

## รายการอ้างอิง

- [1] David, w. Force Dynamic motion simulator[Online]. Available from:  
<http://www.force-dynamics.com> [2006, June 20]
- [2] Salcudean, S.E.; Drexel, P.A.; Ben-Dov, D.; Taylor, A.J.; and Lawrence, P.D.  
A Six Degree-of-Freedom, Hydraulic, One person Motion Simulator.  
IEEE International conference 3 (May 1994): 2437-2443.
- [3] Philipdene, g. Motion simulator platform[online]. Available from:  
<http://www.guilden.com/philipdenne/subject/motion-control.html>  
[2006, June 20]
- [4] Mark, B. Motion simulator platform[online]. Available from:  
<http://www.inmotionsimulation.com> [2006, June 21]
- [5] Gary, S. Motion Based Flight Simulation[online]. Available from:  
[http://www.mfs.com.au/MFSmotion based flight simulators.htm](http://www.mfs.com.au/MFSmotion%20based%20flight%20simulators.htm)  
[2006, June 20]
- [6] Robert, J.T.; Frank, M.C.; and Jacob, A. Developments in  
Human Centered Cueing Algorithms for Control of Flight Simulator  
Motion Systems. Americal Institute of Aeronautics and stronautics  
(1999): 1-11.
- [7] Duk-Sun, Y., and Jung-Ha, K. The concept for the integration of tele-  
operated unmanned vehicle and driving simulator. IEEE (2001):  
1419-1424.
- [8] Al-Amyr, S. and Lloyd, D.R. The Detection of Low Amplitude  
Yawing Motion Transients in a Flight Simulator. IEEE Transactions on  
Systems man and cybernetics 22 (March 1992): 300-306.
- [9] Carlo, A.A.; Federico, B.; and Massimo, B. Washout Filter Design for a  
Motorcycle Simulator. IEEE (2000): 995-1000.
- [10] Nervous structure[online]. Available from:  
[http://computer.act.ac.th/webproject5\\_2548/st/m51/Nervous/structure.htm](http://computer.act.ac.th/webproject5_2548/st/m51/Nervous/structure.htm)  
[2006, July 15]
- [11] Harold, B. Eye and Retina[online]. Available from:  
<http://thalamus.wustl.edu/course/eyeret.html> [2006, July 20]
- [12] วาดรี สุดทรวง และ วีระชัย สิงหนิยม. ประสาทสรีรวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 4.  
กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

- [13] กนกวรรณ ดิลกสกุลชัย และ ชัยเลิศ พิเชิตพรชัย. สรีรวิทยา 3. พิมพ์ครั้งที่ 2.  
กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์เรือนแก้วเรือนพิมพ์, 2545.
- [14] Lloyd D. Motion platform[online]. Available from:  
[http://www.mfs.com.au/MFS Motion Platforms.htm](http://www.mfs.com.au/MFS_Motion_Platforms.htm) [2007, Jan 10]
- [15] Groen, J.J., and Jongkees, L.B.W. The threshold of angular acceleration Perception. University of Utrecht, 1946.
- [16] Markus von der Heyde, Bernhard, E.R. How to cheat in motion Simulation. Germany: Max-Planck-Institute for Biological Cybernetics, 2001.
- [17] Kingma, H. Threshold of perception of direction of linear acceleration as a possible evaluation of otolith function. BioMed central , (June 2005): 1-6.
- [18] Bateman C. Operators Guide to Human Factors in Aviation[online]. Available from: [http://www.flightsafety.org/hf/hf\\_mar\\_apr04.htm](http://www.flightsafety.org/hf/hf_mar_apr04.htm) [2007, Feb 8]
- [19] Zacharias, G.L. Motion Cue Models for Pilot-Vehicle Analysis.  
Alexandria: Department of Defense, 1978.
- [20] Clark, B., and Stewart, J. D. Effects of Angular Acceleration on Man: Thresholds for the Perception of Rotation and the Oculogyral Illusion. Aerospace Medicine. 40 (1969): 952-956.
- [21] Clark, B., and Stewart, J. D. Thresholds for the Perception of Angular Acceleration About the Three Major Body Axe: Symposium on the Role of the Vestibular Organs in Space Exploration. NASA SP-187 4 (1968)
- [22] Meiry, J.L. The Vestibular System and Human Dynamic Space Orientation, Sc.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, 1965.
- [23] Benson, A.J.; Spencer, M.B.; and Stott, J.R.R. Thresholds for the Detection of the Direction of Whole-Body, Linear Movement in the Horizontal Plane. Aviation, Space, and Environmental Medicine. 57 (1986): 1088-1096.
- [24] Benson, A.J.; Hutt, E.C.B.; and Brown, S.F. Thresholds for the Perception of Whole Body Angular Movement About a Vertical Axis. Aviation, Space, and Environmental Medicine. 60 (1989): 205-213.
- [25] Kiadtipo Y. Computer graphics[online]. Available from:  
<http://cptd.chandra.ac.th/sygraphic/s-car-03.jpg> [2007, Aug 20]

- [26] Falcon B. Intelligent Car[online]. Available from:  
<http://www.worldcarfans.com> [2007, Jul 24]
- [27] Shady L. Motion simulator platform[online]. Available from:  
<http://www.visblelight.com/motionbase> [2006, Aug 25]
- [28] Simuline Inc. Motion simulator platform[online]. Available from:  
[http://www.sumuline.com/product/pro\\_cycraft.htm](http://www.sumuline.com/product/pro_cycraft.htm) [2006, Aug 25]
- [29] C.Shingo ,Y. Kenichi , Daisuke Kawasaki, M. Yoshifumi and S.Takayuki ,  
Development of a Motorcycle Simulator using Parallel Manipulator and Head Mounted display. <http://www.ynl.t.u-tokyo.ac.jp> [2006, 20 July]
- [30] Prabjot, N.; Kenneth, J.W.; and Vasudeva, M. Direct Kinematic Solution of a Stewart platform. IEEE Transactions on robotics and automation. 6 (August 1990): 438-444.
- [31] Sameer, J., and Lung-Wen, T. A Comparison Study of Two 3-DOF Parallel Manipulators: One With Three and the Other With Four Supporting Legs. IEEE Transaction on robotics and automation. 9 (April 2003): 200-209.
- [32] Gregory, J.H., and Sanderson, A.C. A Novel Concentric Multilink Spherical Joint with Parallel Robotics Applications. IEEE Transaction on robotics and automation. 2 (1994):1267-1272.
- [33] วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์, ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข. จลศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอลท แขนกลสามมิติ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย. 17 (ตุลาคม 2546)
- [34] Andy, R.W.; Huang, C.; and Chihsiuh, C. A Low cost driving Simulator for Full Vehicle Dynamics Simulation. IEEE Transactions on vehicular Technology 52 (January 2003): 162-172.
- [35] วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์ และคณะ. การพัฒนารูปแบบใหม่ของระบบประเมิน พลศาสตร์ยานยนต์ การขับขี และระบบชิ้นส่วน. ในรายงานความก้าวหน้า ศูนย์วิจัยวัสดุและโลหะแห่งชาติ MTEC, 1 กรกฎาคม พ.ศ 2549 ถึง เดือน มิถุนายน 2550.
- [36] John, J.C. Introduction to Robotics mechanics and control. 2<sup>nd</sup> Addison-Wesley Publishing Company, 1989

**ภาคผนวก**

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดของอุปกรณ์

ก.1 มอเตอร์กระแสตรงยี่ห้อ Maxon รุ่น Re-max 273166

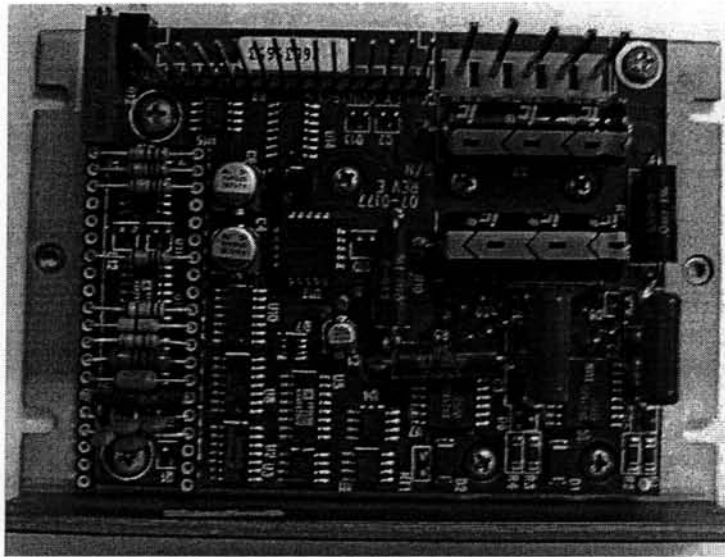


รูปที่ ก.1 มอเตอร์กระแสตรงยี่ห้อ Maxon รุ่น Re-max 273166

รายละเอียดอุปกรณ์

- 1) เป็นมอเตอร์กระแสตรง
- 2) กำลังไฟฟ้าสูงสุด 22 วัตต์
- 3) แรงบิดสูงสุด 0.75 นิวตันเมตร
- 4) ความเร็วสูงสุด 7500 รอบต่อนาที
- 5) ติดตั้งเอ็นโคดเดอร์ขนาด 1200 พัลส์ต่อรอบ

## ก.2 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงยี่ห้อ Copley รุ่น 4122P



รูปที่ ก.2 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงยี่ห้อ Copley รุ่น 4122P

### รายละเอียดอุปกรณ์

- 1) รับสัญญาณป้อนเข้าแบบอนาลอกได้  $\pm 10$  โวลต์
- 2) สามารถจ่ายไฟฟ้าออกได้สูงสุด  $\pm 10$  แอมแปร์
- 3) แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 0 ถึง 24 โวลต์

### ก.3 มอเตอร์กระแสสลับยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น KP43



รูปที่ ก.3 มอเตอร์กระแสสลับยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น KP43

#### รายละเอียดอุปกรณ์

- 1) เป็นมอเตอร์กระแสสลับ
- 2) กำลังไฟฟ้าสูงสุด 400 วัตต์
- 3) แรงบิดสูงสุด 1 นิวตันเมตร
- 4) ความเร็วสูงสุด 3000 รอบต่อนาที
- 5) ติดตั้งเอ็นโคดเดอร์ขนาด 4000 พัลส์ต่อรอบ

#### ก.4 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MR-J3-40A



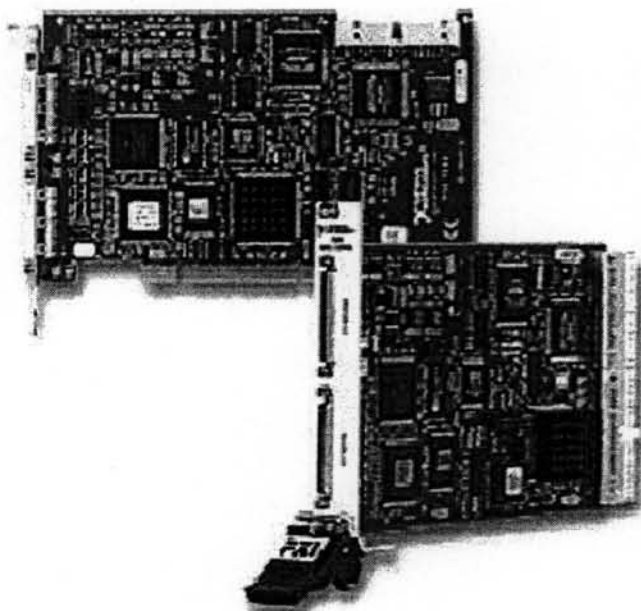
รูปที่ ก.4 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสสลับยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น MR-J3-40A

#### รายละเอียดอุปกรณ์

- 1) รับสัญญาณป้อนเข้าแบบอนาลอกได้  $\pm 10$  โวลต์
- 2) แรงดันไฟฟ้าขาเข้า 0 ถึง 24 โวลต์
- 3) มีช่องรับสัญญาณเอ็นโคดเดอร์ และส่งออกได้



### ก.5 การ์ดควบคุมมอเตอร์ยี่ห้อ National instruments รุ่น PCI-7344



รูปที่ ก.5 การ์ดควบคุมมอเตอร์ยี่ห้อ National instruments รุ่น PCI-7344

#### รายละเอียดอุปกรณ์

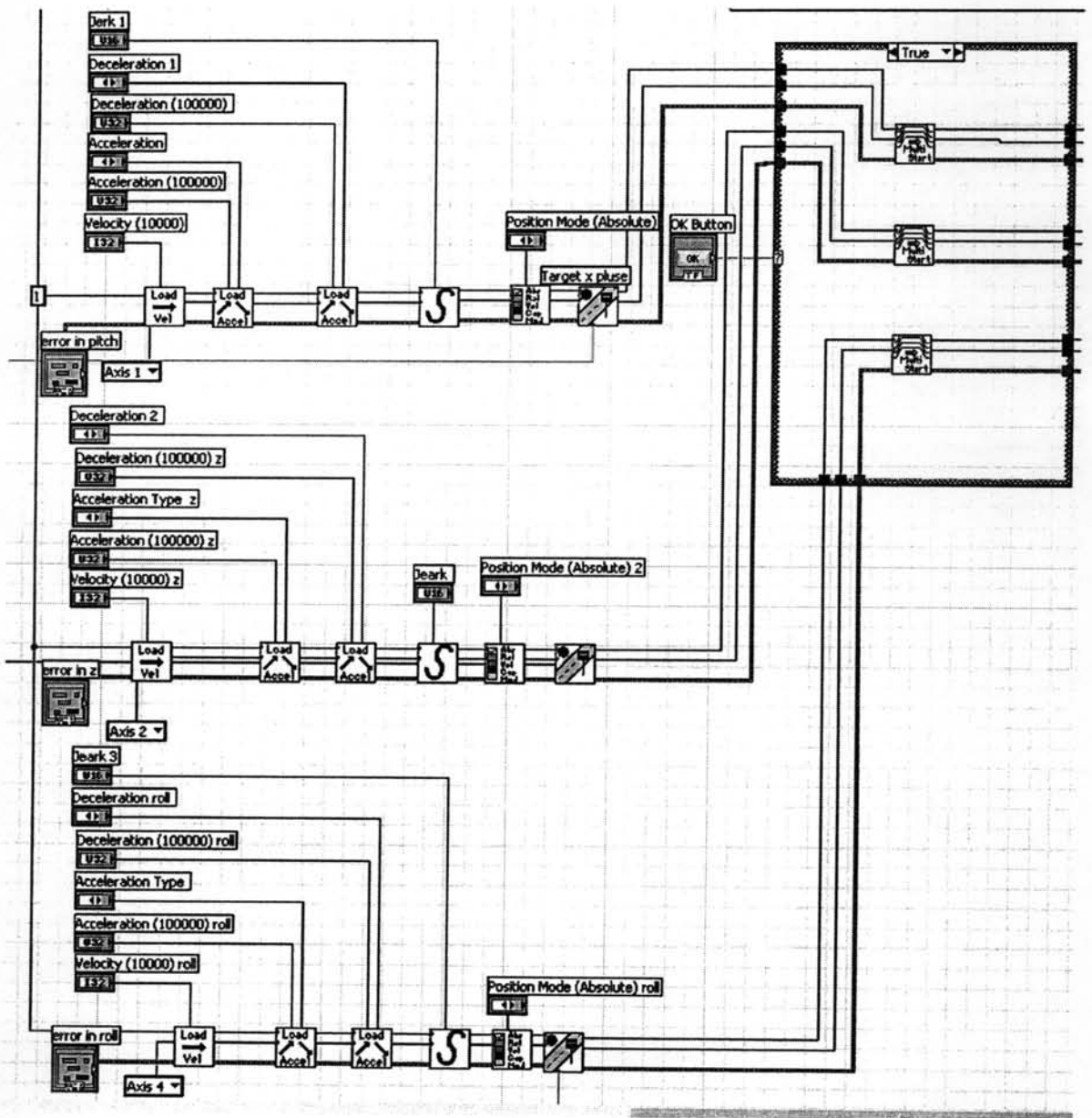
- 1) สามารถติดตั้งอุปกรณ์ภายนอกได้ 4 ชนิด ได้แก่ มอเตอร์กระแสตรง มอเตอร์สเต็ปเปอร์ เอ็นโคเดอร์ และสวิชท์
- 2) สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ได้ 4 แกนพร้อมกัน
- 3) สามารถอ่านค่าสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลได้ 4 ช่องสัญญาณ ค่าที่อ่านได้มีความละเอียด 12 บิต
- 4) มีส่วนประมวลผลในตัว
- 5) มี Driver สำหรับโปรแกรม "Microsoft Visual C++.NET" และโปรแกรม Labview

## ภาคผนวก ข.

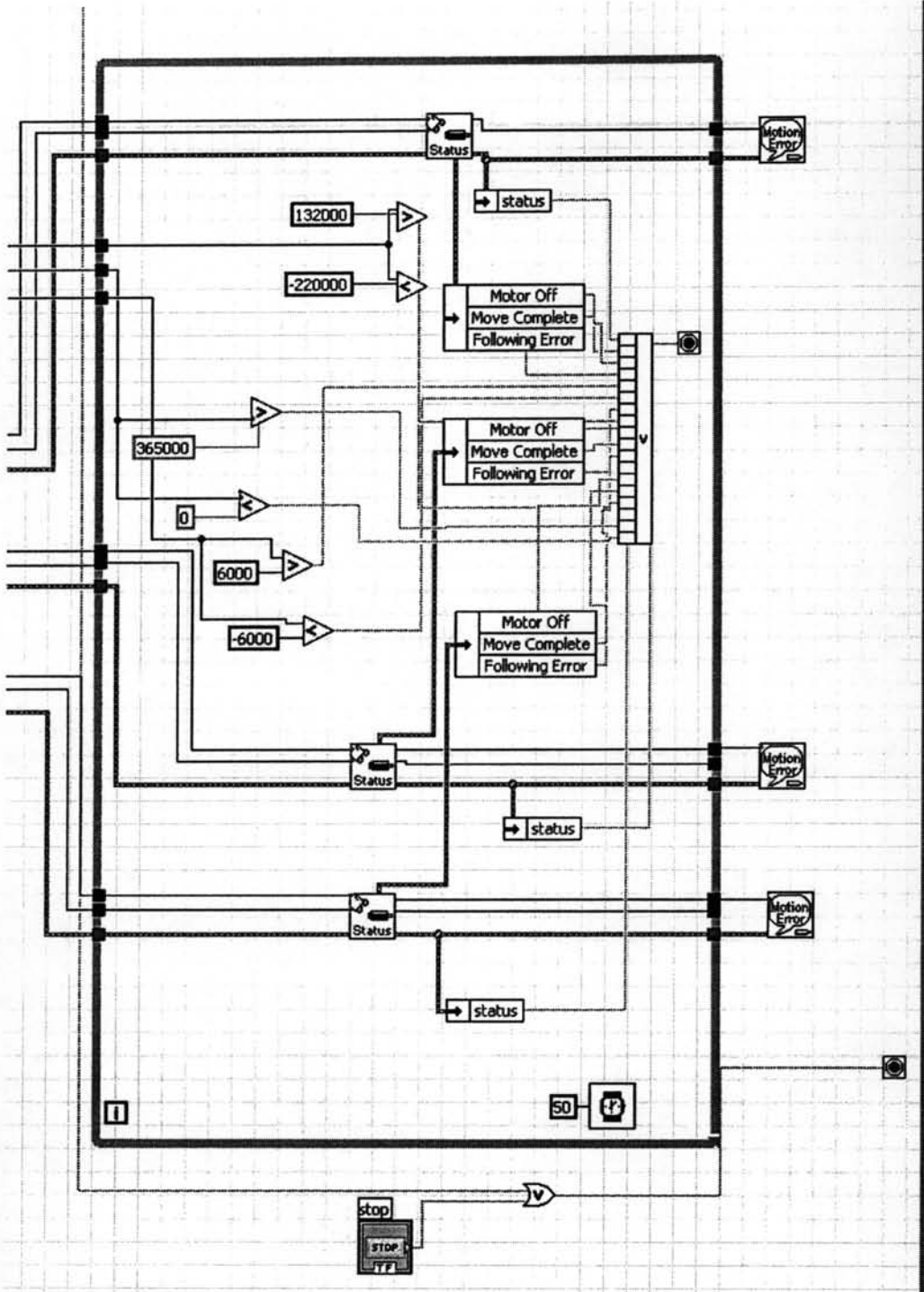
### โปรแกรมที่ใช้เพื่อจำลองการทำงานของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

ในภาคผนวกนี้เป็นการแสดงโปรแกรมที่ใช้ในการทดลองการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ ซึ่งโปรแกรมที่ใช้เขียนคือ โปรแกรม Labview 7

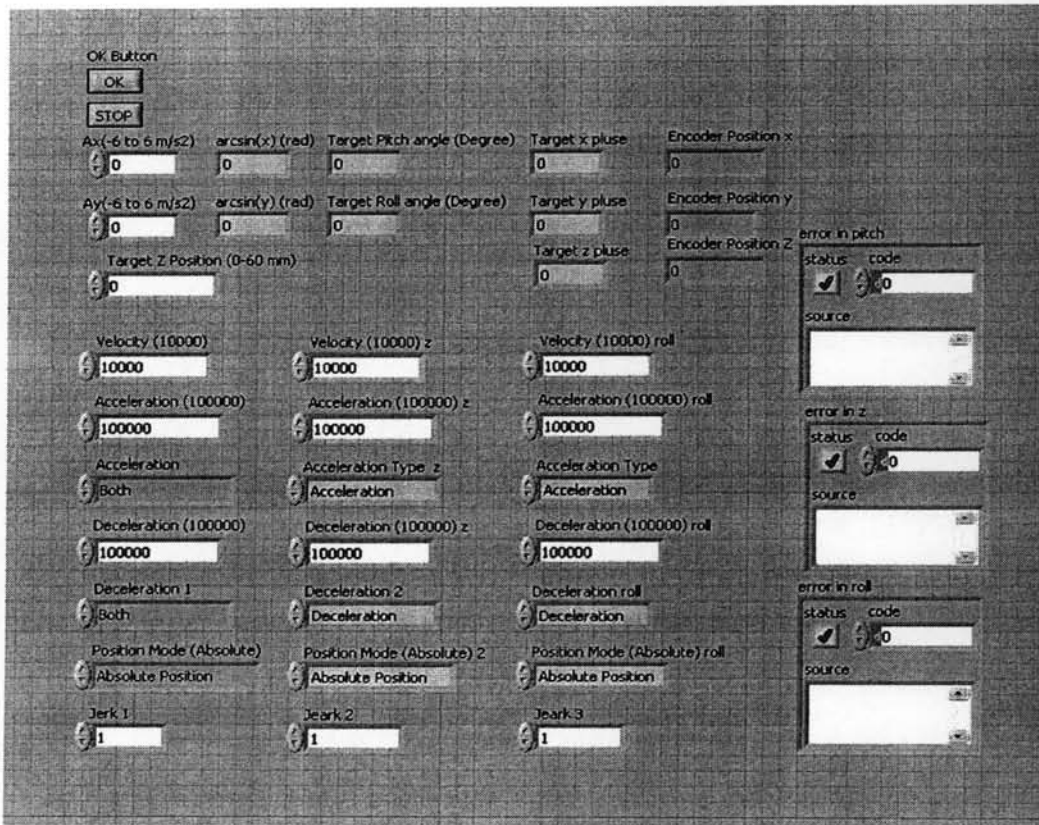
### โปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่



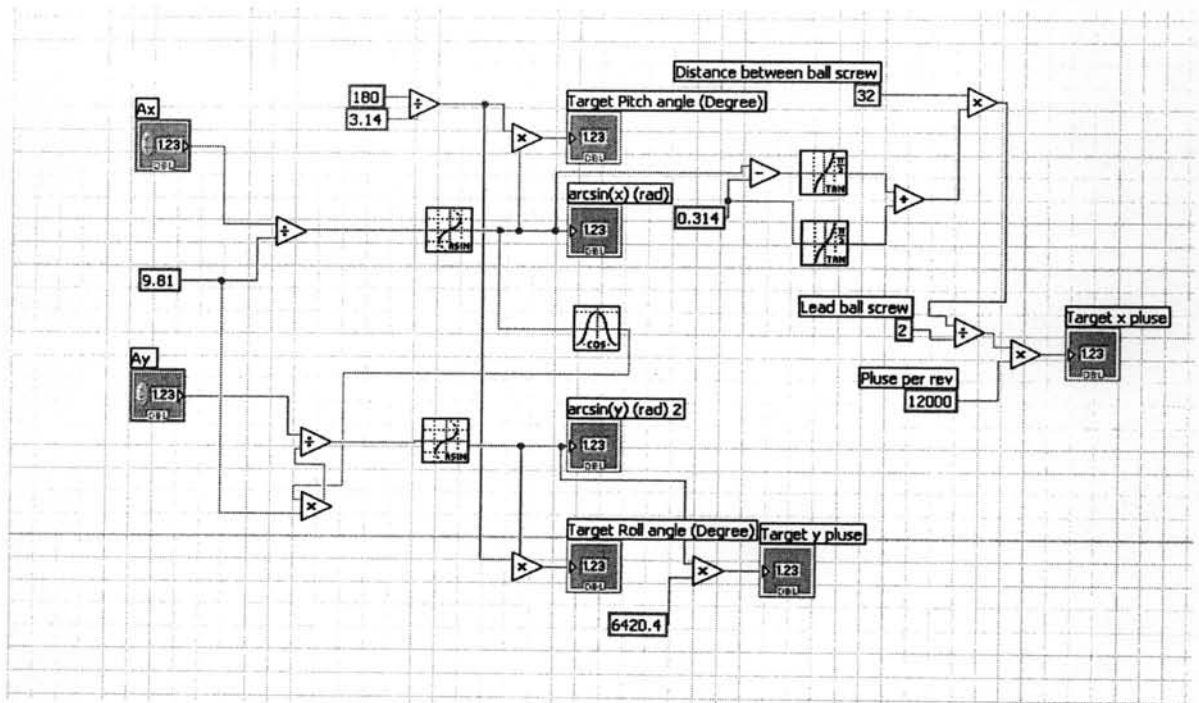
รูปที่ ข.1 โปรแกรมส่วนกำหนดเงื่อนไขและตำแหน่งการเคลื่อนที่



รูปที่ ข.2 โปรแกรมส่วนตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่



รูปที่ ข.3 หน้าจอแสดงผลการทำงานของโปรแกรม

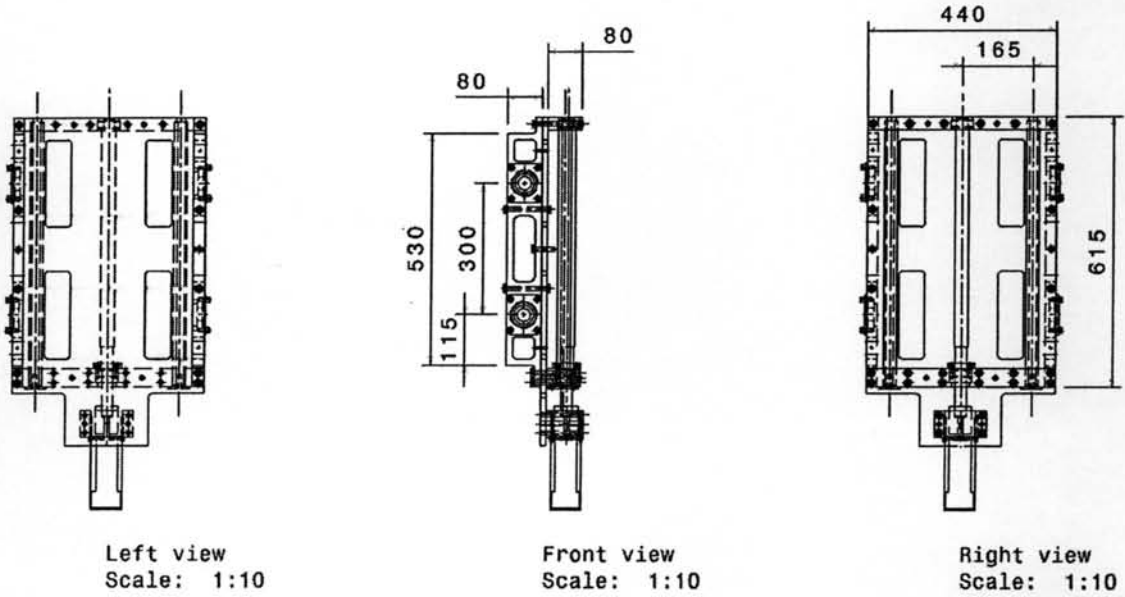


รูปที่ ข.4 โปรแกรมคำนวณค่าความเร่งเป็นตำแหน่งเคลื่อนที่ของมุม Pitch และมุม Roll

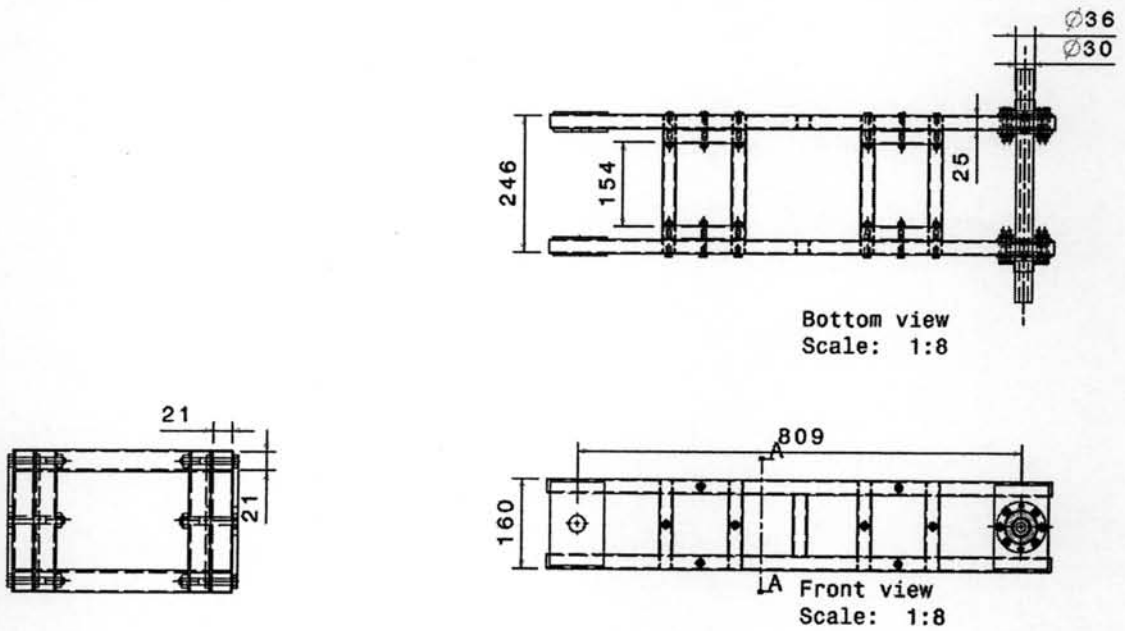
ภาคผนวก ค.

กำหนดของกลไกเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระ

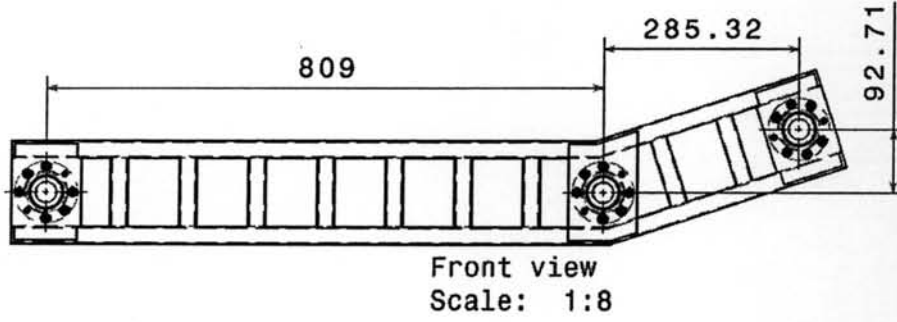
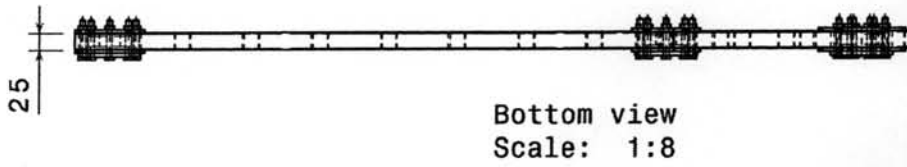
ในภาคผนวกนี้ แสดงโครงสร้างของก้านต่อแต่ละชั้นของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่ ออกแบบขนาดของก้านต่อแต่ทั้ง 6 ชั้นเป็นดังรูปต่อไปนี้



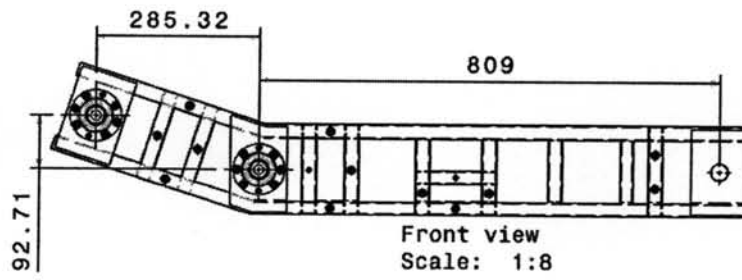
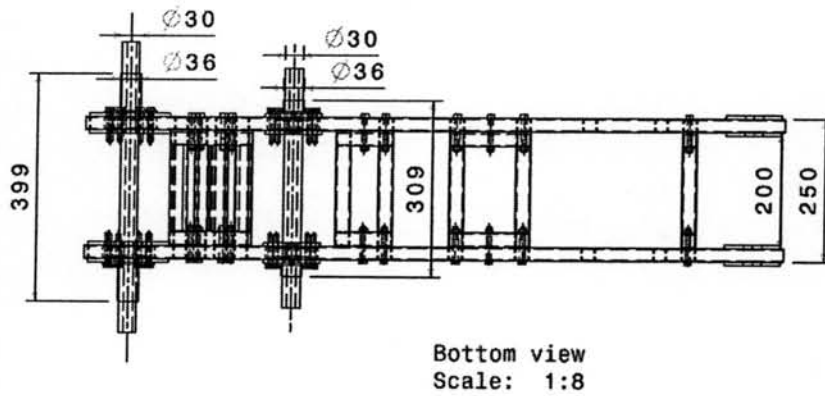
รูปที่ ค.1 ก้านต่อ FGHI



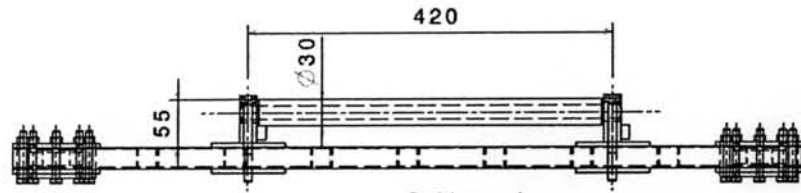
รูปที่ ค.2 ก้านต่อ EF



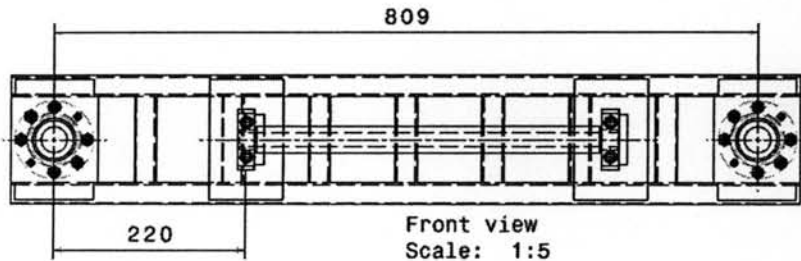
รูปที่ ค.3 ก้านต่อ BC



รูปที่ ค.4 ก้านต่อ CDI

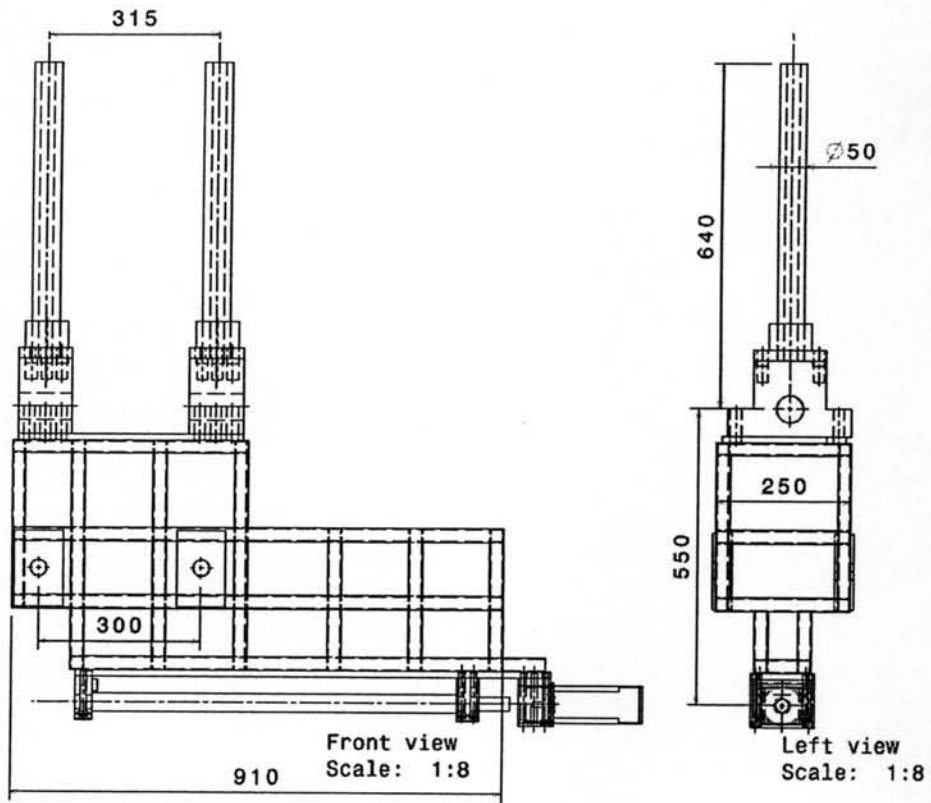


Bottom view  
Scale: 1:5



Front view  
Scale: 1:5

รูปที่ ค.5 ก้านต่อ BC



Front view  
Scale: 1:8

Left view  
Scale: 1:8

รูปที่ ค.6 ก้านต่อ ABJK



ภาคผนวก ง.

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์



# A Design of 3 DOF Driving Simulator

เด่น จันทร์ทองอ่อน และ วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์\*

Den Chantongorn and Witaya Wannasuphprasit\*

ห้องปฏิบัติการสหวิทยาการมนุษย์และหุ่นยนต์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Human Robotics Lab, Mechanical Engineering Dept. Chulalongkorn University

\*Corresponding Author

## ABSTRACT

This paper describes a part of development of a interactive driving simulator research, and mainly focuses on designing of the driving simulator based on human perception. From literature and our experiment, it is recommended that the machine that is suitable for simulating driving perception should have at least 3 DOF. Here a CMS Joint was selected as a main mechanism, because it is simple to fabricate and has large operating workspace.

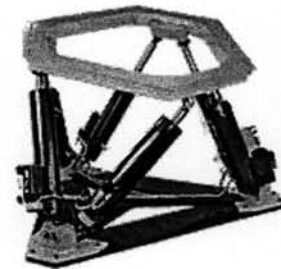
งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการพัฒนาเครื่องสร้างแบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ โดยในบทความมุ่งเน้นที่การศึกษาโครงสร้างและการออกแบบโดยยึดหลักของการรับรู้ของมนุษย์ จากการศึกษาและการทดลองวัดค่าจากยานยนต์ทดสอบพบว่า การเคลื่อนที่ ที่สำคัญและทำให้มนุษย์รับรู้ได้เสมือนจริงเพียงพอต้องประกอบด้วย การเคลื่อนที่อย่างน้อย 3 องศาอิสระ การออกแบบโครงสร้างของกลไกจะคำนึงถึงระบบการรับรู้ความรู้สึกของมนุษย์เพื่อสามารถจำลองความรู้สึกได้เสมือนจริง กลไกหลักที่ใช้ในการออกแบบคือ CMS Joint เพราะสามารถสร้างได้ง่าย มีพื้นที่ทำงานมาก

## บทนำ

แบบจำลองการเคลื่อนที่คืออุปกรณ์ที่ใช้เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ โดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้งานแตกต่างกันไปเช่น เพื่อฝึกหัดควบคุมยานพาหนะ เพื่อทดสอบและพัฒนากระบวนการควบคุมของยานพาหนะ รวมทั้งใช้ในด้านความบันเทิงอีกด้วย โครงสร้างของกลไกจะมีหลายแบบตาม

ความเหมาะสมของการใช้งาน และราคา โครงสร้างที่ได้รับ ความนิยมสูงสุดคือโครงสร้างแบบ สจ๊วจ[11] ดังรูปที่ 1 เนื่องจากเป็นกลไกที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ มีโครงสร้างแบบขนานและ

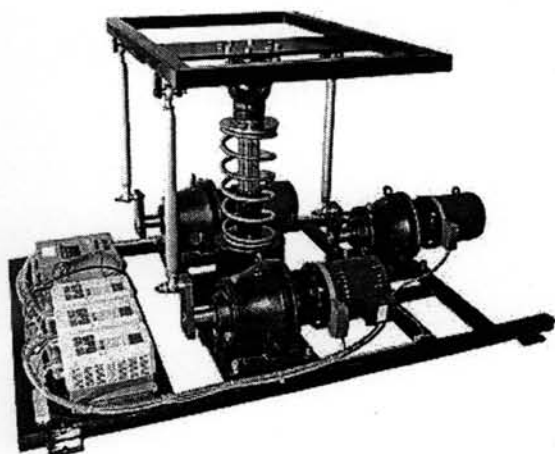
รับภาระได้สูง แต่มีช่วงระยะการทำงานที่จำกัด ตัวอย่างโครงสร้างอื่นๆที่นิยมนำมาสร้างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่คือ โครงสร้างแบบ 3องศาอิสระแบบขนาน[12,13] ดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 ถึงแม้ว่าทั้งสองกลไกมีโครงสร้างแตกต่างกันแต่องศาอิสระที่เคลื่อนที่ได้เหมือนกันคือ หมุนรอบแกนระนาบทั้งสอง แนวแกนและเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวตั้ง ซึ่งความเหมาะสมของโครงสร้างกลไกแต่ละแบบจะขึ้นอยู่กับ การนำกลไกไปสร้างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของยานพาหนะแต่ละประเภท



รูปที่ 1 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ สจ๊วจ 6 องศาอิสระ [11]



รูปที่ 2 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ UPU 3 องศาอิสระ [12]



รูปที่ 3 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระ [13]

อดีตถึงแม้ว่าเครื่องจำลองการเคลื่อนที่จะสามารถสร้างความรู้สึกเหมือนจริงได้ แต่ยังไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานที่ต้องการความเสมือนจริงสูงเช่น การทดลองควบคุมยานพาหนะในกรณีที่มีความเสี่ยง ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาเพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับความรู้สึกของมนุษย์ว่า อะไรทำให้มนุษย์รู้สึกแตกต่างระหว่างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ กับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริง ทั้งนี้เพราะการตัดสินใจของมนุษย์ในการควบคุมยานพาหนะจะอยู่ที่ความเข้าใจของระบบการรับรู้ของสภาวะที่เกิดขึ้นขณะนั้น Siegler [4] ศึกษาถึงการตัดสินใจหยุดรถในกรณีที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับการหยุดรถในกรณีที่อยู่ในเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

R.Hosman [7] นำเสนอการนำปัจจัยในการรับรู้ของมนุษย์มาใช้ประกอบกับการสร้างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่เพื่อให้ความเสมือนจริงมากยิ่งขึ้นโดยได้มีการศึกษาถึงระบบการรับรู้ของมนุษย์และขอบเขตของการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์เพื่อที่จะนำมาสร้างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ให้ความรู้สึกเสมือนจริงมากขึ้น อีกทั้งยังมีการสร้างอุปกรณ์เสริมเพื่อสร้างความรู้สึกเสมือนจริงให้กับอวัยวะต่างโดยตรงเช่น มีการใช้สายรัดนิรภัยในการทำให้รู้สึกว่ามีแรง หรือ L.Nehaoua [5] ใช้การปรับระดับของเบาะรองหลังเพื่อจำลองความแรงที่เกิดขึ้น ปัจจุบันได้มีการศึกษาเพื่อนำกลไกที่มีองศาอิสระที่น้อยกว่า 6 มาสร้างสภาวะจำลองเสมือนจริงโดยอาศัยความรู้เกี่ยวกับระบบการ

รับรู้ของมนุษย์มาสร้างเครื่องจำลองเพื่อให้เหมาะในการจำลองยานพาหนะแต่ละประเภทเพราะกลไกที่มีองศาอิสระน้อยกว่า

กว่า 6 นั้นย่อมหมายถึงกลไกที่มีราคาถูกกว่า พื้นที่ในการเคลื่อนที่ได้มากกว่า และมีความง่ายในการควบคุมมากกว่า

งานวิจัยนี้นำเสนอกลไกแบบ 3 องศาอิสระที่ออกแบบโดยคำนึงถึงระบบการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์เป็นหลัก [17] เพื่อนำเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ไปจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์ เครื่องจำลองการเคลื่อนที่พัฒนาขึ้นนี้มีแกนการเคลื่อนที่ 3 องศาอิสระคือหมุนรอบแกนระนาบสองแนวแกน และเคลื่อนที่ในแนวตั้งจากกับที่นิ่ง 1 แนวแกน เครื่องจำลองการขับเคลื่อนที่ใช้หลักการหมุนรอบแกนระนาบเพื่อทำมุมกับแรงโน้มถ่วงของโลกให้มนุษย์รับรู้เสมือนกับได้รับความเร่งเชิงเส้นในแนวแกน เครื่องจะหมุนรอบแกนด้านหน้าเพื่อจำลองความเร่งด้านข้าง และหมุนรอบแกนด้านข้างเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า โดยขนาดความเร่งที่จำลองนั้นจะมีขนาดเท่ากับความเร่งจริงที่เกิดขึ้น ดังนั้นสิ่งที่เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่ต้องคำนึงถึงคือ อัตราในการหมุนดังเช่น C.Jason [1] และจุดที่ใช้ในการหมุนจะเป็นจุดเดียวกับศีรษะดังแสดงในงานวิจัย C.Shingo [2]

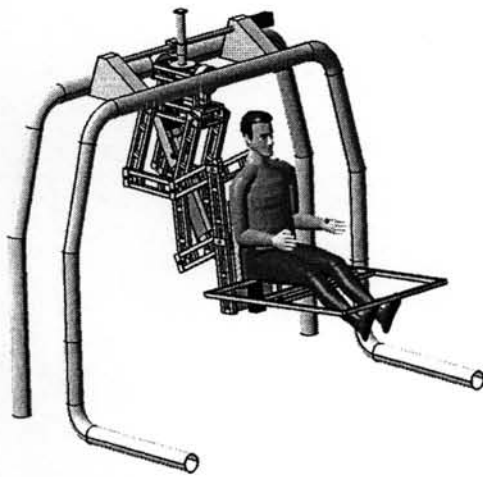
#### การออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

จากการศึกษาจากงานวิจัยที่ผ่านมาและการทดลองวัดค่าความเร่งในแนวแกนต่างๆของรถยนต์ ณ สนามทดสอบที่รีเซอรัท [17] พบว่าความเร่งส่วนที่สำคัญต่อการสร้างความรู้สึกเสมือนจริงในการขับขี่ประกอบด้วยอย่างน้อยสองส่วนด้วยกันคือ ความเร่งในแนวระนาบและความเร่งในแนวตั้ง โดยสามารถกำหนดแกนอิสระและขอบเขตของการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

แกนการเคลื่อนที่ของ	ขอบเขตการเคลื่อนที่
กลไก	
Pitch	+ - 45 deg
Roll	+ - 45 deg
Z (แนวตั้ง)	+ - 150 mm

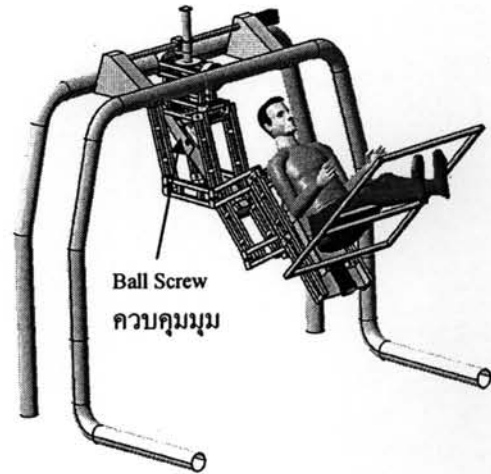
เมื่อพิจารณาอย่างรอบคอบแล้วกลไกที่เหมาะสมคือ กลไกแบบ CMS [3] เพราะโครงสร้างที่มีขอบเขตมากเพียงพอและสร้างได้โดยง่าย กลไกนี้ได้เคยถูกนำมาใช้ในงานหุ่นยนต์ของ ศิริศักดิ์

และ วิทยา [10] เป็นกลไกแบบอนุกรมทำหน้าที่คล้ายกับ spherical joint ที่สร้างการเคลื่อนที่ในแนวแกน Pitch และ Roll ที่มีช่วงขอบเขตการใช้งานสูง และง่ายต่อการออกแบบ และสามารถกำหนดจุดหมุนได้ ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดไว้ตรงกับ ศรีระของมนุษย์ เพราะเป็นตำแหน่งของอวัยวะรับรู้การทรงตัวของมนุษย์ ที่ปลายของโครงสร้างนี้จะมีกลไก ball screw ที่ขับแป้นที่นั่งเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่ง โครงสร้างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่ยานยนต์นี้จะถูกติดตั้งและแขวนอยู่บนฐานขาตั้งที่มีความสูงประมาณ 2 เมตร สามารถสร้างการเคลื่อนที่ในแนว pitch, roll, และในแนวตัวขนานกับที่นั่ง รูปร่างโดยรวมของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

พิจารณารูปที่ 6 ในการเคลื่อนที่ของมุม Pitch นั้นถูกควบคุมด้วยระยะระหว่างข้อต่อของ CMS joint ในที่นี้ใช้กลไก ball screw เป็นตัวควบคุมระยะ โดยเมื่ออีตระยะออกมุม Pitch จะมากขึ้น ส่วนการเคลื่อนที่ในแกน roll นั้นเพื่อความสะดวกจึงใช้ ball screw ควบคุมเช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6 การทำงานของเครื่องขณะจำลองความเร่งด้านหน้า



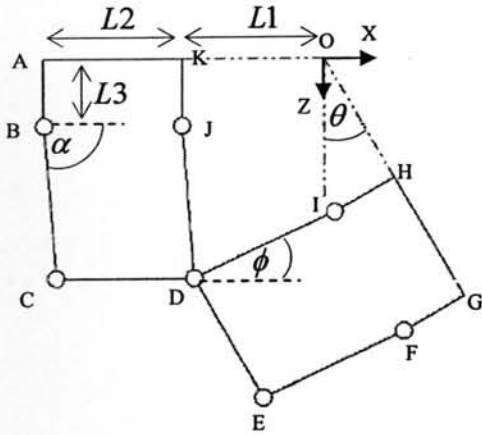
รูปที่ 7 การทำงานของเครื่องขณะจำลองความเร่งด้านข้าง

#### การจำลองการเคลื่อนที่

หัวข้อนี้อธิบายถึงการจำลองการเคลื่อนที่ซึ่งแบ่งเป็น สามส่วน คือ ส่วนที่จำลองความเร่งด้านหน้า ส่วนที่จำลองความเร่งด้านข้าง และส่วนที่จำลองความเร่งในแนวดิ่ง

##### 1) การจำลองความเร่งด้านหน้า

กลไกที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของมุม  $\theta$  คือ Offset Planar Hinge [3] ของ CMS Joint พิจารณาจากรูปที่ 7 กลไกดังกล่าวประกอบไปด้วย Link 6 ชิ้น คือ Link BAKJ, BC, CDI, JDE, EF และ FGHI แต่ละ Link เชื่อมต่อกันด้วย revolute joint 7 ตัว ซึ่งขนาดและความสัมพันธ์ของกลไกเป็นดังนี้



รูปที่ 8 โครงสร้างแบบ Offset Planar Hinge

$$\phi = \tan^{-1} \frac{L3}{L1} \tag{1}$$

$$|BC| = |JD| = |DI| = |EF| = Lx = \frac{L3}{\sin \phi} \tag{2}$$

$$|AB| = |KJ| = |IH| = |FG| = L3 \tag{3}$$

$$|AK| = |BJ| = |CD| = |DE| = |FI| = |HG| = L2 \tag{4}$$

$$|KO| = |HO| = L1 \tag{5}$$

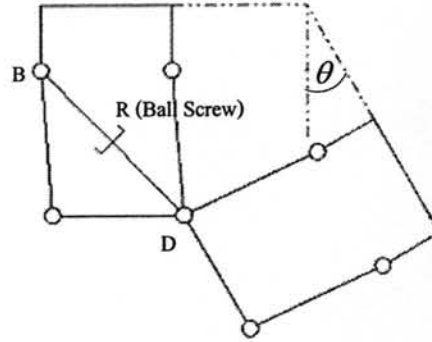
โดยจุดหมุนคือ O จะเป็นจุดที่แทนตำแหน่งศิระะ จากการความสัมพันธ์ของกลไกดังกล่าว สามารถหาความสัมพันธ์ของมุมได้ดังนี้

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \phi - \theta \tag{6}$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \tag{7}$$

เพื่อความเหมาะสมในการเลือกอุปกรณ์ ในการออกแบบ จะไม่ติดตั้งตัวขับไปติดที่ตำแหน่งจุด B โดยตรง เพราะขนาดของชุดเกียร์จะมีอัตราทดสูงและมีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก ดังนั้นในการออกแบบจึงนำกลไกบอลสกรูต่อเข้าที่

ตำแหน่ง B และ D เพื่อควบคุมระยะและตั้งนั้นควบคุมมุมของกลไก ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 โครงสร้างกลไกที่ใช้บอลสกรูควบคุมมุม

จากรูปกำหนดให้ R คือความยาวของบอลสกรู เมื่อเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\theta$  กับ R จะได้ดังนี้

$$R = \sqrt{Lx^2 + L2^2 - 2 \cdot Lx \cdot L2 \cdot \cos(\pi - \alpha)} \tag{8}$$

$$R = \sqrt{Lx^2 + L2^2 - 2 \cdot Lx \cdot L2 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi + \theta\right)} \tag{9}$$

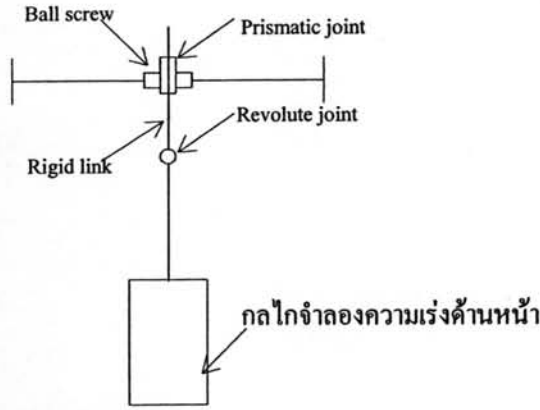
ในการจำลองความเร่งของยานยนต์ในทิศทางในแนวแกนด้านหน้ารถนั้น สามารถสร้างให้มนุษย์รู้สึกถึงความเร่งดังกล่าวได้จากการเอียงกระดกเก้าอี้ของผู้ขับที่ เมื่อกำหนดให้ความเร่งที่วัดในแนวด้านหน้ารถเป็น Ax มุม pitch ( $\theta$ ) ของเก้าอี้ที่ทำให้ผู้ขับรู้สึกเสมือนว่าถูกเร่งมีค่าเท่ากับ

$$\theta = \sin^{-1} \frac{Ax}{g} \tag{10}$$

โดยที่ g คือความเร่งของแรงโน้มถ่วง

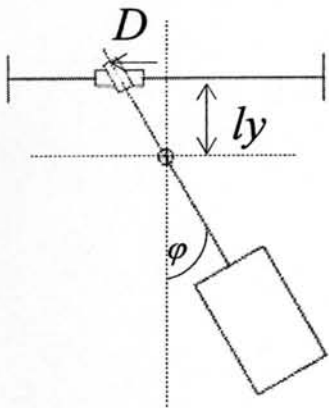
2) การจำลองความเร่งด้านข้าง

การเคลื่อนที่ทางด้านข้าง เกิดจากการหมุน Links รอบแกน AK (รูปที่ 8) ซึ่งได้ใช้กลไกของ ball screw ขับเพื่อหลีกเลี่ยงการขับโดยตรงที่ revolute joint ด้วยเหตุผลเดียวกันที่ได้กล่าวในส่วนที่แล้ว กลไกจำลองการเคลื่อนที่ด้านข้างแสดงไว้ในรูปที่ 10



รูปที่10 โครงสร้างกลไกจำลองความเร่งด้านข้างขณะไม่มี  
ความเร่ง

จากรูปที่10 ball screw ต่อกับ Prismatic joint ด้วย Revolute joint ซึ่งตัว Prismatic joint จะสวมอยู่กับ Rigid link ที่เชื่อมติดกับตัวกลไกจำลองความเร่งด้านหน้า เมื่อ ball screw เคลื่อนที่จะทำให้ จุดจำลองกลไกด้านหน้าเอียงด้านข้างมีลักษณะดังรูปที่ 11



รูปที่11 โครงสร้างกลไกจำลองความเร่งด้านข้างขณะมี  
ความเร่ง

ซึ่งจากรูปที่11 เพื่อหาตำแหน่งของบอลสกรูเมื่อเทียบกับมุม  $\varphi$  กำหนดให้  $ly$  คือความยาวจากจุดหมุนรอบแกน AK ไปยัง ball screw  $D$  คือระยะที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของ บอลสกรู  $\varphi$  คือมุม Roll ที่เกิดจากการจำลองความเร่งด้านข้าง

ดังนั้นความสัมพันธ์ของ ระยะกับมุมคือ

$$D = ly \cdot \tan \varphi \tag{11}$$

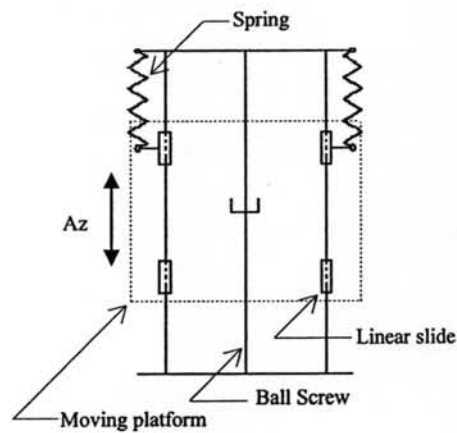
โดยเมื่อนำความสัมพันธ์ของมุม  $\varphi$  มาเทียบความความเร่งด้านข้าง  $A_y$  จะได้ว่า

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{A_y}{g \cdot \cos \theta} \tag{12}$$

โดยที่  $g$  คือความเร่งของแรงโน้มถ่วง

3) การจำลองความเร่งในแนวตั้ง

ในการออกแบบกลไกการจำลองความเร่งในแนวตั้งที่ติดตั้งจากกับที่นั่งของยานพาหนะได้ใช้ บอลสกรู เป็นตัวขับเคลื่อนให้ Moving platform เคลื่อนที่ขึ้นลง มีลักษณะดังรูปที่ 12 เพื่อลดภาระและลดขนาดของมอเตอร์ ในการออกแบบจึงได้นำชุดสปริงมาชดเชยน้ำหนักของผู้ขับขี่ โดยติดตั้งขนานคู่กับบอลสกรู โดยนำ Linear slide 4 ตัวมาช่วยในการรับภาระที่เกิดจากการเคลื่อนที่ การติดตั้งกลไกนี้จะติดตั้งเข้าไปที่ Link FGHI

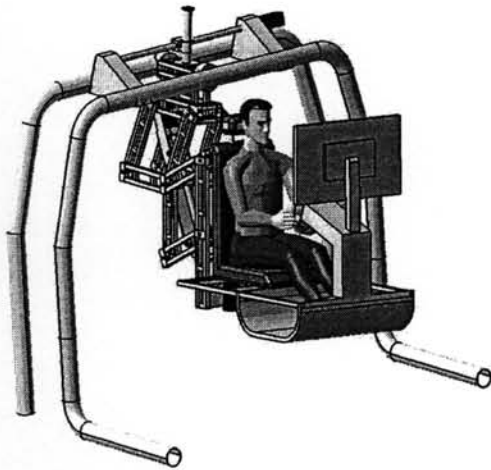


รูปที่12 โครงสร้างตัวจำลองการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระที่ใช้จำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์ โครงสร้างของกลไกจะเป็นแบบอย่างง่ายโดยใช้ CMS Joint เป็นกลไกหลัก ในการออกแบบนี้อาศัยหลักการของการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์เพื่อให้แบบจำลองการเคลื่อนที่ดังกล่าวสามารถจำลองการเคลื่อนที่ให้ความรู้สึกเสมือนจริงมากที่สุด





#### ACKNOWLEDGMENTS

งานวิจัยนี้ส่วนหนึ่งได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยวัสดุและโลหะแห่งชาติ สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

#### REFERENCES

- [1] C.Jason Gutridge, "Three Degree of Freedom Simulator Motion Cueing Using classical Washout Filters and Acceleration Feedback" Master of Science in Aerospace Engineering
- [2] C.Shingo ,Y. Kenichi , Daisuke Kawasaki, M. Yoshifumi and S.Takayuki , "Development of a Motorcycle Simulator using Parallel Manipulator and Head Mounted display" <http://www.ynl.t.u-tokyo.ac.jp>
- [3] Gregory J. Hamlin and A.C.Sanderson, "A Novel Concentric Multilink Spherical Joint with Parallel Robotics Applications" IEEE
- [4] G. Reymond A.Kemeny A.Berthoz "Sensor Integration in a driving simulator : contribution motion cueing in elementary driving tasks" DSC2001-Sophia Antipolis-September 2001
- [5] L.Nehaoua, A.Amouri and H.Arioui, "Classic and Adaptive Washout comparison for a Low Cost Driving Simulator", IEEE 2005:586-591.
- [6] N.spooner, K.Seidler, "Development of the Several Integrated Degree of freedom demonstrator (SIDFreD) Simulator", CSME 2004 Forum1
- [7] R. Hosman, S. Advani, and N. Haeck, " Integrated Design of Flight Simulator Motion Cueing Systems", Presented at the Royal Aeronautical Society conference on Flight Simulation. London, May 2002
- [8] R. J.Telban and F.M.Cardullo, " Motion cueing Algorithm Development: Human-Centered Linear and Nonlinear Approaches", NASA/CR-2005-213747
- [9] ราตรี สุดทรง , วีระชัย สิงหนิยม , "ประสาท สรีรวิทยา", พิมพ์ครั้งที่ 4 , สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย 2545
- [10] วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์, ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข, "จลศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทแขนกลสามมิติ", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17 พค.2546
- [11] [www.brdsim.com](http://www.brdsim.com)
- [12] [www.force\\_dynamic.com](http://www.force_dynamic.com)
- [13] [www.inmotion simulation.com](http://www.inmotion simulation.com)
- [14] [www.mfs.com.au](http://www.mfs.com.au)
- [15] [www.simuline.com](http://www.simuline.com)
- [16] วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และคณะ "การพัฒนารูปแบบใหม่ของระบบประเมินผลศาสตร์ยานยนต์ การขับที่ และระบบชิ้นส่วน" รายงานความก้าวหน้า ศูนย์วิจัยวัสดุและโลหะแห่งชาติ MTEC

# การออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ยานยนต์สำหรับการรับรู้ของผู้ขับขี่

## A Design of Driving Simulator for Human Sensing

เด่น จันทรทองอ่อน<sup>1</sup> วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์<sup>2</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท กรุงเทพมหานคร 10330

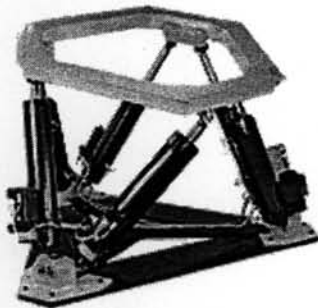
โทร. 0-2218-6610 โทรสาร. 0-2252-2889 Email: witaya.w@chula.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการพัฒนาเครื่องสร้างแบบจำลองการขับขี่ยานยนต์ โดยศึกษาถึงระบบรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์เพื่อนำมาเป็นหลักในการออกแบบเครื่องจำลองการขับขี่ยานยนต์ให้สามารถสร้างความรู้สึกเหมือนจริงได้เหมาะสม โดยระบบที่เกี่ยวข้องโดยตรงคือ ระบบการทรงตัวและระบบรับรู้ของกล้ามเนื้อและข้อต่อ ผลที่ได้จากการศึกษาพบปัจจัยในการออกแบบที่สำคัญของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่คือ จุดหมุนของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ อัตราในการหมุนของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ และขอบเขตในการเอียงของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาปัจจัยต่างในการออกแบบในงานวิจัยนี้จึงนำกลไกแบบ CMS joint มาใช้เป็นกลไกหลักของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่เพราะมี มีพื้นที่ทำงานมากและสามารถกำหนดตามการออกแบบได้ง่ายและสะดวก

### 1. บทนำ

แบบจำลองการเคลื่อนที่ยานยนต์คืออุปกรณ์ที่ใช้เพื่อจำลองสถานะการณ์การเคลื่อนที่ของยานพาหนะ โดยมีวัตถุประสงค์ในการใช้งานแตกต่างกันไปเช่น เพื่อฝึกหัดควบคุมยานพาหนะ เพื่อทดสอบและพัฒนากระบวนการควบคุมของยานพาหนะ ทดสอบพัฒนาผลิตภัณฑ์ยานยนต์ ฝึกหัดและทดสอบทดลองปัจจัยและการตอบสนองของผู้ขับขี่รวมทั้งใช้ในด้านความบันเทิงอีกด้วย อดีตการออกแบบโครงสร้างของกลไกจะมุ่งเน้นที่จำนวนขององศาอิสระที่สร้างได้ให้มีปริมาณที่ใกล้เคียงหรือเท่ากับเคลื่อนที่จริงที่เกิดขึ้น ซึ่งกลไกที่ได้รับความนิยมสูงสุดคือกลไกแบบสจิวจ ดังรูปที่ 1 เพราะกลไกดังกล่าวสามารถสร้างองศาอิสระได้ 6 องศาอิสระ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่ากลไกแบบสจิวจจะสามารถสร้างองศาอิสระได้มาก แต่ก็มีข้อจำกัดอยู่ที่ ขอบเขตการทำงานของกลไกที่มีน้อย และราคาของกลไกที่มีราคาแพง



รูปที่ 1 เครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบสจิวจ 6 องศาอิสระ [11]

อดีตถึงแม้ว่าเครื่องจำลองการเคลื่อนที่จะสามารถสร้างความรู้สึกเหมือนจริงได้ แต่ยังไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้ในงานที่ต้องการความเหมือนจริงสูงเช่น การทดลอง ทดสอบการควบคุมยานพาหนะในกรณีที่มีความเสี่ยง ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาเพื่อทำความเข้าใจเกี่ยวกับความรู้สึกและประสาทการรับรู้ของมนุษย์ ปัจจัยอะไรทำให้มนุษย์รู้สึกแตกต่างระหว่างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่กับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริง ทั้งนี้เพราะการตัดสินใจของมนุษย์ในการควบคุมยานพาหนะจะอยู่ที่ความเข้าใจของระบบการรับรู้ของสภาวะที่เกิดขึ้นขณะนั้น

Siegler [4] ศึกษาถึงการตัดสินใจหยุดรถในกรณีที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับการหยุดรถในกรณีที่อยู่ในเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ R.Hosman [7] นำเสนอการนำปัจจัยในการรับรู้ของมนุษย์มาใช้ประกอบกับการสร้างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่เพื่อให้ความรู้สึกเหมือนจริงมากยิ่งขึ้นโดยได้มีการศึกษาถึงระบบการรับรู้ของมนุษย์และขอบเขตของการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์เพื่อที่จะนำมาสร้างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ให้ความรู้สึกเหมือนจริงมากขึ้น อีกทั้งยังมีการสร้างอุปกรณ์เสริมเพื่อสร้างความรู้สึกเหมือนจริงให้กับอวัยวะต่างโดยตรงเช่น มีการใช้สายรัดนิรภัยในการทำให้รู้สึกถึงความเร่ง หรือ L.Nehaoua [5] ใช้การปรับระดับของเบาะรองหลังเพื่อจำลองความเร่งที่เกิดขึ้น ปัจจุบันได้มีการศึกษาเพื่อนำกลไกที่มีองศาอิสระที่น้อยกว่า 6 มาสร้างสภาวะจำลองเหมือนจริงโดยอาศัยความรู้เกี่ยวกับระบบการรับรู้ของมนุษย์มาสร้างเครื่องจำลองเพื่อให้เหมาะในการจำลองยานพาหนะแต่ละประเภทเพราะกลไกที่มีองศาอิสระน้อยกว่า 6 นั้นย่อมหมายถึงกลไกที่มีราคาถูกกว่า พื้นที่ในการเคลื่อนที่ได้มากกว่า และมีความง่ายในการควบคุมมากกว่า

งานวิจัยนี้นำเสนอกลไกแบบ 3 องศาอิสระที่ออกแบบโดยคำนึงถึงระบบการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์เป็นหลัก [17] เพื่อใช้เครื่องจำลองการเคลื่อนที่สร้างสถานการณ์จำลองทางพลศาสตร์ของรถยนต์ เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่พัฒนาขึ้นนี้มีสามแกน 3 องศาอิสระ คือแกนการเคลื่อนที่หมุนรอบแกนระนาบสองแนวแกน และเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับที่หนึ่งหนึ่งแนวแกน เครื่องจำลองการขับขี่นี้ใช้หลักการหมุนรอบแกนระนาบเพื่อทำมุมกับแรงโน้มถ่วงของโลกให้มนุษย์รับรู้เสมือนกับได้รับความเร่งเชิงเส้นในแนวแกน

ในการจำลองความเร่งด้านหน้าของยานยนต์ เครื่องจำลองจะหมุนรอบแกนด้านข้างเพื่อให้ตัวมนุษย์เอียงไปข้างหน้าและข้างหลัง (pitch) และเครื่องจะหมุนรอบแกนด้านหน้า (roll) เพื่อจำลองความเร่งด้านข้างของยานยนต์เช่นการเลี้ยวโค้ง โดยขนาดความเร่งที่จำลองนั้น

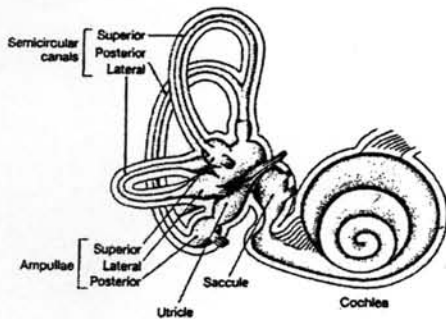
จะมีขนาดเท่ากับความเร่งจริงที่เกิดขึ้น ดังนั้นสิ่งที่เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่ต้องคำนึงถึงคือ อัตราในการหมุนในงานวิจัย C.Jason [1] และ จุดที่ใช้ในการหมุนจะเป็นจุดเดียวกับศีรษะดังแสดงในงานวิจัย C.Shingo [2]

### 2. ระบบรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์

คุณลักษณะที่สำคัญของเครื่องจำลองนี้คือการสร้างการเคลื่อนที่เพื่อทำให้ผู้ขับขี่ที่กำลังควบคุมอยู่ในเครื่องนั้นรู้สึกเสมือนกับว่าตนเองกำลังควบคุมยานพาหนะนั้นจริงๆ ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาถึงความสามารถ กลไกและระบบในการรับรู้ของมนุษย์เพื่อนำปัจจัยที่ได้จากการศึกษามาใช้ในการสร้างระบบควบคุมเครื่องจำลองเสมือนจริงให้สามารถถ่ายทอดให้ผู้ที่จะควบคุมเกิดความรู้สึกเสมือนจริงมากที่สุด

ระบบรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์ที่เกี่ยวข้องจะมี 2 ระบบใหญ่ๆ ด้วยกันอันได้แก่ระบบประสาท ซึ่งเปรียบเสมือนกับส่วนประมวลผลมีหน้าที่รับความรู้สึกต่างๆจากเซลล์ซึ่งอยู่ตามตำแหน่งต่างๆทั่วร่างกาย เพื่อนำมาให้สมองวิเคราะห์และแปลความหมายของความรู้สึกที่ได้รับ ทำให้มนุษย์รู้ว่า ณ สภาวะนั้นได้เกิดอะไรขึ้น และอีกระบบคือระบบการทรงตัว ระบบนี้จะมีหน้าที่ในการบอกถึงความสามารถในการทรงตัวของมนุษย์ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่งและทิศทางของร่างกาย โดยรับข้อมูลจากการมองเห็นด้วยสายตา การสัมผัสถึงการเคลื่อนไหวและแรงต่างๆจากผิวหนัง และข้อต่อต่างๆทั่วร่างกาย รวมถึงการรับรู้ถึงความเร่งที่เกิดขึ้นด้วยระบบของหูชั้นใน เมื่อนำข้อมูลจากระบบเหล่านี้รวมกันทำให้มนุษย์สามารถทราบถึงสภาวะที่เป็นอยู่ ณ ขณะนั้นได้

สิ่งที่เครื่องจำลองการเคลื่อนที่ที่ต้องคำนึงถึงนอกจากแรงที่กระทำต่อร่างกายแล้ว คือการสร้างตำแหน่งการเคลื่อนที่เพื่อทำให้ไกลกระบบรับรู้ของหูชั้นในได้รับความเร่งเสมือนได้รับความเร่งจากการขับยานยนต์จริง ระบบของหูชั้นในเมื่อวิริยะรับรู้ความเร่งเชิงมุมและความเร่งเชิงเส้น สำหรับรับรู้ความเร่งที่สภาวะต่างๆซึ่งตำแหน่งที่ตั้งของอวัยวะดังกล่าวจะอยู่ที่ตำแหน่งของหูชั้นในทั้งชายและขวาของมนุษย์ ลักษณะของอวัยวะรับรู้ความเร่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 2

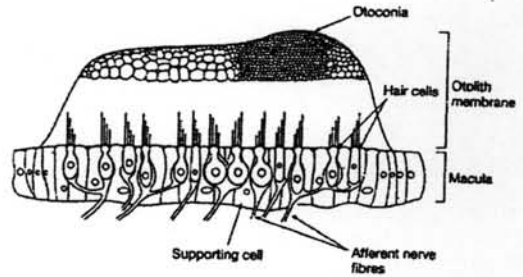


รูปที่2 ระบบรับรู้ความเร่งของมนุษย์ [9]

พิจารณารูปที่ 2 อวัยวะรับรู้ความเร่งเชิงมุมคือ เซมิเซอคูลาร์คาแนล (semicircular canals) ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปโค้งครึ่งวงกลมเล็กๆ สามวงทำหน้าที่วัดความเร่งเชิงมุมที่เกิดขึ้นทั้ง 3 แนวแกน วางเรียงติดต่อกันตั้งฉากกับผนังภายในโดยปลายของครึ่งวงกลมทั้ง 3 นั้นอยู่

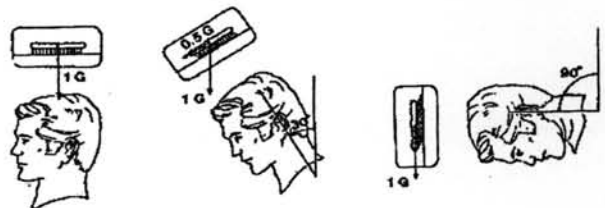
ติดกัน ท่อเซมิเซอคูลาร์คาแนล ทั้ง 3 นี้มีด้วยเนื้อเยื่อบางๆที่มีประสาทรับความรู้สึกเกี่ยวกับการทรงตัวกระจายอยู่ ส่วนที่เป็นช่องว่างภายในท่อครึ่งวงกลมนั้นบรรจุด้วยของเหลว เมื่อเกิดความเร่งเชิงมุม อวัยวะรับรู้ได้ด้วยความเฉื่อยของของเหลวที่ไหลหมุนในท่อ

อวัยวะรับรู้ความเร่งเชิงเส้นคือ ยูทริเคิล (utricle) ซึ่งทำหน้าที่วัดความเร่งแนวระดับ และซัคคิวเออ(saccule) ทำหน้าที่วัดความเร่งแนวตั้งภายในของอวัยวะรับรู้ทั้งสองจะบรรจุด้วย ไอโตคอนเนีย (otoconia)ซึ่งมีลักษณะเป็นผลึกเล็กๆ และ Hair cells ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้น รวมเรียกล้วนดังกล่าวว่า ไอโตคอนเนียเมมเบรน (Otolith membrane)พิจารณาจากรูปที่3



รูปที่3 ไอโตคอนเนียเมมเบรน [9]

ลักษณะการทำงานจะเป็นดังรูปที่ 4 ในกรณีที่มีมนุษย์ไม่ได้เคลื่อนที่และอยู่ในตำแหน่งแนวตั้งกับโลก ตัวไอโตคอนเนียจะอยู่ตำแหน่งเดิมเมื่อเทียบกับแฮร์เซลล์ แต่ในขณะที่มนุษย์ได้รับความเร่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันระหว่างแฮร์เซลล์และตัวไอโตคอนเนีย ตัวแฮร์เซลล์จะส่งข้อมูลของตำแหน่งไอโตคอนเนียไปสมองเพื่อรายงานสภาวะการเคลื่อนที่เชิงเส้นที่เกิดขึ้น และเมื่อมนุษย์อยู่นิ่งหรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตัว ไอโตคอนเนียจะเคลื่อนที่กลับมาอยู่ที่สมดุลเดิม



รูปที่4 การเคลื่อนที่ของ ไอโตคอนเนียเมื่อมนุษย์ได้รับความเร่ง [9]

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าระบบการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์นั้นมีขอบเขตในการรับรู้ ตัวอย่างเช่น มนุษย์ไม่สามารถรับรู้และทราบถึงความเร่งเชิงมุมทั้งสามแนวแกนที่มีค่าน้อยกว่า 2 deg/s<sup>2</sup> และไม่สามารถรับรู้ถึงความเร่งเชิงเส้นในแนวระดับที่น้อยกว่า 0.17 m/s<sup>2</sup> และความเร่งในแนวตั้งที่น้อยกว่า 0.28 m/s<sup>2</sup> [8] ตามลำดับ C.Jason [1] ทดลองและพบว่าเมื่อหมุนมนุษย์โดยอัตราการหมุนน้อยกว่า 2 deg/s มนุษย์จะไม่รู้สึกว่ามีโคลน ผลการทดลองเหล่านี้ได้จากการทดลองโดยการทดลองใส่ค่าความเร่งที่ละแกนเพื่อตรวจสอบว่ารู้สึกหรือไม่รู้สึก สิ่งที่น่าสนใจเพิ่มคือในกรณีที่มีมนุษย์รับรู้ความเร่งความเร็วพร้อมกันทั้ง 6 แนวแกน มนุษย์จะรู้สึกอย่างไร



อีกประเด็นที่น่าสนใจคือมนุษย์มีความรู้สึกที่เรียกว่าความเคยชิน คือ ในกรณีที่มนุษย์ได้รับความเร่งเชิงมุมเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งจนความเร็วในการเคลื่อนที่ของของของเหลวภายในเซมิเซอร์คิวลาร์เท่ากับความเร็วของศีรษะมนุษย์จะเข้าใจว่าสภาวะนั้นไม่มีความเร่งเกิดขึ้น[14] ตูรายละเอียดเพิ่มเติมของระบบการรับรู้ของมนุษย์ได้ในรายงานวิจัย [16]

ในการศึกษาระบบการรับรู้การเคลื่อนที่โดยเฉพาะความเร่งของอวัยวะรับรู้ของมนุษย์ ทำให้สามารถประยุกต์ใช้แรงโน้มถ่วงของโลกมาจำลองการเคลื่อนที่ของยานยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ C.Jason [1] ได้นำเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระที่อาศัยแรงโน้มถ่วงมาจำลองการเคลื่อนที่ กลไกดังกล่าวสามารถหมุนได้ทั้งสามแนวแกน แต่สามารถจำลองการเคลื่อนที่ของเครื่องบินได้ 6 แนวแกน เช่น หมุนรอบแกนด้านข้างเพื่อจำลองความเร่งด้านหน้า และหมุนรอบแกนด้านหน้าเพื่อจำลองความเร่งด้านข้าง เป็นต้น

3. การออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

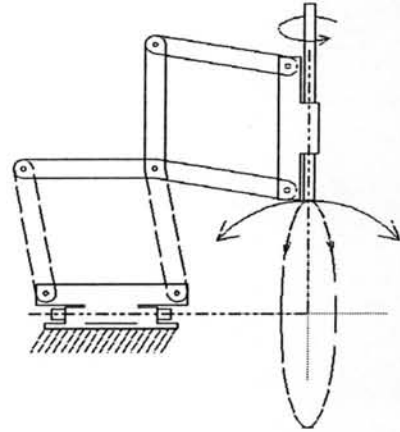
จากการทดลองวัดค่าความเร่งในแนวแกนต่างๆของรถยนต์ทดสอบ ณ สนามทดสอบพีระเซอริกิต [16] และการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ความเร่งส่วนที่สำคัญต่อการสร้างความรู้สึกเสมือนจริงในการขับซึ่งประกอบด้วยอย่างน้อยสองส่วนด้วยกันคือ ความเร่งในแนวระนาบ (lateral and transverse accelerations) และความเร่งในแนวตั้ง เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้สามารถกำหนดแกนอิสระและขอบเขตของการเคลื่อนที่ของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

แกนการเคลื่อนที่ของกลไก	ขอบเขตการเคลื่อนที่
Pitch	+ - 45 deg
Roll	+ - 45 deg
Z (แนวตั้ง)	+ - 150 mm

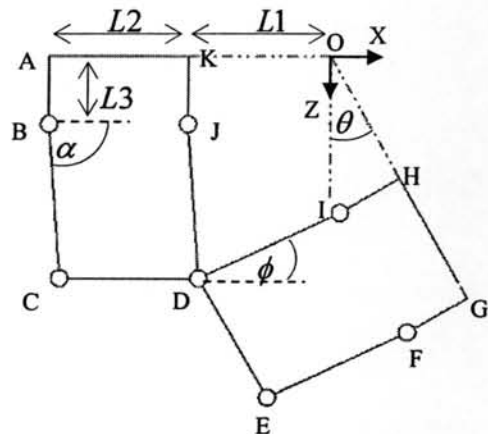
เมื่อพิจารณาอย่างรอบคอบแล้ว กลไกหลักที่ใช้ในการสร้างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ ที่เหมาะสมกับขอบเขตที่กำหนดคือกลไกแบบ CMS ( Concentric Multilink Spherical ) ดังรูปที่ 5 ซึ่งถูกพัฒนาโดย Gregory J.Hamin [3] เพราะโครงสร้างกลไกที่มีขอบเขตมากเพียงพอและสร้างได้โดยง่าย กลไกนี้ได้เคยถูกนำมาใช้ในงานหุ่นยนต์ของ สิริศักดิ์ และ วิทยา [10] CMS Joint เป็นกลไกแบบอนุกรมทำหน้าที่คล้ายกับ Spherical Joint ที่สร้างการเคลื่อนที่ในแนวแกน Pitch และ Roll ที่มีช่วงขอบเขตการใช้งานสูง และง่ายต่อการออกแบบ และที่สำคัญสามารถกำหนดจุดหมุนได้ โดยจุดหมุนทั้ง 2 แนวแกนจะเป็นจุดเดียวกันเสมอซึ่งคือจุดตัดกันของแกนการหมุนนั่นเอง เมื่อนำกลไกดังกล่าวมาเป็นโครงสร้างหลักของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ จุดหมุนที่เหมาะสมถูกกำหนดให้อยู่ที่ศีรษะของมนุษย์ จากรูปที่ 6 จุดดังกล่าวคือจุด O กลไกของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงจากกลไกแบบ CMS (ในรูปที่ 6) โดยจะไม่หมุนรอบแนวแกน HG แต่จะแทนด้วยการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นเพื่อใช้จำลองการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ส่วนการ

หมุนรอบแกน AK และรอบแกน Y เป็นจำลองการเคลื่อนที่ของความเร่งด้านข้างและความเร่งด้านหน้าตามลำดับ

โครงสร้างหลักของกลไกประกอบไปด้วย Link 6 ชิ้น คือ Link BAKJ, BC, CDI, JDE, EF และ FGHI แต่ละ Link เชื่อมต่อกันด้วย revolute joint 7 ตัว



รูปที่ 5 การเคลื่อนที่ของกลไกแบบ CMS [10]



รูปที่ 6 โครงสร้างของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

ขนาดและความสัมพันธ์ของกลไกเป็นดังนี้

$$\phi = \tan^{-1} \frac{L3}{L1} \tag{1}$$

$$|BC| = |JD| = |DI| = |EF| = Lx = \frac{L3}{\sin \phi} \tag{2}$$

$$|AB| = |KJ| = |IH| = |FG| = L3 \tag{3}$$

$$|AK| = |BJ| = |CD| = |DE| = |FI| = |HG| = L2 \tag{4}$$

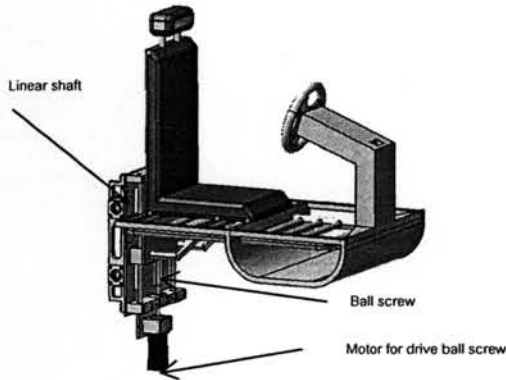
$$|KO| = |HO| = L1 \tag{5}$$

จากความสัมพันธ์ของกลไกดังกล่าว สามารถหาความสัมพันธ์ของมุมที่เคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \phi - \theta \tag{6}$$

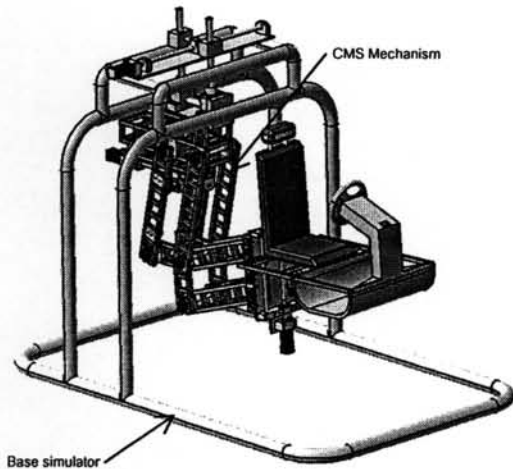
$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \tag{7}$$

ในการออกแบบโครงสร้างโดยรวมจะใช้โครงสร้างของ CMS Joint จำนวนสองชุดต่อขนานกันเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและด้านการบิดตัวที่ปลายของโครงสร้างมีกลไกสร้างการเคลื่อนที่ในแนวตั้งสำหรับผู้ขับขี่ที่มวิจัยเลือกกลไก ball screw ในการขับเคลื่อนและควบคุมแป้นที่นิ่งและเพื่อความแข็งแรงของกลไกจะเพิ่มชุด linear shaft เข้าไปสองชุดดังรูปที่ 7



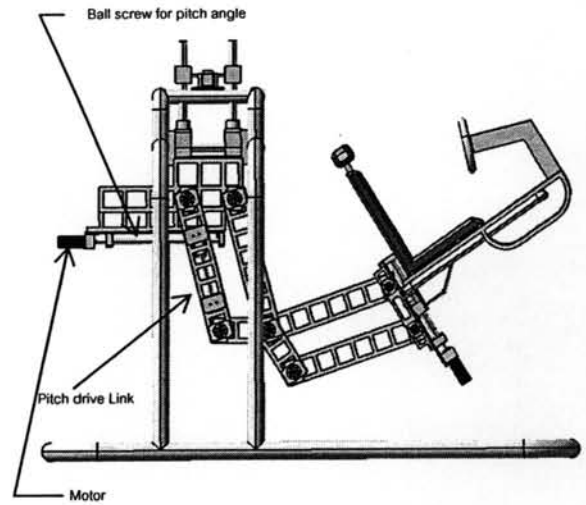
รูปที่7 โครงสร้างของกลไกการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง

โครงสร้างเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ยานยนต์นี้จะถูกติดตั้งและแขวนอยู่บนฐานขาตั้งที่มีความสูงประมาณ 2 เมตร สามารถสร้างการเคลื่อนที่ในแนว pitch, roll, และในแนวค้ำขนานกับที่นิ่ง รูปร่างโดยรวมของเครื่องจำลองการเคลื่อนที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8



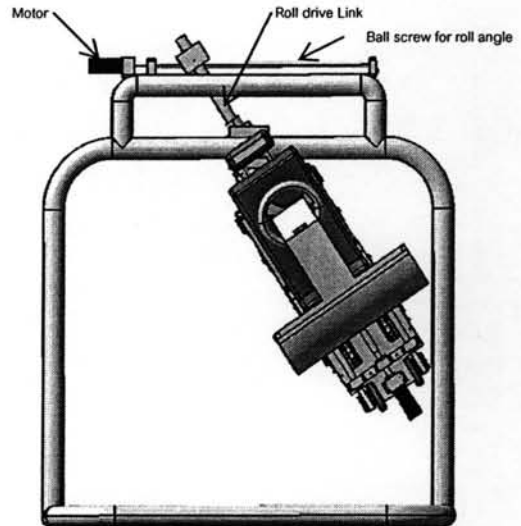
รูปที่8 แบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่

พิจารณารูปที่9 ในการเคลื่อนที่ของมุม Pitch นั้นถูกควบคุมด้วย ball screw เป็นตัวควบคุมระยะโดยเมื่อ ball screw เคลื่อนที่จะทำให้ pitch drive link ของ CMS joint ที่ติดอยู่กับตัว ball screw เคลื่อนที่



รูปที่9 การทำงานของเครื่องขณะจำลองความเร่งด้านหน้า

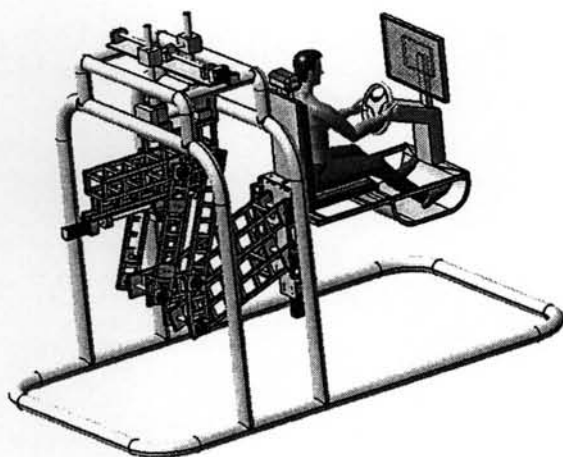
ส่วนการเคลื่อนที่ในแกน roll นั้นอาศัยหลักการเดียวกับการควบคุมการเคลื่อนที่ของมุม pitch คือ ball screw ทำหน้าที่ขับให้ roll drive link เคลื่อนที่ซึ่งการเคลื่อนที่ดังกล่าวจะเป็นดังรูปที่ 10



รูปที่10 การทำงานของเครื่องขณะจำลองความเร่งด้านข้าง

### 5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบเครื่องจำลองการเคลื่อนที่แบบ 3 องศาอิสระที่ใช้จำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์ โครงสร้างของกลไกจะเป็นแบบอย่างง่ายโดยใช้ CMS Joint เป็นกลไกหลัก ในการออกแบบนี้อาศัยหลักการของการรับรู้การเคลื่อนที่ของมนุษย์เพื่อให้แบบจำลองการเคลื่อนที่ดังกล่าวสามารถจำลองการเคลื่อนที่ให้ความรู้สึกเสมือนจริงมากที่สุด



## ACKNOWLEDGMENTS

งานวิจัยนี้ส่วนหนึ่งได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยวัสดุและโลหะแห่งชาติ สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

## REFERENCES

- [1] C.Jason Guttridge, "Three Degree of Freedom Simulator Motion Cueing Using classical Washout Filters and Acceleration Feedback" Master of Science in Aerospace Engineering
- [2] C.Shingo ,Y. Kenichi , Daisuke Kawasaki, M. Yoshifumi and S.Takayuki , "Development of a Motorcycle Simulator using Parallel Manipulator and Head Mounted display" <http://www.ynl.t.u-tokyo.ac.jp>
- [3] Gregory J. Hamlin and A.C.Sanderson, "A Novel Concentric Multilink Spherical Joint with Parallel Robotics Applications" IEEE
- [4] G.Reymond,A.Kemeny,A.Berthoz,"Sensorimotor integration in a driving simulator: contribution of motion cueing in elementary driving tasks" DSC2001-Sophia Antipolis-September 2001
- [5] L.Nehaoua, A.Amouri and H.Arioui, "Classic and Adaptive Washout comparison for a Low Cost Driving Simulator",IEEE 2005,page 586-591.
- [6] N.spooner, K.Seidler,"Development of the Several Integrated Degree of freedom demonstrator (SIDFreD) Simulator", CSME 2004 Forum1
- [7] R. Hosman,S. Advani, and N. Haeck," Integrated Design of Flight Simulator Motion Cueing Systems",Presented at the Royal Aeronautical Society conference on Flight Simulation. London, May 2002
- [8] R. J.Telban and F.M.Cardullo," Motion cueing Algorithm Development: Human-Centered Linear and Nonlinear Approaches",NASA/CR-2005-213747
- [9] วาดรี สุดทรง , วีระชัย สิงหนิยม , "ประสาธศรีวิทยา", พิมพ์ครั้งที่ 4 , สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2545
- [10] วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์,ศิริศักดิ์ สิริเกษมสุข,"จลศาสตร์ของหุ่นยนต์โคบอทแขนกลสามมิติ", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17 พค. 2546
- [11] [www.brdsim.com](http://www.brdsim.com)
- [12] [www.force\\_dynamic.com](http://www.force_dynamic.com)
- [13] [www.inmotion\\_simulation.com](http://www.inmotion_simulation.com)
- [14] [www.mfs.com.au](http://www.mfs.com.au)
- [15] [www.simuline.com](http://www.simuline.com)
- [16] วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์ และคณะ "การพัฒนารูปแบบใหม่ของระบบประเมินพลศาสตร์ยานยนต์ การขับขี และระบบชิ้นส่วน" รายงานความก้าวหน้า ศูนย์วิจัยวัสดุและโลหะแห่งชาติ MTEC

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเด่น จันทรทองอ่อน เกิดเมื่อวันที่ 6 สิงหาคม พ.ศ. 2521 ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัด นครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาต้น และมัธยมปลาย จากโรงเรียน เบญจมาชชุทิศ สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปี การศึกษา 2544 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขา วิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ. 2546