# เสถียรภาพการบังคับยานยนต์ และแนวทางการทดสอบ

**ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี*, กุลยศ สุวันทโรจน์ และ ศุภชัย หลักคำ**
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ถนนพิบูลสงคราม บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

## บทคัดย่อ

บทความวิชาการปริทรรศน์นี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเสนอถึงปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการบังคับรถยนต์ แนวการทดสอบ รวมไปถึงงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาประเทศในด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ที่มีแนวโน้มเติบโตและแข่งขันสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคต โดยแนวทางการทดสอบในกรณีของการทดสอบจริงสามารถแบ่งได้เป็น 4 การทดสอบหลักคือ การทดสอบความเร่งด้านข้าง การทดสอบการโคลง การทดสอบแรงเบรก และการทดสอบจุดศูนย์กลางมวลของรถยนต์ ซึ่งการทดสอบเหล่านี้ สามารถนำมาใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของรถยนต์ในกรณีต่างๆ กันภายใต้การออกแบบรถยนต์และการขับขี่ในสภาวะต่างๆ ส่วนการทดสอบด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์และการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปควรตระหนักถึงความถูกต้องของสมการคณิตศาสตร์และการจำลองเงื่อนไขการทดสอบ เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบ

**คำสำคัญ :** เสถียรภาพการบังคับยานยนต์ / แนวทางการทดสอบ

* *Correspondent author: songwut.m@rmutp.ac.th*
*อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์*

# Vehicle Handling Performance and Testing Guideline

**Songwut Mongkonlerdmanee*, Kullayot Suwantaroj and Supachai Lakkam**

Rajamangala University of Technology PhraNakhon, Piboonsongkram Rd., Bangsue, Bangkok Thailand 10800

## Abstract

This review article aims to present the crucial factors of vehicle handling performance, experimental method and related researches. The review is expect to be useful to the development of the automotive industry, which has rapidly been expanding and should exhibit high competition potential in the near future. The reviewed tests consist of 4 refutations: lateral acceleration, roll moment, brake and center of gravity tests. These tests can be used to analyze the vehicle stability under different conditions based on various driving situations and designs. In the case of mathematical modeling, the accuracy of mathematical equations and experimental conditions needs careful attention to reduce possible simulation errors.

**Keywords :** Testing guideline / Vehicle handling

* *Correspondent author: songwut.m@hotmail.com*

*Lecture, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering.*

## 1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมยานยนต์เข้ามามีบทบาทอย่างมากต่อการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศไทย จากผลการศึกษาของทีมงานวิจัยภาวะเศรษฐกิจและพยากรณ์ฝ่ายวิจัยความเสี่ยงธุรกิจกลุ่มบริหารความเสี่ยง บมจ.ธนาคารกรุงไทย [1] เปิดเผยให้เห็นว่ายอดการผลิตรถยนต์จากประเทศไทยเพื่อจำหน่ายทั้งภายในและภายนอกประเทศมียอดจำหน่ายรวมสูงถึง 1.7 ล้านคัน ในปี 2553 ซึ่งประเทศไทยถือว่าเป็นฐานการผลิตรถยนต์ขนาดใหญ่แห่งหนึ่งของอาเซียน หากแต่การออกแบบรถยนต์ส่วนใหญ่กลับเป็นของวิศวกรต่างชาติ ถึงแม้ว่าจะมีความพยายามจากภาครัฐและเอกชนที่จะผลักดันให้วิศวกรหรือสถาบันภายในประเทศทำการออกแบบระบบการทำงานและชิ้นส่วนยานยนต์ แต่ก็เป็นเพียงระบบการทำงานปลีกย่อยและเป็นชิ้นส่วนที่ไม่สำคัญมากนัก สาเหตุหนึ่งมาจากความไม่พร้อมด้านอุปกรณ์และเครื่องมือทดสอบ

สำหรับการทำงานของรถยนต์ประกอบด้วยระบบหลักหลายๆ ระบบเช่น ระบบต้นกำลัง ระบบความปลอดภัย และระบบรองรับน้ำหนัก เป็นต้น ซึ่งแต่ละระบบมีความสำคัญไม่ด้อยไปกว่ากัน หากกล่าวถึงระบบความปลอดภัยของรถยนต์ ซึ่งหมายถึงการควบคุมการทรงตัวหรือการรักษาเสถียรภาพการบังคับรถให้เป็นไปตามต้องการขึ้นอยู่กับองค์ประกอบสองส่วนใหญ่ๆ คือ การกระจายตัวของน้ำหนักรถยนต์และระบบรองรับ อย่างไรก็ตามเสถียรภาพการบังคับรถนั้นมิได้ขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของน้ำหนักรถเพียงอย่างเดียว เนื่องจากสภาวะการขับขี่จริงรถยนต์ไม่ได้อยู่ภายใต้เงื่อนไขการเร่งเพื่อสร้างความเร็วเท่านั้น หากแต่ต้องมีการชะลอหรือหยุดรถยนต์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้นการพิจารณาพฤติกรรมการขับขี่ในช่วงการเบรกเป็นสิ่งที่ต้องตระหนักต่อการรักษาเสถียรภาพของรถยนต์ ซึ่งความสามารถในการเบรกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการคือ การออกแบบระบบเบรก สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นถนนและสัดส่วนแรงเบรก [2]

**รูปที่ 1** เสถียรภาพการบังคับรถยนต์
**ที่มา** (http://www.cartechhome.com2007/12/vehicle-safety-equipment-vehicle.html)

## 2. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพของรถยนต์

เสถียรภาพการบังคับรถยนต์คือ การบังคับรถยนต์ให้เป็นไปตามที่ผู้ขับขี่ต้องการ ในสภาวะการขับขี่จริง ทั้งในขณะขับขี่ทางตรง การเข้าโค้งหรือแม้กระทั่งผ่านสภาวะของถนนรูปแบบต่างๆ ซึ่งเสถียรภาพการบังคับรถยนต์และการเบรกถือได้ว่าเป็นการกระทำของรถยนต์ที่ทำหน้าที่ให้เกิดความปลอดภัยต่อการขับขี่ก่อนที่จะเกิดอุบัติเหตุ (Active safety) กระนั้นเสถียรภาพการบังคับรถยนต์อาจหมายถึงการทรงตัวของรถยนต์ได้ดีในทุกๆ สถานการณ์ การทรงตัวขณะจอดนิ่งบนพื้นระดับหรือทางชัน การทรงตัวในขณะเลี้ยวเข้าโค้ง ฯลฯ [3] องค์ประกอบหลักที่จะรักษาเสถียรภาพของรถยนต์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลักต่อไปนี้

1. จุดศูนย์กลางมวลของรถยนต์ (Centre of gravity of vehicle)

2. แรงเบรกและการกระจายแรงเบรก (Braking force and Brake force distribution)

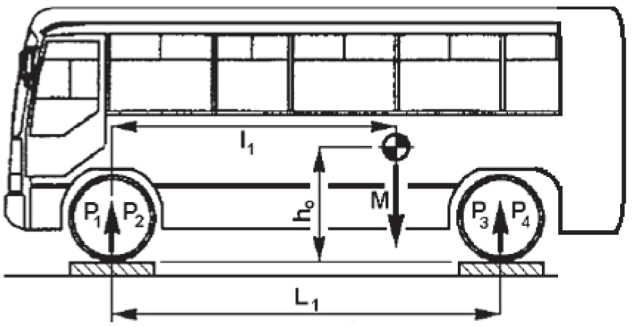
3. สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นถนน (Friction coefficient of road surface)

**2.1 จุดศูนย์กลางมวลของรถยนต์ (Centre of gravity of vehicle)**

จุดศูนย์กลางมวลเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องตระหนักถึงเนื่องจากเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการควบคุมการขับขี่โดยตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งยานยนต์ที่มีสมรรถนะสูงเพราะต้องการการทรงตัวที่ดีและในขณะที่ใช้ความเร็วสูงเพื่อความปลอดภัยความสูงของจุดศูนย์กลางมวลที่น้อยที่สุดเป็นสิ่งที่ปรารถนาสำหรับการออกแบบยานยนต์ในทุกประเภท ด้วยเหตุผลในด้านการควบคุมรถ การยึดเกาะถนน การเลี้ยว รวมไปถึงการขึ้นทางลาดชัน อย่างไรก็ตามตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลขึ้นอยู่กับขนาดของภาระการโดยสารและตำแหน่งที่ตั้งของมวลที่บรรทุก ด้วยหลักการทางวิศวกรรมยานยนต์จุดศูนย์กลางมวลสามารถแบบออกได้เป็น 3 แนวตามระบบพิกัดฉากดังนี้

**2.1.1 ตำแหน่งตามแนวยาวของจุดศูนย์กลางมวล**

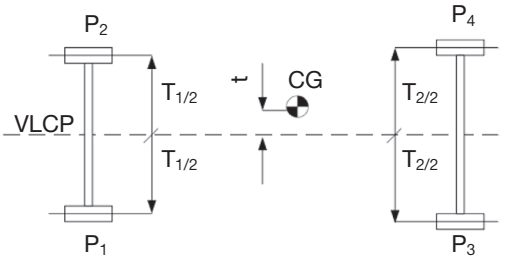
ตำแหน่งตามแนวยาวของจุดศูนย์กลางมวล เป็นตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงของรถยนต์ที่พิจารณาจากระยะฐานล้อ (Wheel base) โดยมองจากด้านข้างตำแหน่งตามยาวของจุดศูนย์ถ่วงจะอยู่ในแนวระนาบ (Horizontal) ภายใต้ระยะของฐานล้อ สำหรับตำแหน่งตามแนวยาวของจุดศูนย์กลางมวลแสดงดังรูปที่ 2




**รูปที่ 2** ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลตามแนวยาวรถ [16]

**2.1.2 ตำแหน่งตามแนวขวางของจุดศูนย์กลางมวล**

ตำแหน่งตามแนวขวางของจุดศูนย์กลางมวล เป็นตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงของรถยนต์ที่พิจารณาจากระยะของจุดศูนย์กลางล้อซ้ายถึงจุดศูนย์กลางล้อขวา (Tracking) โดยการมองรถจากด้านหน้า หรือด้านหลัง ในขณะที่ระยะของจุดศูนย์กลางล้อซ้ายถึงจุดศูนย์กลางล้อขวาของเพลาหน้า และเพลาท้ายของรถยนต์อาจมีค่าไม่เท่ากันเช่นรถบรรทุก 6 ล้อ ที่ออกแบบให้มีล้อคู่อยู่ที่เพลาท้าย โดยที่เพลาหลังจะมีค่ามากกว่า เนื่องจากเหตุผลเรื่องรัศมีการเลี้ยว (Turning radius) และการเข้าโค้ง ส่วนในกรณีรถยนต์ 4 ล้อโดยปกติจะมีค่าเท่ากัน ตำแหน่งตามแนวขวางของจุดศูนย์กลางมวลแสดงดังรูปที่ 3

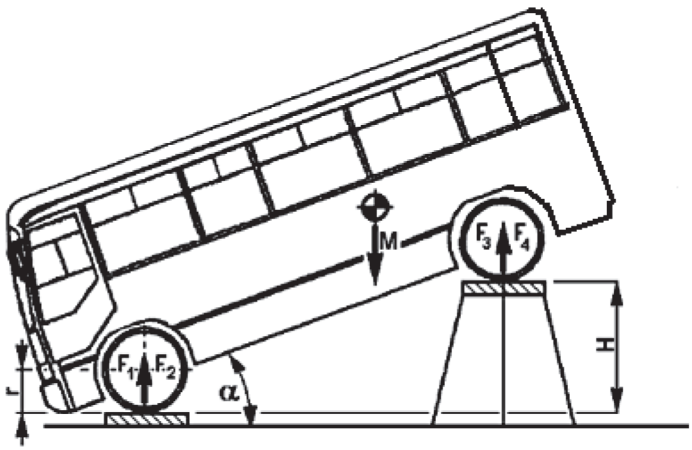



**รูปที่ 3** ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลตามแนวขวางรถ [16]

**2.1.3 ตำแหน่งตามแนวดิ่งของจุดศูนย์กลางมวล**

ตำแหน่งตามแนวดิ่งของจุดศูนย์กลางมวล เป็นตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงของรถยนต์ที่พิจารณาจากระยะที่ล้อสัมผัสกับผิวถนนซึ่งตำแหน่งตามแนวดิ่งถึง

จุดศูนย์กลางมวลนี้ เป็นตำแหน่งที่พิจารณาได้ยากที่สุด เนื่องจากต้องมาจากการทดสอบเท่านั้น การทดสอบสามารถกระทำได้ 3 วิธี คือวิธีแขวนรถ วิธียกเพลาท้ายขึ้นในแนวดิ่ง และวิธีพลิกคว่ำ อย่างไรก็ตามการทดสอบทั้ง 3 วิธีนี้ค่าที่ได้ถูกนำมาใช้เพื่อการคำนวณหาตำแหน่งตามแนวดิ่งของจุดศูนย์กลางมวล วิธีการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4

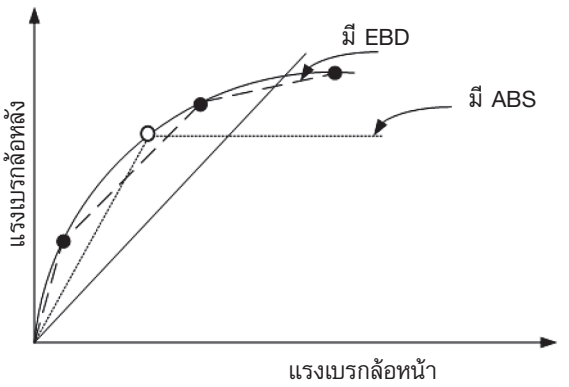



**รูปที่ 4** วิธีการหาระยะแนวดิ่งของจุดศูนย์กลางมวลแบบยกเพลาท้ายขึ้น [16]

**2.2 แรงเบรกและการกระจายแรงเบรก (Braking force and Brake force distribution)**

แรงเบรกเป็นองค์ประกอบหลักของการสร้างแรงเสียดทานที่กระทำต่อผ้าเบรกและจานเบรก ซึ่งส่งผลต่อระยะทางการเบรกและการชะลอหรือหยุดรถยนต์ ปริมาณแรงเบรกนั้นขึ้นอยู่กับพฤติกรรมของผู้ขับขี่หรือปริมาณแรงเบรกที่อยู่ในระบบไฮดรอลิก หากแรงเบรกมีปริมาณสูงเกินไปยางที่สัมผัสกับผิวของถนนนั้นจะเกิดการลื่นไถลของล้อหรือที่เรียกว่าล้อล็อก (Wheel lock-up) การลื่นไถลของล้อเกิดขึ้นได้ 2 กรณีคือ ปริมาณของแรงเบรกที่ผู้ขับขี่เหยียบเบรกมีค่ามากเกินไปและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างยางกับพื้นถนนจริงมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างยางกับพื้นถนนจากการที่ผู้ขับขี่ทำการเหยียบเบรกด้วยการลื่นไถลของล้อนี้จะส่งผลกระทบอย่างมากกับการบังคับหรือการควบคุมรถยนต์ให้ทิศทางเป็นไปตามต้องการ หากพิจารณาพฤติกรรมของรถยนต์ในขณะทำการเบรกนั้นจะเกิดการส่งถ่ายของมวลในแนวระนาบและแนวดิ่งไปที่บริเวณเพลาหน้าของรถยนต์ (Dynamic load transfer)

อย่างไรก็ตามการพิจารณาแรงเบรกที่มีความสัมพันธ์กับการส่งถ่ายมวลขณะเบรก (Dynamic load transfer) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ แรงเบรกที่ได้มาจากอุปกรณ์ในระบบเบรก เช่น กระบอกเบรก แรงดันน้ำมัน หม้อลมเบรก เป็นต้น หรือเรียกว่าแรงเบรกกระทำจริง (Actual braking force) ส่วนอีกแบบหนึ่งเป็นแรงเบรกทางทฤษฎี (Ideal braking force) ที่เป็นผลจากการประเมินทางทฤษฎีที่ได้จากปัจจัยต่างๆ เช่น สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นถนน (Friction coefficient of road surface) มวลของรถยนต์ ระยะห่างของจุดศูนย์ถ่วงในแนวดิ่งและระนาบ (Centre of gravity) เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้นแรงเบรกและการกระจายแรงเบรกถือเป็นพื้นฐานในการพัฒนาระบบเบรกให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น ระบบป้องกันการลื่นไถลของล้อ (Anti-lock brake system) และระบบการกระจายแรงเบรกด้วยอิเลคทรอนิกส์ (Electronic brake force distribution) ระบบเหล่านี้เป็นระบบที่ช่วยป้องกันการเกิดอุบัติเหตุและมีส่วนในการช่วยรักษาเสถียรภาพของรถยนต์




**รูปที่ 5** การกระจายแรงเบรกแบบมี ABS และ EBD

**2.3 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นถนน (Friction coefficient of road surface)**

การเคลื่อนที่ของรถยนต์ไปตามที่ผู้ขับขี่ต้องการนั้น เรากล่าวได้ว่าไม่สามารถเลือกไปตามถนนที่ต้องการได้เสมอไป ดังนั้นรถยนต์ที่เคลื่อนที่ไปทุกสภาพถนนในทุกพฤติกรรมการขับขี่อาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียเสถียรภาพการบังคับรถยนต์ได้ เช่น ในกรณีทำการเบรกหรือเข้าโค้งในขณะที่พื้นถนนลื่นทำให้มีโอกาสที่รถยนต์เกิดปัญหาการควบคุม ซึ่งอาจมีความรุนแรงจนเกิดการพลิกคว่ำ จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น เปิดเผยให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นถนนเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการบังคับยานยนต์ ทั้งนี้ทางผู้เขียนได้นำเสนอตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นถนนเพื่อประโยชน์ในการช่วยประเมินการขับขี่รถยนต์ดังแสดงตามตารางที่ 1 [19]

**ตารางที่ 1** ช่วงของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของพื้นถนนแบบต่างๆ [19]

| Type | Rage of Friction Coefficient | |
|---|---|---|
| | Concrete and Asphalt | Tar macadam |
| Dry | 0.76-0.85 | 0.58-0.62 |
| Wet | 0.48-0.52 | 0.38-0.42 |
| Oily | 0.35-0.40 | 0.25-0.30 |

## 3. แนวทางการทดสอบ

สำหรับแนวทางการทดสอบทางผู้เขียนได้รวบรวมวรรณกรรมของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ โดยได้นำเสนอทั้ง วิธีการทดสอบ (Methodology) ผลการทดสอบ (Results) และสรุปผล (Discussion) ของงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศ รวมไปถึงมาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับเสถียรภาพการบังคับรถยนต์ โดยสามารถแบ่งการทดสอบได้ดังต่อไปนี้คือ การทดสอบจริง (Experimental works)และการทดสอบด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

### 3.1 การทดสอบจริง (Experimental works)

การทดสอบจริง (Experimental works) เป็นการทดสอบที่สามารถสะท้อนให้เห็นถึงพฤติกรรมการควบคุมเสถียรภาพรถ หากแต่มีความจำเป็นต้องควบคุมเงื่อนไขการทดสอบให้ดี เพื่อความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ต้องการศึกษา ยิ่งไปกว่านั้นการทดสอบจริงยังถูกใช้เพื่อทดสอบการตอบสนองการทำงานของระบบหรือเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยในการควบคุมเสถียรภาพของรถยนต์อีกด้วยซึ่งการทดสอบจริงในปัจจุบันนิยมทำการทดสอบในหัวข้อต่อไปนี้

**3.1.1 การทดสอบเกี่ยวกับความเร่งด้านข้าง**

การทดสอบความเร่งด้านข้างนิยมใช้เพื่อพิจารณาเสถียรภาพรถขณะเข้าโค้ง ซึ่งเป็นตัวแปรหลักของอัตราการส่ายของรถยนต์ (Yaw rate) และการถูกรบกวนของพวงมาลัย ที่เป็นสาเหตุที่ทำให้รถยนต์มีเสถียรภาพการบังคับลดลง ตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Riener และคณะ [4] ที่ศึกษาปัจจัยความเป็นปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวผู้ขับกับรถ และรถกับถนน ในกรณีที่รถขับเข้าโค้ง ซึ่งพวงมาลัยถูกรบกวนจากความเร่งด้านข้าง (Lateral acceleration) ซึ่งขึ้นกับอัตราส่วนการหมุนพวงมาลัยและความเร็วของรถขณะเข้าโค้ง การทดสอบกระทำโดยชดเชยแรงด้านข้างของรถ โดยอาศัยร่างกายของตัวผู้ขับขี่ ที่ใช้การประเมินผลจากค่าความดันจากแผงวัดความดัน 2 แผง ที่รับความดันจากการเปลี่ยนแปลงท่าทางของผู้ขับขี่ โดยแต่ละแผงมีเซนเซอร์วัดความดันจำนวน 32 ตัว ติดตั้งบริเวณที่นั่งและติดตั้งบริเวณพนักพิงจำนวน 32 ตัว เพื่อจำแนกคุณลักษณะตามสถานการณ์การขับขี่ผ่านโค้ง ผลการทดสอบพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นจะมีการชดเชยความเร่งด้านข้าง กรณีนี้สามารถทำให้รถเพิ่มความเร็วและเพิ่มความแม่นยำของพวงมาลัย อีกทั้งสามารถลดการดื้อโค้ง (Understeer) และไวโค้ง (Oversteer) ของรถได้

ส่วนงานวิจัยของ Anwar [5] ศึกษาถึงปัจจัยการรักษาเสถียรภาพการควบคุมรถยนต์ที่เป็นแบบผสมผสาน (Hybrid) กับรถยนต์ที่ติดตั้งระบบเบรกแบบไฟฟ้า (Brake-by-wire)การทดสอบใช้วิธีการประเมินผลการหมุนของมุมพวงมาลัย (Generalized Predictive Control) หรือ (GPC) เพื่อใช้ในการควบคุมอัตราการส่ายของรถยนต์ (Yaw rate) ในสภาวะที่รถเกิดการดื้อโค้ง (Understeer) และสภาวะที่รถมีความไวโค้ง (Oversteer) โดยผลการวิจัยสรุปได้ว่าวิธี (GPC) สามารถนำมาใช้ประเมินเสถียรภาพของรถยนต์ขณะเข้าโค้งจากผลของการลื่นไถลของล้อ

**3.1.2 การทดสอบเกี่ยวกับการโคลงของรถยนต์**

การทดสอบการโคลงของรถยนต์ เป็นการทดสอบที่น่าสนใจอีกประการหนึ่ง อันเป็นผลจากการออกแบบระบบรองรับน้ำหนัก (Suspension) โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนที่อยู่เหนือระบบรองรับ (Sprung mass) ที่ส่งผลให้รถเกิดการพลิกคว่ำในขณะเข้าโค้ง ซึ่งการทดสอบการโคลงของรถยนต์นิยมพิจารณาถึงโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) อันเป็นผลจากแรงกระทำด้านข้าง (Lateral Force) ของรถยนต์ขณะเลี้ยวหรือขณะเข้าโค้ง ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Svenson และ Hac [6] ได้ศึกษาผลของการโคลงของตัวรถที่มากเกินไปโดยทดสอบกับรถบรรทุกขนาดเล็ก 4 ล้อ ขับเคลื่อน 2 ล้อหลัง ดังแสดงตามรูปที่ 6 โดยเปรียบเทียบกับการทดสอบที่ติดตั้งระบบควบคุมเสถียรภาพรถด้วยอิเลคทรอนิกส์ (Electronic Stability Control) หรือ (ESC) และระบบควบคุมมุมเลี้ยว 4 ล้อ (Active Rear Steer) หรือ (ARS) สรุปว่ารถยนต์ทดสอบที่ติดตั้งระบบ (ESC) สามารถลดการโคลงของตัวรถ ส่วนระบบ (ARS) มีผลต่อประสิทธิภาพการบังคับเลี้ยวในขณะความเร็วสูงที่ทำให้การตอบสนองของมุมพวงมาลัยทันต่อความเร็วรถ และช่วยลดภาระการหมุนพวงมาลัยในขณะความเร็วต่ำของผู้ขับขี่ ซึ่งทั้งสองระบบนี้จะช่วยให้การขับขี่ปลอดภัยมากขึ้น

**รูปที่ 6** รถยนต์ Chevrolet Silverado ที่ใช้ทดสอบภาคสนาม [6]

งานวิจัยของ Miège และ Cebon [7] ศึกษาถึงความได้เปรียบของระบบการควบคุมการพลิกคว่ำแบบเชิงรุก (Active roll control) ของรถขนาดใหญ่ วิธีการทดสอบกระทำโดยการพัฒนาจากต้นแบบระนาบพลิกคว่ำอย่างง่ายหรือแบบพลิกคว่ำ 2 มิติ ด้วยการเชื่อมต่อเข้ากับระบบรองรับที่ถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ให้สามารถเก็บข้อมูลป้อนกลับ (Feedback control) ของค่าความเร่งด้านข้าง ซึ่งระบบการควบคุมการพลิกคว่ำแบบเชิงรุก (Active roll control) นี้สามารถทดสอบกับรถยนต์ได้ทั้งสภาวะอยู่ตัว (Steady state) และสภาวะไม่อยู่ตัว (Transient) โดยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบถูกใช้วิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ เพื่อนำไปพัฒนาการออกแบบระบบควบคุม เช่น การควบคุมมุมโคลง (Roll angle) ด้วยการชดเชยแรงกดและความหน่วงของระบบรองรับในแนวดิ่ง

### 3.1.3 การทดสอบเกี่ยวกับแรงเบรกของรถยนต์

แรงเบรกของรถยนต์ เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญต่อการควบคุมรถยนต์ ทั้งกรณีการขับขี่ทางตรง และการขับขี่ขณะเข้าโค้ง เนื่องจากปัจจัยด้านเวลาการตอบสนอง ปริมาณแรงเบรก สัดส่วนการกระจายแรงเบรก และอัตราหน่วง อย่างไรก็ตามการทดสอบเกี่ยวกับแรงเบรกของรถยนต์ถือเป็นพื้นฐานในการพัฒนาระบบเบรกให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น เช่น ระบบป้องกันการลื่นไถลของล้อ (ABS) และระบบการกระจายแรงเบรกด้วยอิเลคทรอนิกส์ (EBD) ระบบเหล่านี้เป็นระบบที่ช่วยป้องกันการเกิดอุบัติเหตุและมีส่วนในการรักษาเสถียรภาพของรถยนต์ ซึ่งผู้เขียนได้แสดงถึงแนวทางการทดสอบระบบเบรกรถยนต์ตามมาตรฐานของกรมการขนส่งทางบกประเทศไทย [8] คือ ระบบเบรกจะต้องตอบสนองภายในเวลา 5 วินาที หลังจากทำการเหยียบเบรก ปริมาณแรงเบรกทั้งหมดจะต้องมีค่ามากกว่าร้อยละ 50 ของน้ำหนักลงเพลารวม (Gross Vehicle Weight Rating) หรือ (GVWR) ของรถยนต์ทั่วไป ส่วนในกรณีรถบัสและรถบรรทุก ปริมาณแรงเบรกรวมทุกเพลาต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ของน้ำหนักลงเพลา โดยทดสอบบนเครื่องทดสอบแบบลูกกลิ้ง (Roller brake tester) และมาตรฐานของ Federal Motor Carrier Safety Administration (FMCSA) [9] ของประเทศสหรัฐอเมริกา ตามตารางที่ 2 โดยทั้ง 2 มาตรฐานมีความแตกต่างกันคือ มาตรฐาน (FMCSA) จะไม่พิจารณาถึงเวลาการตอบสนองระบบ และค่าของปริมาณแรงเบรกที่สูงกว่ามาตรฐานของประเทศไทย ยกเว้นในกรณีเดียว คือ รถยนต์ประเภทนั่งแบบมีภาระการบรรทุก ปริมาณแรงเบรกในแต่ละเพลาที่ต้องการมีค่าเพียงร้อยละ 43.5 เท่านั้น

**ตารางที่ 2** รายละเอียดการทดสอบสมรรถนะการเบรกของรถยนต์ตามมาตรฐาน FMCSA [9]

| Type of motor vehicle | Service brake systems | | |
|---|---|---|---|
| | **Braking force as a percentage of gross vehicle or combination weight [%]** | **Deceleration in [$m/s^2$]** | **Application and braking distance in meter from initial speed at 32.16 km/hr** |
| **A. Passenger-carrying vehicles:** (1) Vehicles with a seating capacity of 10 persons or less, including driver and built on a passenger car chassis | 65.2 | 6.4 | 6.09 |
| (2) Vehicles with a seating capacity of more than 10 persons, including driver and built on a passenger car chassis ; vehicles built on a truck or bus chassis and having a manufacturer's GVWR of 10,000 pounds or less | 52.8 | 5.181 | 7.62 |
| (3) All other passenger-carrying vehicles | 43.5 | 4.267 | 10.67 |
| **B. Property-carrying vehicles:** (1) Single unit vehicles having a manufacturer's GVWR of 10,000 pounds or less. | 52.8 | 5.181 | 7.62 |
| (2) Single unit vehicles having a manufacturer's GVWR of more than 10,000 pounds, except truck tractors | 52.8 | 5.181 | 7.62 |

**3.1.4 การทดสอบเกี่ยวกับจุดศูนย์กลางมวลของรถยนต์**

การทดสอบจุดศูนย์กลางมวลของรถยนต์มีความแตกต่างกับการทดสอบทั้ง 3 กรณีที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องจากการทดสอบจุดศูนย์กลางมวลนี้ทั้ง 3 แนวพิกัดฉาก (แนวดิ่ง แนวขวาง และแนวยาว) เป็นการทดสอบหาพิกัดตำแหน่ง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการดัดแปลงหรือแก้ไขรถยนต์ให้สอดคล้องกับการใช้งาน เช่น การต่อเติมตู้บรรจุภัณฑ์ และการเสริมโครงหลังคาเพื่อเพิ่มการบรรทุก เป็นต้น การหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลทั้ง 3 แนวพิกัดฉากนี้สามารถหาได้จากการคำนวณโดยต้องทราบถึงน้ำหนักลงเพลา (Axle load) ระยะฐานล้อ (Wheel base) ระยะห่างระหว่างล้อซ้าย-ขวา (Tracking) และมุมยกของรถ (Lift angle) อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีเครื่องมือที่สามารถหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลได้ทั้ง 3 แนวพิกัดฉาก ที่เรียกว่าเครื่องระนาบพลิกคว่ำ 2 มิติ ที่ใช้ต้นกำลังเป็นระบบไฮดรอลิกในการพลิกระนาบ ดังตัวอย่างการทดสอบจริงตามรูปที่ 7

**รูปที่ 7** ตัวอย่างการทดสอบจริงของจุดศูนย์กลางมวลแบบระนาบพลิกคว่ำ 2 มิติ
**ที่มา** (http://www.kdc.nsw.edu.autechno__centre__of__gravity.html)

**3.2 การทดสอบด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)**

การทดสอบด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามามีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมเสถียรภาพของรถ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการทดสอบจริง อีกทั้งยังสามารถทดสอบได้เหมือนกับการทดสอบจริง โดยการทดสอบด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีความจำเป็นต้องทราบถึงกายภาพของรถยนต์ในสภาวะต่างๆ ที่ต้องการศึกษา เพื่อเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ อย่างไรก็ตามหลังจากการจำลองทางคณิตศาสตร์เสร็จสิ้นแล้วจะถูกนำมาเปรียบเทียบผลกับการทดสอบจริงเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อน เมื่อค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้แล้วนั้น ก็จะสามารถนำสมการคณิตศาสตร์นั้นมาใช้โดยไม่ต้องทำการทดสอบจริง การจำลองทางคณิตศาสตร์ยังเป็นพื้นฐานในการพัฒนาการวิเคราะห์ผลการควบคุมเสถียรภาพด้วยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปอีกด้วย

**3.2.1 งานวิจัยที่ใช้การทดสอบด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์**

Momiyama และคณะ [10] ได้ทำการพัฒนาระบบควบคุมต้นแบบโดยมีจุดประสงค์ที่จะทำการชดเชยสภาวะวิกฤติด้วยการควบคุมแรงเบรก โดยการสร้างฟังก์ชันเคลื่อนย้าย (Transfer function) เพื่อแก้ไขปัจจัยควบคุมให้กับระบบชดเชยการพลิกคว่ำของรถยนต์ โดยการวิเคราะห์อินพุทในระบบเพื่อนำมาวิเคราะห์โมเดลคณิตศาสตร์ (Auto-Regressive moving average with exogenous input-model) หรือ (ARX-model) เพื่อเปรียบเทียบกับการทดสอบจริง ซึ่งการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก

งานวิจัยของ Solmaz และคณะ [11] ได้สร้างแบบจำลองเพื่อประมาณตำแหน่งของจุดศูนย์มวลเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการช่วยออกแบบยานยนต์ในระบบควบคุมและระบบต้านทานการพลิกคว่ำ โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ประกอบไปด้วยสมการคณิตศาสตร์แบบเชิงเส้นนอกจากนี้ยังมีการพัฒนาวิธีการตรวจจับตำแหน่งที่การเข้าใกล้การพลิกคว่ำ โดย Hac และคณะ [12] ทำการพัฒนากระบวนการตรวจจับตำแหน่งการพลิกคว่ำที่อาศัยการเชื่อมต่อระหว่างตัวถัง เพื่อป้องกันการพลิกคว่ำ กระบวนการนี้ใช้วิธีปรับค่าแบบทวนซ้ำเพื่อประมาณการพลิกคว่ำ จากองศาการพลิกคว่ำและปัจจัยอื่นๆ ที่อาจจะทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างยานยนต์

อีกทั้ง Yim และคณะ [13] ได้ทดสอบระบบป้องกันการพลิกคว่ำ ด้วยการเปรียบเทียบจากผลการจำลองระบบควบคุมตัวถังทั้ง 2 ระบบ คือ ระบบควบรวมการควบคุมตัวถัง (Unified chassis control system) ที่ประกอบด้วยการติดตั้งชุดควบคุมเสถียรภาพ (ESC) ชุดเบรกแปรผัน (Differential braking) ชุดควบคุมความเร็ว (Longitudinal speed control) และชุดควบคุมความหน่วงแบบต่อเนื่อง (Continuous damping control) ส่วนระบบที่ 2 เป็นระบบป้องกันการโคลง (Active anti-roll bar combined) ที่ติดตั้งเฉพาะชุดควบคุมเสถียรภาพและชุดเบรกแปรผันเท่านั้น ซึ่งการประเมินใช้การเปรียบเทียบค่าความเร่งด้านข้าง (Lateral acceleration) มุมโคลง (Roll angle) และค่าดัชนีการพลิกคว่ำ (Rollover index) ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าทั้ง 2 ระบบ มีความน่าเชื่อถือเป็นที่ยอมรับได้ หากแต่ระบบทั้งสองยังมีข้อจำกัดในส่วนของการทำงานร่วมกัน

ส่วนงานวิจัยของ Hegazy และคณะ [14] การทำการศึกษาโมเดลที่มี 94 Degree of freedom โดยจำลองการเปลี่ยนเลน, เปลี่ยนเลนทีละสองเลน และการเคลื่อนหลบหลีกสิ่งกีดขวางโดยปราศจากการเบรก ที่สนใจผลของแรงในแนวดิ่งที่ทำกับยางรถยนต์ ความเร่งในแนวระนาบ มุมโคลง และอื่นๆ นอกจากนี้ Watanabe และคณะ [15] ได้ศึกษาเสถียรภาพการบังคับรถและสมรรถนะความเสถียรของรถตีนตะขาบ ที่เปรียบเทียบกันระว่างโมเดลทางคณิตศาสตร์กับการทดสอบจริง พบว่าโมเดลทางคณิตศาสตร์มีความแม่นยำค่อนข้างสูงซึ่งพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ของความเร็วกับรัศมีการเลี้ยว (Turning radius) และ มุมลื่นไถลของล้อ (Side slip angle) ที่ต่างก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

ส่วนกรณีของ Allen และคณะ [16] ได้ทำการประมาณค่าคุณสมบัติความเฉื่อย และปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพและการควบคุมยานยนต์ที่พิจารณาการพลิกคว่ำเป็นหลัก โดยอาศัยหลักการของสมการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น $\{I_{x,\,y,\,z} = 10^{k1} * L^{k2} * T_w^{k3} * H_r^{k4} * W_t^{k5}\}$ ในการประมาณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยทั้ง 3 แกน ($I_{x,\,y,\,z}$) จากค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ($k_{1,\,2,\,3,\,4,\,5}$) สรุปว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเสถียรภาพ ได้แก่ ความสูงของจุดศูนย์ถ่วงในแนวดิ่ง ($CG_h$), น้ำหนักรวมของรถ ($W_t$), ความกว้างช่วงล้อเฉลี่ย ($T_w$), ความยาวรถ (L) และความสูงของหลังคารถ ($H_r$)

### 3.2.2 งานวิจัยที่ใช้การทดสอบด้วยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

งานวิจัยของ Chen และคณะ [17] ได้ทำการพัฒนาขั้นตอนการควบคุมการต่อต้านการพลิกคว่ำ โดยอาศัยหลักการจับเวลาและสร้างแบบจำลองอย่างง่ายขึ้น จากนั้นทำการจำลองโดยใช้ซอฟแวร์ TruckSim dynamic simulation ทดสอบกับรถ Jeep Cherokee และทำการประเมินสมรรถนะในการต่อต้านการพลิกคว่ำ ส่วนงานวิจัยของ Michael และ Han [18] ใช้โมเดลที่มี 18 Degree of freedom ซึ่งเพียงพอเป็นที่ยอมรับทางวิศวกรรม โดยเปรียบกับโมเดลรถบนโปรแกรมจำลองหลายวัตถุ (multi-body) ที่เน้นการศึกษาการเบรกและเสถียรภาพการบังคับรถผลในการเปรียบเทียบกับการทดลองจริงให้ค่าใกล้เคียงกันสูงมาก

## 4. ข้อเสนอแนะ

แนวทางการวิเคราะห์ผลของการควบคุมเสถียรภาพของรถที่แตกต่างกัน ทั้งในกรณีการทดสอบจริงการทดสอบจริงทั้ง 4 กรณีและการจำลองทางคณิตศาสตร์ ผู้เขียนมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการทดสอบดังนี้คือ

- หากต้องการวิเคราะห์ผลของการออกแบบช่วงล่างหรือระบบรองรับควรใช้วิธีการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับการโคลงของรถยนต์

- การวิเคราะห์ผลของการส่ายของรถและตำแหน่งมุมพวงมาลัย ควรใช้การทดสอบที่เกี่ยวกับความเร่งด้านข้างของรถยนต์
- กรณีการวิเคราะห์การลื่นไถลของล้อควรใช้การทดสอบที่เกี่ยวกับความเร่งด้านข้าง และแรงเบรกของรถยนต์
- การทดสอบด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์และการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการทดสอบจริง หากแต่ควรพิจารณาความถูกต้องของสมการ การระบุเงื่อนไขการทดสอบ และควรเปรียบเทียบกับการทดสอบจริง

## 5. สรุป

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการควบคุมรถยนต์ให้มีเสถียรภาพได้แก่ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล แรงเบรกและการกระจายแรงเบรก รวมไปถึงสภาพของพื้นผิวถนน ซึ่งเสถียรภาพการบังคับรถยนต์มีการทดสอบจริงส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การทดสอบความเร่งด้านข้าง การโคลงแรงเบรกและตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของรถยนต์ โดยการทดสอบจริงนี้มีเงื่อนไขการทดสอบที่พิจารณาถึงการขับขี่ขณะเข้าโค้ง และความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ ยกเว้นกรณีการทดสอบตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล เท่านั้น ที่ไม่มีการทดสอบจากการเคลื่อนที่ของรถยนต์ ส่วนกรณีการทดสอบด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์ และการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการทดสอบจริง และสามารถจำลองสภาวะการขับขี่รูปแบบต่างได้การใช้การทดสอบด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมสำเร็จรูปนี้ ควรเปรียบเทียบกับการทดสอบจริง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบ ซึ่งการทดสอบจริง และการจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้เป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาเทคโนโลยีที่สามารถตอบสนองการขับขี่อย่างปลอดภัย

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบทความวิจัยและบทความวิชาการที่ได้ใช้อ้างอิงในครั้งนี้ อีกทั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร สำหรับทุนสนับสนุนการศึกษาค้นคว้า

## 7. เอกสารอ้างอิง

1. Department of Economic Highlights of Krung Thai Bank,2011, “Thailand automotive industries to the new record”, *Journal of Business Research*, Vol.14, No. 22.(In Thai)

2. Chutima, S., Kamnerdtong, T. and Siriwattanapolkul, A., 2007, “Effect of automotive speed on the behaviors of brake disc during braking” , *KMUTT Research & Development Journal*, Vol.30, No. 2. (In Thai)

3. Suwanprateep, T.,2003, Automotive Engineering, Witthayaphat Co.,Ltd., Bangkok, pp. 151-176.

4. Riener, A., Ferscha, A. and Matscheko, M., 2008, “Intelligent vehicle handling: Steering and body posture while cornering”, *Proceedings of the International Conference on Architecture of Computer System 2008 Architecture and Adaptivity*, ARCS. Vol. 4934 pp. 14.

5. Anwar, S., 2005, “Generalized Predictive Control of yaw dynamics of a hybrid brake-by-wire equipped vehicle”, *Journal of Mechatronics*, Vol. 15, No. 9 pp. 1089-1108.

6. Svenson, L., and Hac, A. 2005, “Influence of Chassis Control Systems on Vehicle Handling and Rollover Stability”, *Proceedings on the enhanced safety of vehicles*, NHTSA.Paper No. 05-0324.

7. Miège, A.J.P., and Cebon, D., 2005, “Active roll control of an experimental articulated vehicle”, *Journal of Automotive Engineering*, Vol. 219, No. 6 pp. 791-806.

8. Department of land Transport, 2005, “The criteria and method of experiment for service brake and parking brake”, *Department of land Transport*, Issues 9th December 2005, Thailand, pp.1-3. (In Thai)

9. Federal Motor Carrier Safety Administration, 2002, “Rules and Regulations for brake perfor-

mance", *U.S. Department of land Transport*, United State of America, Past 393.52.

10. Momiyama, F., Kitazawa, K., Miyazaki, K., Soma, H., and Takahashi, T., 1999, "The gravity center height estimation for the rollover compensation system of commercial vehicles", *Journal of JSAE Review*, Vol. 20, No. 4 pp. 493-497.

11. Solmaz,S., Akar, M., Shorten, R., and Kalkkuhl, J., 2008, "Real-time multiple-model estimation of centre of gravity position in automotive vehicles", *Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, Vol. 46, No. 9 pp.763-788.

12. Hac,A., Brown, T., and Martens, J., 2004, "Detection of vehicles rollover", *SAE Technical Paper*2004-01-1757, DOI: 10.4271/2004-01-1757.

13. Yim, S-J.,Yoon, J-Y., Cho, W-K., and Yi, K-S., 2011, "An Investigation on Rollover Prevention Systems: Unified Chassis Control versus Electronic Stability Control with Active Anti-Roll Bar", *Journal of Automotive Engineering*, Vol. 225, No. 1 pp. 1-14.

14. Hegazy, S., Rahnejat, H., and Hussain, K., 2000, "Multi-body in full-vehicle handling analysis under Transient Manoeuvre", *Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, Vol. 34, No.1 pp. 1-24.

15. Watanabe, K., Kitano, M., and Fugishima, A., 1995, "Handling and Stability performance of four-track steering vehicles", *Journal of Terramechanics*, Vol. 32, No. 6 pp. 285-302.

16. Allen, R.W., Klyde, D.H., Rosenthal, T.J., and Smith, D.M., 2003, "Estimation of Passenger Vehicle Inertial Properties and Their Effect on Stability and Handling", *Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, Vol. 112, SAE Paper No. 2003-01-0966.

17. Chen, B-C., and Peng, H., 2001, "Differential-Braking-based Rollover Prevention for Sport Utility Vehicles with Human-in-the-loop Evaluation", *Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, Vol. 36, No.4-5 pp. 359-389.

18. Michael, W.S., and Han, D.S., 1996, "A Generic Multibody Vehicle Model for Simulating Handling and Braking", *Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, Vol. 25, No.1 pp. 599-613.

19. Hamm, G., and Burk, G., 1992, "*Tables for the Automotive Trade*", New Age International P. Ltd., ISBN: 9780852263501.