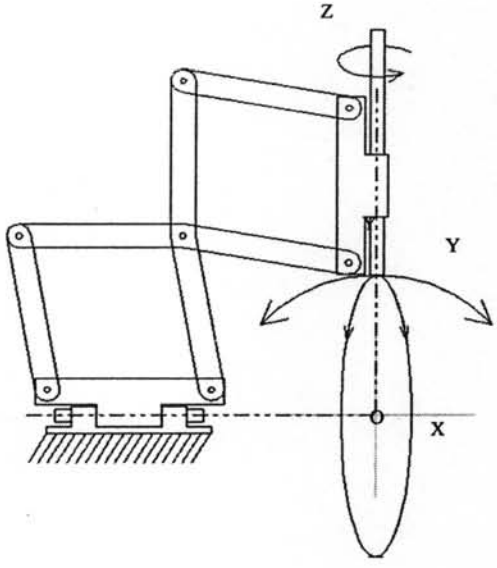
4.4.3 กลไกแบบ CMS

กลไก CMS (Concentric Multilink Spherical Joint) [32]เป็นกลไกแบบ 3 องศาอิสระ กลไก CMS นี้เป็นกลไกที่พัฒนาขึ้นสำหรับการใช้งานแทน Spherical Joint เป็นกลไกที่มีจุดเด่นที่สามารถสร้างการเคลื่อนที่แบบ หมุนได้สามแนวแกน และทั้งสามแนวแกนนั้นตัดที่จุดหมุนเดียวกัน เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.17 จุดดังกล่าวคือจุด O ลักษณะของกลไกทำให้กลไกสามารถหมุนได้ครบรอบ 2 แนวแกนคือหมุนรอบแกน X และหมุนรอบแกน Y และในแนวแกน Z โครงสร้างของกลไกประกอบด้วย Link 6 ชิ้น แต่ละชิ้นจะต่อกันด้วย Revolute joint มีขอบเขตในการเคลื่อนที่มาก และเหมาะสมกับ

การใช้งานหลากหลายประเภท รวมทั้งจัดสร้างและประกอบง่ายกว่ากลไกลักษณะแบบอื่นๆ



รูปที่ 4.16 กลไกขนาน 3-UPU ที่มา: จาก [31]

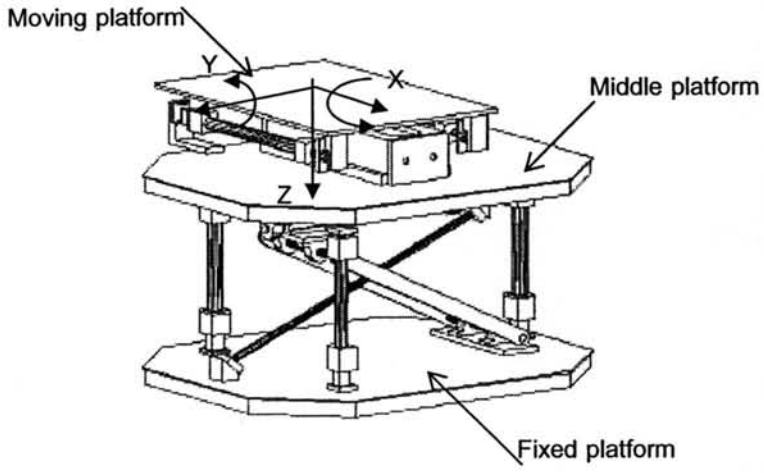


รูปที่ 4.17 กลไก CMS ที่มา: จาก [33]

4.4.4 กลไกผสมแบบ 5 องศาอิสระ

กลไกนี้เป็นกลไกที่เกิดจากการ การนำกลไก 2 ชุดมารวมกัน คือ ชุดหนึ่งคือกลไกขนาน และชุดกลไกอนุกรม ส่วนกลไกขนานที่ทำหน้าที่เป็นฐานนั้น สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 องศาอิสระ คือ เคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวแกน Z หมุนรอบแกน X และ

หมุนรอบแกน Y ในส่วนกลไกอนุกรมที่ติดตั้งปลายแขนนั้นสามารถเคลื่อนที่ได้ 2 องศาอิสระคือ หมุนรอบแกน Z และเลื่อนที่ในแนวแกน X จากโครงสร้างของกลไกทั้งสองส่วนเมื่อนำมาต่อรวมกันทำให้ปลายแขนของกลไกสามารถเคลื่อนที่ได้ 5 องศาอิสระ ลักษณะดังรูปที่ 4.18 จากรูป ส่วนกลไกขนานคือกลไกที่ต่อกันระหว่าง Fixed platform และ Middle platform และส่วนกลไกอนุกรมคือส่วน Middle platform ต่อกับ Moving platform

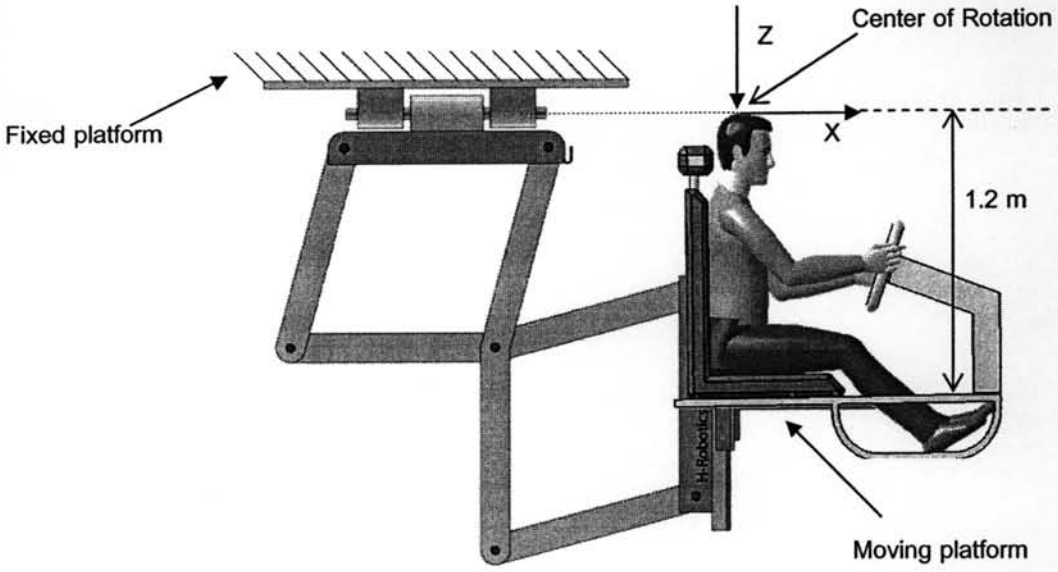


รูปที่ 4.18 กลไกแบบ 5 องศาอิสระ ที่มา: จาก [34]

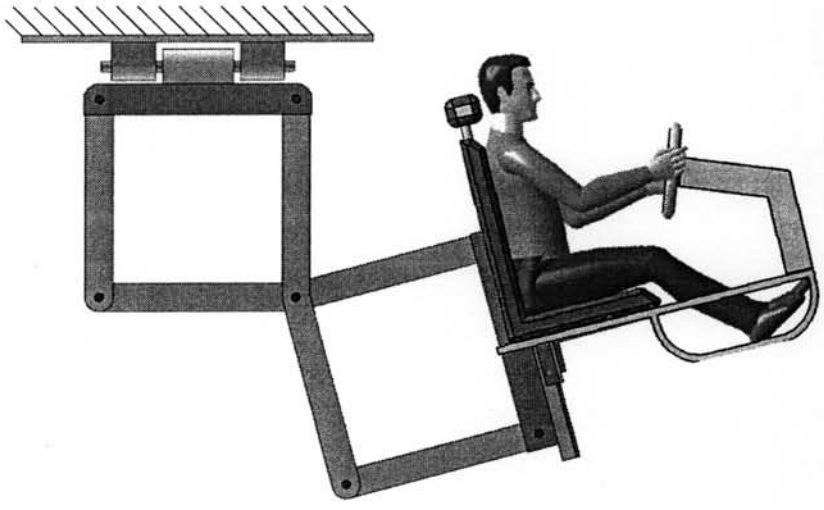
4.5 สรุปกลไกของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

จากตัวอย่างกลไกที่กล่าวถึงในหัวข้อ 4.4 พบว่าปัจจุบันกลไกที่สามารถสร้างการเคลื่อนที่ได้ตามต้องการนั้น มีอยู่หลายกลไกแต่ที่ได้รับความนิยมในการนำมาสร้างเป็นเครื่องจำลองการเคลื่อนที่เป็นกลไกขนาน เพราะกลไกแบบขนานสามารถรับภาระได้สูง แต่กลไกขนานที่พบไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ตามขอบเขตที่กำหนด อย่างไรก็ตามพบว่ากลไก CMS Joint (Concentric Multilink Spherical Joint) เป็นกลไกที่เหมาะสมและสามารถนำมาสร้างเป็นเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ได้ เพราะสามารถสร้างจุดหมุนที่ศีรษะ และขอบเขตการเคลื่อนที่ของกลไกยังสามารถเคลื่อนที่ได้ตามที่ต้องการคือ บวกลบ 45 องศา เมื่อนำกลไก CMS มาประยุกต์เป็นเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 โดยปลายแขนของกลไกทั้งสองด้านจะต่อกับชุดกลไกแบบเลื่อนที่เพื่อสร้างการเคลื่อนที่ในแนวดิ่ง ส่วนปลายอีกด้านของกลไกต่อกับ Fixed platform โดยกลไกแบบเลื่อนที่ปลายแขนจะทำหน้าที่จำลองความเร่งในแนวดิ่ง ในการจำลองความเร่งและความหน่วงด้านหน้ารถ และด้านข้างรถใช้การหมุนรอบจุด X และY โครงสร้างจริงของกลไกจะกล่าวถึงในบทที่ 5

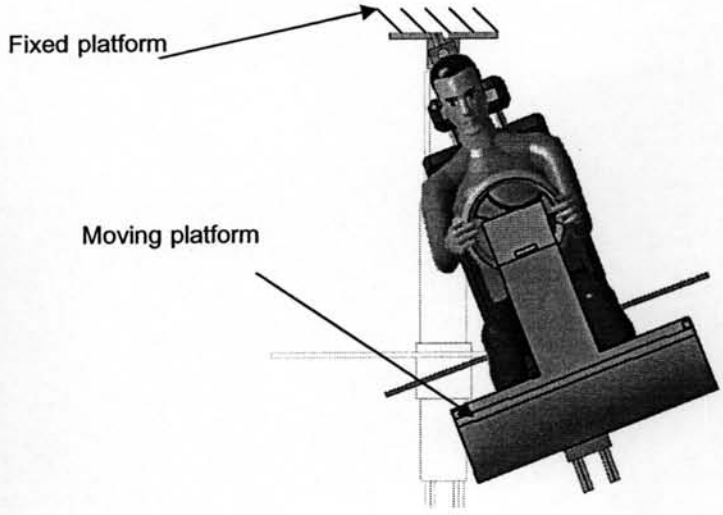
รูปที่ 4.20 แสดงการเอียงเบาะนั่งของคนขับขณะจำลองความเร่งด้านหน้า และรูปที่ 4.21 แสดงการเอียงเบาะนั่งของคนขับขณะจำลองความเร่งด้านข้าง ซึ่งทั้งสองรูปจุดหมุนในการเอียงของทั้งสองแนวแกนจะเป็นจุดเดียวกัน คือ จุดที่อยู่สูงจาก Moving platform 1.2 เมตร



รูปที่ 4.19 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่จากกลไก CMS



รูปที่ 4.20 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ขณะจำลองความเร่งด้านหน้า



รูปที่ 4.21 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ขณะจำลองความเร่งด้านข้าง

ในบทถัดไปคือบทที่ 5 จะอธิบายรายละเอียดการประยุกต์นำกลไก CMS ออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระสำหรับจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์