

ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้พร้อมการควบคุมแรงกระตุ้นสำหรับหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

An Adaptive Control with Traction Force Control for A Two-wheel Mobile Robot



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้พร้อมการควบคุมแรงอุตสาหกรรม
	สำหรับหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อ
โดย	นายไมไท ตะห์ลัน
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.กฤษณ์นัท มะลิตอง)	

ไมไท ดะห์ลัน : ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้พร้อมการควบคุมแรงฉุดลากสำหรับ  
หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อ. ( An Adaptive Control with Traction Force Control  
for A Two-wheel Mobile Robot) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สองล้อเพื่อให้การลื่นไถลที่ล้อยให้น้อยที่สุดถือเป็นการเพิ่มความปลอดภัยให้กับหุ่นยนต์ที่ทำงานอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคน ปกติแล้วการควบคุมแรงฉุดลากนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการประมาณค่าพารามิเตอร์ทางพลศาสตร์ของการเคลื่อนที่เช่น ค่าความเฉื่อยและแรงเสียดทาน รวมถึงการประมาณค่าสัดส่วนของการลื่นไถลที่ล้อยกับพื้น ซึ่งมักจะต้องการคำนวณที่มีความสลับซับซ้อน ในงานวิจัยนี้เราจะใช้ตัวควบคุมแรงฉุดลากที่ปรับตัวได้หรือ Model following control (MFC) โดยจะแปลงในอยู่ในรูปของเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete time model) การทดลองจะใช้หุ่นยนต์แบบสองล้อที่ควบคุมแรงฉุดลากแบบจำลองการไถล เทียบกับการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดี ตามเส้นวิถีการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง รวมถึงการทดสอบการประมาณค่าแรงฉุดลากสูงสุดของหุ่นยนต์ และทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ขึ้นและลงบนทางลาดชัน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6070286321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD: Mobile robot, Robot, Control system, Traction control, Slip control,  
Slip prevention

Maitai Dahlan : An Adaptive Control with Traction Force Control for A  
Two-wheel Mobile Robot. Advisor: Prof. VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D.

Traction controls usually need dynamic parameters as an approximated reference in the model such as inertia, friction, and slip ratio estimator which normally require a heavily computational estimator. In this work, a simple traction control system of a two-wheel driven mobile robot to reduce wheel slippage is purposed. The high traction control force can be maintained. The controller will be composed of position and velocity feedback with the Model Following Adaptive control. The Model Following Adaptive control is added to reduce wheel slippage so that the traction control force can be maintained at a high value. The traction force will depend on the type of road surface as well as the wheel material. Both computer simulations and experiments are performed to assure the high traction control force. The discrete-time traction controller is obtained. The experiments will cover the comparison of the lateral slip control, on straight-line paths, based on typical PD control with our traction controller, and feedforward compensator with our traction control. The estimation of the maximum traction force can be obtained as well. The performance of the traction control also demonstrated on slope surfaces or incline roads.

Field of Study: Mechanical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิทยานิพนธ์เรื่อง "ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้พร้อมการควบคุมแรงฉุดลากสำหรับหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อ" สำเร็จลุล่วงลงได้เป็นอย่างดี โดยได้รับคำแนะนำ และสนับสนุนเป็นอย่างดีจาก ศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ให้คำชี้แนะ ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์มาโดยตลอด ขอขอบคุณคณาจารย์ทุก ๆ ท่านที่ให้ความรู้ ตลอดจนรุ่นพี่ เพื่อน ๆ และรุ่นน้อง ทั้งที่เป็นกำลังกาย และกำลังใจให้เสมอมา สำคัญที่สุดด้วยบุญคุณของบิดา มารดา และผู้อุปการคุณทุกท่านที่เกื้อหนุนจนเจือ

ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นแนวทางในการศึกษาเพื่อพัฒนาระบบควบคุมของหุ่นยนต์แก่ผู้ที่สนใจอันจะนำมาซึ่งประโยชน์และคุณค่าต่อสังคม และต่อโลกอนาคต

ไม้เต ณะห์ลัน



## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรม.....	3
2.1 ระบบควบคุมแรงฉุดลากที่ไม่ได้ใช้ค่าอัตราการไถล.....	3
2.2 ระบบควบคุมแรงฉุดลากที่ใช้อัตราการไถล.....	4
2.3 ระบบควบคุมแรงฉุดลากรูปแบบอื่น ๆ.....	6
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องและการจำลองเบื้องต้น.....	8
3.1 แบบจำลองแรงเสียดทาน.....	8
3.1.1 แรงเสียดทานคูลอมบ์ (Coulomb friction).....	8

3.1.2 แรงเสียดทานสถิต (Static friction).....	9
3.1.3 แรงเสียดทานหนืด (Viscous Friction).....	9
3.1.4 LuGre โมเดล.....	10
3.2 การไถลและอัตราการลื่นไถล.....	11
3.3 การแปลงแซด (Z-transform).....	16
3.3.1 วิธีการประมาณจากสมการออยเลอร์.....	16
3.3.2 การหาปริพันธ์เชิงตัวเลข (Numerical integration).....	17
3.3.2.1 กฎสี่เหลี่ยมไปข้างหน้า (Forward rectangular rule).....	18
3.3.2.2 กฎสี่เหลี่ยมย้อนหลัง (Backward rectangular rule).....	18
3.3.2.3 กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule).....	18
บทที่ 4 หุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่ได้สองล้อและระบบควบคุม.....	19
4.1 ส่วนประกอบของหุ่นยนต์.....	19
4.2 การออกแบบระบบควบคุมเบื้องต้น.....	19
4.3 การออกแบบระบบควบคุมแรงฉุดลากเบื้องต้น.....	20
4.4 การออกแบบระบบการชดเชยแบบมีวิถีไปหน้า.....	22
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	23
5.1 การจำลอง Simple traction control.....	23
5.2 การทดสอบ Simple traction control.....	25
5.3 การทดสอบการชดเชยแบบมีวิถีไปหน้า (Feedforward compensator with traction control).....	28
5.4 การประมาณค่าแรงฉุดลากสูงสุดของหุ่นยนต์.....	29
5.5 การเคลื่อนที่บนทางลาดชัน.....	31
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	32
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	32



6.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในอนาคต.....	32
บรรณานุกรม.....	34
ประวัติผู้เขียน.....	38



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการไหล .....	12



## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแรงจุดลาก Model following control [12] .....	3
รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการไหลแบบ Maximum Transmissible Torque Estimation [13].....	4
รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการไหลแบบ Optimal slip ratio controller [12] .....	5
รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่ใช้ในงานวิจัย [14].....	5
รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการไหลที่ใช้ในงานวิจัย [5].....	6
รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการไหลที่ใช้ในงานวิจัย [15].....	6
รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการไหลที่ใช้ในงานวิจัย [16].....	7
รูปที่ 8 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการไหลที่ใช้ในงานวิจัย [17].....	7
รูปที่ 9 ลักษณะของแรงเสียดทานคูลอมบ์ .....	8
รูปที่ 10 ลักษณะของแรงเสียดทานคูลอมบ์และแรงเสียดทานสถิต .....	9
รูปที่ 11 ลักษณะของแรงเสียดทานคูลอมบ์ แรงเสียดทานสถิต และแรงเสียดทานหนืด.....	10
รูปที่ 12 ลักษณะของแรงเสียดทานจาก LuGre โมเดล .....	11
รูปที่ 13 แผนภาพอิสระของระบบพื้น-ล้อ (wheel-road system).....	12
รูปที่ 14 โปรแกรมจำลองการไหลบน MATLAB Simulink.....	13
รูปที่ 15 กราฟโปรไฟล์ความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมู .....	14
รูปที่ 16 กราฟอัตราการไหลและค่าความคลาดเคลื่อน .....	15
รูปที่ 17 ภาพแสดงการประมาณค่าพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งแบบต่าง ๆ .....	17
รูปที่ 18 หุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่ได้สองล้อ.....	19
รูปที่ 19 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม PD.....	20
รูปที่ 20 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแรงจุดลาก Model following control .....	21

รูปที่ 21	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแรงฉุดลากที่มีการชดเชยแบบมีวิถีไปหน้า.....	22
รูปที่ 22	กราฟตำแหน่ง, ความเร็ว, และความเร่งของระบบควบคุมแบบ PD และ Simple traction controller.....	23
รูปที่ 23	กราฟอัตราการไถลและค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของ ระบบควบคุมแบบ PD และ Simple traction controller.....	24
รูปที่ 24	กราฟขยายใหญ่ของอัตราการไถลของ Simple traction controller .....	24
รูปที่ 25	กราฟตำแหน่ง, ความเร็ว, และความเร่งของระบบควบคุมแบบ PD.....	25
รูปที่ 26	กราฟตำแหน่ง, ความเร็ว, และความเร่งของระบบควบคุม Simple traction control.....	26
รูปที่ 27	ภาพหุ่นยนต์ขณะเคลื่อนที่ด้วยระบบควบคุมแบบ PD (บน) และ Simple traction control (ล่าง) .....	26
รูปที่ 28	กราฟทิศทางการหันหน้าของระบบควบคุมแบบ PD (บน) และ Simple traction control (ล่าง) .....	27
รูปที่ 29	กราฟค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของระบบควบคุมที่มี การชดเชยแบบมีวิถีไปหน้า และไม่มีชดเชยแบบมีวิถีไปหน้า.....	28
รูปที่ 30	กราฟโปรไฟล์วิถีความเร่งแบบแรมี่ .....	29
รูปที่ 31	กราฟผลการทดลองหาแรงฉุดลากสูงสุด .....	30
รูปที่ 32	หุ่นยนต์ขณะเคลื่อนที่ขึ้น (ซ้าย) และลง (ขวา) ทางชันประมาณ 9° .....	31
รูปที่ 33	หุ่นยนต์ขณะเคลื่อนที่ลงทางชัน (มุมมองด้านข้าง).....	31

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ในปัจจุบัน หุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่ได้ (Mobile robot) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งในอุตสาหกรรมและครัวเรือน ตัวอย่างเช่น หุ่นยนต์ดูดฝุ่น หุ่นยนต์โกดังสินค้า หุ่นฮิวมานอยด์ เป็นต้น

จากการสืบค้นพบว่า ระบบที่นิยมใช้ในหุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่ได้ มีเพียงการควบคุมแบบจลนศาสตร์ (Kinematic control) [1, 2] และระบบนำทาง ในขณะที่ รถยนต์พลังงานไฟฟ้าและรถเข็นนั่งไฟฟ้าที่มีรูปแบบการเคลื่อนที่คล้ายคลึงกัน มีการนำอัลกอริทึมในการควบคุมการขับเคลื่อนแบบพลวัตขั้นสูง (Advanced dynamic driving control algorithms) เข้ามาใช้ [3, 4] โดยการควบคุมการขับเคลื่อนขั้นสูงสำหรับรถยนต์พลังงานไฟฟ้ามีทั้งระบบป้องกันการลื่นไถล (Traction control) [5, 6] ระบบควบคุมการเลี้ยว (Steering control) [7, 8] และระบบการประมาณค่าสภาพการขับขี่ (Driving state estimations) [9, 10]

แม้ว่าหุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่ได้จะไม่ได้รับประโยชน์จากอัลกอริทึมการควบคุมขั้นสูงเหล่านี้มากนัก แต่หากหุ่นยนต์ถูกใช้งานในลักษณะงานที่มีสภาพแวดล้อมต่างจากปกติ อาทิเช่น วิ่งบนน้ำแข็ง [11], วิ่งบนทางชัน, หรือวิ่งด้วยความเร็วที่สูงกว่าปกติ อัลกอริทึมการควบคุมขั้นสูงเหล่านี้ก็จะมีความจำเป็นขึ้นมาทันที

ระบบดูแลผู้สูงอายุมีแนวโน้มของความต้องการสูงขึ้นเรื่อย ๆ ประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศที่มีแนวโน้มเข้าสู่สังคมสูงวัยในอีกไม่นาน การดูแลสุขภาพของผู้สูงอายุและผู้ป่วยติดเตียงจำเป็นต้องมีความละเอียดอ่อนมาก มีความหลากหลายโดยเฉพาะผู้สูงอายุที่มีโรคประจำตัว เช่น โรคหลอดเลือดสมองที่ผู้ป่วยต้องการการดูแลและฟื้นฟู เป็นต้น หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นฐานหลักสำหรับการพัฒนาความสามารถอื่นเพิ่มเติมเข้าไป เช่น การพัฒนาระบบตรวจรู้ที่ใช้ในการเฝ้าระวังอาการต่าง ๆ เป็นต้น เนื่องจากหุ่นยนต์นี้อาจจะต้องทำงานอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคนอยู่และเคลื่อนที่ผ่านผิวพื้นที่มีความลื่นต่าง ๆ ดังนั้นระบบควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ี้มีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องสามารถปรับแรงขับเคลื่อนได้เพื่อป้องกันการลื่นไถลขณะเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ในเส้นทางการเดินที่มีสิ่งกีดขวางในรูปแบบต่าง ๆ โครงการนี้จึงเป็นการพัฒนาหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ที่สามารถสร้างแรงขับเคลื่อนที่เหมาะสม เพื่อให้หุ่นยนต์มีพื้นฐานของความปลอดภัยที่เหมาะสมกับงานดังที่กล่าวมาข้างต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

พัฒนาหุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่ได้แบบสองล้อที่มีระบบป้องกันการลื่นไถลเพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้กับหุ่นยนต์ที่จะนำไปใช้ดูแลผู้ป่วยในโรงพยาบาล และพัฒนากระบวนการประมาณค่าแรงฉุดลากบนพื้นผิวที่มีความลื่นต่าง ๆ

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ออกแบบระบบป้องกันการลื่นไถลของหุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่ได้สองล้อ
2. ออกแบบวิธีการประมาณค่าแรงฉุดลากสูงสุดของหุ่นยนต์บนพื้นผิวใด ๆ ได้

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบป้องกันการลื่นไถล
2. ออกแบบและพัฒนาระบบป้องกันการลื่นไถลของหุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่ได้
3. ออกแบบวิธีการทดลองระบบป้องกันการลื่นไถล
4. ทดสอบการทำงานของระบบและปรับปรุงแก้ไข
5. สรุปผลและเขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ระบบป้องกันการลื่นไถลของหุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่ได้สองล้อ
2. สามารถประมาณค่าแรงฉุดลากของพื้นใด ๆ ได้

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรม

จากการที่ได้ศึกษางานวิจัยที่เกิดขึ้นในอดีตที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแรงฉุดลากและระบบป้องกันการไถล ผู้เขียนวิทยานิพนธ์นี้ได้จำแนกรูปแบบของระบบควบคุมเป็นกลุ่มย่อยดังนี้

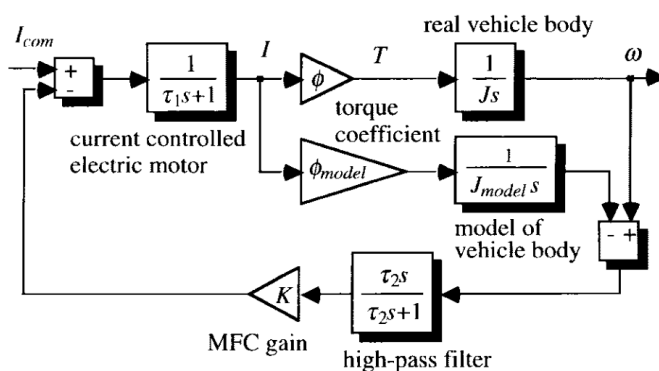
1. ระบบควบคุมแรงฉุดลากที่ไม่ได้ใช้ค่าอัตราการไถล (Slip ratio)
2. ระบบควบคุมแรงฉุดลากที่ใช้ค่าอัตราการไถล
3. ระบบควบคุมแรงฉุดลากรูปแบบอื่น ๆ

โดยจะกล่าวถึงในรายละเอียดของระบบควบคุมจากการทบทวนวรรณกรรมทั้งหมด 10 งานวิจัย

#### 2.1 ระบบควบคุมแรงฉุดลากที่ไม่ได้ใช้ค่าอัตราการไถล

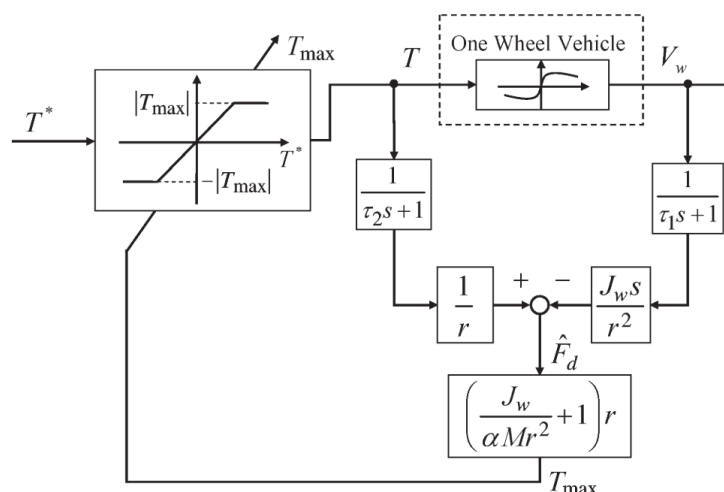
กลุ่มงานวิจัยระบบควบคุมแรงฉุดลากที่ไม่ใช้อัตราการไถลจะอาศัยเพียงการอ่านค่าจากเอ็นโค้ดเตอร์ (Encoder) เท่านั้น และนำค่าจากเอ็นโค้ดเตอร์นี้มาคำนวณด้วยวิธีต่าง ๆ หาสัญญาณป้อนกลับเพื่อนำมาช่วยควบคุมสัญญาณจ่ายขาออกให้มอเตอร์

งานวิจัย “Traction control of electric vehicle: basic experimental results using the test EV "UOT electric march"” [12] นี้ได้นำเสนอระบบควบคุมแรงฉุดลากถึง 2 แบบ แบบแรกคือระบบควบคุมแรงฉุดลาก Model following control (MFC) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับระบบควบคุมแรงฉุดลากด้วยการส่งสัญญาณป้อนกลับความเร็วล้อ และนำความเร็วล้อที่ได้ไปหาผลต่างเทียบกับความเร็วที่ได้จากสมการประมาณความเร็วของล้อ จากนั้นนำผลต่างของสองความเร็วนี้ไปผ่าน high-pass filter เพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงความเร็วแบบฉับพลันที่เกิดจากการไถล และนำสัญญาณที่ตรวจจับได้นี้มาลดสัญญาณขาออกและนำมาซึ่งการลดการไถลนั่นเอง ภาพที่ 1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม MFC ส่วนของระบบควบคุมแรงฉุดลากแบบที่สองที่ได้มีการนำเสนอในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแรงฉุดลาก Model following control [12]

งานวิจัย “A Novel Traction Control for EV Based on Maximum Transmissible Torque Estimation” [13] นี้ได้นำเสนอระบบควบคุมแรงฉุดลาก MTTE หรือ Maximum Transmissible Torque Estimation โดยใช้วิธีการประมาณค่าแรงบิดสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการไถล โดยการใช้เพียงแค่สัญญาณป้อนกลับจากเซ็นเซอร์เท่านั้น ภาพที่ 2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม MTTE

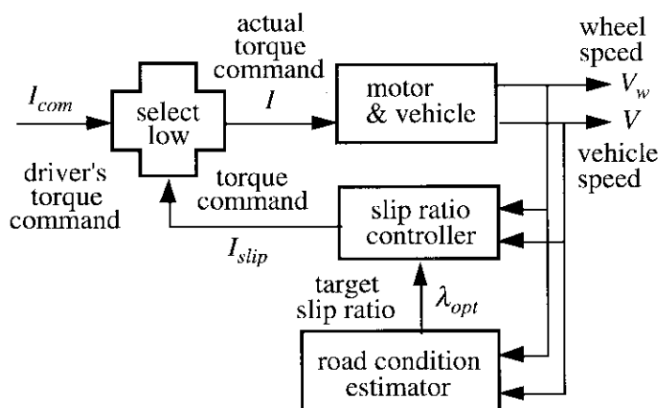


รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการไถลแบบ Maximum Transmissible Torque Estimation [13]

## 2.2 ระบบควบคุมแรงฉุดลากที่ใช้อัตราการไถล

งานวิจัย “Traction control of electric vehicle: basic experimental results using the test EV "UOT electric march"” [12] นี้ได้นำเสนอระบบควบคุมแรงฉุดลากถึง 2 แบบ แบบที่สองนี้เรียกว่า Optimal slip ratio controller ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของการประมาณค่าการไถลที่ดีที่สุดโดยคำนวณจากค่าสภาพของถนน และทำการควบคุมค่าอัตราการไถลด้วยหน่วยควบคุมอัตราการไถล (Slip ratio controller) ภาพที่ 3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม Optimal slip ratio controller

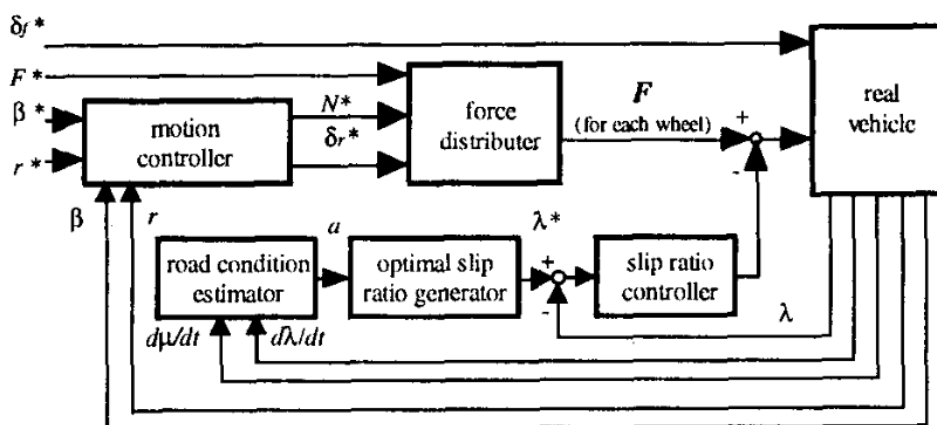




รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการไหลแบบ Optimal slip ratio controller

[12]

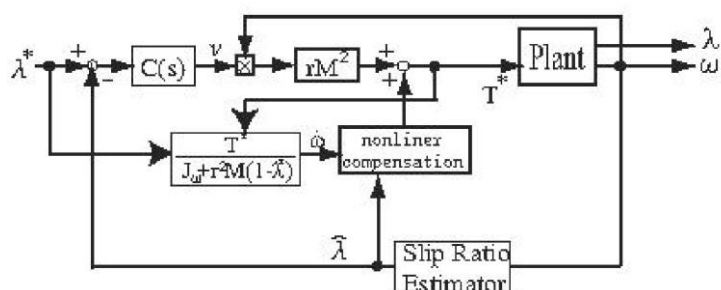
งานวิจัย “Road condition estimation for traction control in electric vehicle” [14] เป็นงานวิจัยที่คล้ายคลึงกับงานวิจัยระบบควบคุม Optimal slip ratio controller ตรงที่มีการใช้ Road condition estimator เช่นกัน แต่แตกต่างกันที่งานวิจัยนี้ควบคุมทั้งสี่ล้อแยกออกจากกัน ภาพที่ 4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่ใช้ในงานวิจัย [14]

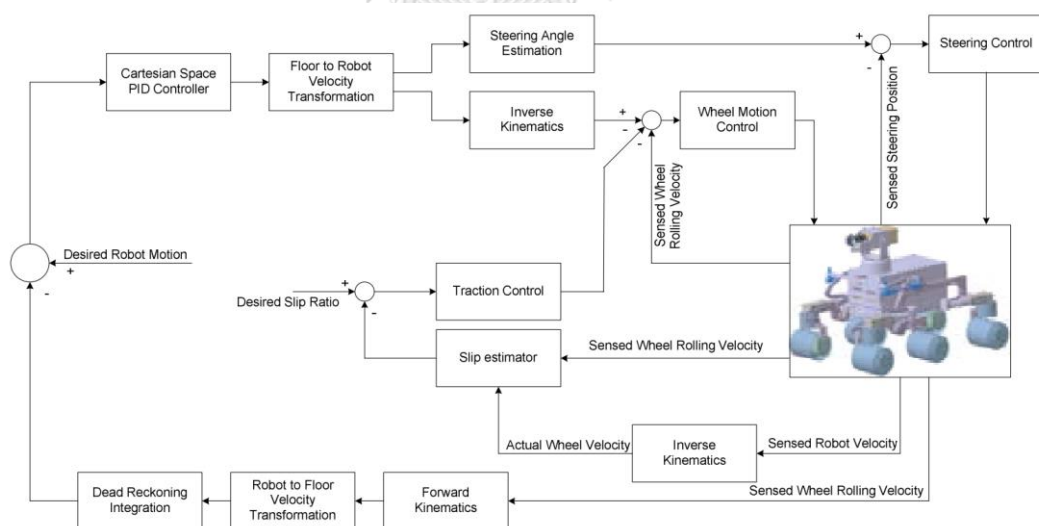
งานวิจัย “Traction Control based on Slip Ratio Estimation Without Detecting Vehicle Speed for Electric Vehicle” [5] นี้ได้นำเสนอวิธีการประมาณค่าอัตราการไหลทั้งหมดสองวิธี พร้อมทั้งใช้วิธีที่สามในการเปรียบเทียบความแม่นยำของทั้งสองวิธีและยังได้นำเสนอระบบ

ควบคุมไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับควบคุมแรงฉุดลากอีกด้วย ภาพที่ 5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 5 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการไถที่ใช้ในงานวิจัย [5]

งานวิจัย “Traction Control for a Rocker-Bogie Robot with Wheel-Ground Contact Angle Estimation” [15] นี้นำเสนอวิธีการหาค่าอัตราการไถโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งและนำค่าความเร่งที่ได้มาหาความเร็วซึ่งจะนำมาหาค่าการไถในที่สุด ภาพที่ 6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

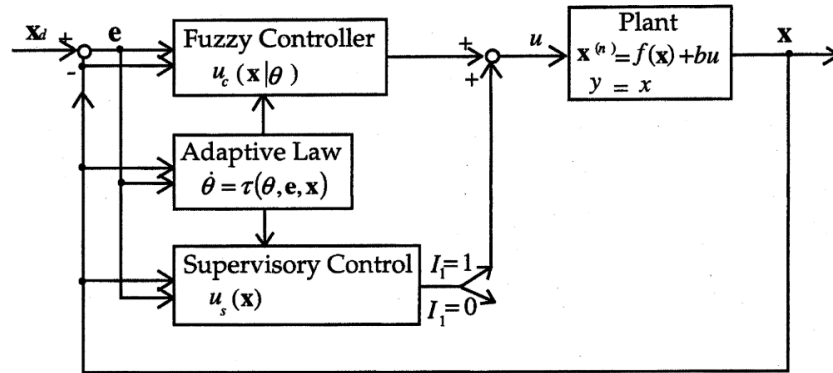


รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการไถที่ใช้ในงานวิจัย [15]

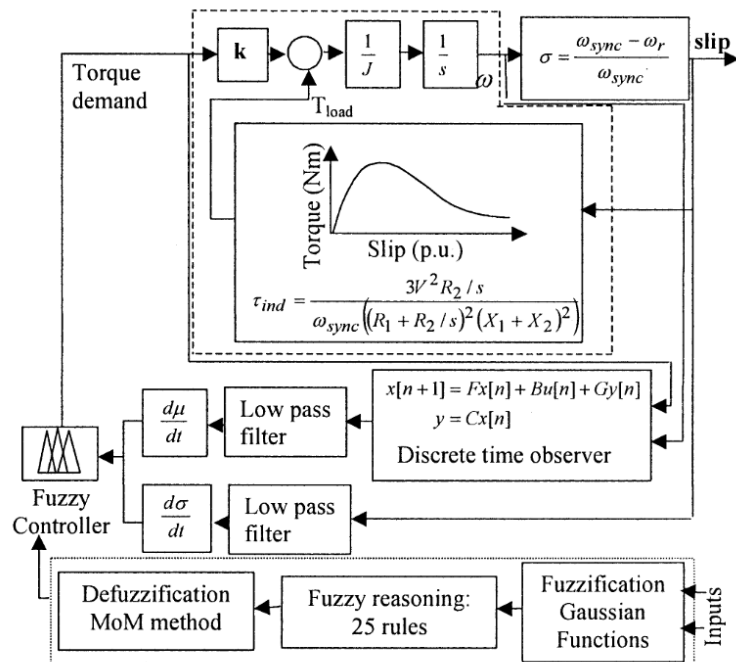
### 2.3 ระบบควบคุมแรงฉุดลากรูปแบบอื่น ๆ

ระบบควบคุมในกลุ่มนี้ประกอบไปด้วยระบบควบคุมแรงฉุดลากหลากหลายประเภท ได้แก่ ระบบควบคุมแรงฉุดลากที่ใช้ Fuzzy logic [16, 17] ดังรูปที่ 7 และ 8, ระบบควบคุมแรงฉุดลากที่ใช้

Optimal controller [18], ระบบควบคุมแรงจุดลาคที่ใช้ Model predictive controller [19] และสุดท้าย ระบบควบคุมแรงจุดลาคที่ใช้ Non-linear controller ร่วมกับโมเดลแรงเสียดทาน [20]



รูปที่ 7 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการไหลที่ใช้ในงานวิจัย [16]



รูปที่ 8 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมการไหลที่ใช้ในงานวิจัย [17]

### บทที่ 3

## ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องและการจำลองเบื้องต้น

### 3.1 แบบจำลองแรงเสียดทาน

แรงเสียดทานเป็นแรงที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิวที่สัมผัสกัน มีทิศทางไปตามแนวสัมผัส (Tangential) และจะมีทิศทางสวนทางกับการเคลื่อนที่เสมอ หรือในกรณีที่วัตถุไม่มีการเคลื่อนที่ ทิศทางของแรงเสียดทานจะมีทิศตรงข้ามกับแรงภายนอกที่กระทำ

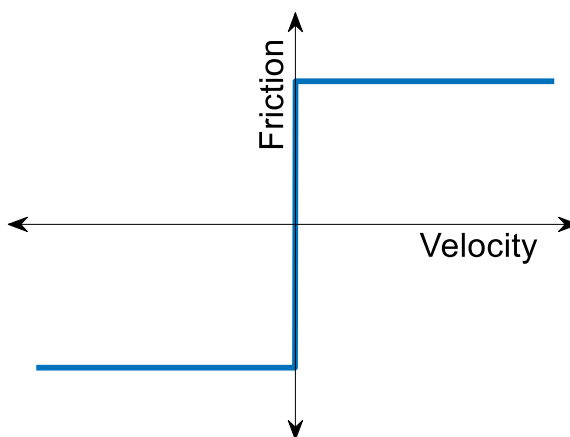
แบบจำลองแรงเสียดทานมีทั้งแบบเรียบง่ายและแบบความซับซ้อน ในบทนี้จะแสดงแบบจำลองแรงเสียดทานและส่วนประกอบของแรงเสียดทานทั้งหมด 4 อย่าง คือ แรงเสียดทานคูลอมบ์ (Coulomb friction), แรงเสียดทานสถิต (Static friction), แรงเสียดทานหนืด (Viscous friction) และปรากฏการณ์ Stribeck (Stribeck effect)

#### 3.1.1 แรงเสียดทานคูลอมบ์ (Coulomb friction)

โมเดลแรงเสียดทานคูลอมบ์เป็นรูปแบบของแรงเสียดทานที่เรียบง่ายที่สุด ตั้งชื่อตามนักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Charles-Augustin de Coulomb ซึ่งเสนอว่าขนาดของแรงเสียดทานไม่ขึ้นกับขนาดของผิวสัมผัสและไม่ขึ้นกับความเร็วสัมพัทธ์ของวัตถุ แต่ขึ้นกับแรงที่กระทำในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่หรือ Normal force เท่านั้น

แรงเสียดทานคูลอมบ์ ( $F_C$ ) มีค่าขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ ( $N$ ) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ ( $\mu_k$ ) โดยมีทิศทางตรงข้ามกับความเร็วสัมพัทธ์ของวัตถุกับพื้น ( $v$ ) รูปที่ 9 แสดงลักษณะของแรงเสียดทานคูลอมบ์

$$F_C = \mu_k N \operatorname{sgn}(v) \quad (3.1)$$



รูปที่ 9 ลักษณะของแรงเสียดทานคูลอมบ์

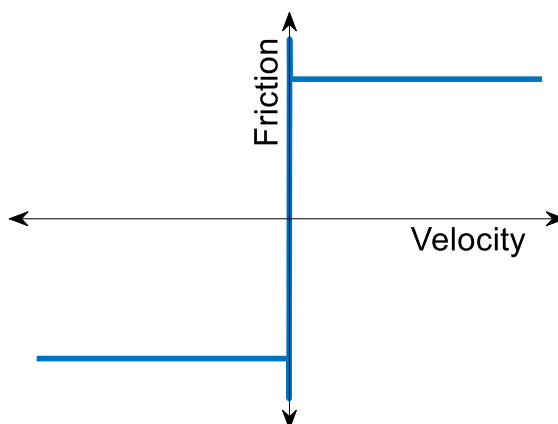
### 3.1.2 แรงเสียดทานสถิต (Static friction)

แนวคิดของแรงเสียดทานสถิต (Static friction) คือในขณะที่วัตถุอยู่นิ่งวัตถุจะมีแรงเสียดทานค่าหนึ่งซึ่งมีค่ามากกว่าแรงเสียดทานในขณะที่วัตถุเคลื่อนที่หรือแรงเสียดทานจลน์ ซึ่งในแบบจำลองแรงเสียดทานอย่างง่ายนั้น แรงเสียดทานสถิตจะเปลี่ยนไปเป็นแรงเสียดจลน์ทันทีในขณะที่วัตถุเริ่มเคลื่อนที่

แรงเสียดทานสถิต ( $F_s$ ) มีค่าขึ้นกับแรงที่กระทำในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ ( $N$ ) และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต ( $\mu_s$ ) โดยมีทิศทางตรงข้ามกับความเร็วสัมพัทธ์ของวัตถุกับพื้น ( $v$ ) ซึ่งแรงเสียดทานสถิตจะเกิดขึ้นในช่วงที่วัตถุอยู่นิ่งหรือเมื่อความเร็วสัมพัทธ์ของวัตถุกับพื้นมีค่าเท่ากับศูนย์ รูปที่ 10 แสดงลักษณะของแรงเสียดทานคูลอมบ์ร่วมกับลักษณะของแรงเสียดทานสถิต

$$F_s = \mu_s N \operatorname{sgn}(v) \quad (3.2)$$

$$\text{Friction} = \begin{cases} F_s, v = 0 \\ F_c, v \neq 0 \end{cases} \quad (3.3)$$



รูปที่ 10 ลักษณะของแรงเสียดทานคูลอมบ์และแรงเสียดทานสถิต

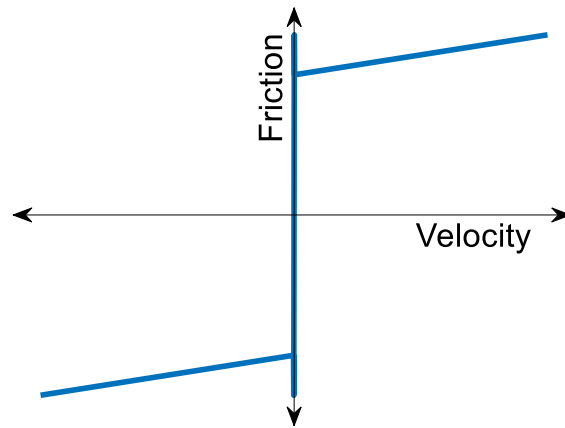
### 3.1.3 แรงเสียดทานหนืด (Viscous Friction)

แรงเสียดทานหนืด (Viscous Friction) เกิดจากการที่มีความหนืดของเหลวหรือสารหล่อลื่นชั้นอยู่ระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิวที่เคลื่อนที่สัมผัสกัน เนื่องจากของเหลวมีแรงดันจากการที่ของเหลวต้องเคลื่อนที่ไปตามการเคลื่อนที่สัมพัทธ์นั้น

แรงเสียดทานหนืด ( $F_v$ ) มีค่าขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานหนืด ( $c$ ) และความเร็วสัมพัทธ์ของวัตถุกับพื้น ( $v$ ) ซึ่งแรงเสียดทานหนืดจะเกิดขึ้นในช่วงที่วัตถุมีความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างวัตถุกับพื้น รูปที่ 11 แสดงลักษณะของแรงเสียดทานคูลอมบ์ร่วมกับลักษณะของแรงเสียดทานสถิต

$$F_v = cv \quad (3.4)$$

$$\text{Friction} = \begin{cases} F_s, v = 0 \\ F_C + F_V, v \neq 0 \end{cases} \quad (3.5)$$



รูปที่ 11 ลักษณะของแรงเสียดทานคูลอมบ์ แรงเสียดทานสถิต และแรงเสียดทานหนืด

### 3.1.4 LuGre โมเดล

โมเดลแรงเสียดทาน LuGre [21] ถูกพัฒนาขึ้นโดยกลุ่มนักวิจัยจากเมือง Lund ประเทศสวีเดนและเมือง Grenoble ประเทศฝรั่งเศส โมเดลแรงเสียดทานนี้แสดงปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนต่างๆ ของแรงเสียดทาน ได้แก่ การประพฤติตัวเหมือนสปริงในขณะที่มีความเร็วเป็นศูนย์, แรงเสียดทานที่ความเร็วต่ำ, ปรากฏการณ์ Stribeck (Stribeck effect) เกิดขึ้นเมื่อแรงเสียดทานเกิดการเปลี่ยนแปลงจากแรงเสียดทานสถิตไปเป็นแรงเสียดทานจลน์), ปรากฏการณ์ Stick-slip และฮิสเทอรีซิส (hysteresis) ซึ่งปรากฏการณ์ทั้งหมดที่กล่าวมาได้ถูกบรรจุอยู่ในสมการเชิงอนุพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นอันดับสองเพียงสมการเดียวเท่านั้น โมเดลแรงเสียดทาน LuGre นี้มีจำนวนค่าคงที่ในสมการทั้งหมด 4 ค่า ทำให้ง่ายต่อการใช้งาน รูปที่ 12 แสดงลักษณะของแรงเสียดทานจาก LuGre โมเดล

สมการโมเดลแรงเสียดทาน LuGre มีดังต่อไปนี้

$$\text{Friction} = (\sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 v_r) N \quad (3.6)$$

$$\dot{z} = v_r - \frac{\sigma_0 |v_r|}{g(v_r)} z \quad (3.7)$$

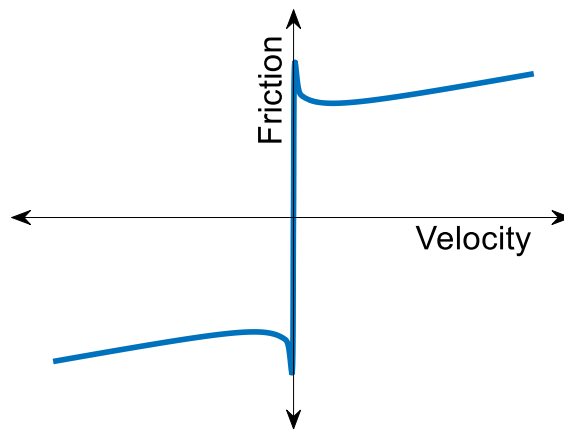
$$g(v_r) = \mu_c + (\mu_s - \mu_c) e^{-|v_r/v_s|^{0.5}} \quad (3.8)$$

เมื่อ

$z$  = ค่าสถานะภายในของแรงเสียดทาน (Internal friction state)

$\sigma_0$  = Normalized rubber longitudinal lumped stiffness

- $\sigma_1$  = Normalized rubber longitudinal lumped damping  
 $\sigma_2$  = Normalized viscous relative damping  
 $\mu_c$  = Normalized Coulomb friction  
 $\mu_s$  = Normalized Static friction  
 $v_s$  = Stribeck relative velocity  
 $v_r$  = ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างวัตถุกับพื้น



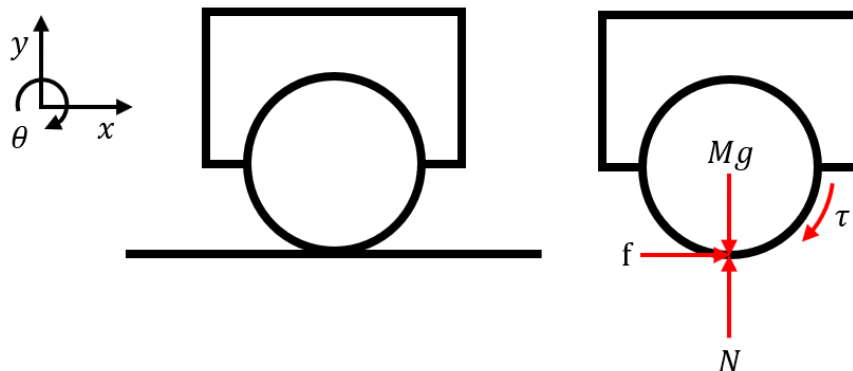
รูปที่ 12 ลักษณะของแรงเสียดทานจาก LuGre โมเดล

### 3.2 การไถลและอัตราการลื่นไถล

การไถล (ในยานยนต์) เกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์กันระหว่างผิวสัมผัสของยางล้อและพื้นถนน การไถลของล้อรถโดยทั่วไปสามารถเขียนในรูปของอัตราส่วนการไถล ( $s$ ) ได้ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างผลต่างของความเร็วพื้นผิว ( $v$ ) ความเร็วที่ขอบล้อ ( $r\omega$ ) ดังสมการต่อไปนี้

$$s = \begin{cases} 1 - \frac{r\omega}{v} & \text{if } v > r\omega, v \neq 0 \\ 1 - \frac{v}{r\omega} & \text{if } v < r\omega, w \neq 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

การจำลองการไถลสามารถทำได้โดยใช้แบบจำลองแรงเสียดทานผสมกับแบบจำลองรถที่มีล้อติดมอเตอร์วังบนพื้น เรียกว่าระบบพื้น-ล้อ (wheel-road system) โดยมีมอเตอร์สร้างแรงบิด ( $\tau$ ) ส่งไปที่ล้อทำให้เกิดการหมุนและการเคลื่อนที่ของตัวรถ และมีแรงเสียดทาน ( $f$ ) ที่พื้นกระทำกับล้อก่อให้เกิดแรงฉุดลาก ตามแผนภาพอิสระ (Free body diagram) ในรูปที่ 13



รูปที่ 13 แผนภาพอิสระของระบบพื้น-ล้อ (wheel-road system)

หากใช้รูปแบบแรงเสียดทานจาก LuGre โมเดลดังสมการที่ 3.6 – 3.8 จะได้สมการทางพลศาสตร์ของระบบพื้น-ล้อนี้อย่างนี้

$$M\ddot{x} = f \quad (3.10)$$

$$I\ddot{\theta} = \tau - rf - c\dot{\theta} \quad (3.11)$$

$$f = (\sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 v_r)N \quad (3.12)$$

$$\dot{z} = v_r - \frac{\sigma_0 |v_r|}{g(v_r)} z \quad (3.13)$$

$$g(v_r) = \mu_c + (\mu_s - \mu_c) e^{-|v_r/v_s|^{0.5}} \quad (3.14)$$

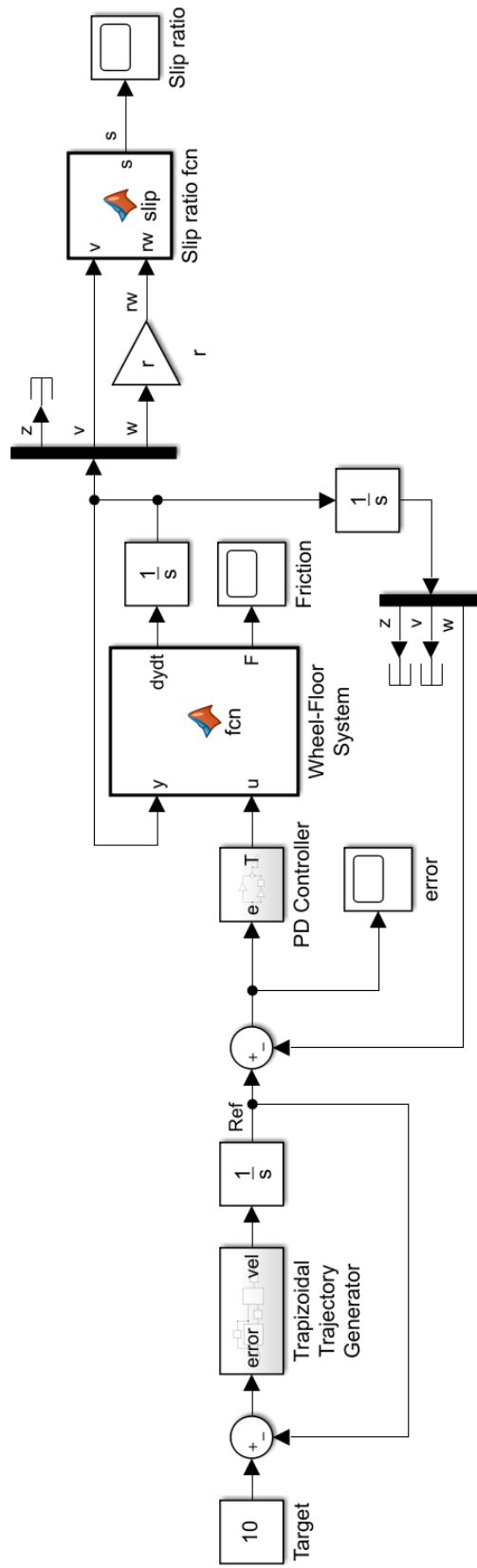
$$v_r = r\dot{\theta} - \dot{x} \quad (3.15)$$

ให้ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการไถลมีค่าตามตารางที่ 1 ซึ่งอ้างอิงจากบทความ [20] กราฟแสดงการจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไถลถูกสร้างโดยใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) โดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink ตามภาพที่ 14

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการไถล

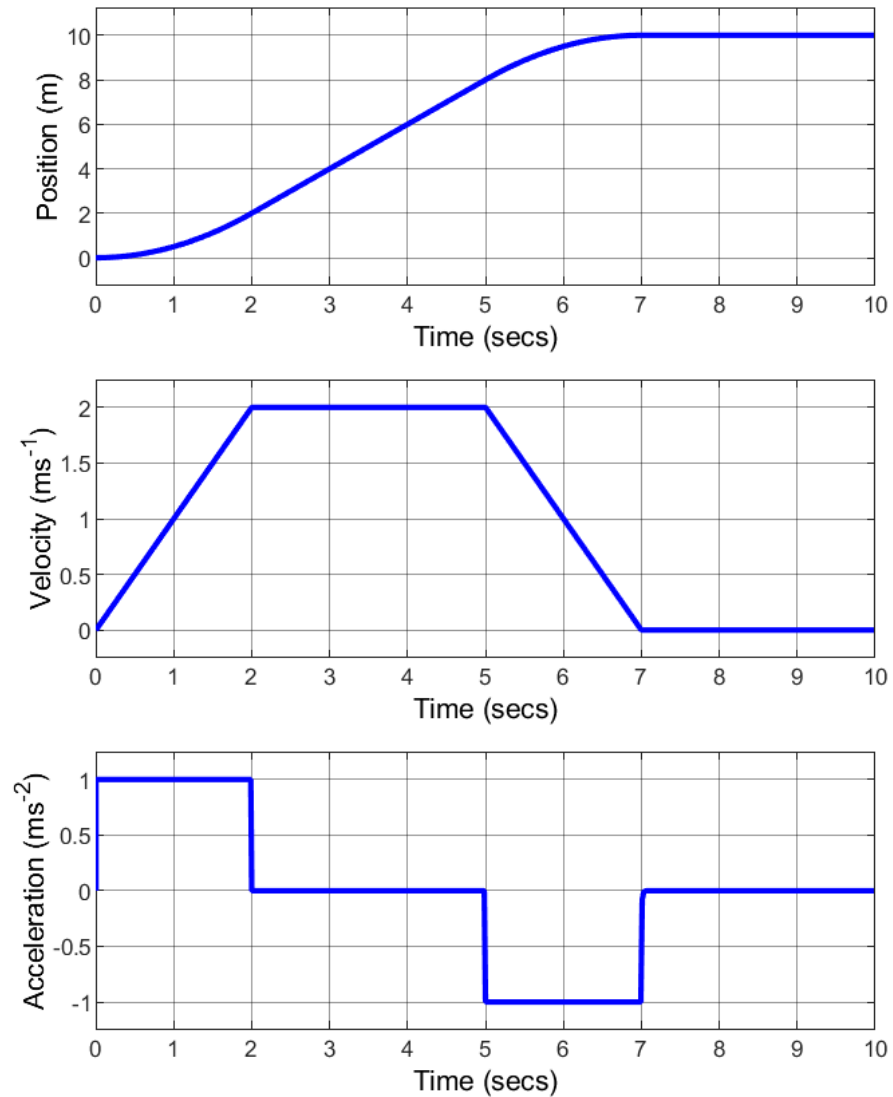
พารามิเตอร์	$\sigma_0$ ( $m^{-1}$ )	$\sigma_1$ ( $sm^{-1}$ )	$\sigma_2$ ( $sm^{-1}$ )	$\mu_s$ (-)	$\mu_c$ (-)	$v_s$ ( $ms^{-1}$ )	$c$ ( $N \cdot ms$ )
ค่าพารามิเตอร์	40	4.95	0.0018	0.4	0.12	12.5	0.001



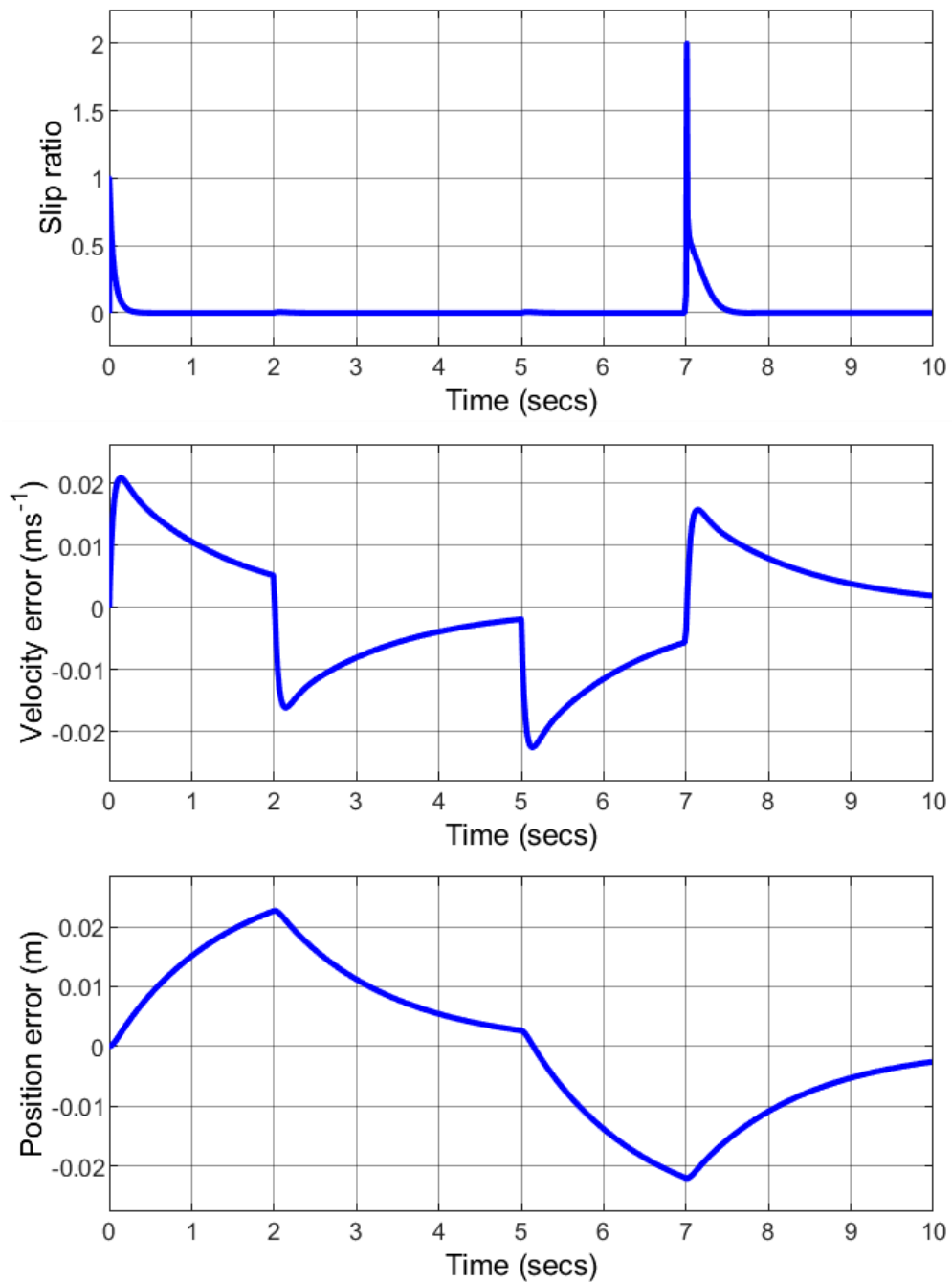


รูปที่ 14 โปรแกรมจำลองการไถลบน MATLAB Simulink

ให้วิถีการเคลื่อนที่ของล้อเป็นไปตามโปรไฟล์ความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal velocity profile) ที่มีความเร็วสูงสุดที่  $2 \text{ ms}^{-1}$  มีค่าความเร่งที่  $1 \text{ ms}^{-2}$  ตามรูปที่ 15 จะได้ผลของ อัตราการไหลและค่าความคลาดเคลื่อนตามรูปที่ 16



รูปที่ 15 กราฟโปรไฟล์ความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 16 กราฟอัตราการใช้และค่าความคลาดเคลื่อน

โมเดลการจำลองนี้สามารถคำนวณค่าอัตราการใช้เวลาต่าง ๆ ได้และจะถูกนำไปใช้ในการวัดค่าอัตราการใช้ในระบบควบคุมต่าง ๆ ต่อไป แต่อาจจะให้ผลไม่ใกล้เคียงความเป็นจริง หากต้องการที่จะจำลองปรากฏการณ์การใช้เวลาที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้นจะต้องนำแบบจำลองของล้อเข้ามาใช้ร่วมกับแบบจำลองแรงเสียดทานด้วย [22] ทั้งนี้จะไม่ขอกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์นี้

### 3.3 การแปลงแซด (Z-transform)

การแปลงแซด (Z-transformation) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยในการแก้สมการของระบบที่มีเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete time system) ซึ่งคล้ายกับการแปลงลาปลาซ (Laplace transform) ที่ช่วยในการแก้สมการของระบบที่มีเวลาต่อเนื่อง (continuous time system) โดยสมการที่ผ่านการแปลงแซดจะอยู่ในรูปของโดเมนแซด (Z-domain)

การแปลงแซดของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องเขียนอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$E(z) \triangleq \sum_{k=-\infty}^{\infty} e_k z^{-k}, \quad r_0 < |z| < R_0 \quad (3.16)$$

โดยที่  $e_k$  คือ สัญญาณไม่ต่อเนื่อง (Discrete signal)  
 $k$  คือ ค่าจำนวนเต็ม โดยที่  $t = kT$   
 $z$  คือ ตัวแปรความถี่

โดยทั่วไปฟังก์ชันส่วนใหญ่อยู่ในรูปของระบบเวลาต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ฟังก์ชันของระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง จึงต้องทำการประมาณค่าฟังก์ชันของระบบเวลาต่อเนื่องเป็นฟังก์ชันของระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง ซึ่งมีวิธีการประมาณอยู่หลากหลายวิธี เช่น วิธีการประมาณจากสมการออยเลอร์ (Euler equation) การหาปริพันธ์เชิงตัวเลข (Numerical integration) โพล-ซีโรแมปปิง (Pole-zero Mapping) และวิธีการคงค่าเทียบเท่า (Hold equivalents) ฯลฯ

#### 3.3.1 วิธีการประมาณจากสมการออยเลอร์

จากสมการออยเลอร์ (Euler equation) ได้จำกัดความของอนุพันธ์ของตัวแปรไว้ว่า

$$\dot{x}(t) = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta x}{\delta t} \quad (3.17)$$

ถ้ากำหนดให้คาบเวลาการสุ่มข้อมูล ( $T = \delta t$ ) มีค่าน้อยมาก สมการข้างต้นจะถูกประมาณค่าได้ดังนี้

$$\dot{x}(t) = \frac{x(k+1) - x(k)}{T} \quad (3.18)$$

โดยที่  $T$  คือ คาบเวลาการสุ่มข้อมูล (มีหน่วยเป็น วินาที)  $T = t_{k+1} - t_k; t_k = kT$   
 $k$  คือ ค่าเลขจำนวนเต็ม

$x(k)$  คือ ค่าของ  $x(t)$  ที่เวลา  $t_k$

$x(k+1)$  คือ ค่าของ  $x(t)$  ที่เวลา  $t_{k+1}$

### 3.3.2 การหาปริพันธ์เชิงตัวเลข (Numerical integration)

การหาปริพันธ์เชิงตัวเลขเป็นวิธีที่ช่วยประมาณฟังก์ชันที่อยู่ในโดเมน  $s$  ของระบบเวลา ต่อเนื่องให้เป็นฟังก์ชันที่อยู่ในโดเมน  $z$  ของระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง โดยใช้พื้นฐานการหาปริพันธ์มาช่วย ในการประมาณค่า ดังนั้นการประมาณค่านี้คือการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $s$  และตัวแปร  $z$  จากสมการอนุพันธ์ของตัวแปรเทียบกับเวลา คือ

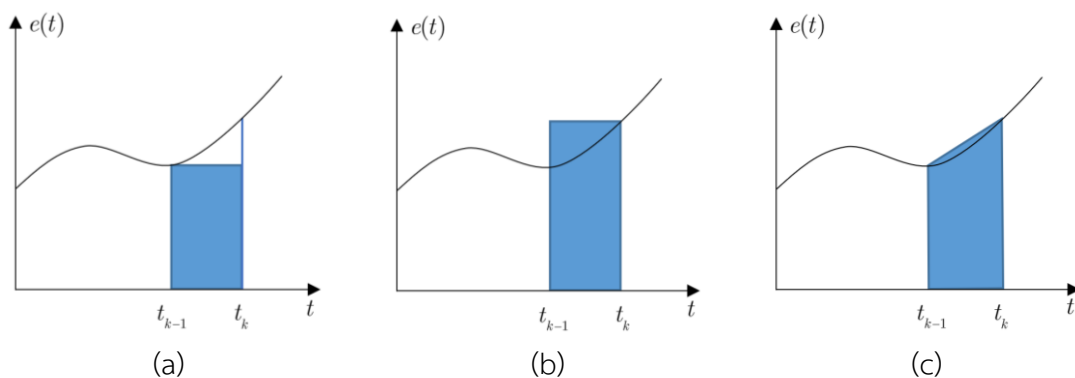
$$e(t) = \dot{u}(t) = \frac{du(t)}{dt} \rightarrow u(t) = \int_0^t \dot{u}(t) dt \rightarrow u(T) = \int_0^T e(t) dt \quad (3.19)$$

$$E(s) = sU(s) \rightarrow \frac{1}{s} = \frac{U(s)}{E(s)} \quad (3.20)$$

จากสมการข้างต้นทั้งสอง สามารถสรุปได้ว่า การหาปริพันธ์เชิงตัวเลขนี้เป็นวิธีการประมาณค่าพื้นที่ใต้เส้นโค้ง ดังสมการต่อไปนี้

$$A_e = \int_0^t e(t) dt \quad (3.21)$$

โดยวิธีการประมาณค่าพื้นที่ใต้เส้นโค้งมี 3 แบบ ได้แก่ กฎสี่เหลี่ยมไปข้างหน้า (Forward rectangular rule) กฎสี่เหลี่ยมย้อนหลัง (Backward rectangular rule) และกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule) ตามที่แสดงในรูปที่ 17 (a), (b), และ (c) ตามลำดับ



รูปที่ 17 ภาพแสดงการประมาณค่าพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งแบบต่าง ๆ

### 3.3.2.1 กฎสี่เหลี่ยมไปข้างหน้า (Forward rectangular rule)

จากรูป 17(a) จะได้ว่า

$$u_k = u_{k-1} + Te_{k-1} \quad (\text{Forward rectangular rule}) \quad (3.22)$$

โดยที่  $T$  คือคาบเวลาการสุ่มข้อมูล (sampling time) เมื่อนำสมการ 3.22 มาทำการแปลงแซด จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $s$  และตัวแปร  $z$  ดังนี้

$$\begin{aligned} U(z) &= z^{-1}U(z) + Tz^{-1}E(z) \\ \frac{U(z)}{E(z)} &= \frac{Tz^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{T}{z - 1} = \frac{1}{s} \rightarrow s = \frac{z - 1}{T} \end{aligned} \quad (3.23)$$

### 3.3.2.2 กฎสี่เหลี่ยมย้อนหลัง (Backward rectangular rule)

จากรูป 17(b) จะได้ว่า

$$u_k = u_{k-1} + Te_k \quad (\text{Backward rectangular rule}) \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} U(z) &= z^{-1}U(z) + TE(z) \\ \frac{U(z)}{E(z)} &= \frac{T}{1 - z^{-1}} = \frac{Tz}{z - 1} = \frac{1}{s} \rightarrow s = \frac{z - 1}{Tz} \end{aligned} \quad (3.25)$$

### 3.3.2.3 กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule)

จากรูป 17(c) จะได้ว่า

$$u_k = u_{k-1} + A_e = u_{k-1} + \frac{T}{2} (e_k + e_{k-1}) \quad (\text{Trapezoidal rule}) \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} U(z) &= z^{-1}U(z) + \frac{T}{2} (E(z) + z^{-1}E(z)) \\ \frac{U(z)}{E(z)} &= \frac{T}{2} \frac{(1 + z^{-1})}{(1 - z^{-1})} = \frac{1}{s} \rightarrow s = \frac{2}{T} \frac{(1 - z^{-1})}{(1 + z^{-1})} \end{aligned} \quad (3.27)$$

ตารางที่ 2 ตารางสรุปการประมาณค่าด้วยวิธีการอินทิเกรตเชิงเลขโดยใช้กฎต่าง ๆ

กฎสี่เหลี่ยมไปข้างหน้า (Forward rectangular rule)	$s = \frac{z - 1}{T} \leftrightarrow z = 1 + Ts$
กฎสี่เหลี่ยมย้อนหลัง (Backward rectangular rule)	$s = \frac{z - 1}{Tz} \leftrightarrow z = \frac{1}{1 - Ts}$
กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal rule)	$s = \frac{2}{T} \frac{(z - 1)}{(z + 1)} \leftrightarrow z = \frac{1 + Ts / 2}{1 - Ts / 2}$

## บทที่ 4

### หุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่ได้สองล้อและระบบควบคุม

#### 4.1 ส่วนประกอบของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์สองล้อที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ดังในรูปที่ 18 นี้ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC motor) ที่ต่อกับชุดเฟืองแพลนเนตารี (Planetary Gear) อัตราทด 6:1 เพื่อเพิ่มแรงบิดและลดความเร็วของมอเตอร์ ตัวล้อที่ต่อกับมอเตอร์ทำด้วยอะลูมิเนียมกัดซีเอ็นซีหุ้มด้วยยางและมีล้อช่วยประคองอีกสี่ล้อติดอยู่ที่ถังสี่มุมของหุ่นยนต์ แหล่งจ่ายไฟฟ้าของหุ่นยนต์ใช้เป็นแบตเตอรี่ VRLA 12 โวลต์สองก้อนต่ออนุกรมกันเป็น 24 โวลต์ หุ่นยนต์มีระบบแขวนล้อทำจากสปริงเพื่อช่วยให้ล้อจับติดพื้นอยู่ตลอดเวลา

ส่วนประมวลผลของหุ่นยนต์นั้นใช้เป็นคอมพิวเตอร์ที่ใช้ระบบปฏิบัติการ Windows 10 และใช้เมนบอร์ดและหน่วยประมวลผลกลางเป็น Gigabyte Z370M และ Intel Core i7-8700 ตามลำดับ และมี Sensoray 826 เป็น Acquisition data card เพื่อที่จะทำให้คอมพิวเตอร์สามารถสั่งการมอเตอร์ได้ ซึ่งภาษาที่ใช้ในการการเขียนโปรแกรมสั่งงานนั้นคือภาษา C++

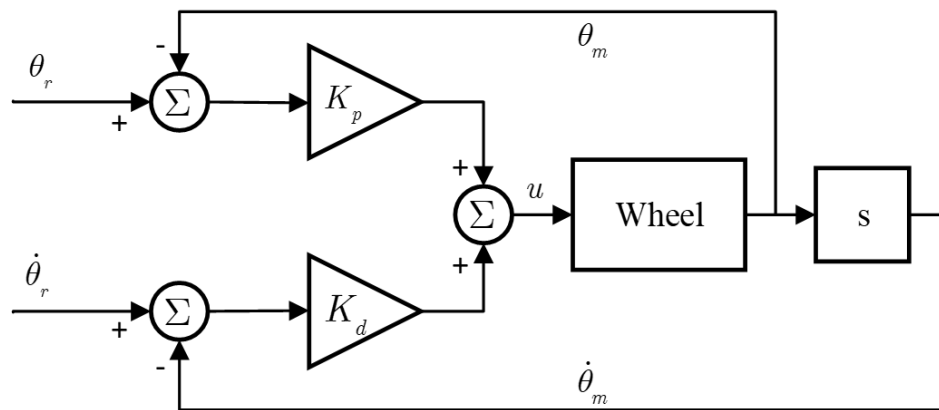


รูปที่ 18 หุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่ได้สองล้อ

#### 4.2 การออกแบบระบบควบคุมเบื้องต้น

เพื่อที่หุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร่ง ความเร็วและตำแหน่งตามที่ต้องการ หุ่นยนต์จะต้องมีระบบควบคุม ระบบควบคุมที่นำมาใช้เป็นระบบควบคุมตำแหน่งที่รับคำสั่งตำแหน่ง

จากโปรแกรมสร้างวิถีความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal velocity profile generator) ดังรูปที่ 15 โดยโปรแกรมสร้างวิถีความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมูนี้จะทำให้หุ่นยนต์สองล้อสามารถรับคำสั่งทั้งตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งได้ ถึงแม้ว่าจะใช้เพียงแค่ระบบควบคุมตำแหน่งก็ตาม ระบบควบคุมตำแหน่งจะรับสัญญาณค่าตำแหน่งจากเอ็นโค้ดเดอร์ที่ติดอยู่ที่ล้อแต่ละข้างของหุ่นยนต์สองล้อ ดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 19



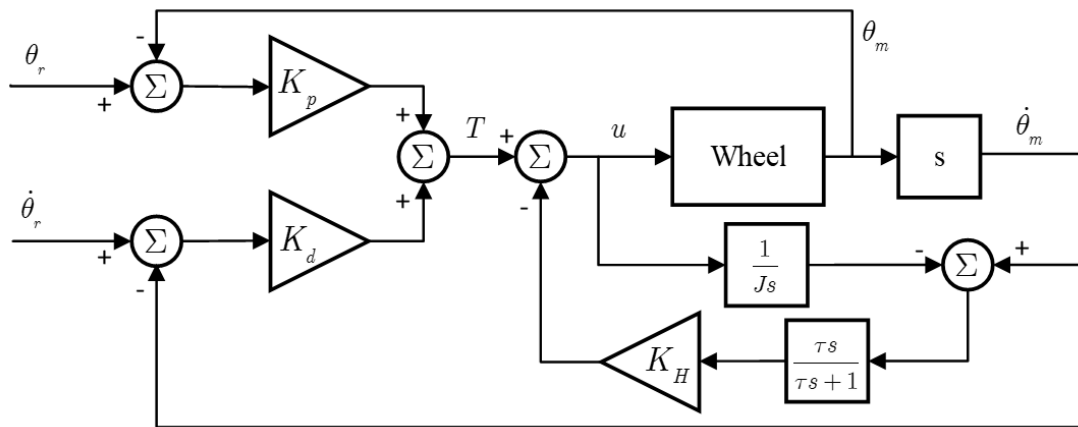
รูปที่ 19 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุม PD

#### 4.3 การออกแบบระบบควบคุมแรงฉุดลากเบื้องต้น

มีงานวิจัยต่าง ๆ มากมายที่ใช้ระบบควบคุมแรงฉุดลากยกตัวอย่างเช่น การควบคุมแรงฉุดลากด้วยตัวประมาณค่าอัตราส่วนการลื่นไถลสำหรับหุ่นยนต์ rocker-bogie [15], การควบคุมแรงฉุดลากด้วยแบบจำลองแรงเสียดทานของล้อ [20], การควบคุมอัตราส่วนการลื่นไถลที่เหมาะสม และ Model following control [12]

The model following control (MFC) ดังที่แสดงในบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3 นั้นถูกนำมาใช้ได้ง่ายเพราะไม่จำเป็นต้องใช้ตัวประมาณค่าแรงเสียดทานของล้อกับพื้นหรือตัวประมาณค่าอัตราส่วนการลื่นไถล อีกทั้ง MFC ยังถูกนำไปใช้ในระบบควบคุมแรงฉุดลากของหุ่นยนต์วิ่งบนน้ำแข็งด้วย [11]





รูปที่ 20 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแรงฉุดลาก Model following control

MFC ป้องกันการลื่นไถลโดยลดสัญญาณขาออก ( $u$ ) ด้วยสัญญาณจากตัวประมาณค่าอัตราการไถล ค่าจากที่ได้มาจากระบบควบคุม PD ( $T$ ) ถูกนำไปใช้ในการประมาณความเร็วของล้อและการลื่นไถลโดยคาดการณ์จากผลต่างของความเร็วที่วัดได้และความเร็วจากแบบจำลอง ถ้าเกิดการลื่นไถลหรือการเปลี่ยนแปลงโดยกะทันหันของความเร็วที่วัดได้จะถูกตรวจจับ และการลื่นไถลจะถูกลดลงโดยตัวควบคุม

ค่าคงที่ต่าง ๆ ของระบบนี้ได้แก่ ค่าคงที่เวลาของ high pass filter ( $\tau$ ), ค่าเกน ( $K_H$ ), และค่าความเฉื่อยของระบบ ( $J$ )

จากบล็อกไดอะแกรม ค่าสัญญาณขาออกจะมีค่าดังนี้

$$u = [T(s + \tau^{-1}) - K_H \dot{\theta}_m s](s + \tau^{-1} - K_H J^{-1})^{-1} \quad (4.1)$$

เพื่อการนำไปใช้ สมการที่ 4.1 ด้านบนจะต้องผ่านการแปลงเขตด้วยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู เพื่อแปลงจากขอบเขตจำนวนเชิงซ้อนนาลาปลาซ (s-domain) ไปเป็นขอบเขตแซต (z-domain)

$$s = \frac{2z - 1}{tz + 1} \quad (4.2)$$

แล้วจะได้ว่า

$$u = \frac{T[2(z - 1) + \tau^{-1}t(z + 1)] - K_H \dot{\theta}_m 2(z - 1)}{[2(z - 1) + \tau^{-1}t(z + 1) - t(z + 1)K_H J^{-1}]} \quad (4.3)$$

เมื่อเวลาการเก็บตัวอย่าง ( $t$ ) มีค่าที่เล็กมากพอจะสามารถละทิ้งได้

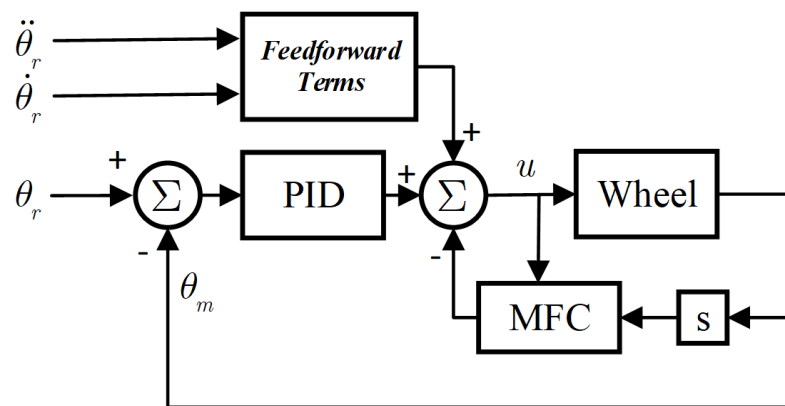
$$u = uz^{-1} + T(1 - z^{-1}) + K_H \dot{\theta}_m (1 - z^{-1}) \quad (4.4)$$

โดยที่

$$T = K_p(\theta_r - \theta_m) + K_d(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_m) \quad (4.5)$$

#### 4.4 การออกแบบระบบการชดเชยแบบมีวิถีไปหน้า

บล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 21 แสดงการชดเชยแบบมีวิถีไปหน้า (Feedforward compensation) สามารถทำให้หุ่นยนต์ตอบสนองต่อสัญญาณขับเคลื่อนได้ดีขึ้น ความเป็นไปได้ที่การนำการชดเชยแบบมีวิถีไปหน้ามาใช้ร่วมกับระบบควบคุมแรงดุดลากจะทำให้ค่าความคาดเคลื่อนลดลง



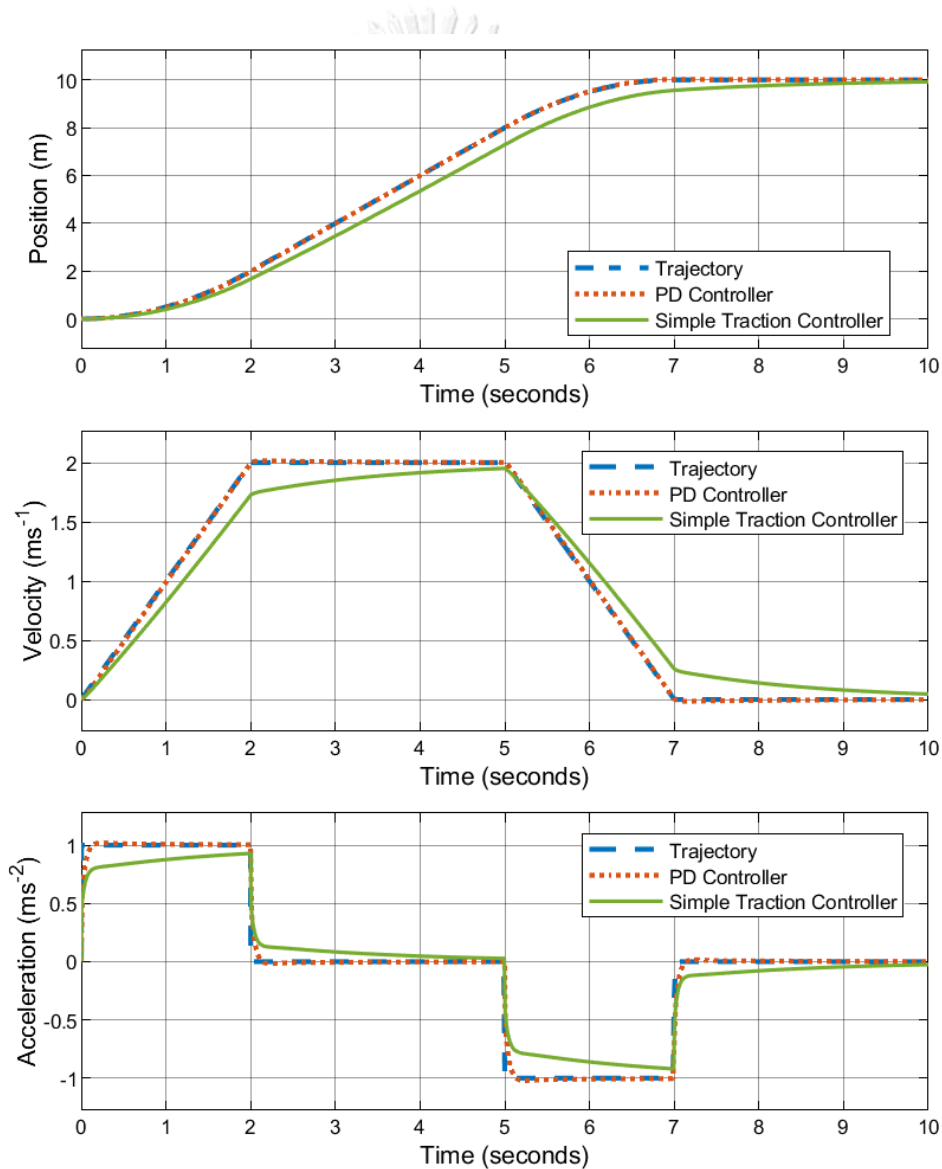
รูปที่ 21 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแรงดุดลากที่มีการชดเชยแบบมีวิถีไปหน้า

## บทที่ 5

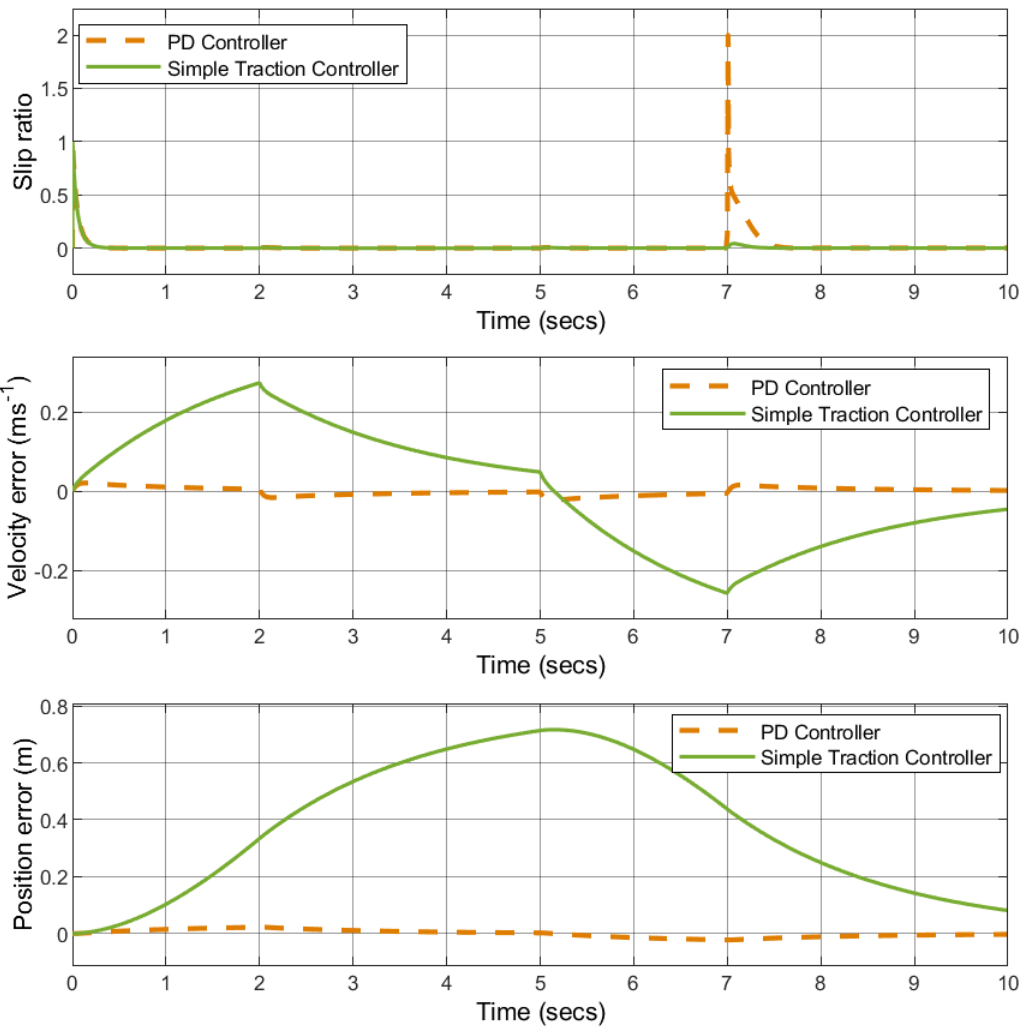
### การทดลองและผลการทดลอง

#### 5.1 การจำลอง Simple traction control

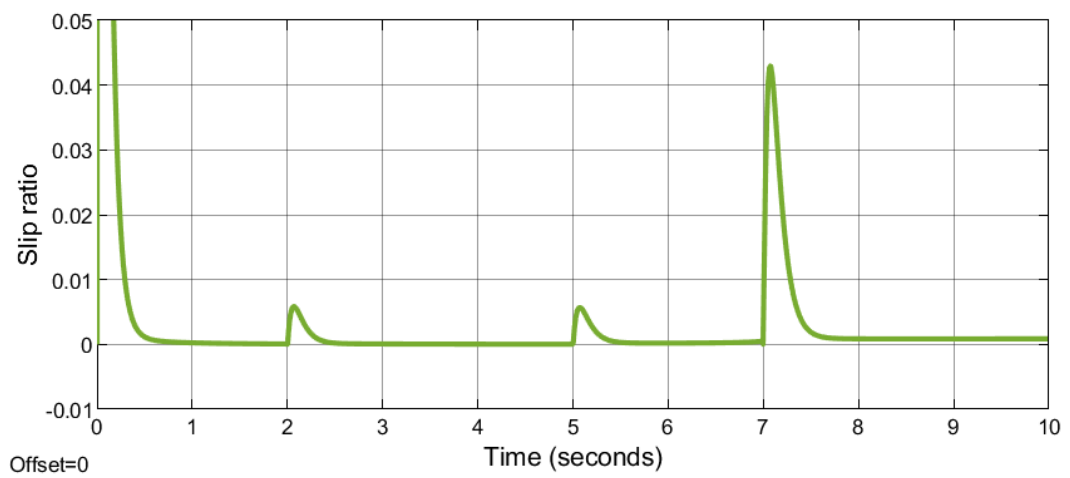
การทดลองนี้จัดทำขึ้นเพื่อทดสอบความสามารถในการลดการไถลของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ โดยการใช้ระบบควบคุม Simple traction control เปรียบเทียบกับระบบควบคุม PD (ภาพ 19) บน MATLAB ด้วยวิธีการเคลื่อนที่ตามโปรไฟล์ความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมูดังรูปที่ 15 และให้ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองการไถลมีค่าตามตารางที่ 1 เหมือนการจำลองด้านบน ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 22, 23, และ 24



รูปที่ 22 กราฟตำแหน่ง, ความเร็ว, และความเร่งของระบบควบคุมแบบ PD และ Simple traction controller



รูปที่ 23 กราฟอัตราการไถลและค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของระบบควบคุมแบบ PD และ Simple traction controller

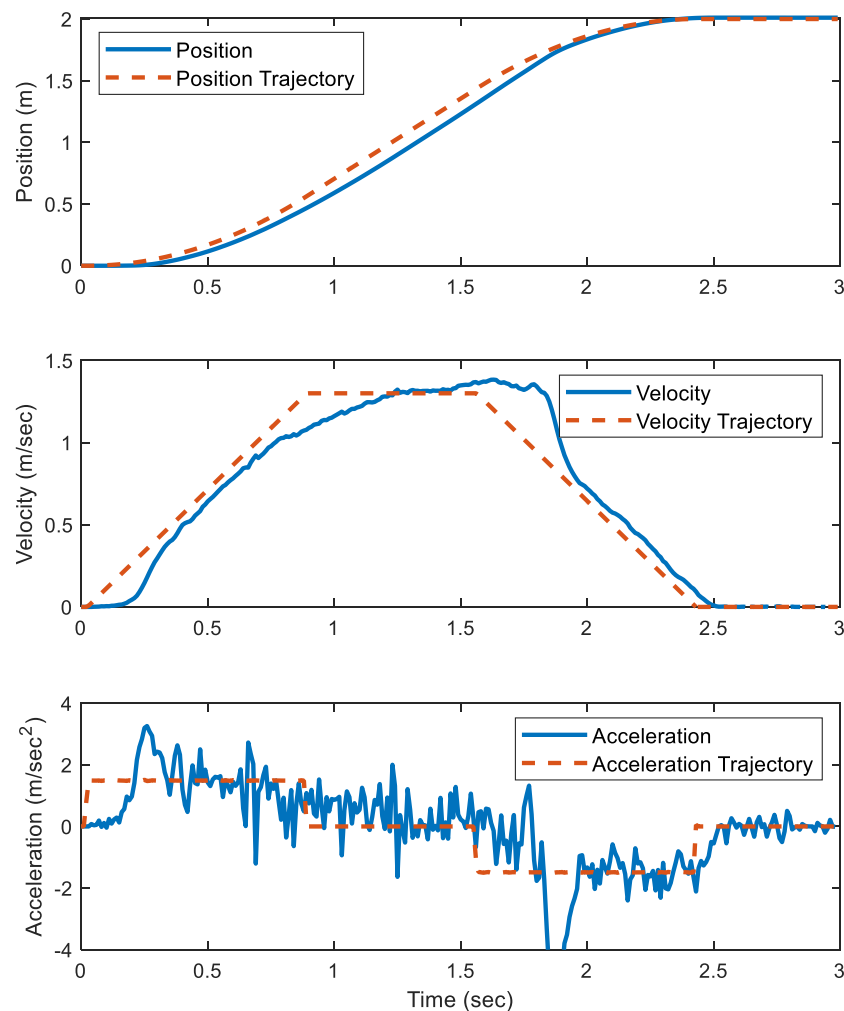


รูปที่ 24 กราฟขยายใหญ่ของอัตราการไถลของ Simple traction controller

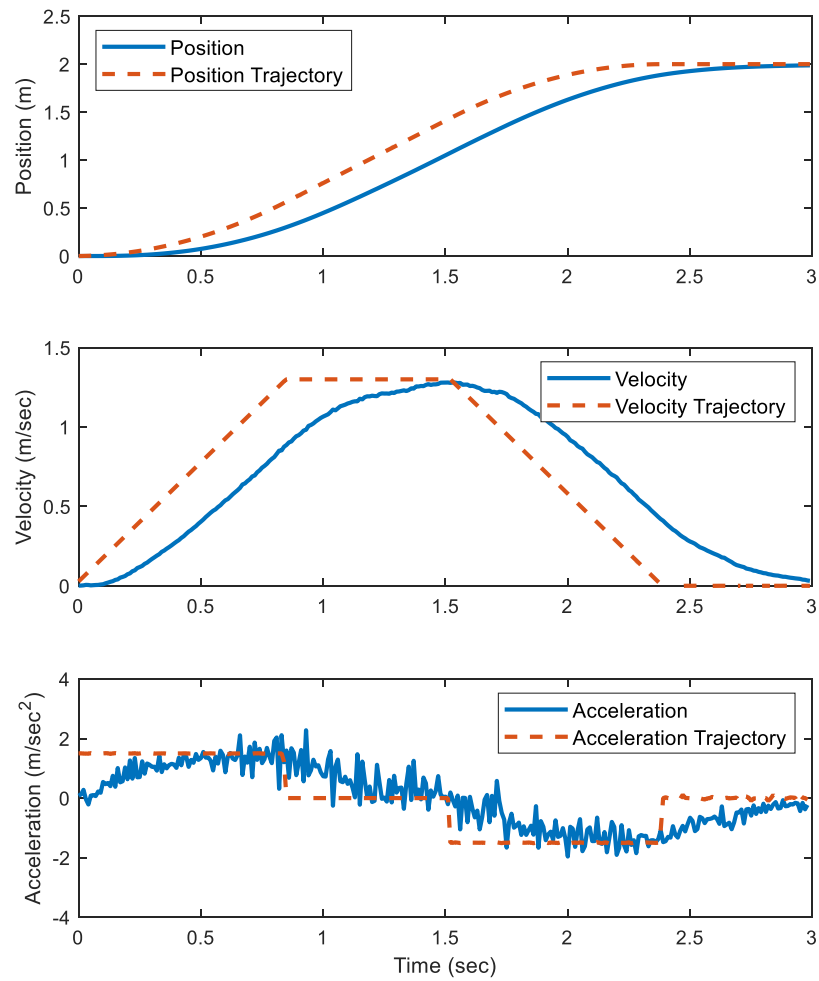
จะเห็นได้ชัดว่าค่าอัตราการไหลลดลงอย่างมากเมื่อเปลี่ยนจากระบบควบคุม PD เป็น Simple traction control แต่ในทางกลับกัน ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างมาก

## 5.2 การทดสอบ Simple traction control

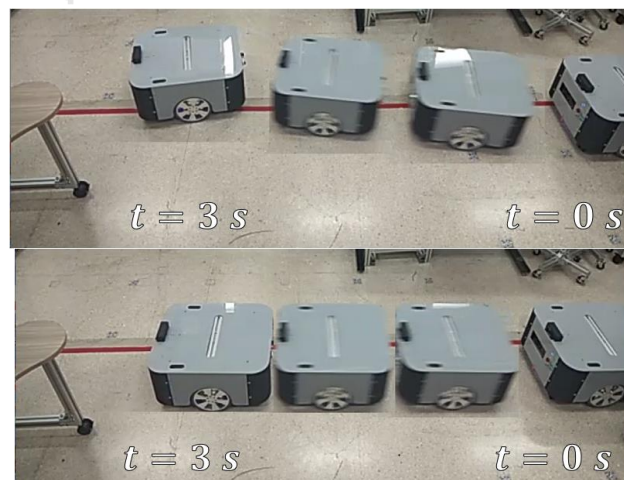
การทดลองนี้จัดทำขึ้นเพื่อทดสอบความสามารถในการลดการไหลของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ โดยทำการทดลองนี้จะใช้ระบบควบคุม Simple traction control เปรียบเทียบกับระบบควบคุม PD โดยจะให้หุ่นยนต์วิ่งในระยะทาง 2 เมตรด้วยวิถีความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal velocity profile trajectory) ที่มีความเร็วสูงสุด  $1.3 \text{ ms}^{-1}$  และความเร่ง  $1.5 \text{ ms}^{-2}$  ได้ผลการทดลอง ดังภาพที่ 25, 26 และ 27



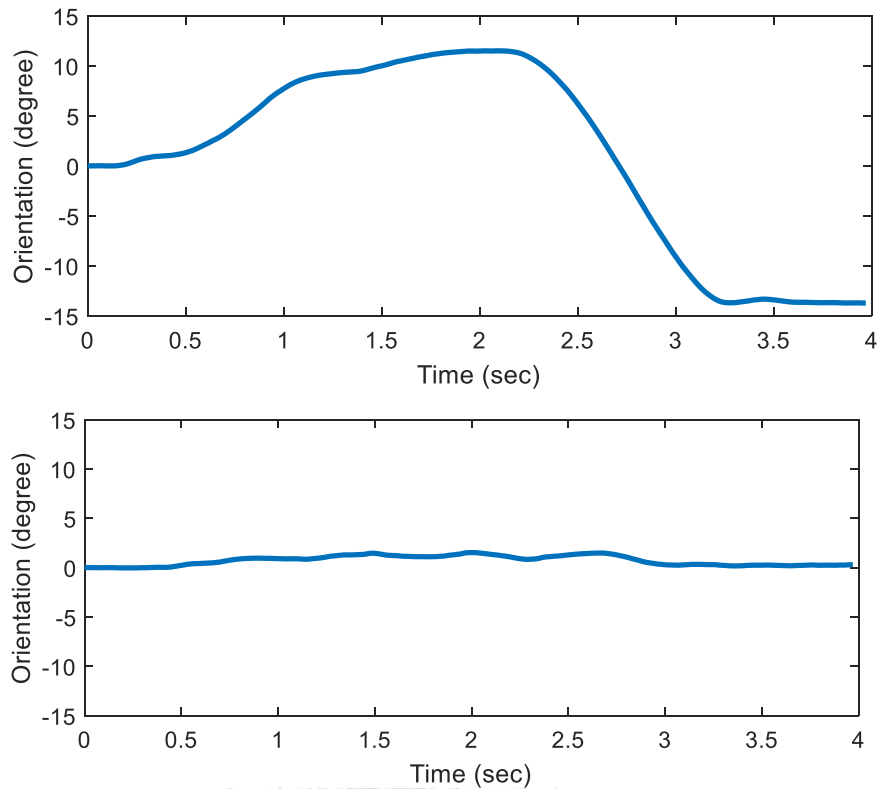
รูปที่ 25 กราฟตำแหน่ง, ความเร็ว, และความเร่งของระบบควบคุมแบบ PD



รูปที่ 26 กราฟตำแหน่ง, ความเร็ว, และความเร่งของระบบควบคุม Simple traction control



รูปที่ 27 ภาพหุ่นยนต์ขณะเคลื่อนที่ด้วยระบบควบคุมแบบ PD (บน)  
และ Simple traction control (ล่าง)



รูปที่ 28 กราฟทิศทางการหันหน้าของระบบควบคุมแบบ PD (บน)  
และ Simple traction control (ล่าง)

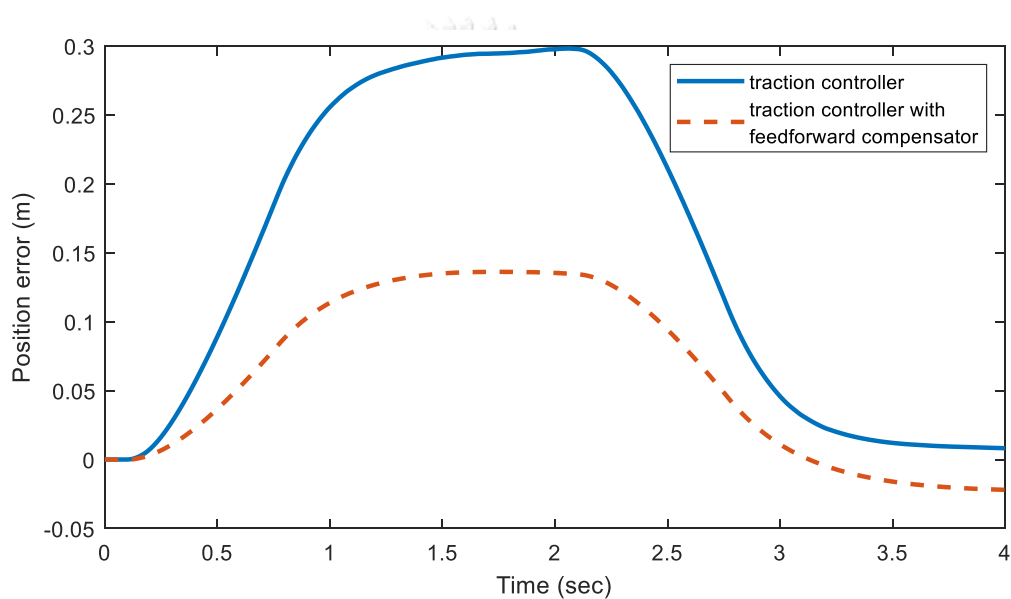
เมื่อใช้ระบบควบคุม PD หุ่นยนต์มีการไถลทั้งตอนเริ่มและสิ้นสุดการเคลื่อนที่ สังเกตได้จาก การที่หุ่นยนต์มีการส่าย ซึ่งเกิดจากการที่ล้อทั้งสองข้างมีแรงกดลากไม่เท่ากัน

เมื่อเปลี่ยนไปใช้ระบบควบคุม Simple traction control พบว่าการไถลลดลงอย่างมากจน สังเกตไม่ได้ด้วยตาเปล่า

### 5.3 การทดสอบการชดเชยแบบมีวิถีไปหน้า (Feedforward compensator with traction control)

การทดลองนี้จัดทำขึ้นเพื่อที่จะปรับปรุง Simple traction control ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งในขณะเคลื่อนที่สูง ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้สามารถทำให้น้อยลงได้โดยการนำการชดเชยแบบมีวิถีไปหน้า (Feedforward compensation) เข้ามาใช้ร่วมกับระบบควบคุมเดิมซึ่งเป็นแบบป้อนกลับเพียงอย่างเดียว

จากผลการทดลองในรูปที่ 29 การชดเชยแบบมีวิถีไปหน้าสามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งได้อย่างมากและยังสามารถป้องกันการไหลได้



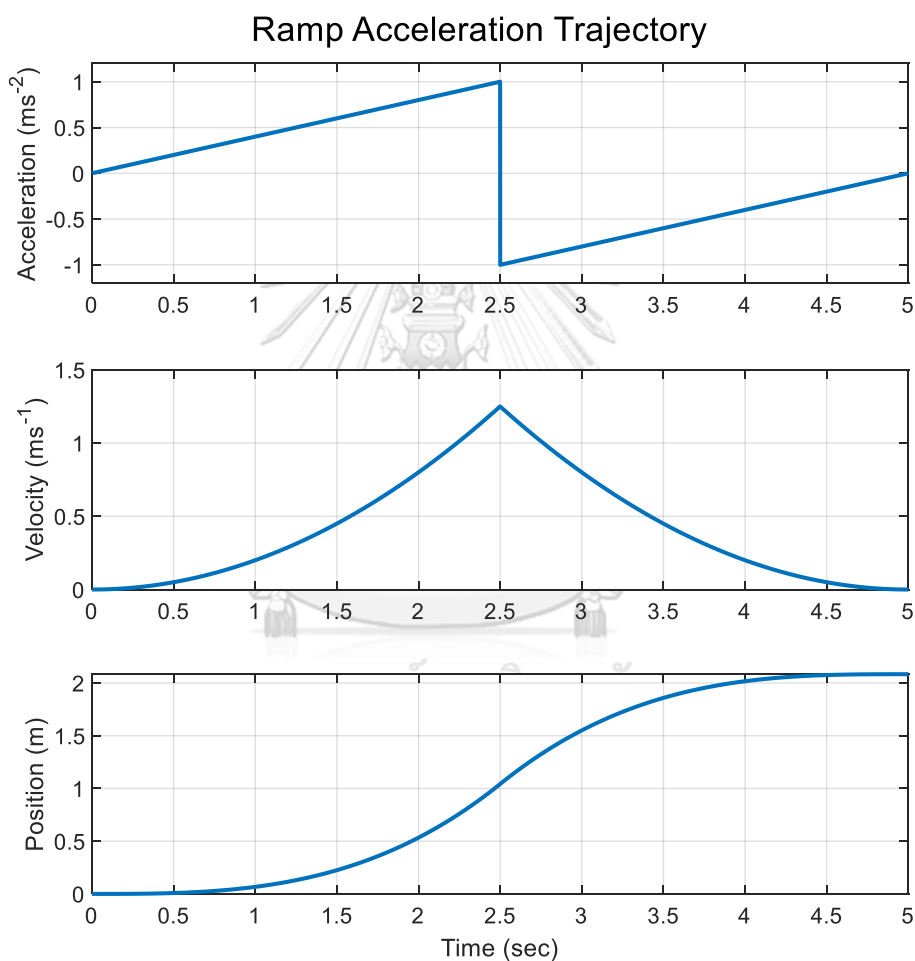
รูปที่ 29 กราฟค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งของระบบควบคุมที่มีการชดเชยแบบมีวิถีไปหน้าและไม่มี การชดเชยแบบมีวิถีไปหน้า



#### 5.4 การประมาณค่าแรงฉุดลากสูงสุดของหุ่นยนต์

การทดลองนี้นำเสนอกระบวนการหาแรงฉุดลากสูงสุดของหุ่นยนต์สองล้อ ซึ่งจะมีกระบวนการดังนี้

การทดลองเริ่มโดยการให้หุ่นยนต์วิ่งด้วยวิถีความเร่งแบบแรมป์ (Ramp acceleration profile trajectory) ตามรูปที่ 30 ซึ่งจะเริ่มวิ่งจากความเร่ง  $0 \text{ ms}^{-2}$  จนไปถึง  $1 \text{ ms}^{-2}$  โดยใช้ Simple traction control และบันทึกค่าทิศการหันหน้าของหุ่นยนต์ (Yaw angle), ตำแหน่งของล้อ, ความเร็วของล้อ, และความเร่งของล้อ



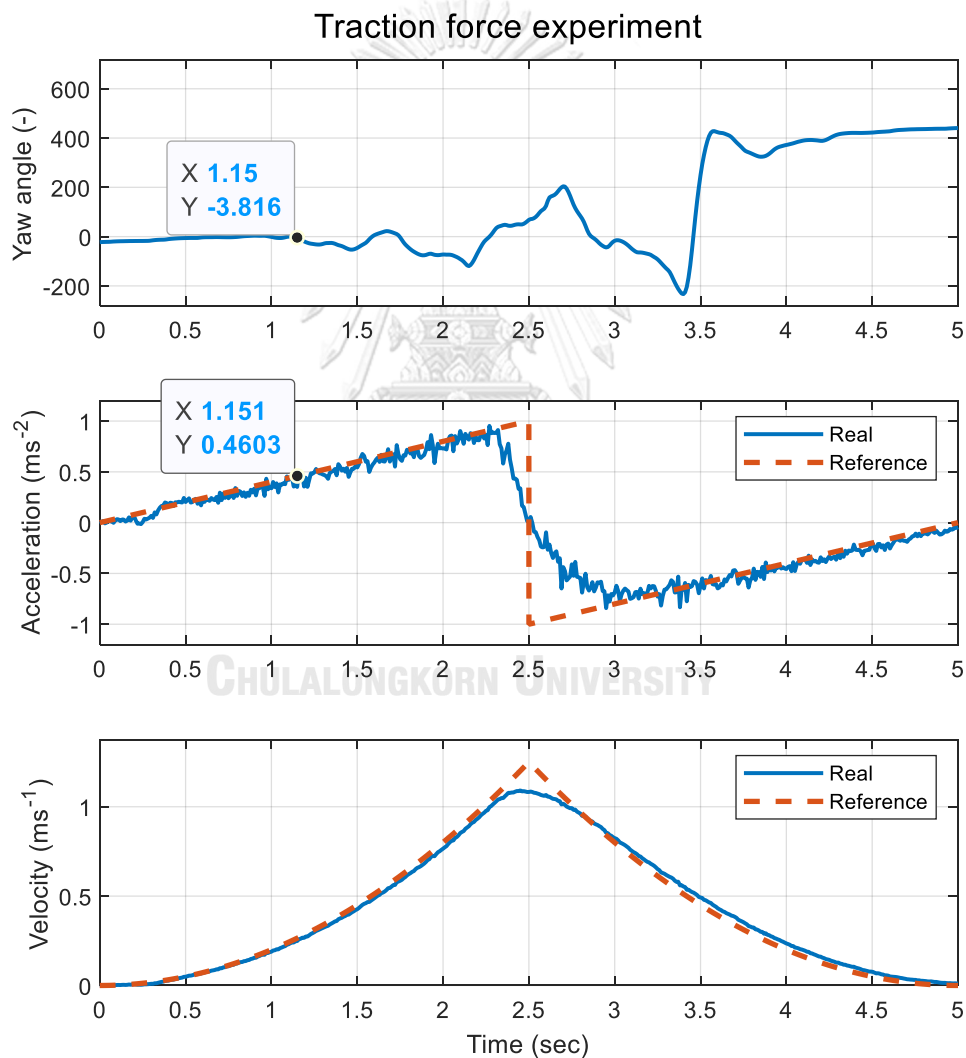
รูปที่ 30 กราฟโปรไฟล์วิถีความเร่งแบบแรมป์

ทิศการหันหน้าของหุ่นยนต์ได้ถูกบันทึกด้วยเครื่องมือตรวจวัดความเร่งเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุม GY-86 ซึ่งจะสามารถนำค่าที่บันทึกไปคำนวณการส่ายของหุ่นยนต์สองล้อเมื่อเกิดการไถล ค่าความเร่งของล้อถูกคำนวณมาจากค่าความเร็วของล้อ ค่าความเร่งนี้จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาความเร่งสูงสุดที่หุ่นยนต์สามารถวิ่งได้บนพื้นนั้น ๆ

ผลการทดลองในรูปที่ 31 ได้มาด้วยการนำหุ่นยนต์ไปวิ่งบนพื้นหินขัดมันด้วยวิธีความเร่งแบบ แรม หุ่นยนต์เริ่มไถ่ตั้งแต่วันที่เวลาประมาณ 1.15 วินาที สังเกตได้จากมุมทิศการหันหน้าของหุ่นยนต์ที่ วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง GY-86 ซึ่งตรงกับความเร็วประมาณ  $0.46 \text{ ms}^{-2}$

ดังนั้นจากการทดลองเราจะสามารถประมาณได้ว่าความเร่งสูงสุดที่หุ่นยนต์สามารถวิ่งได้ด้วย ล้อแบบนี้และบนพื้นหินขัดนี้คือประมาณ  $0.46 \text{ ms}^{-2}$  ซึ่งค่าแรงฉุดลากสูงสุดสามารถหาได้จากการนำ ค่าความเร่งสูงสุดนี้มาคูณกับน้ำหนักของหุ่นยนต์ตามสมการที่ 3.10

ทั้งนี้ค่าความเร่งสูงสุดและค่าแรงฉุดลากสูงสุดจะขึ้นกับสภาพพื้นผิวที่หุ่นยนต์วิ่งและสภาพ ล้อของหุ่นยนต์ ฝุ่นและความสึกของยางต่างมีผลกับการไถ่ทั้งสิ้น



รูปที่ 31 กราฟผลการทดลองหาแรงฉุดลากสูงสุด

### 5.5 การเคลื่อนที่บนทางลาดชัน

การทดลองนี้จัดทำขึ้นเพื่อทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ขึ้นและลงทางลาดชันที่มีความชันประมาณ  $9^\circ$  โดยใช้ระบบควบคุม Simple traction control และมีวิธีการเคลื่อนที่ตามโปรไฟล์ความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมู ใช้ความเร่งที่  $1.0 \text{ ms}^{-2}$  และความเร็วสูงสุด  $0.8 \text{ ms}^{-1}$

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่าหุ่นยนต์นี้สามารถเคลื่อนที่ขึ้นและลงทางชันนี้ได้ พร้อมทั้งทำความเร่งและหยุดบนทางชันได้โดยที่ไม่ลื่น



รูปที่ 32 หุ่นยนต์ขณะเคลื่อนที่ขึ้น (ซ้าย) และลง (ขวา) ทางชันประมาณ  $9^\circ$



รูปที่ 33 หุ่นยนต์ขณะเคลื่อนที่ลงทางชัน (มุมมองด้านข้าง)

## บทที่ 6

### สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์เรื่องระบบควบคุมแบบปรับตัวได้พร้อมการควบคุมแรงฉุดลากสำหรับหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อนี้ มีวัตถุประสงค์แรกคือการพัฒนาและทดสอบระบบควบคุมที่มีความสามารถในการรักษาแรงฉุดลากและป้องกันการไถล วัตถุประสงค์ที่สองคือพัฒนาและทดสอบกระบวนการประมาณค่าแรงฉุดลากบนพื้นผิวต่าง ๆ และได้มีการทำการทดลองทั้งหมด 5 การทดลอง คือ การทดสอบการไถลบนหุ่นยนต์สองล้อด้วยระบบควบคุม PD, การทดสอบการไถลบนหุ่นยนต์สองล้อด้วยระบบควบคุม Simple traction control, การทดสอบการไถลบนหุ่นยนต์สองล้อด้วยระบบควบคุม Simple traction control พร้อมการชดเชยแบบมีวิถีไปหน้า, การทดลองเพื่อประมาณค่าแรงฉุดลากสูงสุด, และการทดลองสุดท้ายคือการทดลองการเคลื่อนที่บนทางลาดชัน

กระบวนการทำงานวิจัยเริ่มจากการศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ไถลและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแรงฉุดลากซึ่งมีหลากหลายรูปแบบ ต่อมาจึงได้นำความรู้จากการศึกษาระบบควบคุมมาพัฒนาระบบควบคุมแรงฉุดลากแบบใหม่มาใช้ทำการทดสอบในหุ่นยนต์สองล้อ เมื่อได้ระบบควบคุมแรงฉุดลากเรียบร้อยแล้ว จึงได้นำการชดเชยแบบมีวิถีไปหน้าเข้ามาใช้ในระบบควบคุมเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง และสุดท้ายจึงพัฒนาและทดสอบกระบวนการประมาณค่าแรงฉุดลากสูงสุด

การพัฒนาระบบควบคุมแรงฉุดลากแบบใหม่เริ่มจากการเลือกระบบควบคุมแรงฉุดลาก MFC มาผ่านการแปลงแซดเพื่อเตรียมพร้อมในการเขียนสมการระบบควบคุมลงในโปรแกรม แล้วตัดพจน์ที่มีเวลา Sampling time ออกเนื่องจากมีค่าน้อย ส่งผลให้พจน์ที่มีตัวแปรทางพลวัตส่วนใหญ่หายไป เหลือเพียงค่าเกนที่เอาไว้ทำหน้าที่ปรับความสามารถในการป้องกันการไถล ซึ่งผลการทดสอบพบว่าระบบควบคุม Simple traction control นี้สามารถป้องกันการไถลได้เมื่อนำมาเทียบกับระบบควบคุมแบบ PD

สามารถสรุปจากผลการทดลองทั้งหมดได้ว่าระบบควบคุมแรงฉุดลาก Simple traction control นั้นสามารถป้องกันการไถลได้ พร้อมทั้งยังสามารถใช้ในกระบวนการประมาณค่าแรงฉุดลากสูงสุดได้อีกด้วย

#### 6.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในอนาคต

ระบบควบคุมแรงฉุดลาก Simple traction control ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นระบบควบคุมที่เรียบเรียงมาจากระบบควบคุมแรงฉุดลาก MFC เท่านั้น ยังมีระบบควบคุมแรงฉุดลากอีกมากมายหลากหลายรูปแบบที่สามารถนำมาใช้ได้

การทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองแค่การเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเพียงเท่านั้น ไม่ได้มีการเลี้ยวแต่อย่างใด ผู้ที่มาพัฒนาต่อสามารถศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการไหลในขณะเลี้ยวหรือในขณะเคลื่อนที่ตามเส้นทางใด ๆ ได้



## บรรณานุกรม

- [1] J.-P. Laumond, S. Sekhavat, and F. Lamiroux, "Guidelines in Nonholonomic Motion Planning for Mobile Robots," vol. 299, 2006, pp. 1-53.
- [2] R. L. Williams, B. E. Carter, P. Gallina, and G. Rosati, "Dynamic model with slip for wheeled omnidirectional robots," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 18, no. 3, pp. 285-293, 2002, doi: 10.1109/TRA.2002.1019459.
- [3] T. Shibata and T. Murakami, "Power-Assist Control of Pushing Task by Repulsive Compliance Control in Electric Wheelchair," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 1, pp. 511-520, 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2146210.
- [4] S. Oh and Y. Hori, "Disturbance Attenuation Control for Power-Assist Wheelchair Operation on Slopes," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 22, no. 3, pp. 828-837, 2014, doi: 10.1109/TCST.2013.2265396.
- [5] K. Fujii and H. Fujimoto, "Traction Control based on Slip Ratio Estimation Without Detecting Vehicle Speed for Electric Vehicle," in *2007 Power Conversion Conference - Nagoya*, 2-5 April 2007 2007, pp. 688-693, doi: 10.1109/PCCON.2007.373040.
- [6] G. A. Magallan, C. H. D. Angelo, and G. O. Garcia, "Maximization of the Traction Forces in a 2WD Electric Vehicle," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 2, pp. 369-380, 2011, doi: 10.1109/TVT.2010.2091659.
- [7] Y. Furukawa, N. Yuhara, S. Sano, H. Takeda, and Y. Matsushita, *A Review of Four-Wheel Steering Studies from the Viewpoint of Vehicle Dynamics and Control*. 1989, pp. 151-186.
- [8] E. Ono, Y. Hattori, Y. Muragishi, and K. Koibuchi, "Vehicle dynamics integrated control for four-wheel-distributed steering and four-wheel-distributed traction/braking systems," *vehicle system dynamics*, vol. 44, no. 2, pp. 139-151, 2006.
- [9] K. Nam, S. Oh, H. Fujimoto, and Y. Hori, "Estimation of sideslip and roll angles of electric vehicles using lateral tire force sensors through RLS and Kalman filter approaches," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 3, pp. 988-

- 1000, 2013.
- [10] S. Oh, K. Kong, and Y. Hori, "Operation state observation and condition recognition for the control of power-assisted wheelchair," *Mechatronics*, vol. 24, no. 8, pp. 1101-1111, 2014.
- [11] J. H. Choi and S. Oh, "Traction Control for Two-Wheel Driven Mobile Robot Driving on Ice," in *2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 13-15 June 2018, pp. 1075-1080, doi: 10.1109/ISIE.2018.8433648.
- [12] Y. Hori, Y. Toyoda, and Y. Tsuruoka, "Traction control of electric vehicle: basic experimental results using the test EV "UOT electric march", " *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 5, pp. 1131-1138, 1998, doi: 10.1109/28.720454.
- [13] D. Yin, S. Oh, and Y. Hori, "A Novel Traction Control for EV Based on Maximum Transmissible Torque Estimation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 6, pp. 2086-2094, 2009, doi: 10.1109/TIE.2009.2016507.
- [14] H. Sado, S. Sakai, and Y. Hori, "Road condition estimation for traction control in electric vehicle," in *ISIE '99. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (Cat. No.99TH8465)*, 12-16 July 1999 1999, vol. 2, pp. 973-978 vol.2, doi: 10.1109/ISIE.1999.798747.
- [15] M. Thianwiboon and V. Sangveraphunsiri, "Traction Control for a Rocker-Bogie Robot with Wheel-Ground Contact Angle Estimation," in *RoboCup 2005: Robot Soccer World Cup IX*, Berlin, Heidelberg, A. Bredenfeld, A. Jacoff, I. Noda, and Y. Takahashi, Eds., 2006// 2006: Springer Berlin Heidelberg, pp. 682-690.
- [16] L. Hyeongcheol and M. Tomizuka, "Adaptive vehicle traction force control for intelligent vehicle highway systems (IVHSs)," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 37-47, 2003, doi: 10.1109/TIE.2002.807677.
- [17] P. Khatun, C. M. Bingham, N. Schofield, and P. H. Mellor, "Application of fuzzy control algorithms for electric vehicle antilock braking/traction control systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 52, no. 5, pp. 1356-1364, 2003, doi: 10.1109/TVT.2003.815922.
- [18] K. Iagnemma and S. Dubowsky, "Traction Control of Wheeled Robotic Vehicles

- in Rough Terrain with Application to Planetary Rovers," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 23, no. 10-11, pp. 1029-1040, 2016, doi: 10.1177/0278364904047392.
- [19] F. Borrelli, A. Bemporad, M. Fodor, and D. Hrovat, "An MPC/hybrid system approach to traction control," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 14, no. 3, pp. 541-552, 2006, doi: 10.1109/TCST.2005.860527.
- [20] C. C. d. Wit and P. Tsiotras, "Dynamic tire friction models for vehicle traction control," in *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.99CH36304)*, 7-10 Dec. 1999 1999, vol. 4, pp. 3746-3751 vol.4, doi: 10.1109/CDC.1999.827937.
- [21] C. Canudas de Wit, H. Olsson, K. J. Astrom, and P. Lischinsky, "A new model for control of systems with friction," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 40, no. 3, pp. 419-425, 1995, doi: 10.1109/9.376053.
- [22] J. P. Pauwelussen, "Chapter Three - Nonsteady-State Tire Behavior," in *Essentials of Vehicle Dynamics*, J. P. Pauwelussen Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015, pp. 75-109.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ไม้มไท่ ตะหฺลัน
วัน เดือน ปี เกิด	7 พ.ค. 2538
สถานที่เกิด	นครราชสีมา
วุฒิการศึกษา	2553 - 2556, ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาเครื่องกล เทคโนโลยีอุตสาหกรรม (เทคนิคไทยเยอรมัน) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 2556 - 2560, ศึกษาในระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2560 - 2563, ศึกษาในระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ แขนงวิชาการควบคุม/พลศาสตร์/การผลิตขั้นสูง ภาควิชาเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผลงานตีพิมพ์	2560, "Recognizing words in Thai Sign Language using flex sensors and gyroscopes" 2560, "Performance enhancement by combining visual clues to identify sign language motions" 2561, "Investigation of Sign Language Recognition Performance by Integration of Multiple Feature Elements and Classifiers" 2562, "A traction controller of a two-wheel mobile robot with feedforward compensator" 2562, "Simple discrete time traction control for a two-wheeled mobile robot"