

การพัฒนาบบเปลี่ยนเลนฉุกเฉินสำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ
ด้วยวิธีการควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า กรณีศึกษา รถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10

ธนโชติ โกลาซ

TNII

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตศึกษา สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2566

DEVELOPMENT OF EMERGENCY LANE-CHANGE MANEUVERS FOR AUTONOMOUS
VEHICLES VIA MODEL PREDICTIVE CONTROL METHOD
A CASE STUDY OF 1:10 SCALED REMOTE-CONTROL CAR

Thanachot Golaz

TNII

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology
Graduate Studies

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2023

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาระบบเปลี่ยนเลนฉุกเฉินสำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติด้วยวิธีการควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า

กรณีศึกษา รถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10

โดย

ธนโชติ โกลาซ

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร.มรรณพ ฟักขาว

บัณฑิตศึกษา สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้มหาวิทยาลัยไทย-ญี่ปุ่นเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิตะพล หุยนันท)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย นิเวศน์รังสรรค์)

..... กรรมการ

(ดร.วัชรินทร์ หนูทอง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร.มรรณพ ฟักขาว)

ธนโชติ โกลาซ : การพัฒนาระบบเปลี่ยนเลนรถเดินสำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติด้วย
วิธีการควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า กรณีศึกษา รถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10. อาจารย์
ที่ปรึกษา : ดร.มรรณพ พักขาว, 110 หน้า.

เทคโนโลยีรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติมีศักยภาพในการเพิ่มความแม่นยำในการขับขี้อย่างมี
นัยสำคัญ และเพิ่มความปลอดภัยบนท้องถนน หนึ่งในคุณสมบัติพื้นฐานของเทคโนโลยีนี้ คือ ระบบ
การเปลี่ยนช่องจราจรรถเดินแบบอัตโนมัติ ซึ่งช่วยให้ยานพาหนะสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้อย่าง
ราบรื่นและปลอดภัย วิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการสร้างวิถีโคจรของยานพาหนะสำหรับการหลบ
หลีกแบบฉุกเฉินที่มีเสถียรภาพและปลอดภัยภายใต้วิถีโคจรที่เหมาะสม โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษา
ตัวแปรที่มีผลต่อการควบคุมเสถียรภาพความเร็วในการเข้าโค้งของแบบจำลองรถยนต์บังคับวิทยุ
ขนาด 1:10 ในระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉินด้วยตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า
(Model Predictive Control: MPC) โดยแบบจำลองจักรยานพลศาสตร์ถูกนำมาใช้ในการจำลอง
พลศาสตร์ยานยนต์ ผ่านการสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม MATLAB & Simulink® โดยสร้างวิถี
โคจรและมุมหันเหชั่วขณะด้วยสมการพหุนามกำลังห้า กำหนดเงื่อนไขการทดลองภายใต้ความเร็วตาม
แนวยาวตั้งแต่ 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที และการกำหนดตัวแปรของสมการวัตถุประสงค์ (Cost
function, J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (MPC) ภายใต้ขอบเขตการควบคุม (Control
horizon) เป็น 20 % ของขอบฟ้าการทำนาย (Prediction horizon) ที่ 15 วินาที พบว่า เงื่อนไขการ
ปรับแต่งตัวแปรของสมการวัตถุประสงค์ที่เหมาะสม ประกอบไปด้วย 1) การกำหนดข้อจำกัดของมุม
บังคับเลี้ยว (u_δ) ตามลักษณะทางกายภาพของยานพาหนะ 2) การปรับแตงน้ำหนักเอาต์พุตของ
ตำแหน่งแนวขวาง (Q_{y_p}) มากกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห (Q_{y_p}) และ 3) การปรับแตงน้ำหนัก
อินพุตของมุมบังคับเลี้ยว (R_{u_δ}) น้อยกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห (Q_{y_p}) แบบ Robust ส่งผล
ให้ตัวควบคุม MPC สามารถรักษาเสถียรภาพของวิถีโคจรอยู่ภายใต้การจำกัดตำแหน่งด้านความ
ปลอดภัย และมีเสถียรภาพในการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางภายใต้การจำกัดความเร็วที่กำหนดได้ จากผล
วิจัยสรุปได้ว่า การศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ช่วยให้ทราบถึงปัจจัยที่
ส่งผลต่อการควบคุมเสถียรภาพความเร็วในการเข้าโค้ง และสามารถขยายขีดความสามารถของการ
ประยุกต์ใช้แบบจำลองจักรยานของแบบจำลองรถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 สำหรับระหว่างการ
เปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉินได้

บัณฑิตศึกษา

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

THANACHOT GOLAZ: DEVELOPMENT OF EMERGENCY LANE-CHANGE MANEUVERS FOR AUTONOMOUS VEHICLES VIA MODEL PREDICTIVE CONTROL METHOD – A CASE STUDY OF 1:10 SCALED REMOTE-CONTROL CAR. ADVISOR: DR. MAHUNNOP FAKKAO, 110 PP.

Autonomous vehicle (AV) technology holds the potential to significantly enhance driving precision and road safety. One of the fundamental features for AV is the emergency lane change that enables a vehicle to evade unexpected obstacles smoothly and safely. This thesis focuses on the development of stable and safe vehicle trajectory planning for emergency maneuvers under appropriate lane change conditions. The objective is to study the variables affecting the cornering speed stability control of a 1:10 scaled remote-control car model during emergency lane changes using Model Predictive Control (MPC). A bicycle model was employed to simulate the vehicle dynamics within a MATLAB & Simulink ®. Trajectories and transient steering angles are generated using a quintic polynomial equation. Experimental conditions are set for longitudinal speeds ranging from 0.5 - 2 m/s, and the cost function parameters of the MPC controller are determined under a control horizon of 20% of the prediction horizon of 15 seconds. The results indicate that appropriate tuning of the cost function parameters, including 1) Setting the steering angle constraints (u_δ) in accordance with the physical characteristics of the vehicle, 2) Prioritizing the weight of lateral position output (Q_{y_y}) over steering angle output (Q_{y_ψ}), and 3) Prioritizing steering angle input weight (R_{u_δ}) lower than steering angle output weight (Q_{y_ψ}) in a robust manner, enables the MPC controller to maintain trajectory stability within safety position constraints and achieve stable obstacle avoidance under specified speed limits. The findings suggest that investigating the factors influencing the MPC controller provides insights into controlling cornering speed stability and extends the applicability of the bicycle model of a 1:10 scale radio-controlled car model for emergency lane changes.

Graduate Studies

Major of Engineering of Technology

Academic Year 2023

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนวิจัย Dr. Noriaki Kano สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ขอกราบขอบพระคุณที่สนับสนุนทุนในการทำวิจัย เพื่อการศึกษาวិทยานิพนธ์ในครั้งนี้

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากอาจารย์ที่ปรึกษา ดร.มพรรณพ พักขาว ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัย และแนะนำแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง และขอกราบขอบพระคุณสำหรับการสนับสนุนจาก อาจารย์ฐิติรัตน์ วิวิธเกยุวงศ์ ดร.วัชรินทร์ หนูทอง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กันติชา กิตติพิรชล อาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น รวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่มีได้กล่าวนามที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ และคอยให้คำแนะนำอันทรงคุณค่าที่เป็นประโยชน์กับงานวิจัย ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ศึกษาไม่มากนักน้อย ซึ่งขอกราบขอบพระคุณ ครอบครัวโกลาซ และเพื่อน ๆ ทุกท่านทั้งผู้ที่กล่าวนามและมีได้กล่าวนาม ที่คอยให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาและสนับสนุนในการทำงาน จนดำเนินงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ธนโชติ โกลาซ

TNI

TAI - NICHU INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ญ
 บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	5
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	5
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	6
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ลำดับชั้นการควบคุมของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ	7
2.2 แบบจำลองยานพาหนะ	8
2.3 การหลบหลีกการเปลี่ยนช่องจราจรฉุกเฉิน	22
2.4 การวางแผนวิถีแบบสมการพหุนามกำลังห้า	24
2.5 ระบบควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า	31
2.6 โครงสร้างการควบคุมของวิทยานิพนธ์	37
3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	39
3.1 วิธีการวิจัย	39
3.2 แบบจำลองยานพาหนะ	40
3.3 การวางแผนวิถี	43
3.4 โปรแกรม MATLAB & Simulink®	48

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	3.5 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า	51
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	60
	4.1 ผลการศึกษาตัวแปรพารามิเตอร์ที่ส่งผลกับตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า	60
	4.2 อภิปรายผลการปรับแต่งตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า	85
5	บทสรุป ข้อเสนอแนะ บทวิจารณ์	88
	5.1 สรุปผลการทดลอง	88
	5.2 ข้อเสนอแนะ	89
	บรรณานุกรม	90
	ภาคผนวก	97
	ภาคผนวก ก. การปรับแต่งตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า	98
	ภาคผนวก ข. การเขียนชุดคำสั่งโปรแกรม MATLAB & Simulink®	104
	ประวัติย่อผู้วิจัย	110

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในอัลกอริทึมการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่	23
2.2 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในอัลกอริทึมการควบคุม	29
3.1 พารามิเตอร์ของรถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10	41
3.2 การกำหนดตัวแปรขอบเขตการควบคุม (Control Horizon: N_c)	54
3.3 การทดลองที่ 1 ศึกษาตัวแปรข้อจำกัดอินพุตในตัวควบคุม MPC 1 – MPC 2	56
3.4 การทดลองที่ 2 ศึกษาตัวแปรน้ำหนักเอาต์พุตในตัวควบคุม MPC 2 – MPC 3	57
3.5 การทดลองที่ 3 ศึกษาตัวแปรน้ำหนักอินพุตในตัวควบคุม MPC 4 – MPC 6	58
4.1 ค่า RMSE การวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ในตัวควบคุม MPC 1 – MPC 2	72
4.2 ค่า RMSE การวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ในตัวควบคุม MPC 2 – MPC 3	76
4.3 ค่า RMSE การวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ในตัวควบคุม MPC 4 – MPC 6	85
4.4 ค่า RMSE การวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ในตัวควบคุม MPC 2 และ MPC 6	86



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ระดับการขับเคลื่อนอัตโนมัติ SAE J3016™	2
1.2 เทคโนโลยีระบบความปลอดภัยอัจฉริยะในรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ	3
1.3 ขอบเขตการทำงานวิจัย	6
2.1 ลำดับขั้นตอนการควบคุมของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ	8
2.2 แกนและการเคลื่อนที่ในระบบพิกัดฉากของยานพาหนะ	9
2.3 แบบจำลองยานพาหนะบนระนาบ $X - Y$	10
2.4 แบบจำลองจักรยานกลศาสตร์	11
2.5 แบบจำลองจักรยานพลศาสตร์	14
2.6 การเคลื่อนที่ตามแนวขวาง แสดงทิศทางของล้อขณะเข้าโค้ง	16
2.7 การวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ (Motion Planning)	19
2.8 ตัวควบคุมการบังคับเลี้ยว (Steering Controller)	20
2.9 พหุนามกำลังห้า โดยมีราก 3 จุดและจุดวิกฤต 4 จุด	24
2.10 เรขาคณิตและกลศาสตร์ของการเปลี่ยนช่องจราจรของยานพาหนะ	25
2.11 สถานการณ์การเปลี่ยนช่องจราจรโดยไม่มียานพาหนะล้อมรอบ	28
2.12 แผนภาพวงจรควบคุมมาตรฐาน	31
2.13 การทำนายอินพุตควบคุมระหว่างช่วงการควบคุม	32
2.14 แผนภาพวงจรควบคุมของแบบจำลองแบบคาดการณ์ล่วงหน้า	32
2.15 กลยุทธ์การทำนายสำหรับปัญหาการปรับให้เหมาะสม	35
2.16 แผนภาพตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของวิทยานิพนธ์	38
3.1 แผนภาพวิธีการวิจัยโดยใช้ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า	40
3.2 ยานพาหนะในแนวพิกัดฉาก	42
3.3 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางในแนวแกน X	42
3.4 รถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 ที่ใช้ในการทดสอบ	43
3.5 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของยานพาหนะ (y)	44
3.6 วิถีโคจรที่ไม่มีข้อจำกัดการจำกัดตำแหน่ง ความเร็วตามยาว $v_x = 0.5$ ถึง 2 เมตรต่อวินาที	44
3.7 วิถีการเคลื่อนที่ภายใต้การจำกัดตำแหน่ง	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของยานพาหนะ (y) ภายใต้การจำกัดตำแหน่ง	46
3.9 ระยะห่างที่ปลอดภัย (Safe Distance)	47
3.10 Driving Scenario Designer ในโปรแกรม MATLAB & Simulink®	48
3.11 ตำแหน่งโดยรวมของยานพาหนะบนระนาบ $X - Y$	48
3.12 วิถีโคจรตามแนวขวาง (y) ต่อเวลา ที่ปราศจากเกณฑ์การปรับวิถีโคจร	50
3.13 มุมหันเหชั่วขณะ (ψ) ต่อเวลา ที่ปราศจากเกณฑ์การปรับวิถีโคจร	50
3.14 ระบบควบคุมแบบวงเปิด	52
3.15 การตอบสนองของแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์	53
3.16 ขอบเขตการควบคุมตัวที่ 1	55
3.17 ขอบเขตการควบคุมตัวที่ 2	55
3.18 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าบนโปรแกรม MATLAB & Simulink®	59
4.1 ตัวควบคุม MPC 1 ที่ความเร็ว 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที	61
4.2 ตัวควบคุม MPC 2 ที่ความเร็ว 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที	62
4.3 ตัวควบคุม MPC 3 ที่ความเร็ว 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที	63
4.4 ตัวควบคุม MPC 4 ที่ความเร็ว 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที	64
4.5 ตัวควบคุม MPC 5 ที่ความเร็ว 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที	65
4.6 ตัวควบคุม MPC 6 ที่ความเร็ว 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที	66
4.7 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 1 ที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที	67
4.8 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 1 ที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที	68
4.9 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 1 ที่ความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที	68
4.10 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 1 ที่ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที	69
4.11 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 2 ที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที	70
4.12 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 2 ที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที	70
4.13 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 2 ที่ความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที	71
4.14 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 2 ที่ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที	71
4.15 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 3 ที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที	74
4.16 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 3 ที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.17	ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 3 ที่ความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที	75
4.18	ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 3 ที่ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที	75
4.19	ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 4 ที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที	77
4.20	ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 4 ที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที	78
4.21	ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 4 ที่ความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที	78
4.22	ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 4 ที่ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที	79
4.23	ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 5 ที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที	80
4.24	ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 5 ที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที	80
4.25	ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 5 ที่ความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที	81
4.26	ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 5 ที่ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที	81
4.27	ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 6 ที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที	82
4.28	ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 6 ที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที	83
4.29	ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 6 ที่ความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที	83
4.30	ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 6 ที่ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที	84

TNI

THAI - NICHU INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เทคโนโลยีรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Autonomous Vehicle: AV) แสดงถึงการปฏิวัติในอุตสาหกรรมยานยนต์โดยการเพิ่มความปลอดภัยของยานพาหนะ ลดปัญหาการจราจรติดขัด และปรับปรุงประสิทธิภาพการขับขี่ [1] ศักยภาพที่สำคัญอย่างหนึ่งของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ คือ การลดอุบัติเหตุทางรถยนต์ที่ทำให้เกิดการเสียชีวิต โดยการพิจารณาว่าผู้ขับขี่ที่เป็นมนุษย์เป็นสาเหตุหลักของข้อผิดพลาด [2] ยานพาหนะเหล่านี้ได้รับการออกแบบมาเพื่อการตรวจจับสนามแวดล้อมที่มีความซับซ้อน และนำทางยานพาหนะโดยใช้การวางแผนวิถี การควบคุมการเคลื่อนที่ และการตัดสินใจโดยการบูรณาการเซนเซอร์ ปัญญาประดิษฐ์ และอัลกอริทึมการควบคุมขั้นสูง ซึ่งเป็นเทคโนโลยีหลัก (Core Technology) ในรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ [3] ที่สามารถบูรณาการเทคโนโลยีทั้งหมดเข้าด้วยกันจนเกิดเป็นระบบปฏิบัติการขับขี่ในรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยสามารถแบ่งระดับการขับขี่อัตโนมัติได้เป็น 6 ระดับ ตามมาตรฐานของสมาคมวิศวกรยานยนต์ของสหรัฐอเมริกา (Society of Automotive Engineer: SAE J3016™) [4] ประกอบไปด้วย 1) ระดับ 0 No Driving Automation 2) ระดับ 1 Driver Assistance และ 3) ระดับ 2 Partial Driving Automation เป็นระดับที่ผู้ขับขี่จะต้องควบคุมรถอย่างต่อเนื่อง และต้องพร้อมที่จะเข้าควบคุมพวงมาลัยเมื่อได้รับการแจ้งเตือน แต่ในส่วนของ SAE J3016™ 4) ระดับ 3 Conditional Driving Automation 5) ระดับ 4 High Driving Automation และ 6) ระดับ 5 Full Driving Automation เป็นระดับที่ระบบควบคุมในรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถขับเคลื่อนได้ด้วยตัวเองปราศจากการควบคุมการขับขี่จากมนุษย์ แต่การขับขี่ระดับ 3 และ 4 มีเงื่อนไขข้อจำกัดของระบบควบคุมอัตโนมัติ ในขณะที่ระดับ 5 เป็นระดับที่ระบบสามารถทำงานได้ในทุกสภาพแวดล้อม [4] ซึ่งระดับการขับขี่อัตโนมัติจะสามารถเพิ่มขึ้นได้จากความสามารถในการประมวลผล และควบคุมของระบบรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 1.1



SAE J3016™ LEVELS OF DRIVING AUTOMATION™

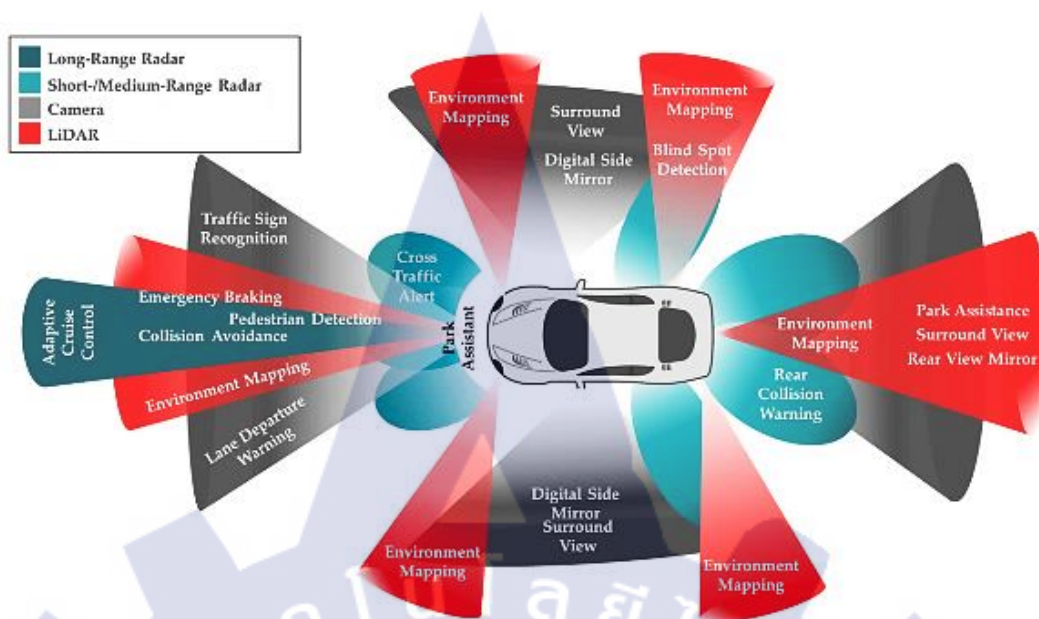
Learn more here: [sae.org/standards/content/j3016_202104](https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104)

Copyright © 2021 SAE International. The summary table may be freely copied and distributed AS-IS provided that SAE International is acknowledged as the source of the content.

	SAE LEVEL 0™	SAE LEVEL 1™	SAE LEVEL 2™	SAE LEVEL 3™	SAE LEVEL 4™	SAE LEVEL 5™
What does the human in the driver's seat have to do?	You are driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering			You are not driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in “the driver’s seat”		
	You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			When the feature requests, you must drive	These automated driving features will not require you to take over driving	
Copyright © 2021 SAE International.						
	These are driver support features			These are automated driving features		
What do these features do?	These features are limited to providing warnings and momentary assistance	These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver	These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met	This feature can drive the vehicle under all conditions	
Example Features	• automatic emergency braking • blind spot warning • lane departure warning	• lane centering OR • adaptive cruise control	• lane centering AND • adaptive cruise control at the same time	• traffic jam chauffeur	• local driverless taxi • pedals/steering wheel may or may not be installed	• same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions

รูปที่ 1.1 ระดับการขับขี่อัตโนมัติ SAE J3016™ [4]

ระบบรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ ประกอบไปด้วยการติดตั้งบรรดาเซนเซอร์ต่าง ๆ ไว้รอบคันรถ เช่น 1) เซนเซอร์อัลตราโซนิก (Ultrasonic Sensor) 2) เซนเซอร์เรดาร์ (RADAR) 3) ไลดาร์ (LiDAR) และ 4) กล้อง (Camera) มาบูรณาการจนเกิดการรวมสัญญาณเซนเซอร์ (Sensor Fusion) เพื่อการตรวจจับสภาพแวดล้อมที่มีความซับซ้อนในระหว่างการขับขี่และประมวลผลสร้างวิถีการเดินทางของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ ทำให้เกิดเทคโนโลยีระบบช่วยเหลือผู้ขับขี่ขั้นสูง (Advanced Driver Assistance Systems: ADAS) ที่ถูกกำหนดให้เป็นระบบความปลอดภัยอัจฉริยะในรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ [5] ดังแสดงในรูปที่ 1.2 เช่น 1) ระบบควบคุมความเร็วแบบรักษาระยะห่างอัตโนมัติ (Adaptive Cruise Control System) 2) ระบบเตือนมุมอับสายตา (Blind Spot Detection System) 3) ระบบควบคุมเสถียรภาพการทรงตัว (Electronic Stability Control) และ 4) ระบบช่วยเปลี่ยนช่องจราจร (Lane Change Assist System) เป็นต้น



รูปที่ 1.2 เทคโนโลยีระบบความปลอดภัยอัจฉริยะในรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ [5]

โดยทั่วไป ระบบรถยนต์ เป็น ระบบแบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (Multiple-Input and Multiple-Output, MIMO) ซึ่งประกอบด้วยอินพุตเป็นการเหยียบคันเร่ง เหยียบเบรก และการหมุนพวงมาลัย เพื่อให้ระบบรถยนต์ประมวลผลและเอาต์พุตเป็น ทิศทางการเคลื่อนที่ และความเร็วของยานพาหนะ เป็นต้น สำหรับลักษณะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในสภาพการจราจรจะประกอบไปด้วยการเปลี่ยนช่องจราจร การแซง การรักษาระยะห่าง และการหลบหลีกในสถานการณ์ฉุกเฉิน แม้ว่าระบบช่วยเหลือผู้ขับขี่ขั้นสูง จะมีความก้าวหน้าในการเพิ่มความปลอดภัย และหลีกเลี่ยงปัญหาอุบัติเหตุบนท้องถนนได้อย่างมาก แต่การทำงานแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบในสถานการณ์จริงยังคงมีความท้าทาย เช่น การเปลี่ยนช่องจราจรอย่างไม่สมเหตุสมผลซึ่งส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุ และทำให้สภาพการจราจรติดขัด ดังนั้น การวางแผนวิธีการเคลื่อนที่ของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติจึงมีส่วนช่วยปรับปรุงความปลอดภัยของพฤติกรรมการเปลี่ยนช่องจราจรฉุกเฉินได้อย่างปลอดภัย [6]

การวางแผนวิธีการเคลื่อนที่ (Trajectory Planning) เป็นการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติที่ปลอดภัยและไม่เกิดการชนทั้งในกรณีของการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ หรือ การหลบหลีกของยานพาหนะ เช่น การเปลี่ยนช่องจราจรฉุกเฉินบนทางหลวง [7] เป็นต้น ในการวางแผนวิธีการเคลื่อนที่ของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัตินั้นจำเป็นต้องพิจารณาหลายปัจจัย อาทิเช่น การออกแบบวิธีการเคลื่อนที่เพื่อหลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วยความสมการเส้นโค้ง การหาขีดจำกัดของยานพาหนะเชิงพลศาสตร์ภายใต้ความเร็วคงที่ หรือความเร็วสูงสุด และประสิทธิภาพของการคำนวณสำหรับสร้างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในการประเมินสภาพแวดล้อมของถนน เพื่อสร้าง

วิธีการเปลี่ยนช่องจราจรที่ปลอดภัยและราบรื่น พร้อมกับความสามารถในการควบคุมเสถียรภาพของยานพาหนะตลอดการเคลื่อนที่ได้ตามวิธีการเคลื่อนที่

การออกวิธีการเคลื่อนที่ด้วยสมการเส้นโค้งสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่น การสร้างสมการเส้นโค้งวงกลม (Circular curves) การสร้างเส้นโค้งความเร่งสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Acceleration Curves) การสร้างเส้นโค้งแบบฮาร์โมนิก (Harmonic Curves) และการสร้างเส้นโค้งด้วยสมการพหุนาม (Polynomial curves) โดยจากงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับเส้นโค้งวิถี ได้ระบุว่าเส้นโค้งพหุนามมักใช้ศึกษาในการเปลี่ยนช่องจราจร โดยเฉพาะการใช้เส้นโค้งพหุนามกำลังห้า (Quintic Polynomials Curves) ในการสร้างวิธีการเปลี่ยนช่องจราจร แสดงวิธีการเคลื่อนที่มีความต่อเนื่องและราบรื่น ซึ่งรับรองว่าไม่มีการชนกันและวางแผนวิถีที่เป็นไปได้แบบพลศาสตร์ยานยนต์ อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ยังมีข้อจำกัด เช่น การสมมติความเร็วคงที่สำหรับยานพาหนะที่ศึกษา และความซับซ้อนในการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการแก้สมการไม่เชิงเส้นไปพร้อม ๆ กับการปรับวิธีการเคลื่อนที่ของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติที่เหมาะสมระหว่างการเคลื่อนที่ของตัวยานพาหนะ ซึ่งอาจเป็นปัญหาสำหรับการใช้งานตามเวลาจริง [8]

ในการแก้ปัญหาการคำนวณวิธีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่เหมาะสม สามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้ การควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่อาศัยการบูรณาการแบบจำลองปริภูมิสถานะ (State Space Model) ของระบบควบคุมร่วมกับตำแหน่งอ้างอิงเป้าหมายที่แน่นอนในการทำนายการสถานะ ส่งผลให้สามารถวางแผนวิธีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะตามเวลาจริง [9] ประกอบกับ สามารถจัดการกับระบบแบบหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (MIMO) ได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบดั้งเดิมอย่างระบบการควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (Proportional-Integral-Derivative: PID) เนื่องจากสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมโดยไม่ต้องมีการเพิ่มพารามิเตอร์ที่ซับซ้อนเข้าไป [10] และ มีความสามารถในการจัดการกับการคาดการณ์ในอนาคตของระบบได้อย่างแม่นยำและมีความยืดหยุ่นในการปรับความเร็วในการคำนวณและลดเวลาการดำเนินงานให้เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบควบคุม [11] ส่งผลให้ควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (MPC) เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในระบบรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ เพื่อให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ต้องการในป้องกันการชนกันหรือสิ่งกีดขวางได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตาม การใช้ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (MPC) ในการควบคุมการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉินของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติยังมีข้อจำกัด เช่น การคำนวณที่ใช้เวลานาน ดังนั้น เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (MPC) ในการควบคุมตามแนวขวางของยานพาหนะได้อย่างต่อเนื่อง จำเป็นต้องศึกษาการเพิ่มความแม่นยำ การลดเวลาในการคำนวณ และปรับให้เหมาะสมกับสถานการณ์การขับขี่และการเปลี่ยนแปลงของสภาพถนนต่าง ๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด [12]

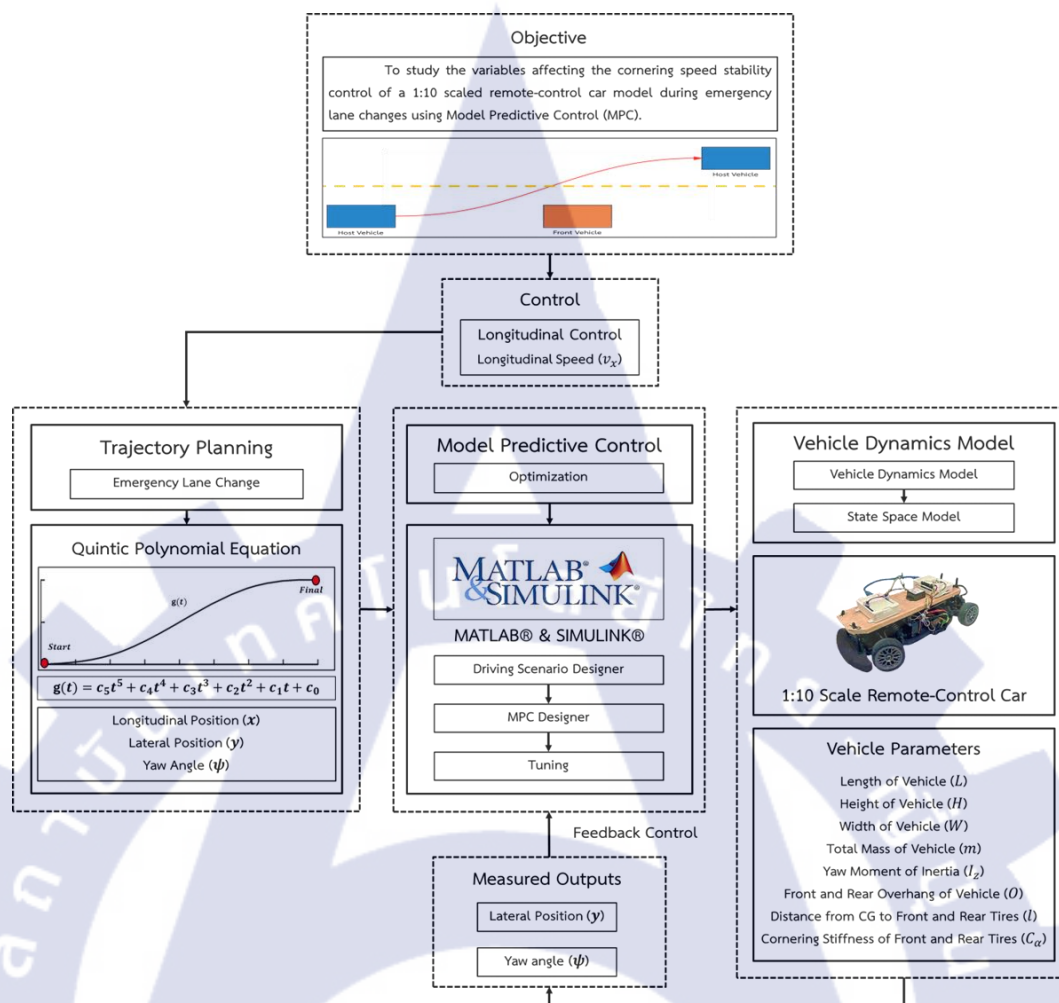
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการควบคุมเสถียรภาพความเร็วในการเข้าโค้งของแบบจำลองรถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 ในระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉินด้วยตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC)

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control) เมื่อประยุกต์ใช้กับแบบจำลองปริภูมิสถานะ (State Space Model) ของสมการแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ (Vehicle Dynamics Model) ร่วมกับการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะด้วยสมการพหุนามกำลังห้า (Quintic Polynomial Equations) ผ่านการสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม MATLAB & Simulink® ดังแสดงในรูปที่ 1.3 โดยพิจารณาบนเงื่อนไขต่อไปนี้

- 1) ข้อมูลแบบจำลองรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ มาจากรถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10
- 2) กำหนดการเลี้ยวโค้งของยานพาหนะมีเฉพาะแรงตามแนวยาว (Longitudinal Force) และ แรงตามแนวขวาง (Lateral Force) บนระนาบตามระบบพิกัดฉาก และเกิดโมเมนต์หันเห (Yaw Moment) เท่านั้น จึงทำให้สามารถลดรูปสมการพลศาสตร์ยานยนต์เหลือเป็นแบบจำลองจักรยานเชิงเส้น (Linear Bicycle Model) ได้
- 3) กำหนดให้ตัวแปรต้นเป็นวิถีโค้งที่สร้างขึ้นด้วยสมการพหุนามกำลังห้า โดยกำหนดให้แบบจำลองยานพาหนะเคลื่อนที่ในทางตรงและต้องหักหลบยานพาหนะที่จอดกีดขวางในช่องจราจร 1 คัน ด้วยการหักเลี้ยวทางซ้ายเพื่อเปลี่ยนช่องจราจรทางเดียว (Single Lane Change) ภายใต้ความเร็วต้นของของแบบจำลองรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติตั้งแต่ 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 1.3 ขอบเขตการทำงานวิจัย

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำนายของแบบจำลองแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (MPC) ในการประยุกต์ใช้กับระบบการควบคุมพลศาสตร์ยานยนต์ อาทิเช่น อิทธิพลของความเร็วของยานพาหนะ และอิทธิพลของการปรับแต่งตัวแปรของสมการวัตถุประสงค์ (Cost function, J) ของตัวควบคุมที่แตกต่างกัน เพื่อแสดงถึงความเสถียรและความคงทนในการปรับแต่งตัวควบคุมที่เหมาะสมในสถานการณ์การเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลำดับชั้นการควบคุมของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ

ความปลอดภัยและประสิทธิภาพการทำงานของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติขึ้นอยู่กับลำดับชั้นการควบคุม (Hierarchy of Control) ที่ครอบคลุมการทำงานของระบบอัตโนมัติทุกระดับ ลำดับชั้นนี้กำหนดขอบเขตของการทำงานของงานอัตโนมัติ ตั้งแต่ระบบที่ผู้ขับขี่ต้องควบคุมอยู่เสมอ (ระดับ 0) จนถึงระบบการขับเคลื่อนอัตโนมัติเต็มรูปแบบที่ขับเคลื่อนโดยปราศจากการควบคุมของมนุษย์ โดยลำดับชั้นการควบคุมถือเป็น ถือเป็นกรอบการศึกษาทั่วไปที่ใช้ในการวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับรถยนต์อัตโนมัติ [13 - 17] รูปที่ 2.1 แสดงลำดับชั้นการควบคุมของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติในวิทยานิพนธ์นี้ที่ประกอบไปด้วยระดับชั้นการควบคุม 4 ระดับ ดังนี้

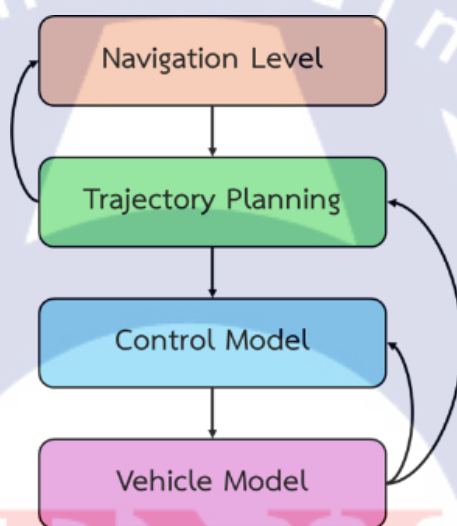
1) ระดับการนำทาง (Navigation Level) คือ ระดับสูงสุดในลำดับชั้นการควบคุมของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ ประกอบด้วย 1) การรับรู้และการบอกตำแหน่ง (Perception and Localization) โดยใช้เซนเซอร์ประเภทต่าง ๆ เช่น เรดาร์ ไลดาร์ อัลตราโซนิก และกล้อง ตรวจสอบสภาพแวดล้อมโดยรอบ เพื่อกำหนดจุดหมายปลายทาง และการเลือกเส้นทางที่ดีที่สุดโดยการพิจารณาสภาพการจราจร 2) การตัดสินใจ (Decision-Making) เช่น การเร่งแซง การเปลี่ยนช่องจราจรบนทางหลวง การหลบหลีกฉุกเฉิน

2) ระดับการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ (Trajectory Planning) คือ ระดับนี้มุ่งเน้นไปที่การสร้างเส้นทางที่ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพสำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ จากการตัดสินใจในระดับการนำทาง ประกอบด้วย 1) การทำนายวิถี (Trajectory Prediction) โดยคาดการณ์การเคลื่อนที่ของยานพาหนะและสิ่งกีดขวางอื่น ๆ โดยรอบ 2) การวางแผนเส้นทาง (Path Planning) เพื่อค้นหาเส้นทางที่เป็นไปได้โดยคำนึงถึงลักษณะของสิ่งกีดขวางและแบบพลศาสตร์ยานยนต์ และ 3) การวางแผนการหลบหลีก (Evasive Maneuver Planning) สำหรับตัดสินใจว่ายานพาหนะจะทำการเลี้ยว หยุด การเร่งความเร็ว และอื่น ๆ อย่างไร

3) ระดับแบบจำลองการควบคุม (Control Model) คือ ระดับที่นำแผนวิถีการเคลื่อนที่มาวิเคราะห์ด้วยตัวควบคุม และปรับแผนวิถีการเคลื่อนที่เพื่อให้รถยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้เหมาะสมและปลอดภัย ระดับนี้เกี่ยวข้องกับการควบคุมพลศาสตร์ยานยนต์ของยานพาหนะ เช่น 1) การควบคุมความเร็ว 2) การควบคุมพวงมาลัย 3) การควบคุมการเบรก และ 4) การจัดการสภาพถนนต่าง ๆ เช่น ทางโค้ง ทางลาดชัน และสภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวย

4) ระดับแบบจำลองยานพาหนะ (Vehicle Model) คือ ระดับที่พิจารณาคุณลักษณะเฉพาะและความสามารถของรถยนต์อัตโนมัติเพื่อเปลี่ยนคำสั่งควบคุมให้เป็นการเคลื่อนที่ของรถยนต์ภายใต้ข้อจำกัดทางกายภาพในรูปของแบบจำลองปริภูมิสถานะ เช่น ขนาด น้ำหนัก สมรรถนะเครื่องยนต์ ระบบเบรก และการยึดเกาะของยาง

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาในระดับการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ ไปจนถึงระบบแบบจำลองยานพาหนะ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้รถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างปลอดภัยและราบรื่น โดยในส่วนถัดไปจะเป็นการอธิบายถึงการสร้างแบบจำลองทางพลศาสตร์ของยานพาหนะ (Vehicle Dynamics Model) การสร้างแผนวิถีการเคลื่อนที่ด้วยสมการพหุนามกำลังห้า (Quintic Polynomial Equations) และการสร้างระบบควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control)



รูปที่ 2.1 ลำดับขั้นตอนการควบคุมของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ

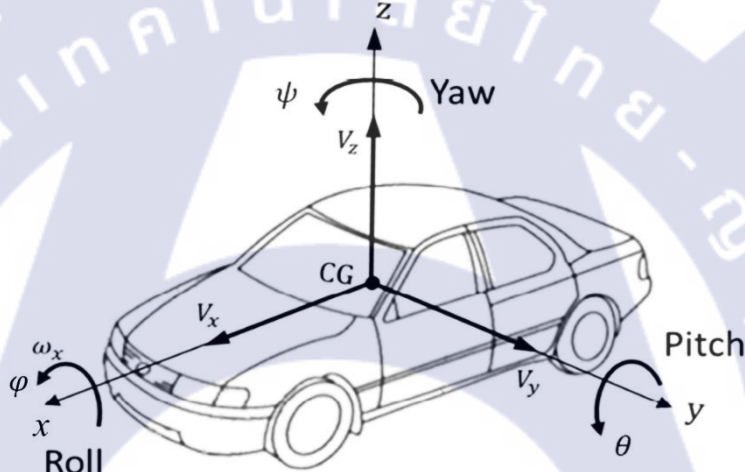
2.2 แบบจำลองยานพาหนะ

แบบจำลองยานพาหนะเป็นองค์ประกอบสำคัญในลำดับขั้นตอนการควบคุมที่จำเป็นสำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยระดับความซับซ้อนของแบบจำลองยานพาหนะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ โดยทั่วไปมีการใช้แบบจำลองยานพาหนะสามประเภท ประกอบด้วย 1) แบบจำลองยานพาหนะเชิงเส้น (Linear Dynamic Model) 2) แบบจำลองยานพาหนะไม่เชิงเส้น (Nonlinear Dynamic Model) และ 3) แบบจำลองยานพาหนะหลายตัว (Multibody Dynamic Model) ซึ่งพิจารณาภายใต้เงื่อนไขที่ยานพาหนะต้องประพาดตัวเป็นวัสดุแข็งเกร็ง (Rigid body) โดย

แบบจำลองยานพาหนะแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับคุณลักษณะเฉพาะที่สำคัญดังต่อไปนี้ 1) ระบบพิกัดของยานพาหนะ 2) แบบจำลองจลนศาสตร์ยานยนต์ 3) แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ และ 4) แบบจำลองปริภูมิสถานะ โดยการสร้างแบบจำลองยานพาหนะในงานนี้จะเป็นแบบจำลองยานพาหนะเชิงเส้นซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.1 – 2.2.4 ตามลำดับ

2.2.1 ระบบพิกัดฉากของยานพาหนะ

ระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordination System) เป็นระบบพิกัดของยานพาหนะในการอ้างอิงตำแหน่ง ทิศทาง การเคลื่อนที่ของยานพาหนะ โดยกำหนดให้จุดกำเนิดที่สัมพันธ์กับตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของยานพาหนะ (CG) เพื่อช่วยต่อการนำทางและการควบคุม



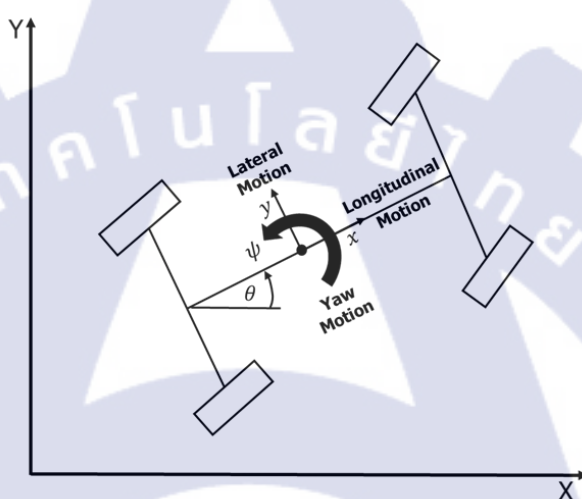
รูปที่ 2.2 แกนและการเคลื่อนที่ในระบบพิกัดฉากของยานพาหนะ

จากรูปที่ 2.2 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในระบบพิกัดฉาก โดยระบบพิกัดฉากมีระดับองศาอิสระ (Degree of Freedom: DOF) กล่าวคือ ทิศทางที่วัตถุสามารถเกิดการเคลื่อนที่หรือการหมุนอย่างอิสระที่ทำได้ โดยยานพาหนะที่เคลื่อนที่ในระบบพิกัดฉาก มีระดับความอิสระได้มากถึงหกกระดบ (6-DOF) ดังนี้

- 1) ทิศทางในแกน x สอดคล้องกับทิศทางตามแนวยาวของยานพาหนะ
- 2) ทิศทางในแกน y สอดคล้องกับทิศทางตามแนวขวางของยานพาหนะ
- 3) ทิศทางในแกน z สอดคล้องกับทิศทางตามแนวตั้งของยานพาหนะ
- 4) การโคลง (Rolling, φ) สอดคล้องกับการหมุนรอบแกน x
- 5) การกระดก (Pitching, θ) สอดคล้องกับการหมุนรอบแกน y

6) การหันเห (Yawing, ψ) สอดคล้องกับการหมุนรอบแกน Z

ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของยานพาหนะโดยไม่สูญเสียเสถียรภาพทางโค้ง สามารถตั้งสมมติฐานให้ล้อของยานพาหนะทั้งสิ้นไม่มีการยกขึ้นจากพื้น กล่าวคือ การเคลื่อนที่ของยานพาหนะสามารถพิจารณาให้ไม่เกิดการโคลง (Rolling) การกระดก (Pitching) และไม่เกิดการเคลื่อนที่ตามแกน Z ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในระบบพิกัดฉากสามารถลดรูปเป็นการเคลื่อนที่บนระนาบ $X - Y$ ในทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวยาวและตามแนวขวางของยานพาหนะ และเกิดการหันเห (Yawing) เท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.3



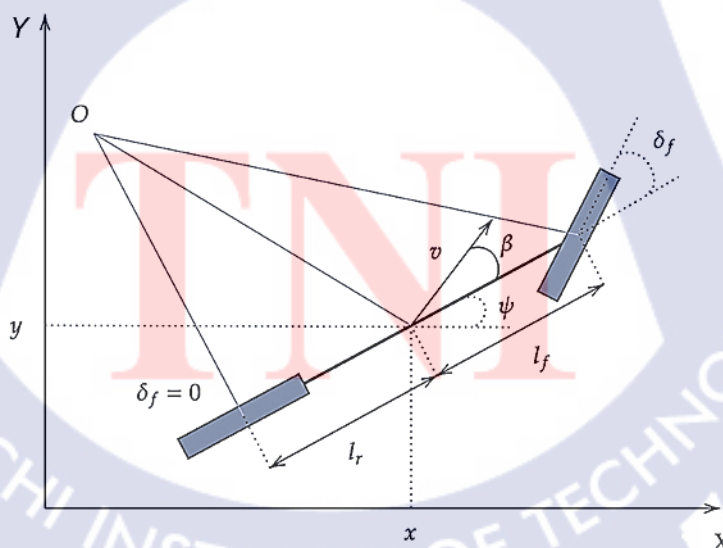
รูปที่ 2.3 แบบจำลองยานพาหนะบนระนาบ $X - Y$ [18]

แบบจำลองยานพาหนะบนระนาบ $X - Y$ ในระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinate System) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ใช้สำหรับการตรวจสอบพลศาสตร์ยานยนต์ของการเคลื่อนที่ตามแนวขวาง (Lateral Vehicle Dynamics) [18] ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ สมมติฐานว่าการเลี้ยวโค้งของยานพาหนะมีเฉพาะแรงตามแนวยาว (Longitudinal Force) และแรงตามแนวขวาง (Lateral Force) บนระนาบตามระบบพิกัดฉาก และเกิดโมเมนต์หันเห (Yaw Moment) เท่านั้น จึงทำให้สามารถลดรูปสมการพลศาสตร์ยานยนต์เหลือเป็นแบบจำลองจักรยานเชิงเส้น (Linear Bicycle Model) ได้ ทำให้ง่ายต่อการพิจารณา เนื่องจากสมการแบบจำลองจักรยานเชิงเส้นสามารถสร้างกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่บ่งบอกถึงสภาพความคล้ายกันระหว่างยานพาหนะแบบย่อยส่วนกับยานพาหนะจริง ทำให้แบบจำลองจักรยานเชิงเส้นเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมในการสร้างสมการพลศาสตร์ นอกจากนี้ งานวิจัยที่อ้างอิง แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองจักรยานเชิงเส้นมีความคล้ายคลึงกับพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของยานพาหนะจริงอย่างแม่นยำในเงื่อนไขที่กำหนด [19 - 23]

ในวิทยานิพนธ์นี้ แบบจำลองจํายานเชิงเส้น แบ่งการศึกษาออกเป็นแบบจำลองจลนศาสตร์ของการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ (Motion Planning) ที่พิจารณาเฉพาะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ และแบบจำลองพลศาสตร์ของตัวควบคุมการบังคับเลี้ยว (Steering Controller) ที่พิจารณาแรงที่กระทำต่อพาหนะ รวมไปถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบจำลองปริภูมิสถานะ (State Space Model) ที่จะอธิบายถึงพฤติกรรมของแบบจำลองยานพาหนะ

2.2.2 แบบจำลองจํายานจลนศาสตร์

แบบจำลองจํายานจลนศาสตร์ (Kinematic Bicycle Model) คำนึงถึงจลนศาสตร์ของยานพาหนะ ถือเป็นกลศาสตร์แขนงหนึ่งที่ศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุ ได้แก่ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง เวลา ความเร็ว ความเร่ง โดยไม่พิจารณาแรงที่มากระทำต่อวัตถุ แต่จะมุ่งเน้นไปที่การศึกษาความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ แต่อาจมีข้อจำกัดสำหรับการวิเคราะห์เบื้องต้น เช่น การวางแผนวิถี และการออกแบบการควบคุม [24 - 26] โดยแบบจำลองจลนศาสตร์เหมาะสำหรับการใช้งานร่วมกับการควบคุมแบบการติดตามโดยตรง (Pure Pursuit Control) และการควบคุมแบบสแตนลีย์ (Stanley Control) สำหรับการควบคุมยานพาหนะตามแนวขวาง [27 - 28] ในกรณีที่ไม่มีมุมลื่นไถล ข้อสันนิษฐานดังกล่าวถือเป็นจริงเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ต่ำกว่า 5 เมตรต่อวินาที [29]



รูปที่ 2.4 แบบจำลองจํายานจลนศาสตร์ [25]

จากรูปที่ 2.4 แบบจำลองจรวดยานเชิงเส้น คือ การลดขนาดล้อหน้าและล้อหลัง 2 ล้อ ให้เป็นล้อเดียว ซึ่งมีลักษณะคล้ายจักรยาน แบบจำลองนี้สามารถแสดงด้วยกลุ่มสมการในระบบพิกัดเฉื่อย (Inertial Coordinate System) ที่พิจารณาการเคลื่อนที่บนระนาบ $X - Y$ ตามการอ้างอิงพิกัดโลก (Global Reference) ที่ไม่ขึ้นกับการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ดังแสดงด้วยกลุ่มสมการดังต่อไปนี้

$$\dot{x} = v_x \cos(\psi) - v_y \sin(\psi) \quad (2.1)$$

$$\dot{y} = v_x \sin(\psi) + v_y \cos(\psi) \quad (2.2)$$

$$\dot{\psi} = \psi \quad (2.3)$$

โดยที่ความเร็วตามแนวยาวของยานพาหนะ (v_x) และความเร็วตามแนวขวางของยานพาหนะ (v_y) สามารถแสดงได้ในสมการที่ (2.4) – (2.5) ตามลำดับ ดังนี้

$$v_x = v \cos(\beta) \quad (2.4)$$

$$v_y = v \sin(\beta) \quad (2.5)$$

นอกจากนี้ ความสัมพันธ์ของความเร็วตามแนวยาว และตามแนวขวางของยานพาหนะ กับมุมทิศทางการเคลื่อนที่ (β) สามารถแสดงได้ในสมการที่ (2.6) ดังนี้

$$\tan \beta = \frac{v_y}{v_x} \quad (2.6)$$

ภายใต้สมมติฐานที่มุมหันเห มีค่าน้อย สมการที่ (2.1) - (2.2) สามารถถูกทำให้เป็นสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\dot{x} = v_x - v_y(\psi) \quad (2.7)$$

$$\dot{y} = v_x(\psi) + v_y \quad (2.8)$$

เมื่อ	x	คือ พิกัดของจุดศูนย์กลางถ่วงของยานพาหนะ (CG) ตามยาว
	y	คือ พิกัดของจุดศูนย์กลางถ่วงของยานพาหนะ (CG) ตามขวาง
	ψ	คือ มุมหันเหตามการอ้างอิงพิกัดโลก
	β	คือ มุมทิศทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเคลื่อนที่
	v	คือ ความเร็วของยานพาหนะทั้งหมด
	v_x	คือ ความเร็วตามแนวยาวของยานพาหนะ
	v_y	คือ ความเร็วตามแนวขวางของยานพาหนะ

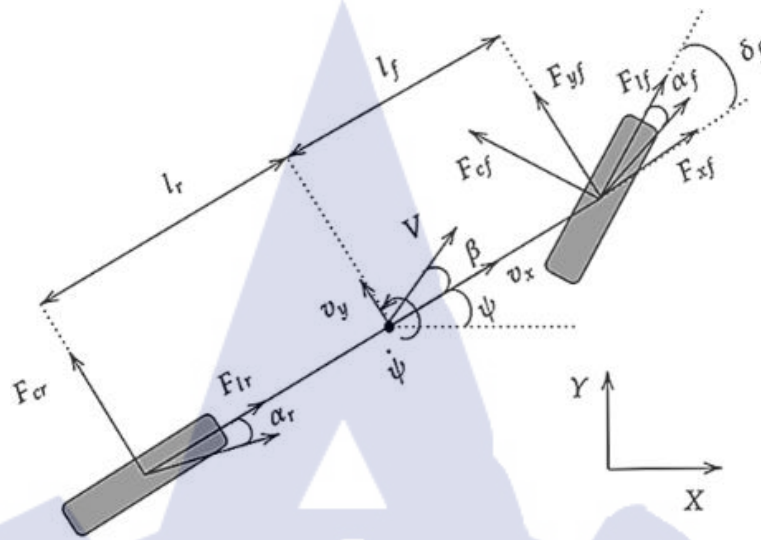
2.2.3 แบบจำลองจักรยานพลศาสตร์

แบบจำลองจักรยานพลศาสตร์ (Dynamic Bicycle Model) วิเคราะห์การควบคุมพลศาสตร์ยานยนต์ ซึ่งจะพิจารณาถึงแรงที่กระทำต่อยานพาหนะ โดยเฉพาะแรงของยาง ที่คำนึงถึงการลื่นไถล และค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อ [30] การสร้างสมการแบบจำลองพลศาสตร์ของยานพาหนะ สามารถพิจารณาได้จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน และวิธีการออยเลอร์ ช่วยให้สามารถอธิบายการเคลื่อนที่ และทิศทางการหมุน โดยทั่วไปแบบจำลองพลศาสตร์สองล้ออย่างง่ายหรือแบบจำลองจักรยาน ใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมยานพาหนะ เช่น เมื่อพิจารณาการติดตามเส้นทางที่การควบคุมตามแนวขวางมีความแม่นยำ และการเคลื่อนที่ของมุมหันเหเป็นสิ่งสำคัญ แต่ในการควบคุมตามแนวยาว เช่น การเร่งความเร็วและการชะลอตัว อาจถูกละเลย นำไปสู่แบบจำลองยานพาหนะระดับองศาอิสระ 2 ระดับ (2-DOF) ที่เรียบง่ายยิ่งขึ้น [31] โดยรวมแล้วแบบจำลองจักรยานพลศาสตร์จะสร้างสมดุลระหว่างความแม่นยำและประสิทธิภาพในการคำนวณ ทำให้เหมาะสำหรับวัตถุประสงค์ในการควบคุมและการตรวจสอบต่าง ๆ และเมื่อพิจารณาแบบจำลองจักรยานพลศาสตร์หรือแบบจำลองสองล้อที่เรียบง่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ที่คำนึงถึงการเคลื่อนที่บนระนาบ $X - Y$ โดยใช้สมการของนิวตัน-ออยเลอร์ (Newton-Eulers Equations) จะได้กลุ่มสมการดังต่อไปนี้

$$ma_x = F_{x_f} \cos \delta_f - F_{y_f} \sin \delta_f + F_{x_r} \cos \delta_r - F_{y_r} \sin \delta_r \quad (2.9)$$

$$ma_y = F_{y_f} \cos \delta_f + F_{x_f} \sin \delta_f + F_{y_r} \cos \delta_r + F_{x_r} \sin \delta_r \quad (2.10)$$

$$I_z \ddot{\psi} = l_f F_{x_f} \sin \delta_f + l_f F_{y_f} \cos \delta_f - l_r F_{x_r} \sin \delta_r - l_r F_{y_r} \cos \delta_r \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.5 แบบจำลองจํานวนพลศาสตร์ [27]

จากสมการที่ (2.9) – (2.11) ถูกกำหนดขึ้นโดยคำนึงถึงจุดศูนย์กลางของยานพาหนะ โดยสมการที่ (2.9) อธิบายผลรวมของแรงตามแนวยาว (F_x) สมการที่ (2.10) อธิบายผลรวมของแรงตามแนวขวาง (F_y) และสมการที่ (2.11) อธิบายผลรวมของโมเมนต์ (M_z) ของยานพาหนะ ภายใต้สมมติฐานที่เกิดมุมบังคับเลี้ยวเล็กน้อย สมการที่ (2.9) – (2.11) สามารถเขียนใหม่ได้ด้วยกลุ่มสมการดังต่อไปนี้

$$ma_x = F_{x_f} + F_{x_r} \quad (2.12)$$

$$ma_y = F_{y_f} + F_{y_r} \quad (2.13)$$

$$I_z \ddot{\psi} = l_f F_{y_f} - l_r F_{y_r} \quad (2.14)$$

เมื่อ	I_z	คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของยานพาหนะ
	m	คือ มวลรวมของยานพาหนะ
	l_f	คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางยานพาหนะถึงกึ่งกลางล้อหน้า
	l_r	คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางยานพาหนะถึงกึ่งกลางล้อหลัง
	$\ddot{\psi}$	คือ ความเร่งเชิงมุมของยานพาหนะ
	F_{x_f}	คือ แรงที่กระทำกับยานพาหนะตามแนวยาวของล้อหน้า

F_{xr}	คือ แรงที่กระทำกับยานพาหนะตามแนวยาวของล้อหลัง
F_{yf}	คือ แรงที่กระทำกับยานพาหนะตามแนวยาวของล้อหลัง
F_{yr}	คือ แรงที่กระทำกับยานพาหนะตามแนวขวางของล้อหลัง

ความเร่งในพิกัดเฉื่อยตามแนวยาว (a_x) และตามแนวขวาง (a_y) สามารถกระจายรูปสมการ ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ (2.15) – (2.16) ตามลำดับ ดังต่อไปนี้

$$a_x = (\dot{v}_x - v_y \dot{\psi}) \quad (2.15)$$

$$a_y = (\dot{v}_y + v_x \dot{\psi}) \quad (2.16)$$

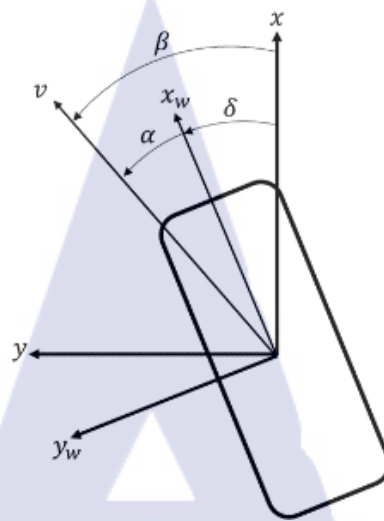
เมื่อ	$\dot{v}_x$	คือ ความเร่งตามแนวยาวของยานพาหนะ
	$\dot{v}_y$	คือ ความเร่งตามแนวขวางของยานพาหนะ
	$\dot{\psi}$	คือ ความเร็วเชิงมุมของยานพาหนะ หรืออัตราการหันเห
	v_x	คือ ความเร็วตามแนวยาวของยานพาหนะ
	v_y	คือ ความเร็วตามแนวขวางของยานพาหนะ

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของยานพาหนะ กรณีมุมลื่นไถลของล้อ (α) มีค่าน้อย สามารถจัดรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อ (C_α) และแรงที่กระทำตามแนวขวางของล้อ (F_y) ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ (2.17) – (2.18) ดังนี้

$$F_{yf} = -C_{\alpha f} \alpha_f \quad (2.17)$$

$$F_{yr} = -C_{\alpha r} \alpha_r \quad (2.18)$$

เมื่อ	$C_{\alpha f}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อหน้า
	$C_{\alpha r}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อหลัง
	α_f	คือ มุมลื่นไถลของล้อหน้า
	α_r	คือ มุมลื่นไถลของล้อหลัง



รูปที่ 2.6 การเคลื่อนที่ตามแนวขวาง แสดงทิศทางของล้อขณะเข้าโค้ง [27]

ภายใต้สมมติฐานที่ว่าไม่มีเพียงมุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) เท่านั้นที่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นมุมบังคับเลี้ยวของล้อหลังเป็นศูนย์ ($\delta_r = 0$) จากรูปที่ 2.6 สามารถจัดรูปสมการความสัมพันธ์ระหว่างมุมลื่นไถลของล้อ (α) มุมบังคับเลี้ยว (δ) และมุมทิศทางที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ (β) ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ (2.19) – (2.20) ดังนี้

$$\alpha_f = \beta_f - \delta_f \quad (2.19)$$

$$\alpha_r = \beta_r - \delta_r \quad (2.20)$$

เมื่อ	β_f	คือ มุมทิศทางที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ของล้อหน้า
	β_r	คือ มุมทิศทางที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ของล้อหลัง
	δ_f	คือ มุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า
	δ_r	คือ มุมบังคับเลี้ยวของล้อหลัง

มุมทิศทางที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ (β) เป็นมุมระหว่างแกนตามแนวยาวของล้อกับความเร็วดำเนินการ ซึ่งได้มาจากอัตราส่วนของความเร็วตามแนวขวางต่อความเร็วตามแนวยาว สามารถจัดรูปสมการได้ดังนี้

$$\beta_f = \arctan\left(\frac{v_y + l_f \psi}{v_x}\right) \quad (2.21)$$

$$\beta_r = \arctan\left(\frac{v_y - l_r \psi}{v_x}\right) \quad (2.22)$$

โดยมุมลื่นไถลของล้อจากสมการที่ (2.19) – (2.20) สามารถจัดรูปใหม่เป็นสมการที่ (2.23) – (2.24) ดังนี้

$$\alpha_f = \beta_f - \delta_f = \arctan\left(\frac{v_y + l_f \psi}{v_x}\right) - \delta_f \quad (2.23)$$

$$\alpha_r = \beta_r - \delta_r = \arctan\left(\frac{v_y - l_r \psi}{v_x}\right) - \delta_r \quad (2.24)$$

จากสมการที่ (2.12) - (2.14) สามารถจัดรูปสมการใหม่เป็นสมการที่ (2.25) – (2.27) โดยการแทนที่สมการที่ (2.15) - (2.18) และ (2.23) - (2.24) ดังนี้

$$\dot{v}_x = \frac{F_{x_f} + F_{x_r}}{m} + v_y \dot{\psi} \quad (2.25)$$

$$\dot{v}_y = -\left(\frac{2C_{ar} + 2C_{af}}{mv_x}\right)v_y + \left(\frac{2C_{ar}l_r - 2C_{af}l_f}{mv_x} - v_x\right)\dot{\psi} + \frac{2C_{af}}{m}\delta_f \quad (2.26)$$

$$\ddot{\psi} = \left(\frac{2l_r C_{ar} - 2l_f C_{af}}{I_z v_x}\right)v_y - \left(\frac{2l_r^2 C_{ar} - 2l_f^2 C_{af}}{I_z v_x} - v_x\right)\dot{\psi} + \frac{2l_f C_{af}}{I_z}\delta_f \quad (2.27)$$

2.2.4 แบบจำลองปริภูมิสถานะ

แบบจำลองปริภูมิสถานะ (State Space Model) เป็นการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบ และการจำลอง โดยจะอธิบายพฤติกรรมของระบบพลศาสตร์โดยการกำหนดกลุ่มตัวแปรสถานะ และสมการเชิงอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งที่สุดคล้องกัน แบบจำลองปริภูมิสถานะมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ การนำเสนอระบบที่มีความซับซ้อนที่สามารถรองรับระบบไม่เชิงเส้น ระบบที่แปรผันตามเวลา และระบบที่มีหลายอินพุตและหลายเอาต์พุต (Multi-Input Multi-

Output Systems: MIMO) อำนวยความสะดวกในเทคนิคการวิเคราะห์ เช่น การวิเคราะห์ความเสถียร การควบคุม และการประมาณค่าสถานะประเภทตัวกรองคาลมาน เหมาะสำหรับการใช้งานในระบบควบคุมสมัยใหม่ เช่น การควบคุมแบบป้อนกลับสถานะ (Feedback Control) และการควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC) [32] โดยแบบจำลองปริภูมิสถานะแสดงถึงระบบพลศาสตร์ยานยนต์ในแง่ของเวกเตอร์สถานะ ($\mathbf{x}$) เวกเตอร์อินพุต ($\mathbf{u}$) และเวกเตอร์เอาต์พุต ($\mathbf{y}$) ซึ่งจะพิจารณาสมการตัวแปรสถานะ (State Variables) และสมการเอาต์พุต (Output Equations) เป็นหลัก ตามที่เขียนไว้ในสมการ (2.28) – (2.29) ตามลำดับ ดังนี้

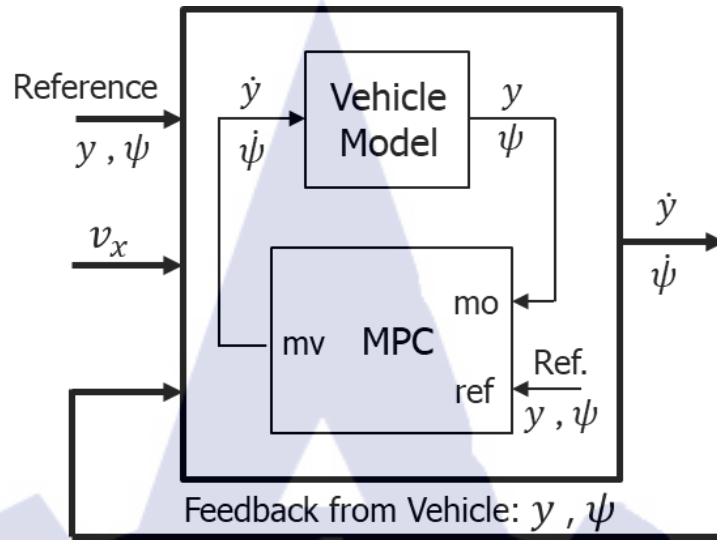
$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (2.28)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (2.29)$$

ในวิทยานิพนธ์นี้ แบบจำลองปริภูมิสถานะในระบบควบคุมแบบวงปิดที่เกี่ยวข้องกับสมการตัวแปรสถานะ (State Variables) สมการเอาต์พุต (Output Equations) และเวกเตอร์ของระบบต่าง ๆ สามารถอ้างอิงได้จากสมการในแบบจำลองจํายานพลศาสตร์ของการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ (Motion Planning) และแบบจำลองจํายานพลศาสตร์ของตัวควบคุมการบังคับเลี้ยว (Steering Controller) โดยการบูรณาการแบบจำลองเหล่านี้เข้าด้วยกัน เพื่อสร้างแบบจำลองปริภูมิสถานะที่ครอบคลุมทั้งการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่และการควบคุมการบังคับเลี้ยวของยานพาหนะที่เหมาะสมกับงานวิจัย ดังที่จะแสดงในหัวข้อต่อไป

2.2.4.1 แบบจำลองจํายานพลศาสตร์

แบบจำลองจํายานพลศาสตร์แสดงถึงการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ (Motion Planning) โดยอ้างอิงจากสมการที่ (2.1) – (2.3) สำหรับการจัดรูปสมการในแบบจำลองปริภูมิสถานะ ที่มีการพิจารณาเฉพาะพลศาสตร์ตามแนวขวางและมุมการหันเหเท่านั้น โดยความเร็วตามแนวยาวของยานพาหนะ (v_x) จะถูกมองว่าเป็นอินพุตของระบบ ซึ่งจะลดความซับซ้อนของการสร้างแบบจำลองและยังรวมถึงตัวควบคุมด้วย ผลลัพธ์ที่ได้ คือ แบบจำลองยานพาหนะระดับความอิสระ 2 ระดับ (2-DOF) มีเวกเตอร์อินพุตของระบบ ($\mathbf{u}$) คือ ความเร็วตามแนวขวางของยานพาหนะ ($\dot{y}$) และความเร็วเชิงมุมของยานพาหนะ ($\dot{\psi}$) และเวกเตอร์สถานะของระบบ ($\mathbf{x}$) คือ วิถีโคจรของยานพาหนะตามแนวขวาง (y) และมุมหันเหตามการอ้างอิงพิกัดโลก (ψ) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และสามารถจัดรูปสมการตัวแปรสถานะ และสมการเอาต์พุตในแบบจำลองปริภูมิสถานะ ได้ดังสมการที่ (2.30) – (2.31) ตามลำดับ



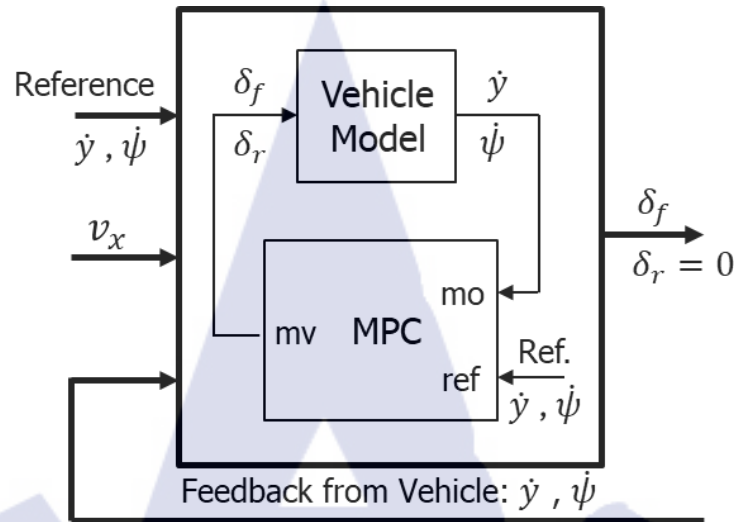
รูปที่ 2.7 การวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ (Motion Planning)

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & v_x \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$\dot{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

2.2.4.2 แบบจำลองจํการยานพลศาสตร์

แบบจำลองจํการยานพลศาสตร์ แสดงตัวควบคุมการบังคับเลี้ยว (Steering Controller) โดยอ้างอิงจากสมการที่ (2.25) - (2.27) สำหรับการจํการในระบบจํการปริภูมิสถานะ ที่ความเร็วตามแนวยาวของยานพาหนะ (v_x) มีค่าคงที่ ภายใต้สมมติฐานที่ว่าไม่มีมุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้าเท่านั้นที่สามารถควบคุมได้ และมุมบังคับเลี้ยวของล้อหลังเป็นศูนย์ ($\delta_r = 0$) ดังนั้น เวกเตอร์อินพุตของระบบ ($\mathbf{u}$) คือ มุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) และเวกเตอร์สถานะของระบบ ($\mathbf{x}$) คือ ความเร็วตามแนวขวางของยานพาหนะ ($\dot{y}$) และความเร็วเชิงมุมของยานพาหนะ ($\dot{\psi}$) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 และเมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ตามแนวขวาง จึงพิจารณาเฉพาะสมการที่ (2.26) - (2.27) โดยสามารถจํการตัวแปรสถานะ และสมการเอาต์พุตในแบบจํการปริภูมิสถานะ ได้ดังสมการที่ (2.32) - (2.33) ตามลำดับ



รูปที่ 2.8 ตัวควบคุมการบังคับเลี้ยว (Steering Controller)

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -\frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{mv_x} & -v_x - \frac{2C_{\alpha f}l_f - 2C_{\alpha r}l_r}{mv_x} \\ -\frac{2l_f C_{\alpha f} - 2l_r C_{\alpha r}}{I_z v_x} & -\frac{2l_f^2 C_{\alpha f} - 2l_r^2 C_{\alpha r}}{I_z v_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_{\alpha f}}{m} \\ \frac{2l_f C_{\alpha f}}{I_z} \end{bmatrix} [\delta_f] \quad (2.32)$$

$$\dot{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_f] \quad (2.33)$$

ในวิทยานิพนธ์นี้ แบบจำลองปริภูมิสถานะ (State Space Model) ที่บูรณาการแบบจำลองจํายานพลศาสตร์ของการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ (Motion Planning) เข้ากับแบบจำลองจํายานพลศาสตร์ของตัวควบคุมการบังคับเลี้ยว (Steering Controller) เพื่อสร้างแบบจำลองปริภูมิสถานะที่ครอบคลุมทั้งการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่และการควบคุมการบังคับเลี้ยวของยานพาหนะที่เหมาะสมกับงานวิจัย โดยประกอบไปด้วยเวกเตอร์สถานะ $\mathbf{x} = [\dot{y} \ \psi \ \dot{\psi} \ y]^T$ เวกเตอร์อินพุต $\mathbf{u} = \delta_f$ และเวกเตอร์เอาต์พุต $\mathbf{y} = [\psi \ y]^T$

เมื่อ y คือ วิถีโคจรของยานพาหนะตามแนวขวาง
 ψ คือ มุมหันเหชั่วขณะ
 δ_f คือ มุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า

โดยเมทริกซ์สถานะ (A) เมทริกซ์อินพุต (B) เมทริกซ์เอาต์พุต (C) และเมทริกซ์ระบบแบบป้อนไปข้างหน้า (D) สามารถแสดงสมการตัวแปรสถานะ อินพุต และเอาต์พุต ในแบบจำลองปริภูมิสถานะตามลำดับได้ดังนี้

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{mv_x} & 0 & -v_x - \frac{2l_f - 2C_{\alpha r}l_r}{mv_x} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{2l_f C_{\alpha f} - 2l_r C_{\alpha r}}{v_x} & 0 & -\frac{2l_f^2 C_{\alpha f} - 2l_r^2 C_{\alpha r}}{v_x} & 0 \\ 1 & V_x & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{2C_{\alpha f}}{m} \\ 0 \\ \frac{2l_f C_{\alpha f}}{I_z} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นแบบจำลองปริภูมิสถานะในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถแสดงสมการสถานะ (State Variables) ที่ $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$ และสมการเอาต์พุต (Output Equations) ที่ $\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u}$ ได้ในสมการที่ (2.34) - (2.35) ตามลำดับ ดังนี้

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -\frac{2C_{\alpha f} + 2C_{\alpha r}}{mv_x} & 0 & -v_x - \frac{2C_{\alpha f}l_f - 2C_{\alpha r}l_r}{mv_x} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{2l_f C_{\alpha f} - 2l_r C_{\alpha r}}{I_z v_x} & 0 & -\frac{2l_f^2 C_{\alpha f} - 2l_r^2 C_{\alpha r}}{I_z v_x} & 0 \\ 1 & V_x & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \psi \\ \dot{y} \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2C_{\alpha f}}{m} \\ 0 \\ \frac{2l_f C_{\alpha f}}{I_z} \\ 0 \end{bmatrix} [\delta_f] \quad (2.34)$$

$$\dot{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \psi \\ \dot{y} \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} [\delta] \quad (2.35)$$

ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้แบบจำลองปริภูมิสถานะมีครอบคลุมทั้งการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่และการควบคุมการบังคับเลี้ยวของยานพาหนะ รวมไปถึงความเหมาะสมสำหรับการใช้งาน

ในการวางแผนวิธีการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของระบบควบคุม โดยเฉพาะการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน เนื่องจากแบบจำลองปริภูมิสถานะสามารถจำลองพฤติกรรมของยานพาหนะในสภาพแวดล้อม และเงื่อนไขต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม

2.3 การหลบหลีกการเปลี่ยนช่องจราจรฉุกเฉิน

การสร้างวิธีการเคลื่อนที่ในการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน เพื่อหลีกเลี่ยงการชน มีกลยุทธ์ที่สำคัญในระดับการตัดสินใจที่แสดงถึงระดับพฤติกรรมการขับขี่ในระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจร ซึ่งกระบวนการสร้างวิธีการเคลื่อนที่เหล่านี้มีส่วนช่วยในการออกแบบวิธีที่ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพสำหรับยานพาหนะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระหว่างการหลบหลีกด้วยความเร็วสูง ซึ่งความเสี่ยงและการควบคุมเป็นปัจจัยสำคัญ

2.3.1 กลยุทธ์ในระดับการตัดสินใจ

กลยุทธ์ในระดับการตัดสินใจแสดงถึงระดับพฤติกรรมการขับขี่ในระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจร โดยสามารถแบ่งพฤติกรรมการขับขี่ในการเปลี่ยนช่องจราจรอัตโนมัติตามกลยุทธ์ในระดับการตัดสินใจที่ประกอบไปด้วย ระดับการรับรู้สถานการณ์ ระดับการวางแผนวิธีการเปลี่ยนช่องจราจร และระดับการดำเนินการเปลี่ยนช่องจราจร [33 - 34] โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) ระดับการรับรู้สถานการณ์ ยานพาหนะจะรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ เพื่อกำหนดตัวเลือกในการเปลี่ยนช่องจราจรที่เป็นไปได้ รวมถึงเวลา การเคลื่อนตัว และยานพาหนะจะรักษาช่องจราจรปัจจุบันไว้ในระดับนี้
- 2) ระดับการวางแผนวิธีการเปลี่ยนช่องจราจร หลักการสำคัญบางประการสำหรับการวางแผนวิธี ได้แก่ การรองรับความต่อเนื่องในอนุพันธ์ของวิถีบนขอบเขตที่เหมาะสม ความเป็นไปได้ในการดำเนินการควบคุมการเปลี่ยนช่องจราจร และความราบรื่นในการสร้างวิธี
- 3) ระดับการดำเนินการเปลี่ยนช่องจราจร ยานพาหนะจะเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดในระหว่างระดับการวางแผน เพื่อให้มั่นใจว่าการเปลี่ยนผ่านไปยังช่องจราจรเป้าหมายมีความราบรื่น

2.3.1.1 การวางแผนวิธีการเคลื่อนที่

ในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษากลยุทธ์การตัดสินใจในระดับการวางแผนวิธีการเปลี่ยนช่องจราจรเป็นหลัก ซึ่งการวางแผนวิธีการเคลื่อนที่ (Trajectory Planning) เป็นส่วนหนึ่งของลำดับขั้นการควบคุมสำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ เนื่องจากจะต้องกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมและปลอดภัยที่สุดสำหรับยานพาหนะในการติดตามเส้นทาง โดยไม่เกิดการชนระหว่างการเปลี่ยนช่อง

จรรยาจรณ [35] โดยสามารถอธิบายอัลกอริทึมการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ในแต่ละหมวดหมู่ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในอัลกอริทึมการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่

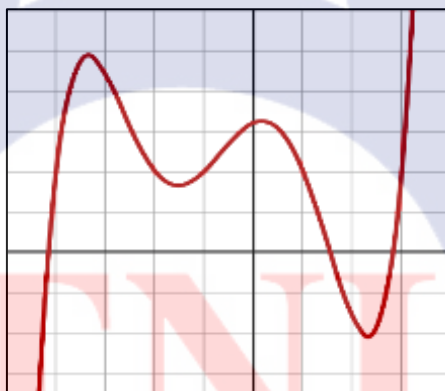
วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
แบบเส้นโค้งวงกลม (Circular Curves) [36]	ความเรียบง่ายในการสร้าง เส้นทางเริ่มต้น	ไม่มีขีดจำกัดความเร่งตาม แนวขวาง ขาดความนุ่มนวล และราบรื่นตามแนวโค้ง
แบบเส้นโค้งความเร่งสี่เหลี่ยมคาง หมู (Trapezoidal Acceleration Curves) [36]	ควบคุมขีดจำกัดความเร็ว และความเร่งได้อย่าง แม่นยำ	ต้องการการผสมผสานที่ สมดุลระหว่างความเร่งตาม แนวขวางและอัตราการเร่ง ความเร็ว
แบบเส้นโค้งฮาร์โมนิก (Harmonic Curves) [36]	ช่วยปรับความยืดหยุ่นของ รูปทรงเส้นโค้งให้ตรงตาม ความต้องการ	ไม่เหมาะสำหรับการขยาย อัลกอริทึมและการปรับแก้ไข
แบบเส้นโค้งพหุนามกำลังห้า (Quintic Polynomials Curves) [36]	มีความต่อเนื่องและความ ราบรื่นในการหลบหลีกการ เปลี่ยนช่องจราจรและการ หลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง	ต้องมีการปรับจูนและการ กำหนดตัวแปรเสริมอย่าง ระมัดระวัง
แบบต้นไม้สุ่มประเภทดาว (Rapidly Exploring Random Tree Star: RRT*) [37]	ตอบสนองต่อการ เปลี่ยนแปลง สภาพแวดล้อมได้อย่าง รวดเร็ว	ไม่คำนึงถึงความไม่แน่นอนใน ตำแหน่งสิ่งกีดขวางหรือการ เปลี่ยนแปลงของยานพาหนะ รอบข้าง
แบบตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter-Based) [37]	ทำนายตำแหน่งของ ยานพาหนะและสิ่งกีดขวาง	ไม่จัดลำดับความสำคัญด้าน ความปลอดภัยหรือปรับ เส้นทางให้เหมาะสม

จากตารางที่ 2.1 อัลกอริทึมการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ ที่มีความเหมาะสม
สำหรับการเปลี่ยนช่องจราจรจรณ คือ อัลกอริทึมสมการพหุนามกำลังห้า (Quintic Polynomial
Equation) ที่สามารถกำหนดวิถีการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางในสถานการณ์เฉพาะ เนื่องจากเส้นโค้งพหุ

นามกำลังห้า มีความครอบคลุมด้านความยืดหยุ่นในการปรับแต่งที่สามารถปรับเปลี่ยนรูปร่าง และขนาดของเส้นโค้งได้ตามความต้องการ รวมไปถึงความราบรื่นของการเคลื่อนที่เป็นไปตามเส้นทางที่วางแผนไว้ได้อย่างแม่นยำ ทำให้มั่นใจในด้านความปลอดภัย และความสะดวกสบาย เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ๆ ที่มีข้อจำกัดด้านการวางแผนวิถีในสถานการณ์วิกฤติ และการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมแบบพลศาสตร์ [38]

2.4 การวางแผนวิถีแบบสมการพหุนามกำลังห้า

สมการพหุนามกำลังห้าเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีรูปแบบ คือ $f(x) = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f$ โดยที่ a, b, c, d, e และ f เป็นค่าสัมประสิทธิ์ และ x เป็นตัวแปร โดยรูปแบบทั่วไปของสมการพหุนามกำลังห้าแสดงให้เห็นว่าสามารถมีจุดเปลี่ยนได้ถึงห้าจุด (จุดที่กราฟเปลี่ยนทิศทาง) และสามารถมีจุดสุดขีดได้สูงสุดสี่จุด (จุดสูงสุดหรือต่ำสุดเฉพาะจุด) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยสมการพหุนามกำลังห้าสามารถแสดงพฤติกรรมได้หลากหลาย รวมถึงรากหลายจุด โดยจุดเปลี่ยนและจุดเปลี่ยนเว้าขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ เพื่อสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์และปรากฏการณ์ที่ซับซ้อน [39]



รูปที่ 2.9 พหุนามกำลังห้า โดยมีราก 3 จุดและจุดวิกฤต 4 จุด

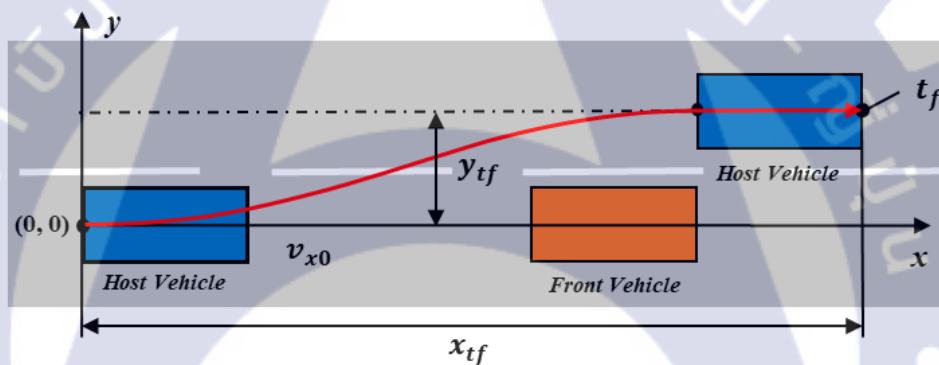
การวางแผนวิถีสำหรับการเปลี่ยนช่องจราจรฉุกเฉินสามารถใช้สมการพหุนามกำลังห้า ในการสร้างวิถีโคจรที่มีความราบรื่นและต่อเนื่อง เพื่อให้แน่ใจว่ายานพาหนะสามารถเปลี่ยนช่องจราจรได้อย่างปลอดภัย ภายใต้ข้อจำกัดต่าง ๆ เช่น การเร่งความเร็วสูงสุด และความโค้งสูงสุด ความราบรื่นและการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง โดยทั่วไปสมการพหุนามกำลังห้าเป็นการกำหนดวิถีการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของยานพาหนะ และขั้นตอนการวางแผนวิถีในการเปลี่ยนช่องจราจรฉุกเฉินประกอบไปด้วย การกำหนดเงื่อนไขสถานะเริ่มต้น และเงื่อนไขสถานะสุดท้ายของการเปลี่ยนช่องจราจร การเลือก

รูปแบบพหุนามกำลังห้าในการแสดงวิถีโคจร การกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนามกำลังห้า การสร้างวิธีการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของยานพาหนะ และการประเมินและเพิ่มประสิทธิภาพตามข้อกำหนด [40]

สำหรับขั้นตอนเริ่มต้นของสมการพหุนามกำลังห้าสำหรับการวางแผนวิถีในการเปลี่ยนช่องจราจรฉุกเฉิน เป็นการวางแผนวิถีที่ใช้เพียงสถานะเริ่มต้นและสถานะสุดท้ายเท่านั้น ทำให้กระบวนการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางมีความเสถียร ดังนั้นสมการพหุนามกำลังห้าจึงถูกนำมาใช้ในสถานการณ์นี้ และกำหนดขอบเขตเงื่อนไขสถานะเริ่มต้น และเงื่อนไขสถานะสุดท้ายบางประการดังต่อไปนี้

- 1) ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปตามกึ่งกลางถนน และสิ่งกีดขวางอยู่ตรงกลางถนน
- 2) ไม่มียานพาหนะอื่น ๆ หลบหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง
- 3) จุดเริ่มต้นของการหลบหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางอยู่ที่จุดกำเนิด 0 ของพิกัดโดยใช้สมการพหุนาม

กำลังห้า ในทิศทางตามยาว (x) และตามขวาง (y) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ดังนี้



รูปที่ 2.10 เรขาคณิตและจลนศาสตร์ของการเปลี่ยนช่องจราจรของยานพาหนะ

แบบจำลองนี้มีข้อดีของรูปแบบปิดอนุพันธ์อันดับสองที่ต่อเนื่อง ที่กำหนดตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ตามที่เขียนไว้ในสมการ (2.36) – (2.41) ตามลำดับ โดยใช้เส้นโค้งพหุนามกำลังห้าที่มีความราบรื่น ซึ่งตอบสนองความต้องการของหลักการพื้นฐานของการหลบหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง จากข้อดีนี้จะมีการเลือกพหุนามกำลังห้าตามเวลา (t) เพื่อสร้างสมการสำหรับการเปลี่ยนช่องจราจร ดังที่แสดงไว้ต่อไปนี้

$$x(t) = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (2.36)$$

$$y(t) = b_5 t^5 + b_4 t^4 + b_3 t^3 + b_2 t^2 + b_1 t + b_0 \quad (2.37)$$

โดยที่ a_i และ b_i รวมไปถึง $i = 0, 1, \dots, 5$ เป็นสัมประสิทธิ์ที่ไม่ได้กำหนดไว้ ซึ่งสมการความเร็วและความเร่งสำหรับยานพาหนะตามเส้นโค้งพหุนามกำลังห้าได้มาจากอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งและอันดับที่สองของสมการที่ (2.36) – (2.37) ซึ่งแสดงสมการความเร็วในสมการที่ (2.38) – (2.39) และสมการความเร่งในสมการที่ (2.40) – (2.41) ตามลำดับได้ดังนี้

$$\dot{x}(t) = 5a_5t^4 + 4a_4t^3 + 3a_3t^2 + 2a_2t + a_1t \quad (2.38)$$

$$\dot{y}(t) = 5b_5t^4 + 4b_4t^3 + 3b_3t^2 + 2b_2t + b_1t \quad (2.39)$$

$$\ddot{x}(t) = 20a_5t^3 + 12a_4t^2 + 6a_3t + 2a_2 \quad (2.40)$$

$$\ddot{y}(t) = 20b_5t^3 + 12b_4t^2 + 6b_3t + 2b_2 \quad (2.41)$$

นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ได้กำหนดไว้ สามารถกำหนดได้โดยการแก้สมการที่ (2.42) – (2.43) ตามเงื่อนไขสถานะเริ่มต้น และสถานะสุดท้ายของตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งอันเนื่องมาจากวิธีการเปลี่ยนช่องจราจร ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 0 & v_{x0} & a_{x0} & x_{tf} & v_{xf} & a_{xf} \end{bmatrix}^T = \mathbb{T}\mathbf{A} \quad (2.42)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & v_{y0} & a_{y0} & y_{tf} & v_{yf} & a_{yf} \end{bmatrix}^T = \mathbb{T}\mathbf{B} \quad (2.43)$$

$$\mathbb{T} = \begin{bmatrix} t_0^5 & t_0^4 & t_0^3 & t_0^2 & t_0 & 1 \\ 5t_0^4 & 4t_0^3 & 3t_0^2 & 2t_0 & 1 & 0 \\ 20t_0^3 & 12t_0^2 & 6t_0 & 2 & 0 & 0 \\ t_f^5 & t_f^4 & t_f^3 & t_f^2 & t_f & 1 \\ 5t_f^4 & 4t_f^3 & 3t_f^2 & 2t_f & 1 & 0 \\ 20t_f^3 & 12t_f^2 & 6t_f & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

จากสมการที่ (2.44) สามารถสร้างพารามิเตอร์ค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ได้กำหนดไว้ 12 ตัว ในที่นี้ คือ $\mathbf{A}^T = (a_5, a_4, a_3, a_2, a_1, a_0)$ และ $\mathbf{B}^T = (b_5, b_4, b_3, b_2, b_1, b_0)$

เพื่อสร้างวิธีการเคลื่อนที่จากสถานะเริ่มต้น $(0, 0)$ ไปยังสถานะสุดท้าย (x_{tf}, y_{tf}) ตามเงื่อนไขสถานะที่กำหนดในเมทริกซ์ $\mathbb{T}$ โดยที่ตัวห้อยของตัวแปร 0 คือ สถานะเริ่มต้นของการเปลี่ยนช่องจราจร ($t = 0$) และตัวห้อยของตัวแปร f คือ สถานะสุดท้าย ($t = t_f$) ดังแสดงในสมการที่ (2.45) - (2.48) ที่แสดงตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ของสถานะเริ่มต้นและสถานะสุดท้ายของการวางแผนวิถี ดังนี้

$$x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = v_{x0}, \quad \ddot{x}(0) = a_{x0} \quad (2.45)$$

$$y(0) = 0, \quad \dot{y}(0) = v_{y0}, \quad \ddot{y}(0) = a_{y0} \quad (2.46)$$

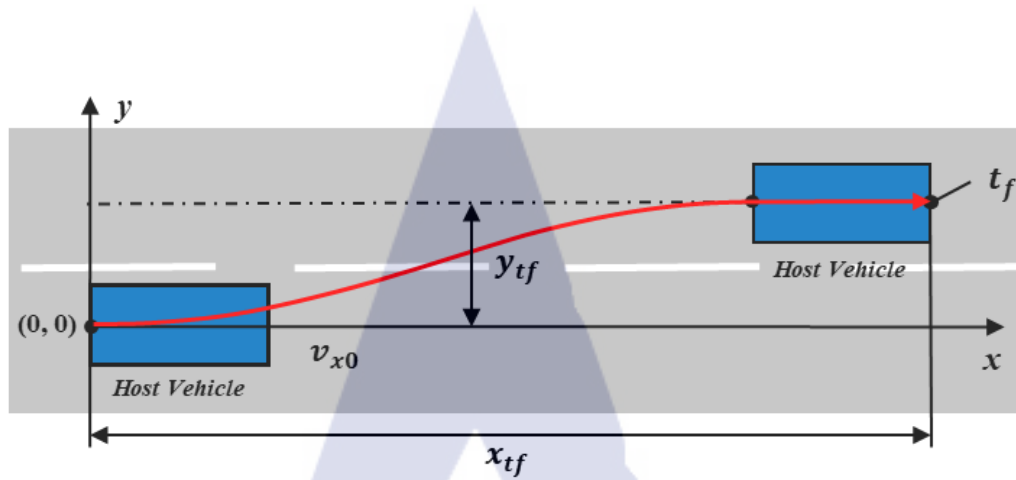
$$x(t_f) = x_{tf}, \quad \dot{x}(t_f) = v_{xf}, \quad \ddot{x}(t_f) = a_{xf} \quad (2.47)$$

$$y(t_f) = y_{tf}, \quad \dot{y}(t_f) = v_{yf}, \quad \ddot{y}(t_f) = a_{yf} \quad (2.48)$$

จากสมการที่ (2.47) - (2.48) ระยะห่างตามแนวขวางจากตำแหน่งสถานะเริ่มต้น (0) ถึงตำแหน่งสถานะสุดท้าย (y_{tf}) ถูกตั้งค่าเป็นความกว้างเดียว และความเร็วตามยาว คือ ความเร็วเฉลี่ยที่ช่องจราจรสถานะสุดท้าย (v_{xf}) ดังนั้น ความเร็วตามแนวขวาง (v_{yf}) และความเร่ง (a_{xf}, a_{yf}) ถือเป็นศูนย์

2.4.1 ข้อกำหนดสมรรถนะของวิธีการเปลี่ยนช่องจราจร

เทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการสร้างวิธีการเปลี่ยนช่องจราจรสำหรับยานพาหนะอัตโนมัติ [41] ตามข้อกำหนดทั้งหมด เช่น ความราบรื่น การหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง และขีดจำกัดความเร็วและความเร่ง จากการวางแผนวิถีแบบสมการพหุนามกำลังห้า พารามิเตอร์ 12 ตัวที่แสดงเป็น a_i และ b_i สำหรับ $i = 0, 1, \dots, 5$ พารามิเตอร์เหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของสมการที่ (2.42) - (2.43) ที่อธิบายวิถีของยานพาหนะในระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจร และสมการที่ (2.45) - (2.48) แสดงถึงเงื่อนไขสถานะเริ่มต้นและเงื่อนไขสถานะสุดท้ายของยานพาหนะ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ได้กำหนดไว้ 12 ตัว จำเป็นต้องมีการกำหนดข้อมูลพารามิเตอร์เพิ่มเติม ซึ่งการกำหนดพารามิเตอร์ โดยที่เวลาในการเปลี่ยนช่องจราจร (t_f) และตำแหน่งสุดท้ายตามแนวยาว (x_{tf}) เป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ความปลอดภัย ประสิทธิภาพ ความสะดวกสบาย และข้อจำกัดของถนน ปัจจัยเหล่านี้เป็นข้อจำกัดในกระบวนการปรับให้เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพและการเลือกวิถี เพื่อให้การเปลี่ยนช่องจราจรราบรื่นและปลอดภัย [41]



รูปที่ 2.11 สถานการณ์การเปลี่ยนช่องจราจรโดยไม่มียานพาหนะล้อมรอบ

จากรูปที่ 2.11 สถานการณ์การเปลี่ยนช่องจราจรโดยไม่มียานพาหนะล้อมรอบในเส้นทางปัจจุบันและไม่มียานพาหนะทางด้านหลังที่ใกล้เคียงเข้ามาในเส้นทางที่อยู่ติดกัน มีข้อกำหนดในความปลอดภัยที่ควรคำนึงถึง [41] ประกอบไปด้วย

1) การจำกัดตำแหน่ง (Position Limitation) โดยที่ $y(t)$ และ $x(t)$ เป็นตำแหน่งตามแนวขวางและตามแนวยาวของยานพาหนะ ดังแสดงในสมการที่ (2.49) – (2.50) ที่ศึกษา ณ เวลา (t)

$$0 < y(t) < y_{tf} \leq y_{tf_{max}} \quad |\forall t \in [0, t_f] \quad (2.49)$$

$$0 < x(t) < x_{tf} \leq x_{tf_{max}} \quad |\forall t \in [0, t_f] \quad (2.50)$$

2) การจำกัดความเร็ว (Speed Limitation) โดยที่ $v_x(t)$ คือ ความเร็วตามแนวยาวของยานพาหนะที่ศึกษา ณ เวลา (t) และ $v_{x_{max}}$ คือ ความเร็วสูงสุดที่อนุญาตให้ศึกษา ดังแสดงในสมการที่ (2.51)

$$0 < v_x(t) < v_{x_{max}} \quad (2.51)$$

3) ความสะดวกสบาย (Comfort) โดยที่ $a_{x_{max}}$ และ $a_{y_{max}}$ คือ ค่าสูงสุดของความเร่งตามแนวยาวและความเร่งตามแนวขวาง ดังแสดงในสมการที่ (2.52) – (2.53) ตามลำดับ

นอกจากนี้ $j_{x_{max}}$ และ $j_{y_{max}}$ คือ ค่าสูงสุดของแรงเหวี่ยงตามแนวยาวและการกระตุกตามแนวขวาง ดังแสดงในสมการที่ (2.54) – (2.55) ตามลำดับ

$$|a_x| < a_{x_{max}} \quad (2.52)$$

$$|a_y| < a_{y_{max}} \quad (2.53)$$

$$|j_x| < j_{x_{max}} \quad (2.54)$$

$$|j_y| < j_{y_{max}} \quad (2.55)$$

สิ่งสำคัญที่ควรทราบ คือ แม้ว่าสมการพหุนามกำลังห้าสามารถสร้างวิถีที่ราบรื่นและต่อเนื่องได้ แต่ก็ไม่สามารถจัดการความซับซ้อนทั้งหมดของสถานการณ์การขับขี่ในโลกแห่งความเป็นจริง เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพถนนอย่างกะทันหัน หรือการมีปฏิสัมพันธ์กับยานพาหนะอื่น ๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องบูรณาการการวางแผนวิถีเข้ากับอัลกอริทึมการควบคุมที่มีประสิทธิภาพ

ความท้าทายเหล่านี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการบูรณาการระบบการควบคุมเข้ากับการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ของพลศาสตร์ตามยาวและตามขวางในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง เพื่อให้มั่นใจว่าการเปลี่ยนช่องจราจรมีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพในสถานการณ์ฉุกเฉิน โดยสามารถอธิบายอัลกอริทึมระบบการควบคุมหลายแบบซึ่งมีข้อดีและข้อเสียที่ควรพิจารณา ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในอัลกอริทึมการควบคุม

วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
การควบคุมแบบคลุมเครือ (Fuzzy Control) [42]	สามารถปรับให้เหมาะสมได้ ในการเลียนแบบพฤติกรรม ของมนุษย์ในการขับขี่ รถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ	มีความซับซ้อนในการปรับค่า และการประมาณค่า ขาดข้อมูล เชิงแบบจำลองพลศาสตร์ยาน ยนต์
การควบคุมโหมดการเลื่อน (Sliding Mode Control: SMC) [42]	ใช้สัญญาณควบคุมที่ไม่ ต่อเนื่องและทนทานต่อการ รบกวนจากภายนอก	มีความถี่ในการสลับที่สูงอาจ เกิดปัญหากับยานพาหนะ

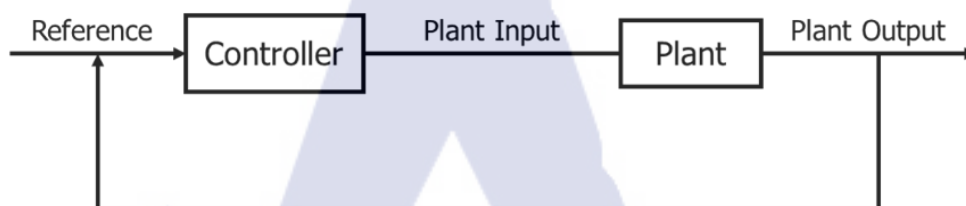
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียในอัลกอริทึมการควบคุม

วิธีการ	ข้อดี	ข้อเสีย
การควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (Proportional-Integral-Derivative Control: PID) [43]	มีความเรียบง่าย ความทนทาน และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว	ประสบปัญหาการควบคุมการปรับที่ต่ำกว่าเป้า การปรับที่สูงกว่าเป้า การปรับแต่งตัวควบคุมยาก และมีประสิทธิภาพที่จำกัด
การควบคุมแบบสแตนลีย์ (Stanley Control) [43]	สามารถติดตามเส้นทางได้ดีสำหรับเส้นทางที่ราบรื่นและต่อเนื่อง	อาจมีปัญหาเมื่อเจอการเลี้ยวหักศอกหรือสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน
การควบคุมแบบการติดตามโดยตรง (Pure Pursuit Control) [43]	มีประสิทธิภาพสำหรับสถานการณ์ที่มีการกำหนดเส้นทางอย่างชัดเจนและต่อเนื่อง	อาจทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางหรือเส้นทางที่คาดเดาไม่ได้
การควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC) [43]	สามารถจัดการอินพุตและเอาต์พุตหลายรายการได้ และมีความสามารถในการทำนายการควบคุมในอนาคต	มีความซับซ้อนในการคำนวณและภาระการคำนวณสูง

ในวิทยานิพนธ์นี้ อัลกอริทึมตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC) เป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพและความเหมาะสมในการจัดการกับการวางแผนวิถีโคจรที่มีความซับซ้อนในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง เมื่อเทียบกับอัลกอริทึมตัวควบคุมอื่น ๆ เนื่องจากมีความสามารถในการคาดการณ์เส้นทางการเคลื่อนที่ในอนาคต และสามารถจัดการกับข้อจำกัดหลายประการ เช่น ข้อจำกัดเกี่ยวกับยานพาหนะทางกายภาพและความปลอดภัย การวางแผนวิถีตามเวลาจริง และการจัดการความซับซ้อนในการคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงมีข้อดีต่อการปรับปรุงความแม่นยำในการติดตามเส้นทาง และการจัดการกับสภาพการขับขี่ที่แตกต่างกันของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ อีกทั้งตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (MPC) มีความสามารถในการจัดการกับระบบแบบหลายอินพุตและหลายเอาต์พุต (MIMO) ของระบบรถยนต์ได้อีกด้วย

2.5 ระบบควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า

โดยพื้นฐานของระบบควบคุมมีเป้าหมาย คือ การคำนวณตัวแปรอินพุตสำหรับระบบ (Plant) เพื่อให้กระบวนการตอบสนองในลักษณะเอาต์พุตที่ต้องการ จากรูปที่ 2.12 แสดงแผนภาพวงจรควบคุมมาตรฐาน



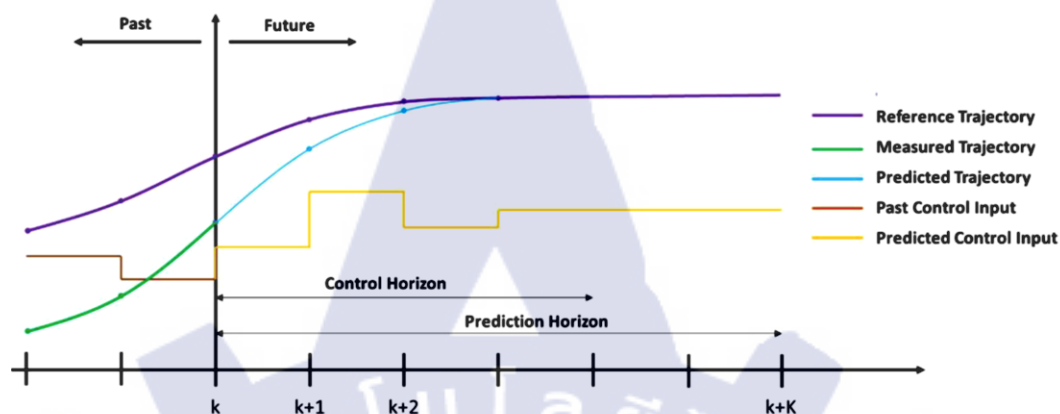
รูปที่ 2.12 แผนภาพวงจรควบคุมมาตรฐาน

แบบจำลองแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC) เป็นวิธีการควบคุมที่น่าสนใจสำหรับการควบคุมระบบการขับเคลื่อนอัตโนมัติ เนื่องจากมีลักษณะการคาดเดาซึ่งคล้ายกับพฤติกรรมการขับขี่ของมนุษย์ กล่าวคือ สามารถตอบสนองต่อเหตุการณ์ที่มีความซับซ้อนได้อย่างกะทันหัน หรือการเปลี่ยนแปลงในเส้นทางการขับขี่ อันเนื่องมาจากการหักเลี้ยวหรือการแซง เป็นต้น ดังนั้นเมื่อใช้ร่วมกับเทคโนโลยีระบบการรับรู้ที่เพียงพอ จึงมีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ [44] โดยกลยุทธ์ของแบบจำลองแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (MPC) มุ่งเป้าไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพสมการวัตถุประสงค์ (Cost function, J) ของตัวควบคุมที่คาดการณ์ไว้ ซึ่งจะให้ข้อมูลการควบคุมเส้นทางในอนาคต ภายใต้ข้อจำกัดทางกายภาพและความปลอดภัยในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ [45]

การควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้ามีการดำเนินการปรับให้เหมาะสมที่คล้ายกันแบบซ้ำ ๆ ในเฉพาะช่วงเวลาที่จำกัด หรือขอบฟ้าการทำนาย (N_p) ทำให้แบบจำลองแบบคาดการณ์ล่วงหน้ามีคุณลักษณะของตัวควบคุมป้อนกลับ เช่น อินพุตของระบบ ซึ่งความซับซ้อนในการคำนวณเป็นปัจจัยที่มีข้อจำกัดสำหรับแบบจำลอง และเพื่อลดภาระการประมวลผลที่ไม่จำเป็น จึงมีการใช้ขอบเขตการควบคุม (N_c) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขอบเขตการคาดการณ์ ที่ดำเนินการจนกระทั่งสิ้นสุดขอบเขตการควบคุมเท่านั้น มีข้อดี คือ การช่วยลดความซับซ้อนในการคำนวณ และปรับปรุงความเร็วของตัวควบคุม [46]

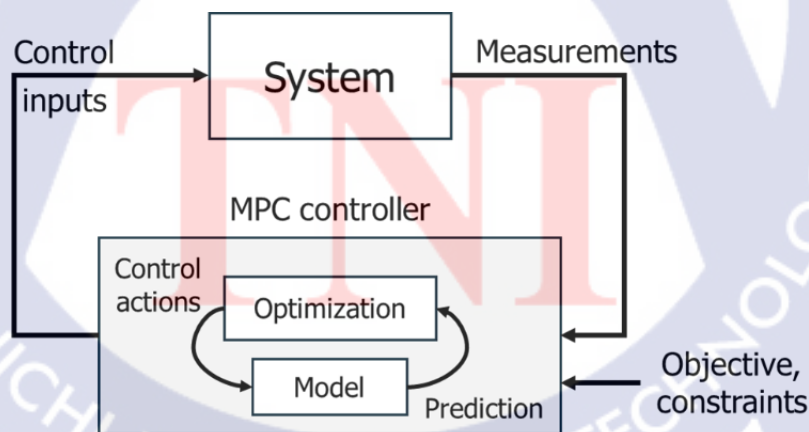
โดยข้อได้เปรียบนี้จะนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ จากรูปที่ 2.13 แสดงอินพุตควบคุมในช่วงเวลาอดีตและอนาคต โดยประกอบไปด้วยขั้นตอนการควบคุม (k) จำนวนขั้นตอน (K) ที่ $K =$

$1, 2, 3, \dots, K$ ขอบเขตการควบคุม (N_c) และขอบฟ้าการทำนาย (N_p) รวมถึงการอ้างอิง การวัด และการคาดการณ์วิถี



รูปที่ 2.13 การทำนายอินพุตควบคุมระหว่างช่วงการควบคุม [46]

โดยระบบควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ที่วงจรภายในตัวควบคุม จะทำการปรับค่าให้เหมาะสมซ้ำ ๆ หลายครั้งจนกว่าจะพบสัญญาณควบคุมที่ดีเพียงพอ ในทางกลับกันวงจรควบคุมด้านนอกจะดำเนินการเพียงครั้งเดียวในแต่ละขั้นตอนการควบคุม (k) โดยจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณเชื่อมต่อกับตัวควบคุม [46]



รูปที่ 2.14 แผนภาพวงจรควบคุมของแบบจำลองแบบคาดการณ์ล่วงหน้า

2.5.1 โครงสร้างระบบควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า

โครงสร้างของระบบควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ในบริบททางเทคนิคทั่วไปแล้ว การพัฒนาและการสร้างแบบจำลองตัวควบคุมดำเนินการผ่านโปรแกรม MATLAB & Simulink® เนื่องจากมีความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพและการออกแบบระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพ ในลักษณะแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อสร้างแบบจำลองแบบคาดการณ์ล่วงหน้า โดยแบบจำลองแบบคาดการณ์ล่วงหน้ามีบทบาทสำคัญในการรักษาความสมดุลระหว่างการแสดงพฤติกรรมของระบบและความเรียบง่าย มีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานด้านยานยนต์ ในแง่ของการควบคุมยานพาหนะ เมื่อพิจารณาถึงการกำหนดแบบจำลองของระบบ มีการใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้นและแบบจำลองเชิงเส้น โดยแบบจำลองเชิงเส้นมีข้อดี คือ ความซับซ้อนในการคำนวณต่ำ และสามารถแสดงพลศาสตร์ของระบบได้ดี จึงเหมาะสำหรับการใช้งานที่พลศาสตร์ยานยนต์สูง หรือมีข้อจำกัดในทางกลับกันการใช้แบบจำลองไม่เชิงเส้นจะทำให้การคำนวณมีความซับซ้อนมากขึ้น และมีข้อจำกัดในการแสดงพลศาสตร์ของระบบที่เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น แบบจำลองแบบคาดการณ์ล่วงหน้าเชิงเส้นจึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมยานพาหนะในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแบบจำลองแบบคาดการณ์ล่วงหน้าสามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองปริภูมิสถานะ (State Space Model) อ้างอิงจากสมการที่ (2.28) – (2.29) ที่ประกอบไปด้วยเวกเตอร์สถานะ $\mathbf{x} = [\dot{y} \ \psi \ \dot{\psi} \ y]^T$ เวกเตอร์อินพุตของระบบ $\mathbf{u} = \delta_f$ และเวกเตอร์เอาต์พุตของระบบ $\mathbf{y} = [\psi \ y]^T$ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ข้อจำกัดของแบบจำลองแบบคาดการณ์ล่วงหน้า โดยพิจารณาจากสมการตัวแปรสถานะ (State Variables) และสมการเอาต์พุต (Output Equations) ของแบบจำลองปริภูมิสถานะในรูปแบบสมการแยกส่วน ดังแสดงในสมการที่ (2.56) - (2.57) ซึ่งอ้างอิงจากระบบหลายอินพุตและหลายเอาต์พุต (MIMO) [47]

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_d \mathbf{u}(k) \quad (2.56)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}_d \mathbf{x}(k) + \mathbf{D}_d \mathbf{u}(k) \quad (2.57)$$

จากสมการที่ (2.56) - (2.57) แบบจำลองปริภูมิสถานะแบบแยกส่วน ที่ประกอบไปด้วยเวกเตอร์สถานะ $\mathbf{x}(k)$ เอาต์พุตของระบบ $\mathbf{y}(k)$ และอินพุตของระบบ $\mathbf{u}(k)$ ที่อยู่ภายใต้ขั้นตอนการควบคุม (k) โดยมีเมทริกซ์ของระบบแบบแยกส่วนที่ประกอบไปด้วย $\mathbf{A}_d = (\mathbf{I} + \mathbf{A} \times T_s)$, $\mathbf{B}_d = (\mathbf{B} \times T_s)$, $\mathbf{C}_d = \mathbf{C}$ และ $\mathbf{D}_d = \mathbf{D}$ ที่อยู่ภายใต้เวลาสุ่มตัวอย่าง

(T_s) นอกจากนี้สมการเหล่านี้ไม่มีเวลาตายตัว เนื่องจากตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ในโปรแกรม MATLAB & Simulink® จะชดเชยค่าดังกล่าว [48]

2.5.2 การเพิ่มประสิทธิภาพตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า

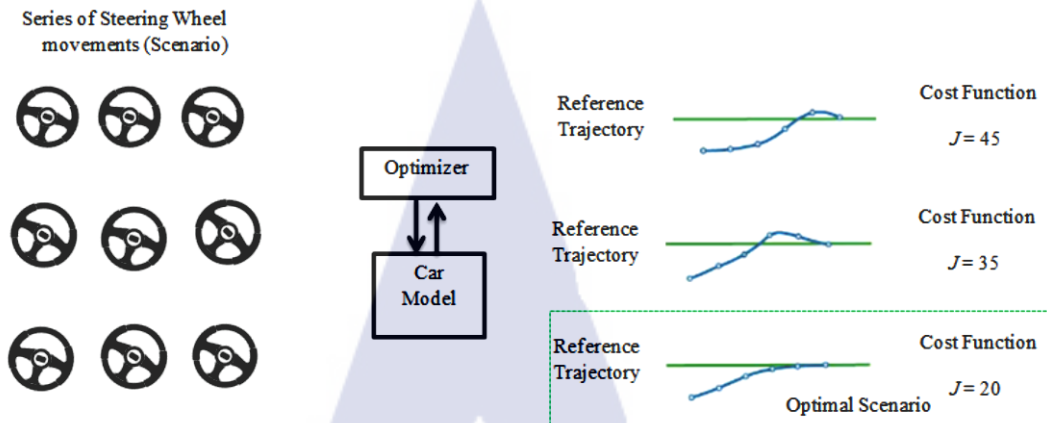
ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าสามารถแก้ปัญหาการปรับให้เหมาะสมซึ่งเป็นปัญหาคำกำลังสอง (Quadratic programming: QP) สำหรับแต่ละช่วงการควบคุมเฉพาะได้ด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

2.5.2.1 สมการวัตถุประสงค์ (Cost Function)

สมการวัตถุประสงค์ทำหน้าที่วัดประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า โดยการปรับแต่งตัวควบคุมอินพุตของระบบให้เหมาะสมที่สุด เพื่อให้เอาต์พุตของระบบเป็นไปตามการอ้างอิง (Reference) ที่ต้องการ กระบวนการนี้ดำเนินการอย่างเป็นระบบโดยใช้สถานการณ์จำลองที่แตกต่างกัน และลดสมการวัตถุประสงค์ในการปรับแต่งให้เหลือน้อยที่สุด สามารถแสดงสมการวัตถุประสงค์ (Cost function, J) ของระบบบังคับขับเคลื่อนในรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ ได้ดังสมการที่ (2.58) ดังนี้

$$\min_{\Delta u(k)} J = \sum_{i=1}^{N_p} \|y_p(k+i|k) - y_r(k+i|k)\|_{Q_y}^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta u(k+i|k)\|_{R_u}^2 \quad (2.58)$$

เมื่อ	J	คือ สมการวัตถุประสงค์
	N_p	คือ ขอบฟ้าการทำนาย
	N_c	คือ ขอบเขตการควบคุม
	Δu	คือ เวกเตอร์อินพุตควบคุมที่เหมาะสมที่สุด
	y_p	คือ สถานะที่คาดการณ์ของระบบ
	y_r	คือ สถานะที่คาดการณ์ของตัวอ้างอิง
	Q_y	คือ เมทริกซ์การถ่วงน้ำหนักสำหรับเอาต์พุต
	R_u	คือ เมทริกซ์การถ่วงน้ำหนักสำหรับอินพุต



รูปที่ 2.15 กลยุทธ์การทำนายสำหรับปัญหาการปรับให้เหมาะสม [49]

จากรูปที่ 2.15 แสดงถึงสถานการณ์จำลองที่สมการวัตถุประสงค์ของระบบ บังคับเลี้ยวของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติที่มีค่าขั้นต่ำ $J = 20$ ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมซึ่งสามารถ บรรลุการติดตามวิถีอ้างอิงได้อย่างเหมาะสม แสดงให้เห็นว่าการปรับแต่งตัวควบคุมที่ดีที่สุดจะ สอดคล้องกับค่าที่น้อยที่สุดของสมการวัตถุประสงค์ (Cost function, J) [49]

2.5.2.2 ข้อจำกัด

ข้อจำกัด (Constraints) ข้อดีประการหนึ่งของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ ล่วงหน้า คือ สามารถกำหนดข้อจำกัดของระบบได้ในสมการวัตถุประสงค์และนำมาพิจารณาในการ เพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งทำให้สามารถรวมข้อจำกัดทางกายภาพ เพื่อแสดงขอบเขตซึ่งไม่ควรละเมิด เนื่องจากเหตุผลด้านความปลอดภัย สามารถใช้ได้กับทั้งค่าอินพุตและเอาต์พุตและมีโครงสร้างพื้นฐาน ดังแสดงในสมการที่ (2.59) - (2.60) ดังนี้

$$u_{min} \leq \mathbf{u}(k + i|k) \leq u_{max} \quad (2.59)$$

$$y_{min} \leq \mathbf{y}(k + i|k) \leq y_{max} \quad (2.60)$$

จากสมการที่ (2.59) - (2.60) ข้อจำกัดของระบบสามารถกำหนดได้โดยการ ปรับสมการวัตถุประสงค์ให้เหมาะสม และสามารถนำไปใช้กับทั้งเวกเตอร์อินพุต $\mathbf{u} = \delta_f$ ของมุม บังคับเลี้ยวของล้อหน้า ที่ $i = 1, 2, \dots, N_p$ และเวกเตอร์เอาต์พุต $\mathbf{y} = [\psi \ y]^T$ ของมุมหันเห ชั่วขณะและวิถีโคจรของยานพาหนะตามแนวขวาง ที่ $i = 1, 2, \dots, N_c - 1$ ตามลำดับ

2.5.2.3 พารามิเตอร์การออกแบบตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า

การออกแบบตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า คำนึงถึงข้อจำกัดที่จำเป็น เช่น ข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว ซึ่งพารามิเตอร์การออกแบบตัวควบคุมมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากส่งผลต่อประสิทธิภาพการปรับค่าที่เหมาะสม ดังนั้น การเลือกพารามิเตอร์การออกแบบควรคำนึงถึงความสมดุลระหว่างภาระในการคำนวณและประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการพิจารณาเป็นพารามิเตอร์ได้ดังนี้

1) เวลาตัวอย่าง (Sample Time: T_s) ในกรณีที่เวลาควบคุมเวลาตัวอย่างมากเกินไป ตัวควบคุมจะไม่สามารถตอบสนองต่อการรบกวนได้ทันเวลา ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในทางลบ ในทางกลับกันหากเวลาตัวอย่างน้อยเกินไป การตอบสนองของตัวควบคุมจะเร็วขึ้น แต่จะเพิ่มภาระในการคำนวณ และจากคำแนะนำควรเลือกเวลาตัวอย่างระหว่าง 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ของเวลาที่เพิ่มขึ้น (T_r) [50]

2) ขอบฟ้าการทำนาย (Prediction horizon: N_p) ควรเลือกขอบฟ้าการทำนายในลักษณะที่ครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงของระบบแบบพลศาสตร์ และจากคำแนะนำควรเลือกขอบฟ้าการทำนาย (N_p) ระหว่าง 10 ถึง 20 ของเวลาที่เพิ่มขึ้น (T_r) [51]

3) ขอบเขตการควบคุม (Control Horizon: N_c) การเลือกขอบเขตการควบคุมมากเกินไปจะเพิ่มความซับซ้อนในการคำนวณ และจากคำแนะนำควรเลือกขอบเขตการควบคุมระหว่าง 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ของขอบฟ้าการทำนาย (N_p) และยิ่งค่าขอบเขตการควบคุมมีค่าน้อยจะมีความเสถียรมากกว่าขอบเขตการควบคุมที่มีค่ามาก เนื่องจากจะลดความหนาทนทานของระบบลง [52]

2.5.3 การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า

การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (MPC) มีความหลากหลายและกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่นในอุตสาหกรรมของหุ่นยนต์ ส่วนใหญ่จะใช้ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า เพื่อวางแผนและควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ที่มีความเป็นอิสระและไม่เชิงเส้น ช่วยให้มีการควบคุมที่แม่นยำและปรับปรุงการตอบสนองได้ดีกว่าหลักการควบคุมอื่น ๆ กล่าวคือ หุ่นยนต์เหล่านี้จะต้องรักษาเสถียรภาพในสภาพแวดล้อมแบบพลศาสตร์ที่ต้องใช้ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า เนื่องจากปัญหาความไม่เสถียรขณะใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (Proportional-Integral-Derivative Control: PID) ดังนั้นจากการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าในอุตสาหกรรมจึงเป็นหนึ่งในกลยุทธ์การควบคุมที่ใช้บ่อยที่สุด [53] นอกจากนี้การใช้งานตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าในรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ จะถูกนำมาใช้ในการติดตามเส้นทางของยานพาหนะ เพื่อควบคุมวิถีของและรักษาวิถีที่แม่นยำระหว่างการขับขี่ โดยมี

จุดมุ่งหมายเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการติดตามเส้นทาง ลดข้อผิดพลาด และปรับปรุงความสามารถในการควบคุมและการนำทางโดยรวม [54]

2.6 โครงสร้างการควบคุมของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์นี้ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC) เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการศึกษาการควบคุมเสถียรภาพความเร็วในการเข้าโค้งของแบบจำลองรถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 ในระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน ที่สามารถปรับแต่งทิศทางการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของยานพาหนะ (Lateral Position) และมุมหันเห (Yaw Angle) ให้อยู่ในสภาวะที่ต้องการ โดยการปรับแต่งสมการวัตถุประสงค์ ของระบบบังคับเลี้ยว (Steering Systems) ในรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติให้มีความเหมาะสม โดยโครงสร้างการควบคุมมีรายละเอียดดังนี้

1) แบบจำลองอ้างอิง (References Model) ในการกำหนดการทำงานของระบบควบคุมแบบจำลองแบบคาดการณ์ล่วงหน้า จะใช้การวางแผนวิถีแบบสมการพหุนามกำลังห้า (Quintic Polynomial Equations) เป็นแบบจำลองอ้างอิงซึ่งใช้ในการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ในวิทยานิพนธ์นี้ ที่กำหนดตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ของยานพาหนะอ้างอิง

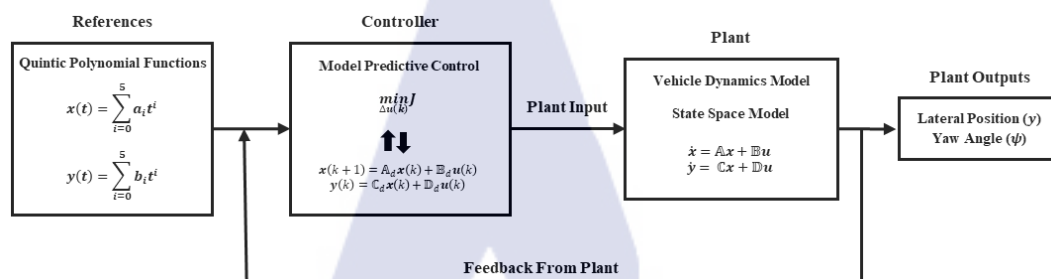
2) แบบจำลองตัวควบคุม (Controller Model) ในอัลกอริทึมการควบคุมระบบจะใช้ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control) ซึ่งจะคาดการณ์และคำนวณพฤติกรรมของระบบในอนาคตอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อปรับอินพุตมุมบังคับเลี้ยวของตัวควบคุมให้วิถีโคจรของยานพาหนะอยู่ในเส้นทางที่ต้องการอย่างแม่นยำและปลอดภัยใกล้เคียงกับแบบจำลองวิถีอ้างอิงในทุกช่วงเวลา

3) แบบจำลองระบบ (Plant Model) ในระบบควบคุมแบบจำลองแบบคาดการณ์ล่วงหน้า จะใช้แบบจำลองปริภูมิสถานะ (State Space Model) ของสมการแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ (Vehicle Dynamics Model) เป็นแบบจำลองยานพาหนะหรือแบบจำลองระบบ ซึ่งเป็นการบูรณาการระบบจลนศาสตร์และพลศาสตร์ของยานพาหนะในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่มีครอบคลุมทั้งการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่และการควบคุมการบังคับเลี้ยวของยานพาหนะ

4) การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ในระบบควบคุมแบบจำลองแบบคาดการณ์ล่วงหน้าจะใช้เอาต์พุตที่วัดได้ (Measured Output) จากแบบจำลองระบบของยานพาหนะ ในที่นี้ คือ วิถีโคจรการเคลื่อนที่ตามแนวขวาง (Lateral Position) และมุมหันเห (Yaw Angle) เพื่อปรับค่าของอินพุตที่เป็นมุมบังคับเลี้ยว (δ) ให้สอดคล้องกับแบบจำลองวิถีอ้างอิงที่กำหนด

ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ โครงสร้างการควบคุมที่สมบูรณ์ ประกอบไปด้วย แบบจำลองอ้างอิง แบบจำลองตัวควบคุม แบบจำลองระบบ และการควบคุมแบบป้อนกลับ ที่ใช้ในการควบคุม

ยานพาหนะให้มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการควบคุมทั้งวิถีโคจรการเคลื่อนที่ตามแนวขวาง และมุมหันเห ให้อยู่ในสถานะที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.16



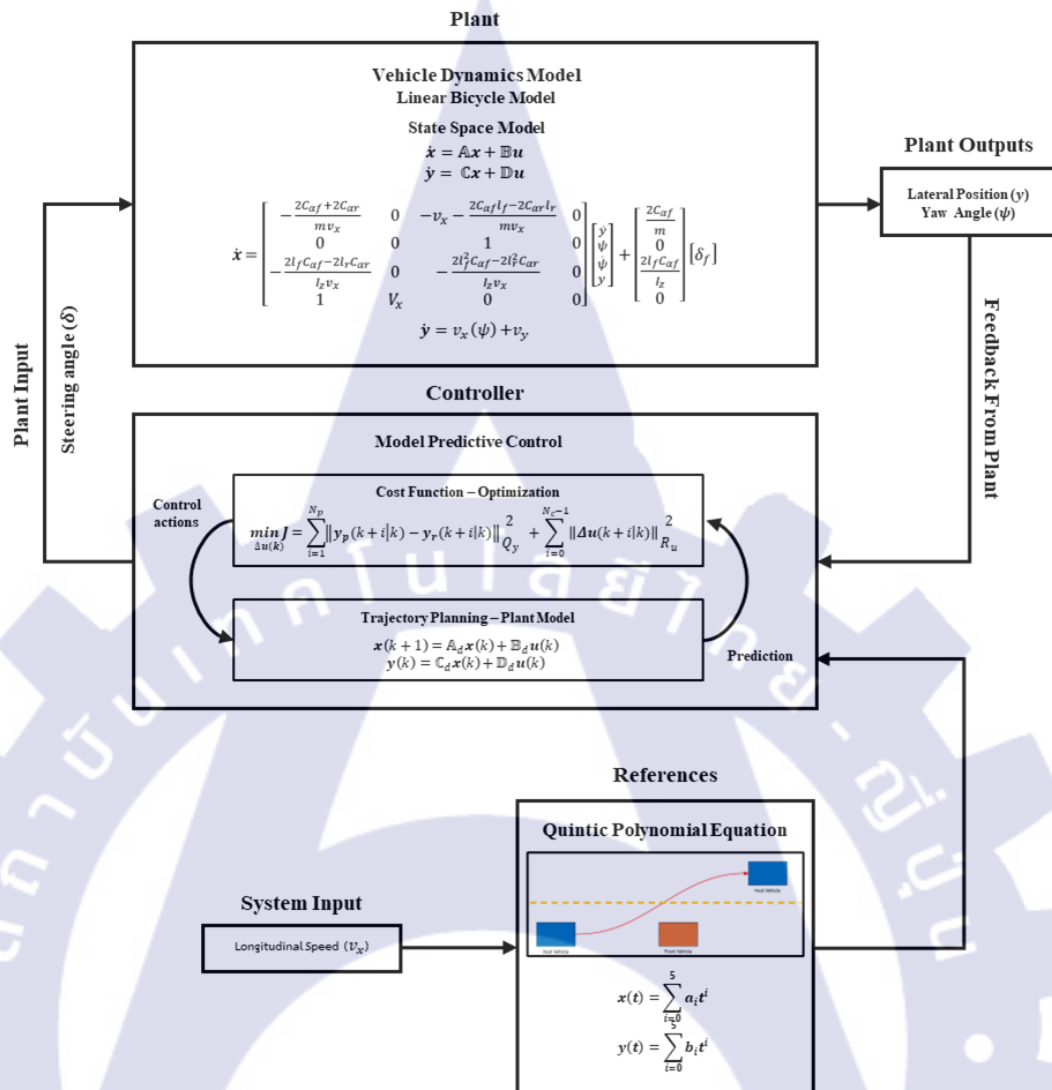
รูปที่ 2.16 แผนภาพตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของวิทยานิพนธ์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 วิธีการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ ศึกษาผลของตัวแปรที่มีผลต่อตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC) สำหรับการควบคุมเสถียรภาพความเร็วในการเข้าโค้งของแบบจำลองรถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 ในระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน โดยมีวิธีการดำเนินงานวิจัย เริ่มต้นจากการอ้างอิงข้อมูลการสร้างแบบจำลองรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติจากรถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 ที่ประยุกต์ใช้กับแบบจำลองปริภูมิสถานะ (State Space Model) ของสมการแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ (Vehicle Dynamics Model) ในรูปแบบจำลองจักรยานเชิงเส้น (Linear Bicycle Model) ขั้นตอนต่อมา คือ การวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะด้วยสมการพหุนามกำลังห้า (Quintic Polynomial Equations) เพื่อกำหนดตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ทำให้เกิดวิถีโคจรเริ่มต้นและมุมหันเหช่วงของยานพาหนะอ้างอิง โดยกำหนดให้แบบจำลองยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยการหักเลี้ยวทางซ้าย เพื่อเปลี่ยนช่องจราจรทางเดียว (Single Lane Change) ภายใต้ความเร็วตามแนวยาว (v_x) ตั้งแต่ 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที ผ่านการสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม MATLAB & Simulink® โดยความเร็วตามแนวยาวของยานพาหนะ (v_x) จะถูกมองว่าเป็นอินพุตของระบบ และสุดท้ายนี้ คือ การเพิ่มประสิทธิภาพการปรับแต่งตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (MPC) ที่เหมาะสม ด้วยการปรับแต่งพารามิเตอร์ตัวควบคุมในสมการวัตถุประสงค์ (Cost function, J) ของระบบบังคับเลี้ยวในรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติให้เหลือน้อยที่สุด ภายใต้ข้อกำหนดต่าง ๆ เช่น การจำกัดตำแหน่ง การจำกัดความเร็ว การหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง เกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสม และพลศาสตร์ยานยนต์ เพื่อให้มั่นใจว่าตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (MPC) สามารถควบคุมเสถียรภาพความเร็วการเข้าโค้งของยานพาหนะในระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพวิธีการวิจัยโดยใช้ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า

3.2 แบบจำลองยานพาหนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ รถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 ประเภทบังคับเลี้ยวในสองล้อหน้า เป็นแบบจำลองพื้นฐานของงานวิจัย ที่ตอบสนองวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในด้านการควบคุมของยานพาหนะและการขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งแบบจำลองยานพาหนะแสดงถึงแบบจำลองระบบ (Plant Model) ในระบบควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองปริภูมิสถานะ ที่แสดงถึงระบบพลศาสตร์ยานยนต์ในแง่ของเวกเตอร์สถานะ ($\mathbf{x}$) อินพุต ($\mathbf{u}$) และเอาต์พุต ($\mathbf{y}$) ที่ประกอบด้วยสมการหลักสองสมการ คือ สมการตัวแปรสถานะ $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$

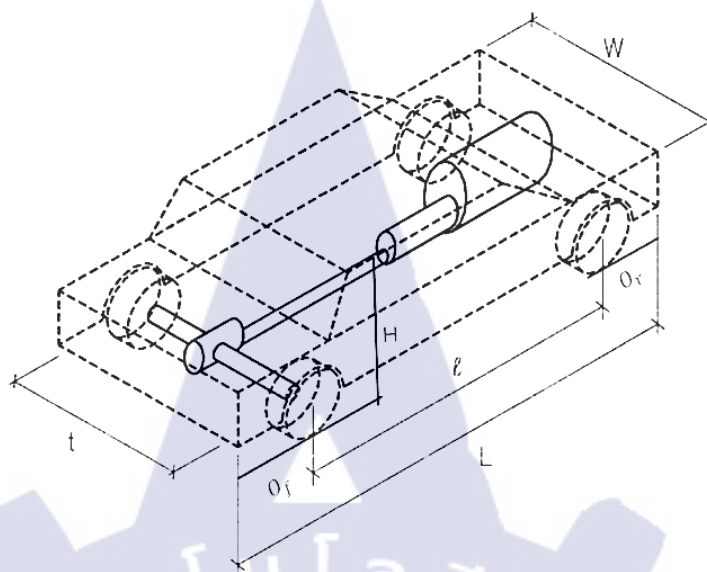
และสมการเอาต์พุต $\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u}$ โดยระบบพลศาสตร์ยานยนต์ในรูปแบบจำลองจักรยานเชิงเส้นที่บูรณาการแบบจำลองจลนศาสตร์ของการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ (Motion Planning) เข้ากับแบบจำลองพลศาสตร์ของตัวควบคุมการบังคับเลี้ยว (Steering Controller) เพื่อสร้างแบบจำลองปริภูมิสถานะที่ครอบคลุมทั้งการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่และการควบคุมการบังคับเลี้ยวของยานพาหนะ อ้างอิงจากสมการที่ (2.34) – (2.35) ที่แสดงถึงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของยานพาหนะในวิทยานิพนธ์นี้ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของรถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10

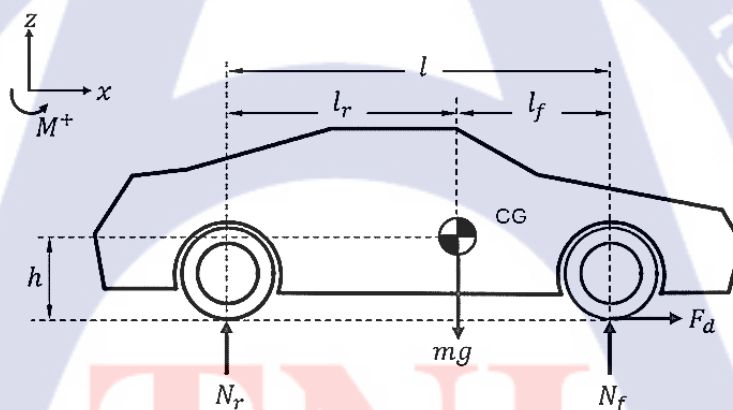
คำอธิบาย	พารามิเตอร์ของยานพาหนะ		
	พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
มวลรวมของยานพาหนะ	m	1.659	kg
ความยาวของยานพาหนะ	L	0.373	m
ความกว้างของตัวรถ	W	0.188	m
ความสูงของยานพาหนะ	H	0.12	m
ส่วนยื่นด้านหน้าของตัวรถจากกึ่งกลางล้อหน้า	O_f	0.084	m
ส่วนยื่นด้านหลังของตัวรถจากกึ่งกลางล้อหลัง	O_r	0.032	m
ระยะห่างจากจุดศูนย์ถ่วงยานพาหนะถึงกึ่งกลางล้อหน้า	l_f	0.1247	m
ระยะห่างจากจุดศูนย์ถ่วงยานพาหนะถึงกึ่งกลางล้อหลัง	l_r	0.1323	m
โมเมนต์ความเฉื่อยของยานพาหนะ	I_z	0.0241	$kg \cdot m^2$
ค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อหน้า	$C_{\alpha f}$	0.169	m
ค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อหลัง	$C_{\alpha r}$	0.495	m

ซึ่งพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ของยานพาหนะ เช่น มวลรวม ความยาว ความกว้าง ความสูงของยานพาหนะ ระยะยื่นจากด้านหน้าและด้านหลังจากจุดกึ่งกลางล้อ และโมเมนต์ความเฉื่อยของยานพาหนะที่อ้างอิงจากสมการที่ (3.1) สามารถวัดได้โดยตรงจากแบบจำลองยานพาหนะ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 นอกจากนี้ พารามิเตอร์บางส่วนที่มีความซับซ้อนในการวัดข้อมูลเพิ่มเติม เช่น ระยะห่างจากจุดศูนย์ถ่วงยานพาหนะถึงกึ่งกลางล้อหน้าและล้อหลัง ที่มีการวัดพารามิเตอร์อ้างอิงจากจุดศูนย์ถ่วงของยานพาหนะ ดังแสดงในรูปที่ 3.3

$$I_z = \frac{1}{12} m(L^2 + W^2) \quad (3.1)$$

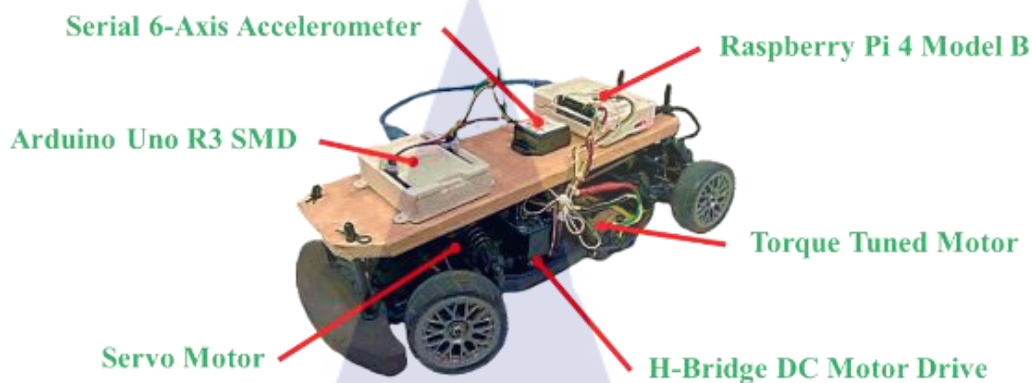


รูปที่ 3.2 ยานพาหนะในแนวพิกัดฉาก [55]



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางในแนวแกน X [56]

เนื่องจากพารามิเตอร์บางค่าของยานพาหนะไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากแบบจำลองยานพาหนะ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อหน้า แต่สามารถวัดได้จากเซนเซอร์หน่วยวัดความเฉื่อย 6 แกนที่ติดตั้งบนแบบจำลองรถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยรวบรวมข้อมูลผ่านบอร์ดควบคุมชนิด Arduino UNO R3 และประมวลผลโดยบอร์ดควบคุม Raspberry PI 4B ร่วมกับการใช้สมการที่ (2.1) – (2.27) ของแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ ในที่นี้ค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อหน้า อ้างอิงจากความเร็วการเคลื่อนที่ตามแนวยาวของยานพาหนะ (v_x) ที่ 0.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 3.4 รถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 ที่ใช้ในการทดสอบ

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของของรถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองระบบ (Plant Model) ในระบบควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ซึ่งจะช่วยทำให้ระบบการควบคุมและการวางแผนวิถี (Trajectory Planning) ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและเสถียรมากยิ่งขึ้น

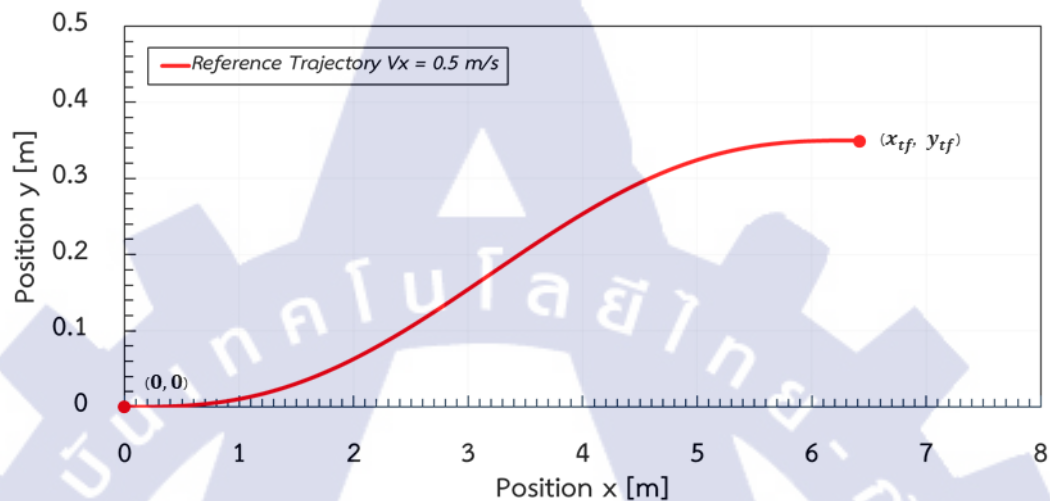
3.3 การวางแผนวิถี

ในวิทยานิพนธ์นี้ การวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ (Trajectory Planning) เป็นส่วนหนึ่งของลำดับขั้นการควบคุมสำหรับระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติ ในการควบคุมการเปลี่ยนช่องจราจรที่พิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น สิ่งกีดขวาง และสภาพถนน โดยใช้อัลกอริทึมการวางแผนวิถีแบบสมการพหุนามกำลังห้า (Quintic Polynomial Equations) ที่แสดงถึงตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ทำให้เกิดวิถีโคจรเริ่มต้นและมุมหันเหชั่วขณะ ที่ใช้ในการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของแบบจำลองอ้างอิง (Reference Model) ในแบบจำลองแบบคาดการณ์ล่วงหน้า

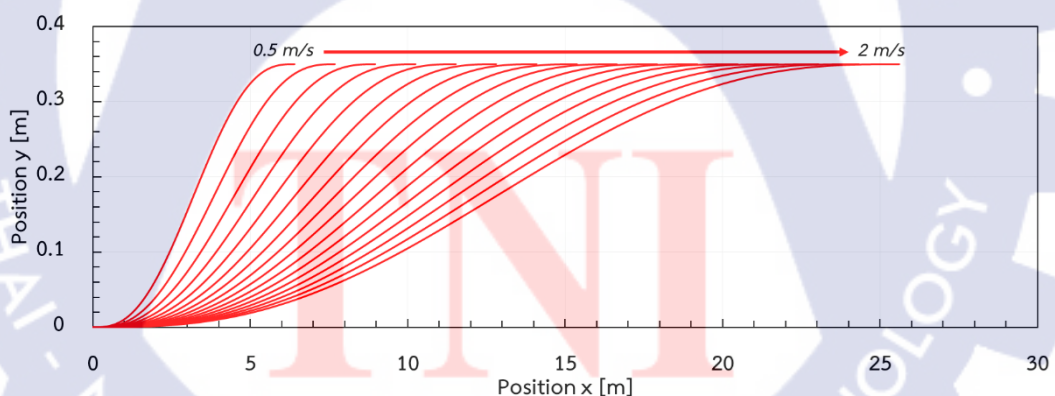
กำหนดสถานการณ์การจำลองยานพาหนะ ในวิทยานิพนธ์นี้ คือ การหักเลี้ยวทางซ้ายเพื่อเปลี่ยนช่องจราจรทางเดียว (Single Lane Change) โดยสร้างวิถีโคจรและมุมหันเหชั่วขณะภายใต้สมการพหุนามกำลังห้า (Quintic Polynomial Equations)

การวางแผนวิถีในสมการพหุนามกำลังห้า ที่ใช้เป็นแบบจำลองอ้างอิงของระบบ มีขั้นตอนการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ เริ่มจากการกำหนดสถานะเริ่มต้นที่ $(0, 0)$ ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งเริ่มต้นของยานพาหนะ และสถานะสุดท้ายที่ (x_{tf}, y_{tf}) แสดงถึงตำแหน่งสิ้นสุดของยานพาหนะ หลังจากเสร็จสิ้นการเปลี่ยนช่องจราจร ร่วมกับการประยุกต์ใช้สมการที่ (2.36) - (2.48) ที่แสดงถึงตำแหน่งวิถีโคจรของยานพาหนะในตำแหน่งตามแนวยาว (x) และตามแนวขวาง (y)

โดยสมการพหุนามกำลังห้าใช้สำหรับการวางแผนวิถีที่ขึ้นอยู่กับการเวลา เพื่อระบุเวลาในสถานะสุดท้ายของวิธีการเคลื่อนที่ กำหนดให้ความเร็วตามยาวของยานพาหนะ $v_x = 0.5$ เมตรต่อวินาที ที่เวลาของสถานะสุดท้าย (t_f) ถูกระบุเป็น $t_f = 12.8$ วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่ยานพาหนะใช้เพื่อไปถึงสถานะสุดท้ายที่ (x_{tf}, y_{tf}) ตามวิถีที่สร้างขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของยานพาหนะ (y)



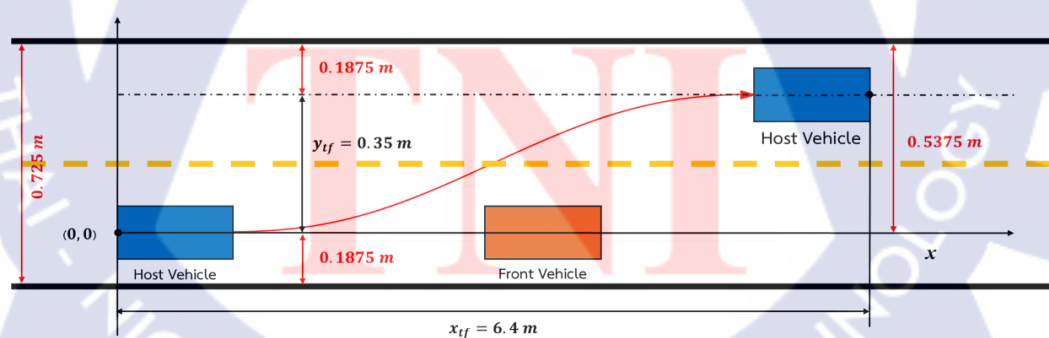
รูปที่ 3.6 วิถีโคจรที่ไม่มีข้อจำกัดการจำกัดตำแหน่ง ความเร็วตามยาว $v_x = 0.5$ ถึง 2 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 3.6 เมื่อกำหนดให้ความเร็วตามยาวของยานพาหนะอยู่ในช่วง $v_x = 0.5$ ถึง $v_{x_{max}} = 2$ เมตรต่อวินาที เพื่อวิเคราะห์วิธีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น กำหนดให้เวลาของสถานะสุดท้าย $t_f = 12.8$ วินาที เท่ากันทุกความเร็วการเคลื่อนที่ โดยพบว่าเมื่อ

ความเร็วเพิ่มสูงขึ้น ตำแหน่งสถานะสุดท้ายตามแนวยาว (x_{tf}) ของวิถีโคจรจะเคลื่อนที่ออกนอกวิถีโคจรที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นวิถีโคจรที่ไม่มีข้อจำกัดการจำกัดตำแหน่ง เช่น ที่ความเร็วตามยาวของยานพาหนะ $v_x = 0.5$ เมตรต่อวินาที เมื่อเวลาผ่านไป $t_f = 12.8$ วินาที ตำแหน่งตามแนวยาวของสถานะสุดท้าย (x_{tf}) ถูกระบุเป็น $x_{tf} = 6.4$ เมตร แต่เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น ที่ความเร็วตามยาวของยานพาหนะ $v_{x_{max}} = 2$ เมตรต่อวินาที เมื่อเวลาผ่านไป $t_f = 12.8$ วินาที ตำแหน่งสถานะสุดท้ายตามแนวยาว (x_{tf}) ถูกระบุเป็น $x_{tf} = 25.6$ เมตร

จากการวิเคราะห์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น การจำกัดตำแหน่ง การจำกัดความเร็ว การหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง เกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสม และพลศาสตร์ยานยนต์ เพื่อสร้างวิถีที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ

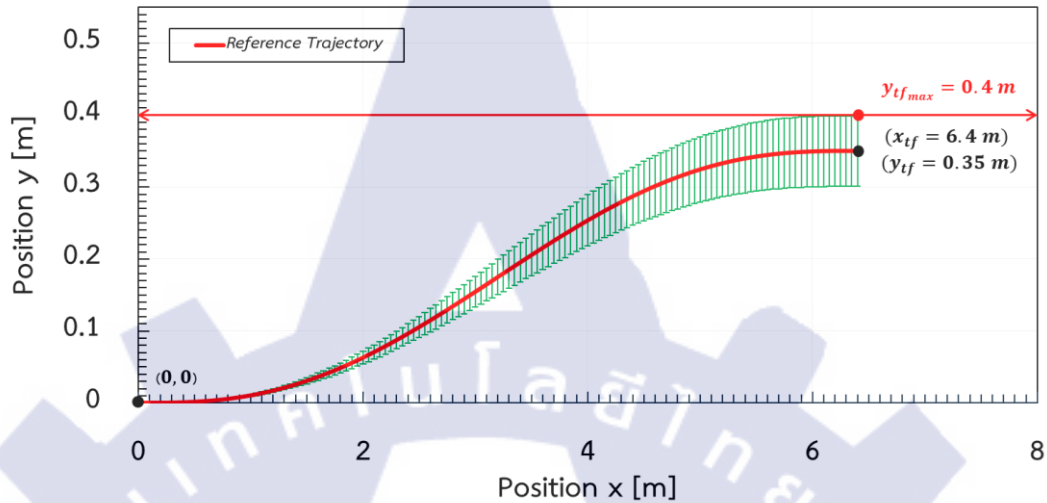
การจำกัดตำแหน่ง (Position Limitation) ภายใต้ข้อจำกัดของการวางแผนวิถีจากสถานะเริ่มต้นไปจนถึงสถานะสุดท้ายที่มีความกว้างของถนน 0.725 เมตร และความกว้างของช่องจราจร 0.35 เมตร ซึ่งข้อจำกัดเหล่านี้มีอิทธิพลต่อการวางแผนวิถี เพื่อให้แน่ใจว่ายานพาหนะจะอยู่ภายใต้ขอบเขตที่เป็นไปได้ในระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจร โดยกำหนดขอบเขตที่เป็นไปได้ในระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจร ได้จากสมการที่ (2.49) – (2.51) ที่ $y(t)$ และ $x(t)$ เป็นตำแหน่งตามแนวขวางและตามแนวยาวของยานพาหนะ และการจำกัดความเร็ว (Speed Limitation) ที่ $v_x(t)$ คือความเร็วตามแนวยาวของยานพาหนะที่ศึกษา ณ เวลา (t) โดยจำกัดความเร็วตามยาวของยานพาหนะให้อยู่ในช่วง $v_x = 0.5$ ถึง $v_{x_{max}} = 2$ เมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 วิธีการเคลื่อนที่ภายใต้การจำกัดตำแหน่ง

จากรูปที่ 3.7 ภายใต้ข้อจำกัดของการวางแผนวิถีจากสถานะเริ่มต้นที่ $(0, 0)$ ไปจนถึงสถานะสุดท้าย (x_{tf}, y_{tf}) ที่มีความกว้างของถนนถูกระบุเป็น 0.5375 เมตร เพื่อให้วิถีโคจรของยานพาหนะเคลื่อนที่ภายใต้ขอบเขตที่เป็นไปได้ในระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรโดยไม่หลุดออกจาก

ข้อจรรยา จังควรพิจารณาการจำกัดตำแหน่งสถานะสุดท้ายตามแนวขวางสูงสุด (y_{tfmax}) ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ตามแนวขวางของยานพาหนะ (y) ภายใต้การจำกัดตำแหน่ง

โดยในวิทยานิพนธ์นี้ ข้อกำหนดด้านความปลอดภัยในการจำกัดตำแหน่ง (Position Limitation) และการจำกัดความเร็ว (Speed Limitation) สามารถแสดงได้ดังนี้

1) ตำแหน่งตามแนวขวางของสถานะสุดท้าย $y(t)$

$$0 < y(t) < y_{tf} \leq y_{tfmax} \quad |\forall t \in [0, t_f]$$

$$0 < y(t) < 0.35 \text{ m} \leq 0.4 \text{ m}$$

2) ตำแหน่งตามแนวยาวของสถานะสุดท้าย $x(t)$

$$0 < x(t) < x_{tf} \leq x_{tfmax} \quad |\forall t \in [0, t_f]$$

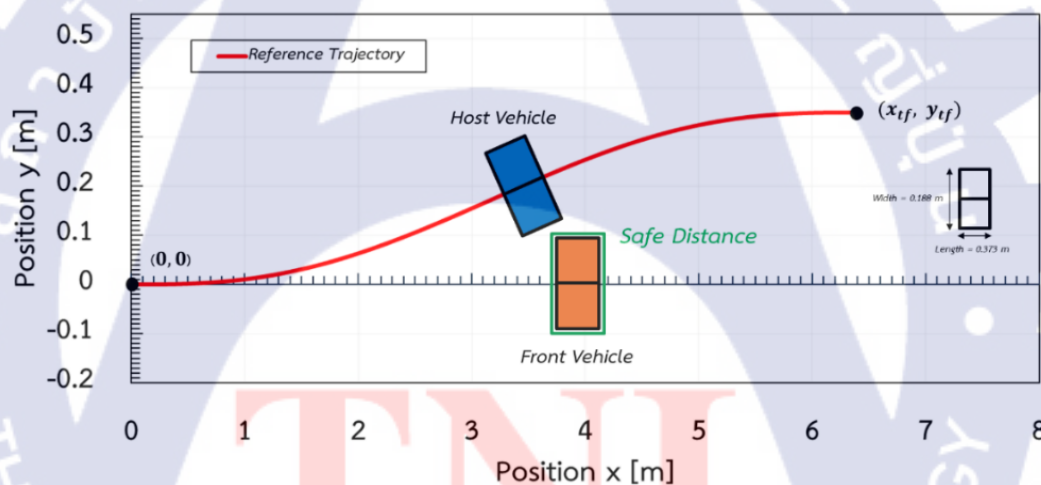
$$0 < x(t) < 6.4 \text{ m} \leq 6.4 \text{ m}$$

3) การจำกัดความเร็ว $v_x(t)$

$$0 < v_x(t) < v_{x_{max}}$$

$$0.5 \text{ m/s} < v_x(t) < 2 \text{ m/s}$$

จากรูปที่ 3.8 กำหนดสถานะเริ่มต้น $(0, 0)$ และสถานะสุดท้าย (x_{tf}, y_{tf}) ที่ตำแหน่งสถานะสุดท้ายตามแนวยาว $x_{tf} = 6.4$ เมตร และตำแหน่งสถานะสุดท้ายตามแนวขวาง $y_{tf} = 0.35$ เมตร โดยกำหนดให้ตำแหน่งสถานะสุดท้ายตามแนวขวางสูงสุดที่อนุญาตให้ศึกษา $y_{tf_{max}} = 0.4$ เมตร นอกจากนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉินให้มีครอบคลุมด้านความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น จำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยในส่วนของการหลีกเลี่ยงการชน (Collision Avoidance) เพิ่มเติม

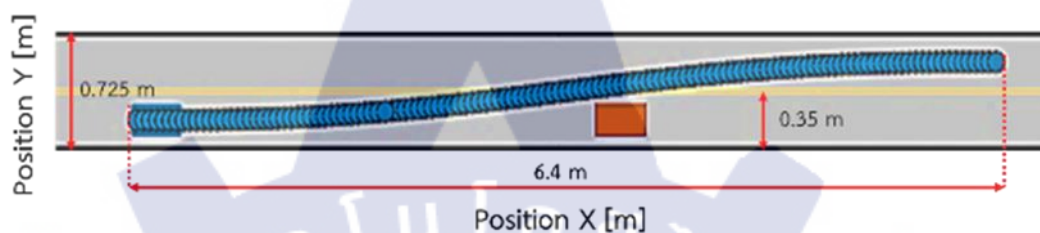


รูปที่ 3.9 ระยะห่างที่ปลอดภัย (Safe Distance)

จากรูปที่ 3.9 กำหนดให้แบบจำลองยานพาหนะที่ศึกษาหรือกล่องสี่เหลี่ยม (Host Vehicle) เคลื่อนที่ในทางตรงและทำการหักหลบยานพาหนะที่จอดกีดขวางหรือกล่องสี่เหลี่ยม (Front Vehicle) ในช่องจราจร 1 คัน ด้วยการหักเลี้ยวทางซ้าย เพื่อเปลี่ยนช่องจราจรทางเดียว (Single Lane Change) โดยแบบจำลองยานพาหนะกล่องสี่เหลี่ยมและกล่องสี่เหลี่ยมมีขนาดเท่ากัน ที่ความยาว 0.373 เมตร และความกว้าง 0.188 เมตร อ้างอิงจากพารามิเตอร์ของรถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 และกำหนดให้กึ่งกลางของแบบจำลองยานพาหนะที่จอดกีดขวางอยู่ ณ ตำแหน่งตามแนวยาว $x = 3.9365$ เมตร

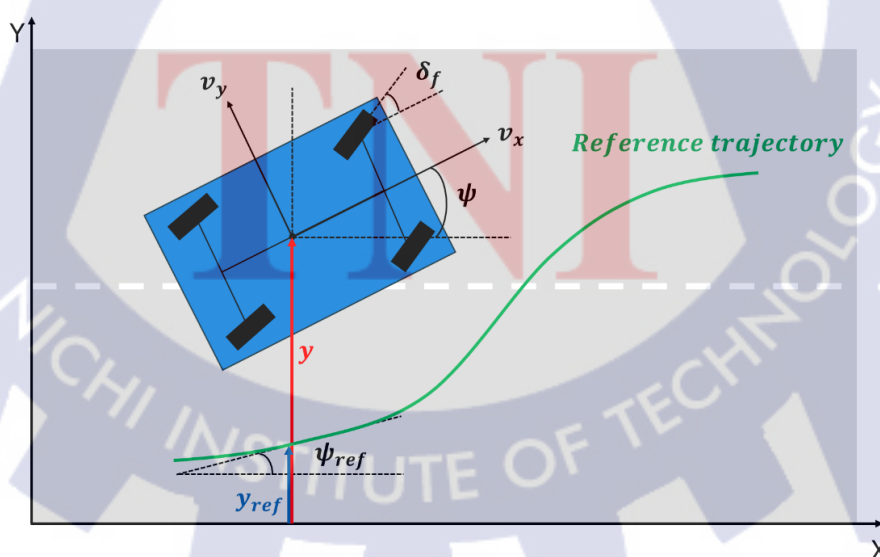
ภายใต้ข้อจำกัดของการวางแผนวิถีจากสถานะเริ่มต้น $(0, 0)$ ไปจนถึงสถานะสุดท้าย (x_{tf}, y_{tf}) เพื่อจำกัดตำแหน่งการเคลื่อนของยานพาหนะในระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉินภายใต้ขอบเขตระยะห่างที่ปลอดภัย (Safe Distance) โดยแบบจำลองยานพาหนะไม่เกิดการชนกัน

3.4 โปรแกรม MATLAB & Simulink®



รูปที่ 3.10 Driving Scenario Designer ในโปรแกรม MATLAB & Simulink®

จากรูปที่ 3.10 ในวิทยานิพนธ์นี้ จำลองสถานการณ์การวางแผนการเคลื่อนที่เข้ากับแบบจำลองยานพาหนะในแอปพลิเคชัน Automated Driving Toolbox's Driving Scenario Designer บนโปรแกรม MATLAB & Simulink® เพื่อปรับปรุงความปลอดภัย และเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉินของรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งโดยรวมของยานพาหนะบนระนาบ $X - Y$

จากรูปที่ 3.11 แอปพลิเคชัน Driving Scenario Designer สามารถแสดงตำแหน่งของยานพาหนะบนระนาบ $X - Y$ รวมไปถึงตำแหน่งโดยรวมของยานพาหนะตามแนวยาวและตามแนวขวาง (x, y) เพื่อติดตามวิถีโคจรของยานพาหนะตามแนวขวาง (y) และมุมหันเหชั่วขณะ (ψ) โดยมีมุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) เป็นตัวควบคุมยานพาหนะให้อยู่ในสภาวะวิถีโคจรที่ต้องการ

โดยสามารถประเมินประสิทธิภาพการวางแผนวิถี ภายใต้การจำกัดความเร็วตามยาวของยานพาหนะในระหว่างช่วง $v_x = 0.5$ ถึง 2 เมตรต่อวินาที เพื่อให้วิถีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเป็นไปตามข้อกำหนดทั้งหมด เช่น ความราบรื่น การหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง และขีดจำกัดความเร็ว ซึ่งครอบคลุมเกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสมตามหลักสมมติฐานที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ ดังนี้

1) สมมติฐานว่าวิถีโคจรตามแนวขวาง (y) ของยานพาหนะสัมพันธ์กับวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) ตลอดการเคลื่อนที่ ทำให้ลดความซับซ้อนของกระบวนการวางแผนวิถี และช่วยรักษาวัดวิถีโคจรของยานพาหนะให้อยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงกับวิถีโคจรอ้างอิง โดยสามารถประเมินประสิทธิภาพการวางแผนวิถีได้จากค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองค่าเฉลี่ยราก หรือ Root Mean Square Error (RMSE) ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ (3.2)

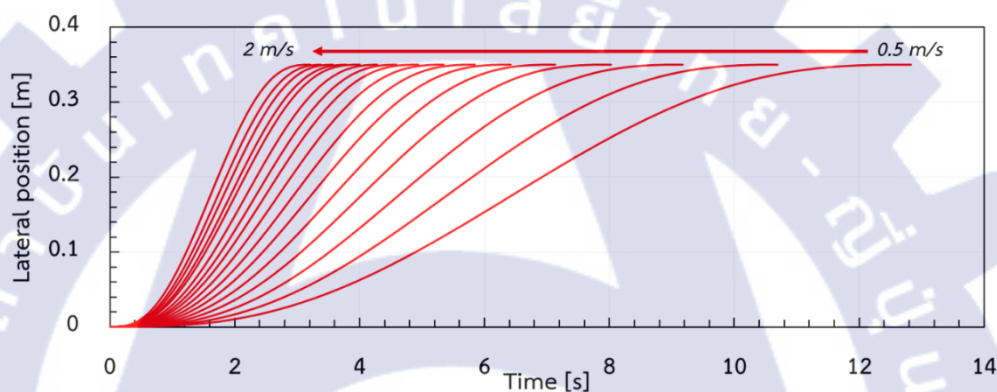
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_{ref_i} - y_{predicted_i})^2}{N}} \quad (3.2)$$

เมื่อ y_{ref}	คือ ตำแหน่งวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref})
$y_{predicted}$	คือ ตำแหน่งวิถีโคจรของยานพาหนะ (y)
N	คือ ขนาดตัวอย่าง

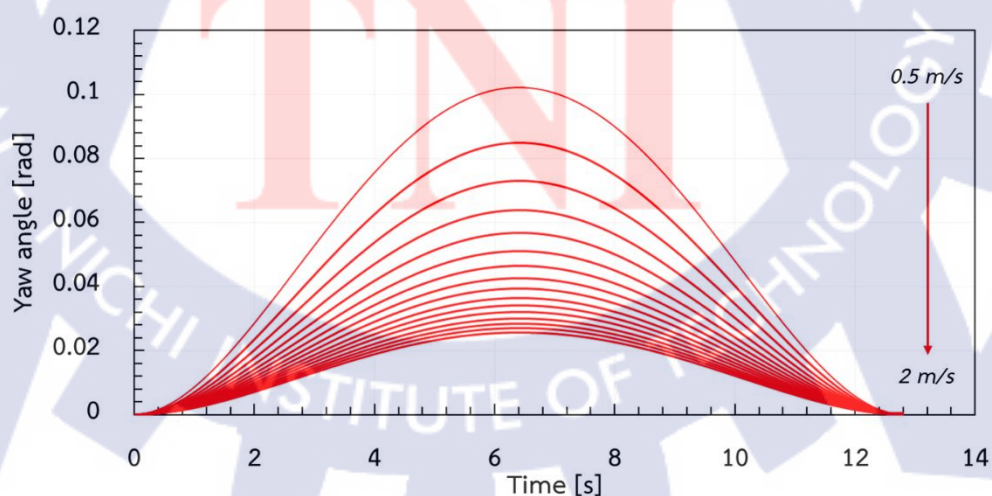
2) สมมติฐานว่ามุมหันเหชั่วขณะ (ψ) มีขนาดเล็กลงเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเพิ่มสูงขึ้น ช่วยให้ยานพาหนะมีความเสถียรระหว่างการเคลื่อนที่

ข้อสมมติฐานนี้ช่วยกำหนดการออกแบบวิถีโคจรที่ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพสำหรับการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในระหว่างการหลีกเลี่ยงการชนเมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งความเสถียรและการควบคุมเป็นปัจจัยสำคัญ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) และมุมหันเหอ้างอิง (ψ_{ref}) ได้จากสมการพหุนามกำลังห้า (Quintic Polynomial Equations) ที่ความเร็วตามยาวของยานพาหนะ $v_x = 0.5$ เมตรต่อวินาที

จากข้อสมมติฐานเหล่านี้สามารถอ้างอิงจากวิถีโคจรของยานพาหนะที่ไม่มีข้อจำกัดการปรับแต่งวิถีโคจรที่เหมาะสมใด ๆ นอกเหนือจากสมการพหุนามกำลังห้า (Quintic Polynomial Equations) สามารถแสดงวิถีโคจรตามแนวขวาง (y) และมุมหันเหชั่วขณะ (ψ) ที่ปราศจากเงื่อนไขการปรับวิถีโคจร ได้จากรูปที่ 3.12 - 3.13 ตามลำดับ ภายใต้การจำกัดตำแหน่งตามแนวยาวของสถานะสุดท้าย $x_{tf} = 6.4$ เมตร และการจำกัดความเร็วตามยาวของยานพาหนะในระหว่างช่วง $v_x = 0.5$ ถึง 2 เมตรต่อวินาที แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเพิ่มสูงขึ้น วิถีโคจรตำแหน่งตามแนวขวางของสถานะสุดท้าย (y_{tf}) จะเบี่ยงออกจากเส้นทางอ้างอิง (y_{ref}) ที่กำหนดไว้ อย่างไรก็ตามมุมหันเหชั่วขณะ (ψ) จะมีขนาดเล็กลงเป็นไปตามข้อสมมติฐานการเพิ่มประสิทธิภาพการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่



รูปที่ 3.12 วิถีโคจรตามแนวขวาง (y) ต่อเวลา ที่ปราศจากเงื่อนไขการปรับวิถีโคจร



รูปที่ 3.13 มุมหันเหชั่วขณะ (ψ) ต่อเวลา ที่ปราศจากเงื่อนไขการปรับวิถีโคจร

ดังนั้น เพื่อให้วิถีโคจรตามแนวขวาง (y) ของยานพาหนะสัมผัสกับวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) ตลอดการเคลื่อนที่ จำเป็นจะต้องบูรณาการตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC) ร่วมกับการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะด้วยสมการพหุนามกำลังห้า (Quintic Polynomial Equations) เพื่อให้มั่นใจถึงประสิทธิภาพการควบคุมยานพาหนะระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน ภายใต้ข้อจำกัดด้านพลศาสตร์ยานยนต์ และการปรับแต่งตัวควบคุมที่เหมาะสม

3.5 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า

ในวิทยานิพนธ์นี้ การออกแบบตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC) บนโปรแกรม MATLAB & Simulink® ประกอบไปด้วย สมการทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบจำลองปริภูมิสถานะ (State Space Model) ของสมการแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ (Vehicle Dynamics Model) ที่นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมที่เรียบง่ายโดยอ้างอิงตามแบบจำลองระบบเวลาคงที่เชิงเส้น (Linear Time-Invariant: LTI) ในรูปแบบของฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer function) [57]

3.5.1 การปรับแต่งตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า

ในวิทยานิพนธ์นี้ การปรับแต่งตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า จะพิจารณาการปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของระบบบังคับเลี้ยวในยานพาหนะเป็นหลัก โดยการลดสมการวัตถุประสงค์ (J) ในการปรับแต่งให้เหลือน้อยที่สุด เพื่อวัดประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าให้ครอบคลุมเกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดด้านพลศาสตร์ยานยนต์ ด้วยการปรับแต่งตัวควบคุมอินพุตมุมบังคับเลี้ยวของระบบ $u = \delta_f$ ให้เหมาะสมที่สุด เพื่อให้เอาต์พุตวิถีโคจรของยานพาหนะตามแนวขวางของระบบ (y) เป็นไปตามวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) ตลอดการเคลื่อนที่ โดยสามารถแสดงสมการวัตถุประสงค์ (Cost function, J) จากสมการที่ (2.58) ได้ดังนี้

$$\min_{\Delta u(k)} J = \sum_{i=1}^{N_p} \|\mathbf{y}_p(k+i|k) - \mathbf{y}_r(k+i|k)\|_{Q_y}^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta \mathbf{u}(k+i|k)\|_{R_u}^2$$

เมื่อ y_r คือ ตำแหน่งวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref})

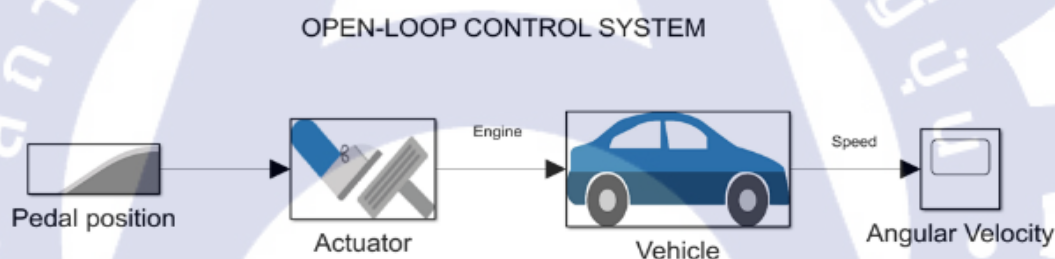
y_p คือ ตำแหน่งวิถีโคจรของยานพาหนะ (y)

การปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ประกอบไปด้วยตัวแปรพารามิเตอร์ ตัวควบคุมหลายตัว ส่งผลให้วิถีโคจรตามแนวขวาง (y) ของยานพาหนะขึ้นอยู่กับ การปรับแต่งตัวแปร พารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า โดยสามารถศึกษาตัวแปรพารามิเตอร์ที่ส่งผลกับ ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (MPC) ได้ดังนี้

3.5.2 ตัวแปรที่ส่งผลกับตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า

3.5.2.1 ตัวแปรควบคุมการคาดการณ์ล่วงหน้า

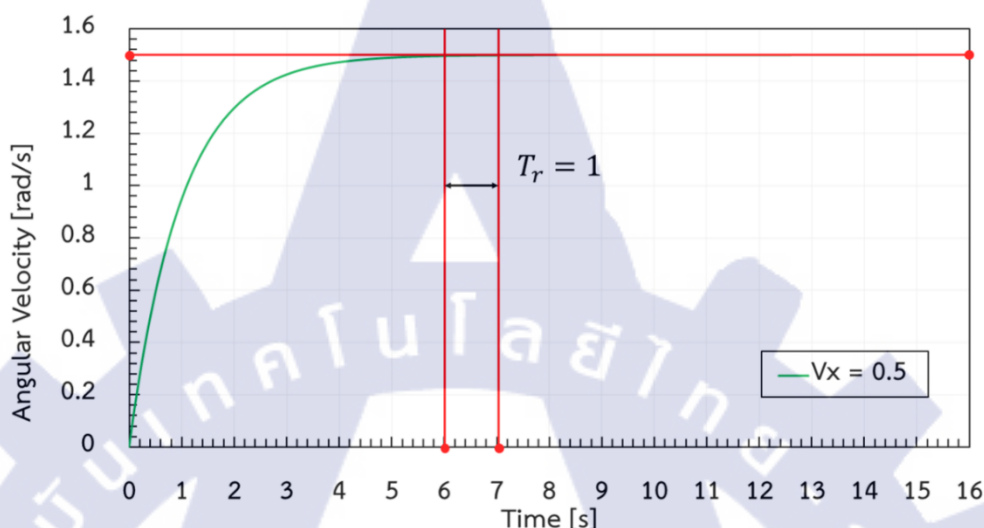
1) เวลาตัวอย่าง (Sample Time: T_s) การเลือกขนาดของเวลาตัวอย่าง ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ของระบบ เช่น ระบบในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการเคลื่อนที่ช้า จะมีเวลา ตัวอย่างที่ใหญ่กว่าหนึ่งวินาทีเป็นอย่างมาก แตกต่างจากระบบในสาขายานยนต์ที่จะมีการเคลื่อนที่ไว กว่า ดังนั้นเวลาตัวอย่างที่ต่ำกว่าหนึ่งวินาทีจะเป็นที่นิยม เพื่อที่จะเลือกเวลาตัวอย่างอย่างเหมาะสม สามารถวิเคราะห์ได้จากการตอบสนองตามขั้นตอนของระบบควบคุมแบบวงเปิด [58] ดังแสดงในรูปที่ 3.14 ดังนี้



รูปที่ 3.14 ระบบควบคุมแบบวงเปิด

จากรูปที่ 3.14 ระบบควบคุมแบบวงเปิด พิจารณาตามการเคลื่อนที่ของ ยานพาหนะ มีขั้นตอนประกอบไปด้วยการรับสัญญาณอินพุตจากระบบบังคับเลี้ยว (Pedal Position) อ้างอิงข้อมูลทางกายภาพจากรถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 ที่จำกัดมุมบังคับเลี้ยวล้อหน้า (δ_f) ใน ระหว่างช่วง $\delta_f = -18$ องศา ถึง 18 องศา ซึ่งจะถูกประมวลผลในรูปแบบของความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) โดยความเร็วเชิงมุมของยานพาหนะจะเพิ่มขึ้นก่อนจะเกิดการสั่น และคงที่ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการตอบสนองของแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ในระบบควบคุมแบบวงเปิด ดังแสดงในรูปที่ 3.15 พบว่า เวลาที่เพิ่มขึ้นของระบบ ที่ $T_r = 1$ วินาที สัมพันธ์กับเวลาสูงสุดของ ระบบ ที่ $T_{peak} = 6$ วินาที และเวลาที่คงที่ของระบบ ที่ $T_{settle} = 7$ วินาที ดังนั้นเวลาตัวอย่าง ควรอยู่ระหว่าง 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ของเวลาที่เพิ่มขึ้น (T_r) กล่าวคือ $0.1 \leq T_s \leq 0.2$ ซึ่งข้อดี

ของเวลาตัวอย่างที่มีค่าน้อยสามารถลดการรบกวนภายในของระบบได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงเลือกเวลาตัวอย่าง $T_s = 0.1$ วินาที ในการปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบ คาดการณ์ล่วงหน้า



รูปที่ 3.15 การตอบสนองของแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์

2) ขอบฟ้าการทำนาย (Prediction horizon: N_p) การเลือกขนาดของขอบฟ้าการทำนาย จำเป็นจะต้องพิจารณาผลลัพธ์ของตัวควบคุม ซึ่งหากเลือกช่วงขอบฟ้าการทำนายที่มีขนาดเล็กเกินไป การเปลี่ยนแปลงในเส้นทางของยานพาหนะอาจจะตรวจจับและตอบสนองได้ล่าช้าเกินไป แต่สำหรับช่วงขอบฟ้าการทำนายที่ใหญ่เกินไป เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างกะทันหัน อาจจะไม่สามารถระบุผลและตอบสนองได้ทันการณ์ [58] ในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดการเลือกขอบฟ้าการทำนายในลักษณะที่ครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงของระบบแบบพลศาสตร์ และจากคำแนะนำควรเลือกขอบฟ้าการทำนาย (N_p) ระหว่าง 10 ถึง 20 ของเวลาที่เพิ่มขึ้น (T_r) ดังนั้นจึงเลือกขอบฟ้าการทำนาย $N_p = 15$ ของเวลาที่เพิ่มขึ้น (T_r) ในการปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ซึ่งเป็นค่ากลางของระบบในระหว่างช่วงที่เหมาะสม เพื่อการป้องกันและการหลีกเลี่ยงอุปสรรคการรบกวนสัญญาณภายในระบบ

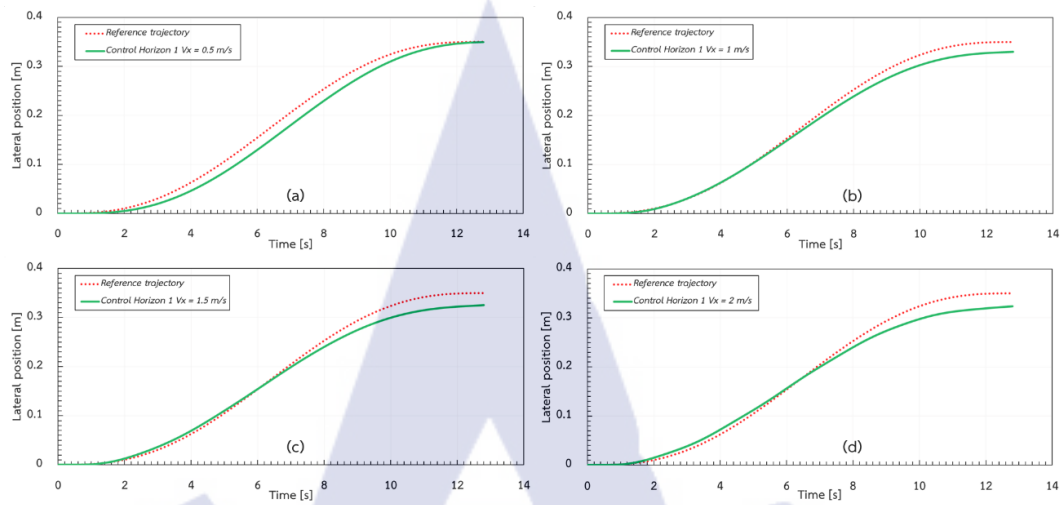
3) ขอบเขตการควบคุม (Control Horizon: N_c) ขอบเขตการควบคุมเป็นการแสดงถึงจำนวนครั้งที่ตัวแปรอินพุตถูกจัดการ (Manipulated Variables: MV) ในช่วงของตัวควบคุมปัจจุบัน ในวิทยานิพนธ์นี้ จากคำแนะนำโดยทั่วไปแล้วควรเลือกขอบเขตการควบคุม (N_c) ในระหว่างช่วง 10 ถึง 20 เปอร์เซนต์ของขอบฟ้าการทำนาย (N_p) ดังนั้น เพื่อให้ขอบเขตการควบคุม มี

ความครอบคลุมในการปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) สามารถพิจารณาขอบเขตการควบคุม (N_c) ในระหว่างช่วงที่เหมาะสม ที่ขอบเขตการควบคุมตัวที่ 1 เป็น 13.33 เปอร์เซ็นต์ของขอบฟ้าการทำนาย และขอบเขตการควบคุมตัวที่ 2 เป็น 20 เปอร์เซ็นต์ของขอบฟ้าการทำนาย ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ดังนี้

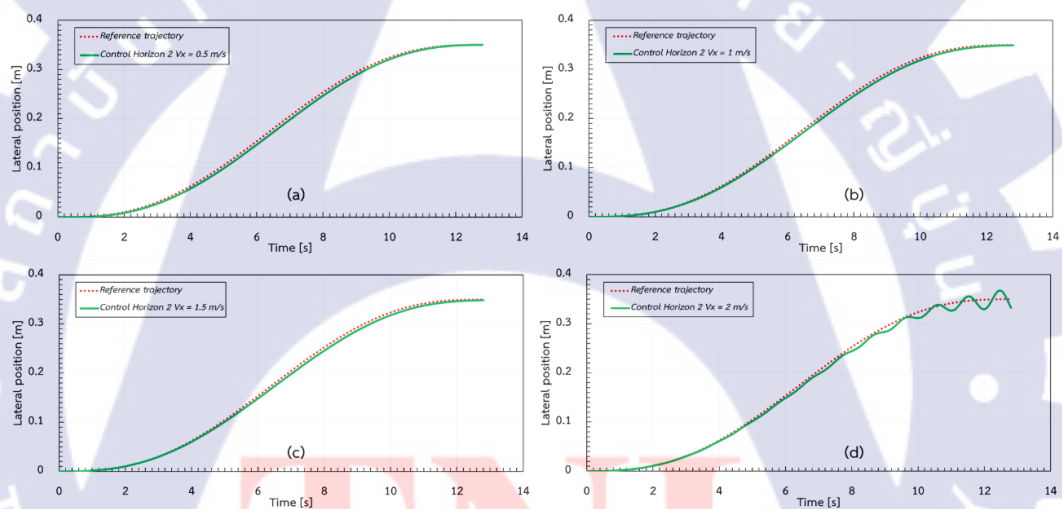
ตารางที่ 3.2 การกำหนดตัวแปรขอบเขตการควบคุม (Control Horizon: N_c)

พารามิเตอร์	ค่าตัวแปร	
	ขอบเขตการควบคุมตัวที่ 1	ขอบเขตการควบคุมตัวที่ 2
เวลาตัวอย่าง (T_s)	0.1	
ขอบฟ้าการทำนาย (N_p)	15	
ขอบเขตการควบคุม (N_c)	2	3

การกำหนดตัวแปรขอบเขตการควบคุม (Control Horizon: N_c) ในการปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ที่ความเร็ว 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที ภายใต้เกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสม เมื่อเปรียบเทียบขอบเขตการควบคุมทั้งสองตัว พบว่า ขอบเขตการควบคุมตัวที่ 2 มีวิถีโคจรของยานพาหนะตามแนวขวาง (y) สัมผัสกับวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) ตลอดการเคลื่อนที่ เหนือกว่าขอบเขตการควบคุมตัวที่ 1 อย่างไรก็ตาม ในขอบเขตการควบคุมตัวที่ 2 ที่ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที วิถีโคจรของยานพาหนะจะมีลักษณะไม่เสถียร แต่เมื่อประเมินประสิทธิภาพการวางแผนวิถีจากค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองค่าเฉลี่ยราก (Root Mean Square Error: RMSE) พบว่า ที่ขอบเขตการควบคุมตัวที่ 2 มีค่าคลาดเคลื่อนในการวางแผนวีน้อยกว่า ที่ $RMSE = 0.006465259$ ในขณะที่ขอบเขตการควบคุมตัวที่ 1 มีค่า $RMSE = 0.016389335$ ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่าขอบเขตการควบคุมที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้วิถีโคจรของยานพาหนะมีวิถีการเคลื่อนที่เข้าใกล้วิถีโคจรอ้างอิงมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงเลือกขอบเขตการควบคุม $N_c = 3$ ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ของขอบฟ้าการทำนาย (N_p) ในการปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และ 3.17 ตามลำดับ ดังนี้



รูปที่ 3.16 ขอบเขตการควบคุมตัวที่ 1



รูปที่ 3.17 ขอบเขตการควบคุมตัวที่ 2

ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดตัวแปรพารามิเตอร์ที่ควบคุมในการปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าประกอบไปด้วย เวลาตัวอย่าง $T_s = 0.1$ วินาที ขอบฟ้าการทำนาย $N_p = 15$ และขอบเขตการควบคุม $N_c = 3$

3.5.2.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

1) ข้อจำกัด (Constraints) ในวิทยานิพนธ์นี้ จะศึกษาเฉพาะข้อจำกัดของตัวแปรอินพุตในการปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์

ล่องหน้า ซึ่งในที่นี้ ข้อจำกัดของตัวแปรอินพุต คือ มุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) โดยกำหนดให้อยู่ในระหว่างช่วง $\delta_f = -18$ องศา ถึง 18 องศา ซึ่งเป็นการพิจารณาจากข้อจำกัดทางกายภาพของยานพาหนะ ที่แสดงเป็นค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของช่วงสัญญาณที่ไม่เกินข้อจำกัดด้านความปลอดภัย ดังนั้น เพื่อศึกษาตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) ให้มีความครอบคลุมในการตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) จึงได้กำหนดเงื่อนไขการทดลองดังนี้

เงื่อนไขการทดลองที่ 1 ศึกษาตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) ในตัวควบคุม MPC 1 – MPC 2 ภายใต้ความเร็วเริ่มต้นของแบบจำลองยานพาหนะตั้งแต่ 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที โดยกำหนดให้ MPC 1 ไม่กำหนดค่าการปรับแต่งตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) ในขณะที่ MPC 2 กำหนดให้มีการปรับแต่งตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) ภายใต้ข้อจำกัดทางกายภาพของยานพาหนะ โดยสามารถแสดงรายละเอียดการปรับแต่งพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 1 – MPC 2 ได้จากตารางที่ 3.3 ดังนี้

ตารางที่ 3.3 การทดลองที่ 1 ศึกษาตัวแปรข้อจำกัดอินพุตในตัวควบคุม MPC 1 – MPC 2

พารามิเตอร์	MPC 1	MPC 2
เวลาตัวอย่าง (T_s)	0.1	
ขอบฟ้าการทำนาย (N_p)	15	
ขอบเขตการควบคุม (N_c)	3	
ข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ)	ไม่กำหนด	-18 องศา ถึง 18 องศา
น้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว (R_{u_δ})	0	
การปรับแต่งประสิทธิภาพ	Aggressive	
น้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{yy})	$Q_{yy} > Q_{y\psi}$	
น้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$)		

2) น้ำหนัก (Weights) ในวิทยานิพนธ์นี้ จะศึกษาน้ำหนักของตัวแปรเอาต์พุตและน้ำหนักของตัวแปรอินพุตในการปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ซึ่งในที่นี้ น้ำหนักตัวแปรเอาต์พุตประกอบไปด้วย น้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{yy}) และน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) ในขณะที่น้ำหนักตัวแปรอินพุต คือ น้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว (R_{u_δ}) ดังนั้น เพื่อศึกษาตัวแปรน้ำหนักเอาต์พุต (Q_y) และน้ำหนักอินพุต (R_u) ให้มีความครอบคลุมในการปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J)

กำหนดเงื่อนไขการทดลองที่ 2 ศึกษาตัวแปรน้ำหนักระเบิดพุทของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{y_y}) และน้ำหนักระเบิดพุทของมุมหันเห (Q_{y_ψ}) ในตัวควบคุม MPC 2 – MPC 3 ภายใต้ความเร็วเริ่มต้นของแบบจำลองยานพาหนะตั้งแต่ 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที โดยกำหนดให้ MPC 2 มีการปรับตั้งน้ำหนักระเบิดพุทของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{y_y}) มากกว่าน้ำหนักระเบิดพุทของมุมหันเห (Q_{y_ψ}) ในขณะที่ MPC 3 กำหนดให้มีการปรับตั้งน้ำหนักระเบิดพุทของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{y_y}) น้อยกว่าน้ำหนักระเบิดพุทของมุมหันเห (Q_{y_ψ}) โดยสามารถแสดงรายละเอียดการปรับตั้งพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 2 – MPC 3 ได้จากตารางที่ 3.4 ดังนี้

ตารางที่ 3.4 การทดลองที่ 2 ศึกษาตัวแปรน้ำหนักระเบิดพุทในตัวควบคุม MPC 2 – MPC 3

พารามิเตอร์	MPC 2	MPC 3
เวลาตัวอย่าง (T_s)	0.1	
ขอบฟ้าการทำนาย (N_p)	15	
ขอบเขตการควบคุม (N_c)	3	
การปรับแต่งประสิทธิภาพ	Aggressive	
น้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{y_y})	$Q_{y_y} > Q_{y_\psi}$	$Q_{y_y} < Q_{y_\psi}$
น้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห (Q_{y_ψ})		
ข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ)	-18 องศา ถึง 18 องศา	
น้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว (R_{u_δ})	0	

กำหนดเงื่อนไขการทดลองที่ 3 ศึกษาตัวแปรน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว (R_{u_δ}) ในตัวควบคุม MPC 4 – MPC 6 ภายใต้ความเร็วเริ่มต้นของแบบจำลองยานพาหนะตั้งแต่ 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที โดยกำหนดให้ MPC 4 มีการปรับตั้งน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว (R_{u_δ}) เท่ากับน้ำหนักระเบิดพุทของมุมหันเห (Q_{y_ψ}) ในขณะที่ MPC 5 – MPC 6 กำหนดให้มีการปรับตั้งน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว (R_{u_δ}) น้อยกว่าน้ำหนักระเบิดพุทของมุมหันเห (Q_{y_ψ}) โดยสามารถแสดงรายละเอียดการปรับตั้งพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 4 – MPC 6 ได้จากตารางที่ 3.5 ดังนี้

ตารางที่ 3.5 การทดลองที่ 3 ศึกษาตัวแปรน้ำหนักรถในตัวควบคุม MPC 4 – MPC 6

พารามิเตอร์	MPC 4	MPC 5	MPC 6
เวลาตัวอย่าง (T_s)	0.1		
ขอบฟ้าการทำนาย (N_p)	15		
ขอบเขตการควบคุม (N_c)	3		
น้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว (R_{u_δ})	$R_{u_\delta} = Q_{y_\psi}$	$R_{u_\delta} < Q_{y_\psi}$	
การปรับแต่งประสิทธิภาพ	Aggressive		Robust
น้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{y_y})	$Q_{y_y} > Q_{y_\psi}$		
น้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห (Q_{y_ψ})			
ข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ)	-18 องศา ถึง 18 องศา		

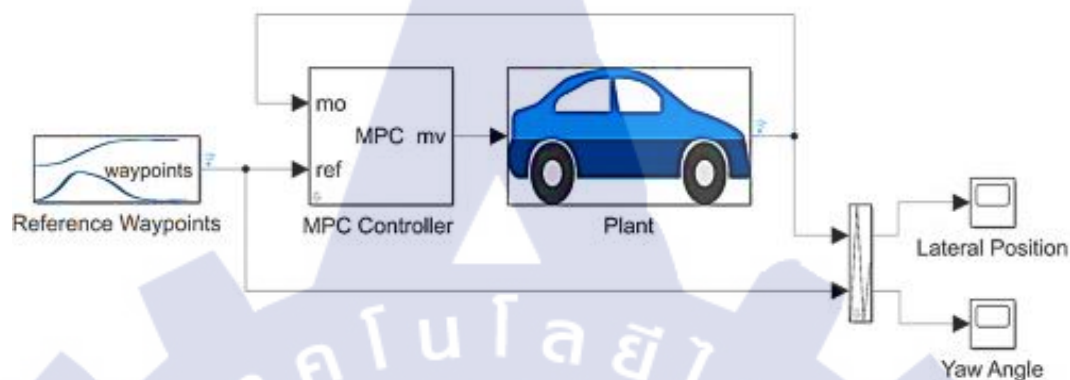
จากการกำหนดเงื่อนไขการทดลองที่ 1 -3 สามารถแสดงรายละเอียดการปรับแต่งประสิทธิภาพของควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ได้ดังนี้

- 1) การปรับแต่งประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบแข็งแกร่ง (Robust Controller) เป็นการเพิ่มน้ำหนักอัตราตัวแปรอินพุตของตัวควบคุม และลดน้ำหนักตัวแปรเอาต์พุต
- 2) การปรับแต่งประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบก้าวร้าว (Aggressive Controller) เป็นการเพิ่มน้ำหนักตัวแปรเอาต์พุตของตัวควบคุม และลดน้ำหนักอัตราตัวแปรอินพุต

3.5.3 แบบจำลองแบบคาดการณ์ล่วงหน้า

จำลองสถานการณ์และปรับแต่งตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าบนโปรแกรม MATLAB & Simulink® โดยสามารถแสดงตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC) พร้อมกับสัญญาณเส้นทางอ้างอิง (Reference Waypoints) ซึ่งถูกสร้างขึ้นจากสมการพหุนามกำลังห้า (Quintic Polynomial Equations) ผ่านการใช้เครื่องมือ Driving Scenario Designer Toolbox™ บนโปรแกรม MATLAB & Simulink® โดยตัวแปรเอาต์พุตที่วัดได้ (Measured Outputs: MO) จากแบบจำลองยานพาหนะ (Plant) คือ วิถีโคจรของยานพาหนะตามแนวขวาง (y) และมุมหันเหชั่วขณะ (ψ) ซึ่งมีการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ที่ส่งสัญญาณเอาต์พุตกลับไปยังตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ในที่นี้ ตัวแปรอินพุตที่ถูกจัดการ (Manipulated Variables: MV) คือ มุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) นอกจากนี้ ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (MPC) สามารถปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ได้จากเครื่องมือ MPC Designer™ บนโปรแกรม MATLAB & Simulink® ที่ประกอบไปด้วยระบบ

(Plant) และเส้นทางอ้างอิง (Reference Waypoints) ภายใต้ตัวแปรพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบ คาดการณ์ล่วงหน้า ที่ประกอบไปด้วย เวลาตัวอย่าง ขอบฟ้าการทำนาย ขอบเขตการควบคุม ข้อจำกัด น้ำหนักเอาต์พุต และน้ำหนักอินพุตของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 ดังนี้



รูปที่ 3.18 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าบนโปรแกรม MATLAB & Simulink®

บทที่ 4

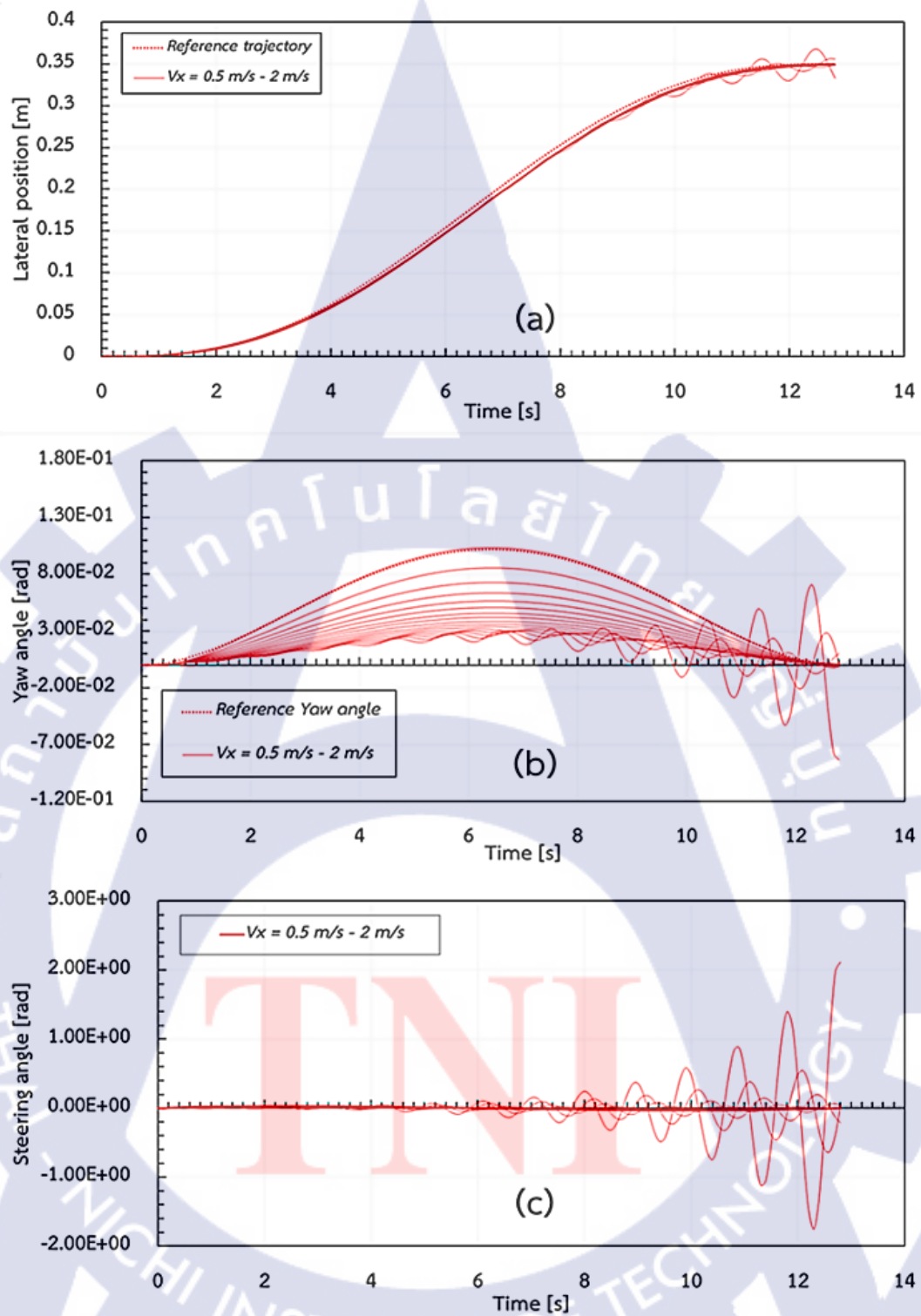
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

กำหนดเงื่อนไขการทดลองภายใต้ความเร็วเริ่มต้นของแบบจำลองยานพาหนะตั้งแต่ 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที และการปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC) เพื่อศึกษาตัวแปรพารามิเตอร์ที่ส่งผลกับตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (MPC) ในการควบคุมเสถียรภาพความเร็วในการเข้าโค้งของยานพาหนะในระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน โดยสามารถแสดงผลการทดลองได้ดังนี้

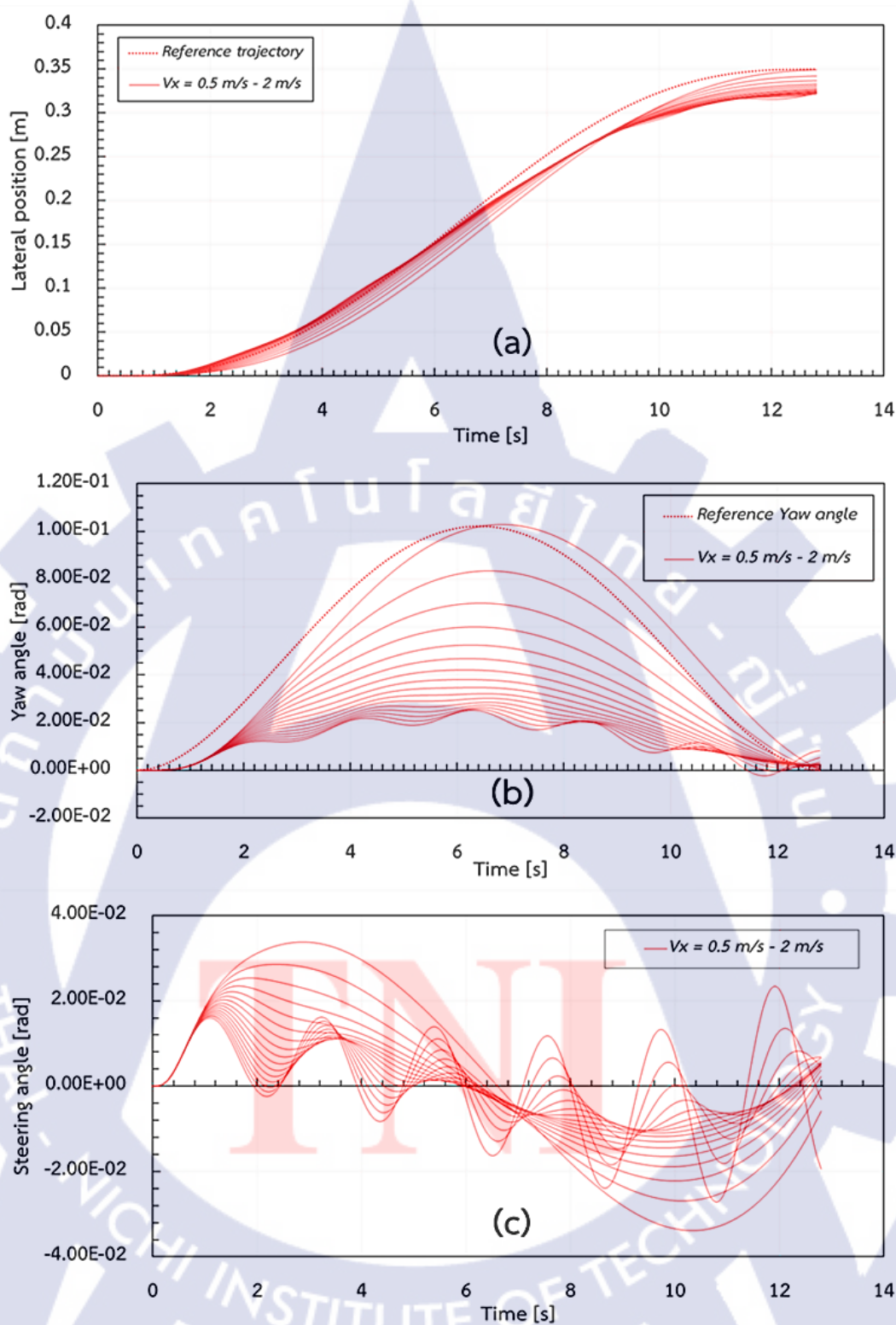
4.1 ผลการศึกษาตัวแปรพารามิเตอร์ที่ส่งผลกับตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า

การปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการวางแผนวิถีในการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน ภายใต้การจำกัดตำแหน่ง การจำกัดความเร็ว การหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง เกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสม และพลศาสตร์ยานยนต์ เพื่อสร้างวิถีที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ

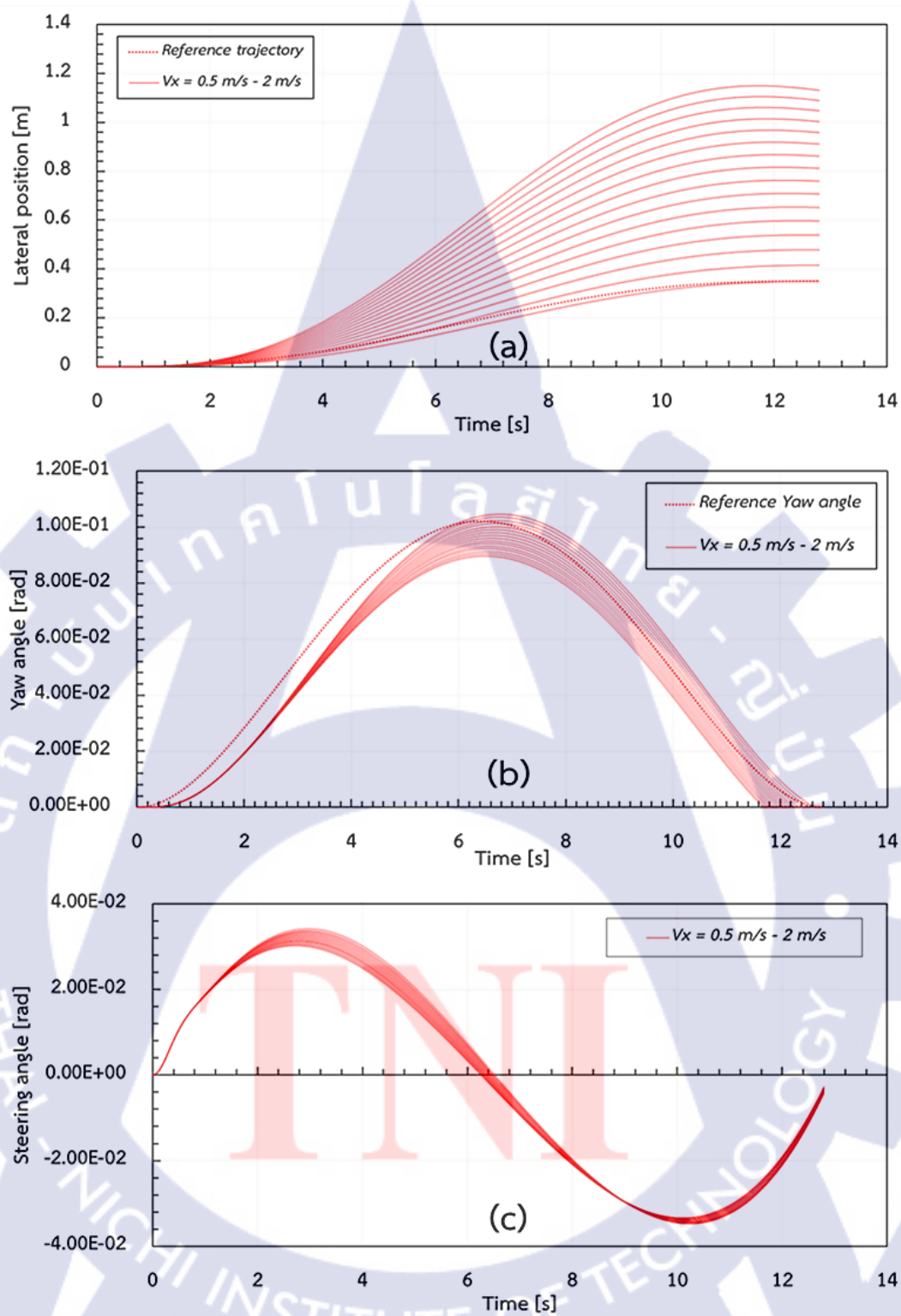
กำหนดตัวแปรพารามิเตอร์ ที่ เวลาตัวอย่าง $T_s = 0.1$ วินาที ขอบฟ้าการทำงาน $N_p = 15$ และขอบเขตการควบคุม $N_c = 3$ ในการปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุม MPC 1 – MPC 6 ให้มีขนาดเท่ากัน โดยสามารถแสดงผลการศึกษิตัวแปรพารามิเตอร์ที่ส่งผลกับตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ประกอบไปด้วย ผลการทดลองที่ 1 ศึกษาตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) ในตัวควบคุม MPC 1 – MPC 2 ผลการทดลองที่ 2 ศึกษาตัวแปรน้ำหนักเอด์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{yy}) และน้ำหนักเอด์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) ในตัวควบคุม MPC 2 – MPC 3 และผลการทดลองที่ 3 ศึกษาตัวแปรน้ำหนักเอด์พุตของมุมบังคับเลี้ยว (R_{u_δ}) ในตัวควบคุม MPC 4 – MPC 6 โดยผลการจำลองตัวควบคุม MPC 1 – MPC 6 กำหนดให้วิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) และมุม headings (ψ_{ref}) แสดงเป็นเส้นประสีแดง ในทางกลับกัน ผลการปรับแต่งพารามิเตอร์ตัวควบคุม MPC 1 – MPC 6 ที่ความเร็ว 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที จะแสดงด้วยเส้นทึบสีแดงตามลำดับ ในที่นี้ ผลการจำลองตัวควบคุม MPC 1 – MPC 6 มีผลการจำลองในลักษณะเดียวกัน ที่ (a) วิถีโคจรของยานพาหนะตามแนวขวาง (y) (b) มุมหันเหชั่วขณะ (ψ) และ (c) มุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) สามารถแสดงผลการจำลองตัวควบคุม MPC 1 – MPC 6 ได้จากรูปที่ 4.1 - 4.6 ตามลำดับ ดังนี้



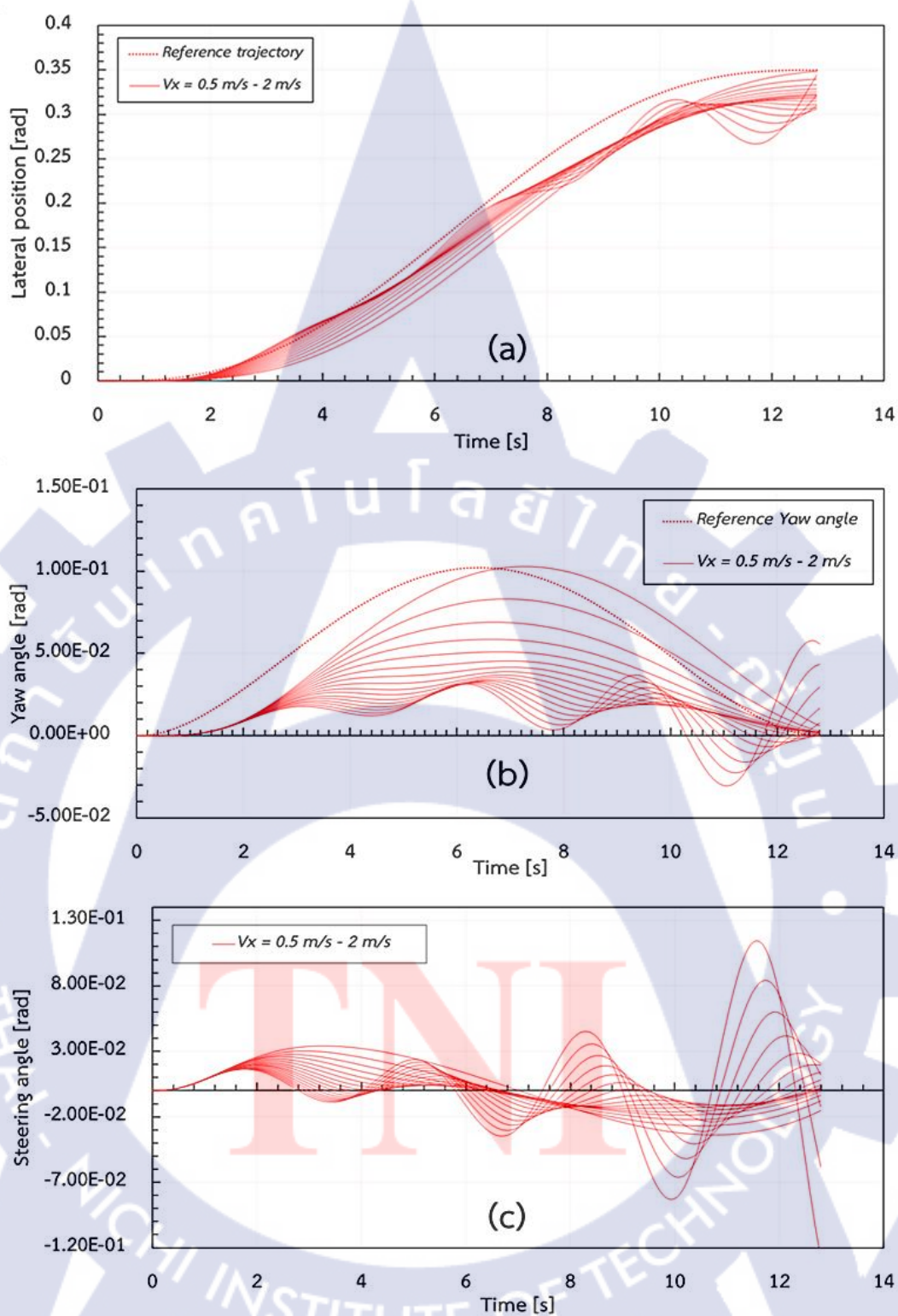
รูปที่ 4.1 ตัวควบคุม MPC 1 ที่ความเร็ว 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที



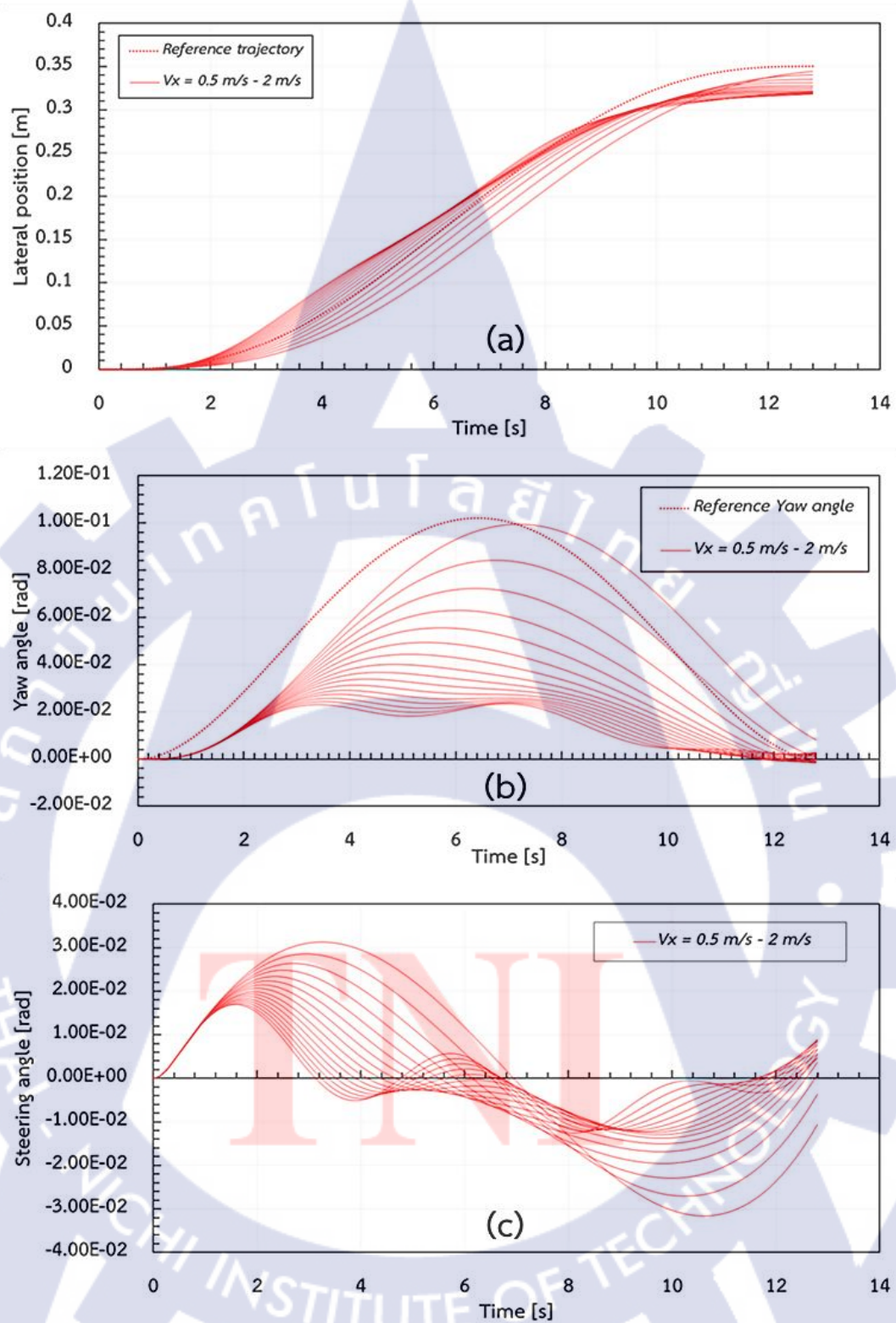
รูปที่ 4.2 ตัวควบคุม MPC 2 ที่ความเร็ว 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที



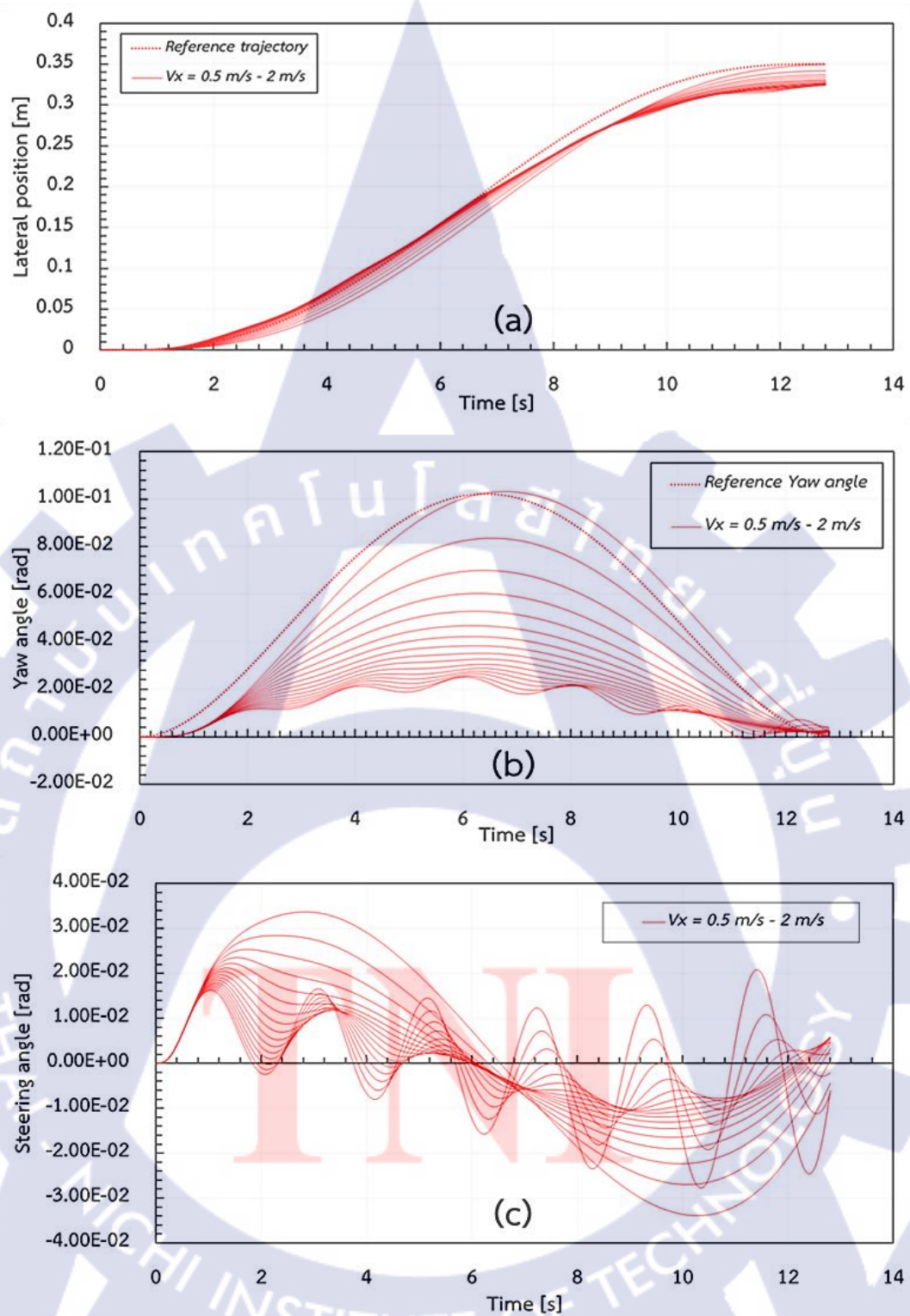
รูปที่ 4.3 ตัวควบคุม MPC 3 ที่ความเร็ว 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.4 ตัวควบคุม MPC 4 ที่ความเร็ว 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.5 ตัวควบคุม MPC 5 ที่ความเร็ว 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที



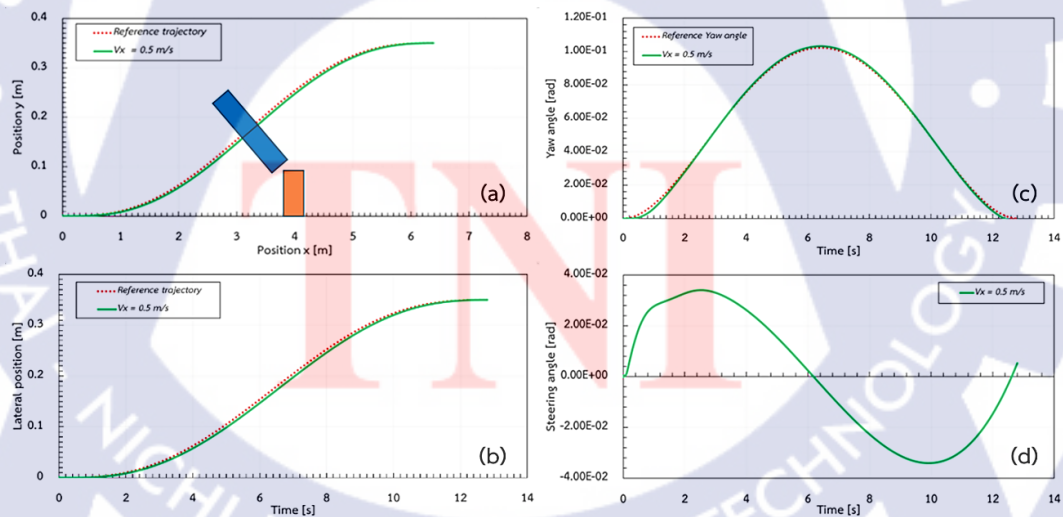
รูปที่ 4.6 ตัวควบคุม MPC 6 ที่ความเร็ว 0.5 ถึง 2 เมตรต่อวินาที

โดยสามารถแสดงผลการศึกษาการปรับแต่งพารามิเตอร์ตัวควบคุม MPC 1 – MPC 6 ที่พิจารณา เฉพาะช่วงความเร็ว 0.5, 1, 1.5 และ 2 เมตรต่อวินาที

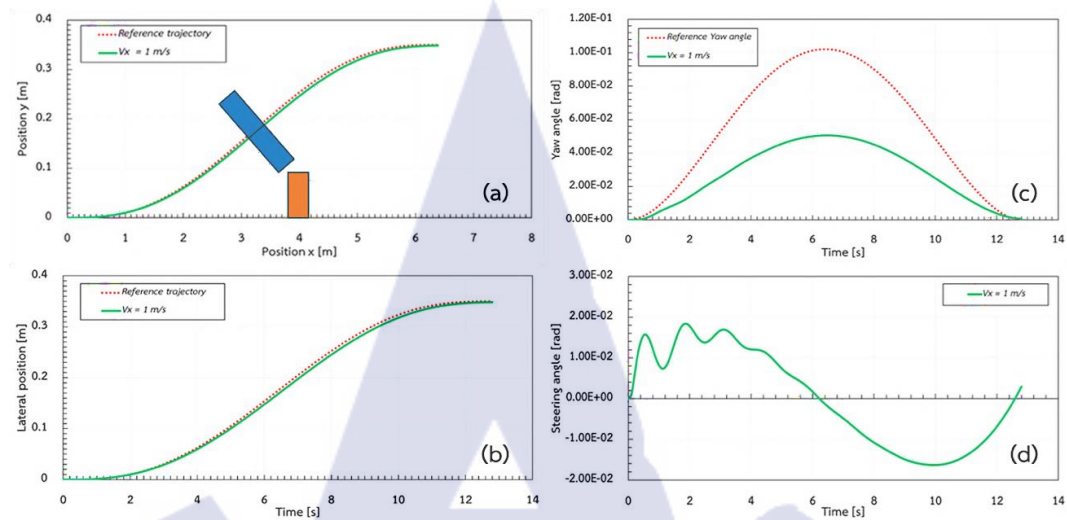
กำหนดให้วิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) และมุมเหวี่ยงอ้างอิง (ψ_{ref}) แสดงเป็นเส้นประสีแดง และ ผลการปรับแต่งพารามิเตอร์ตัวควบคุม MPC 1 – MPC 6 แสดงเป็นเส้นทึบสีเขียว ซึ่งผลการจำลอง ตัวควบคุม MPC 1 – MPC 6 มีลักษณะเดียวกัน ที่ (a) ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของยานพาหนะตามแนวยาว (Position x) และตามแนวขวาง (Position y) เปรียบเทียบกับวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) (b) วิถีโคจรของยานพาหนะตามแนวขวาง (y) ต่อเวลา เปรียบเทียบกับวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) (c) มุมหันเหชั่วขณะ (ψ) ต่อเวลา เปรียบเทียบกับมุมหันเหอ้างอิง (ψ_{ref}) (d) มุมบังคับเลี้ยว (δ_f) ต่อเวลา แสดงถึงการควบคุมการบังคับเลี้ยวของยานพาหนะ สามารถแสดงผลการจำลองตัวควบคุม MPC 1 – MPC 6 ได้จากรูปที่ 4.7 - 4.30 ตามลำดับ ดังนี้

4.1.1 ผลการศึกษาตัวแปรข้อจำกัดอินพุตในตัวควบคุม MPC 1 – MPC 2

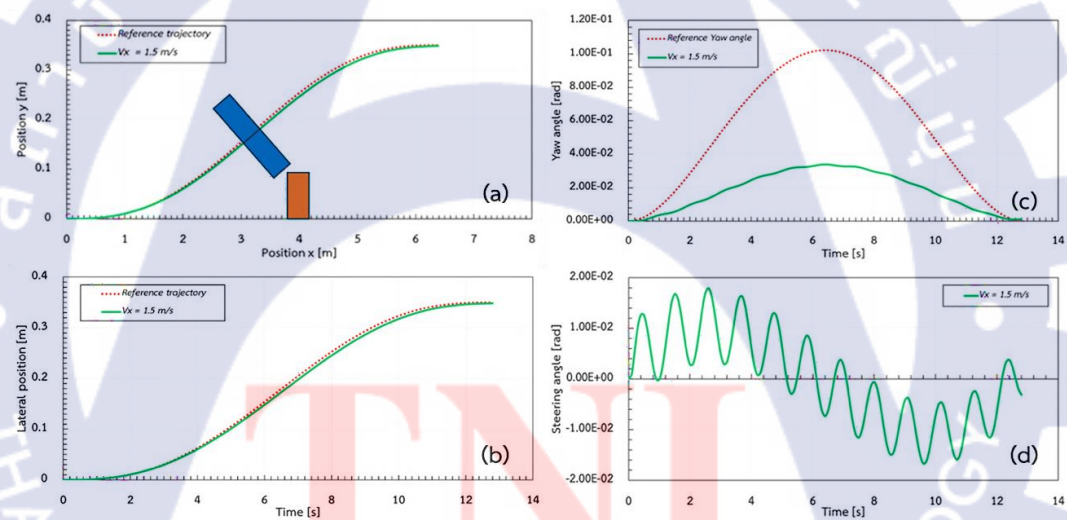
ศึกษาตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) ในการปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า เพื่อประเมินประสิทธิภาพการวางแผนวิถีในการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน โดยสามารถแสดงผลการศึกษาในตัวควบคุม MPC 1 – MPC 2 ตามลำดับดังนี้



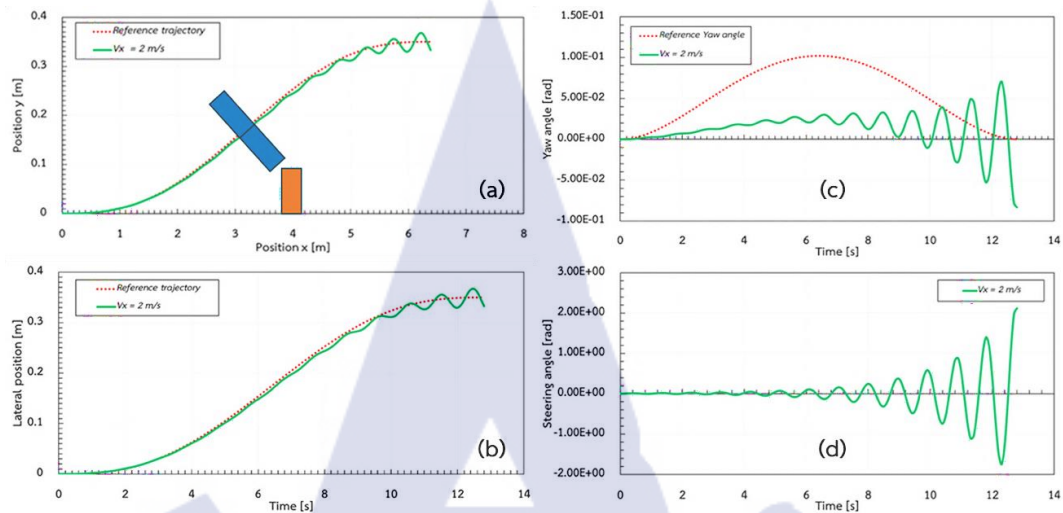
รูปที่ 4.7 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 1 ที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.8 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 1 ที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที

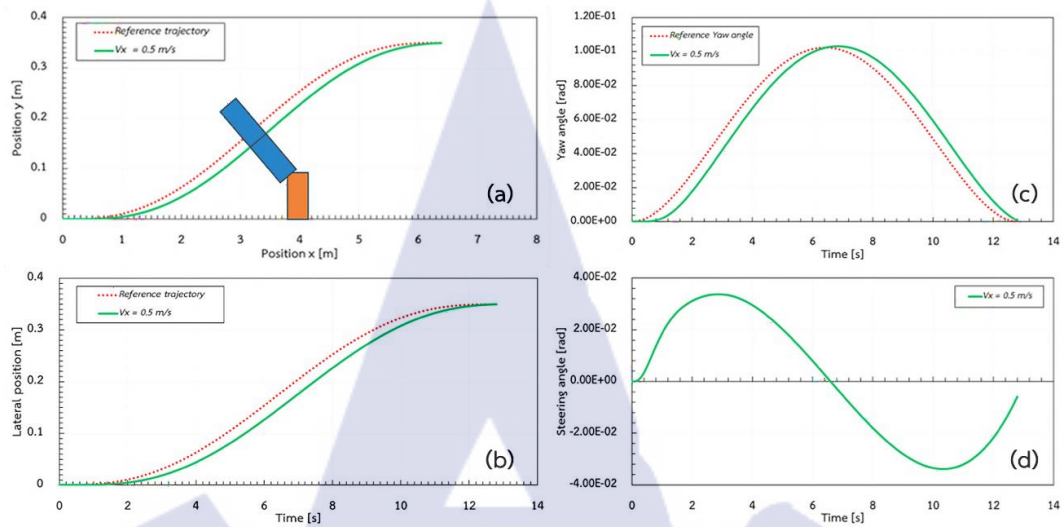


รูปที่ 4.9 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 1 ที่ความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที

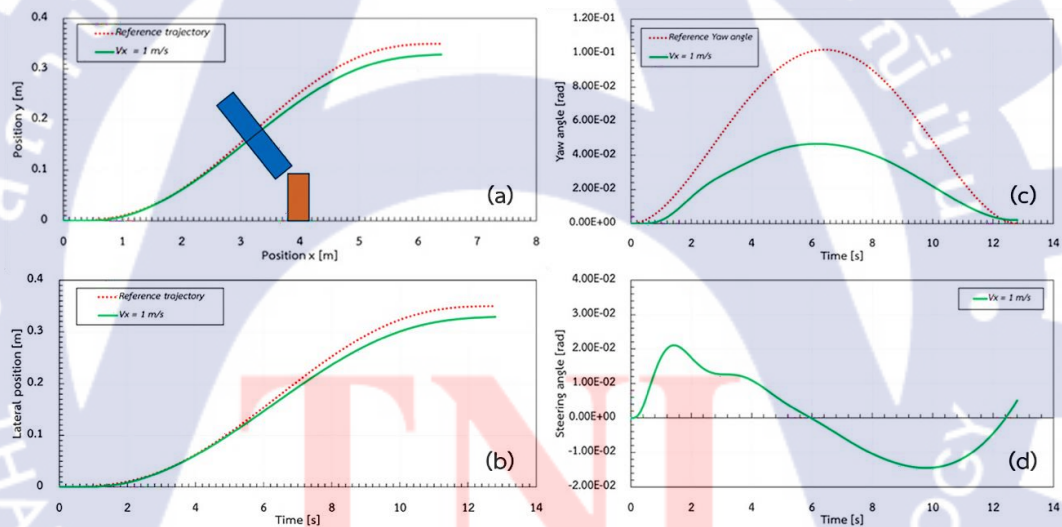


รูปที่ 4.10 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 1 ที่ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที

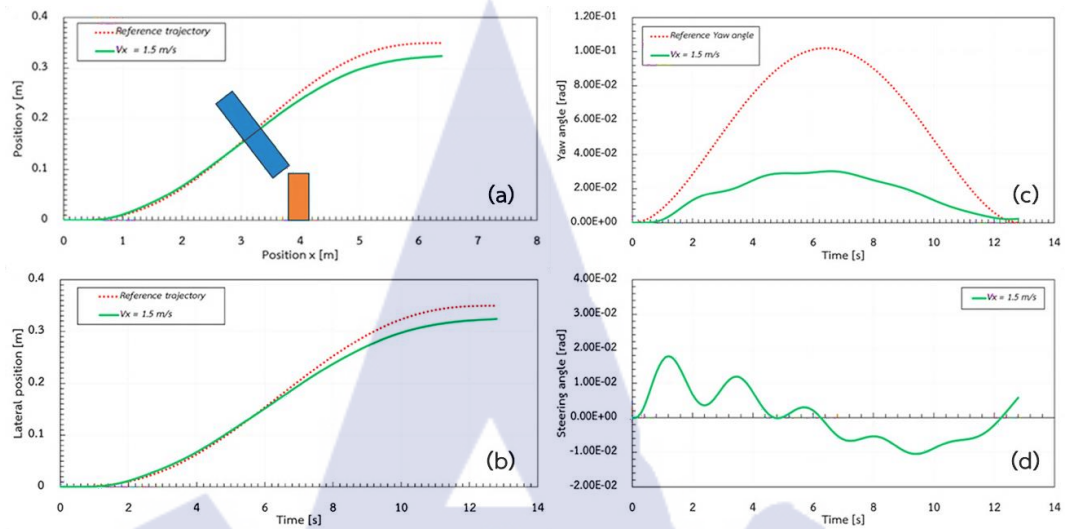
จากรูปที่ 4.7 ถึง 4.10 ผลการศึกษาตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) โดยกำหนดให้ MPC 1 ไม่กำหนดค่าการปรับแต่งตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) จากรูปที่ 4.7(a) – 4.10(a) ภายใต้การจำกัดความเร็วในช่วง $v_x = 0.5$ ถึง 2 เมตรต่อวินาที พบว่า ยานพาหนะสามารถควบคุมเสถียรภาพในการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางโดยไม่เกิดการชนกันได้ในทุกสถานการณ์ความเร็วในการเข้าโค้งระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน และจากรูปที่ 4.7(b) – 4.10(b) ภายใต้การจำกัดตำแหน่งสถานะสุดท้ายตามแนวขวางสูงสุด $y_{tfmax} = 0.4$ เมตร พบว่า วิถีโคจรของยานพาหนะเคลื่อนที่โดยไม่ละเมิดข้อจำกัดด้านความปลอดภัย โดยที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที จากรูปที่ 4.7(b) วิถีโคจรของยานพาหนะ (y) มีวิถีสัมผัสกับวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) ตลอดการเคลื่อนที่ สัมพันธ์กับมุมหันเห (ψ) จากรูปที่ 4.7(c) และมุมบังคับเลี้ยว (δ_f) จากรูปที่ 4.7(d) ที่มีความเสถียร แต่เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น มุมหันเห (ψ) จากรูปที่ 4.8(c) – 4.9(c) และมุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) จากรูปที่ 4.8(d) – 4.9(d) เริ่มมีความไม่เสถียร แต่ความสามารถในการรักษาวิถีโคจรยังคงอยู่ภายใต้ข้อจำกัดด้านความปลอดภัย อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที จากรูปที่ 4.10(b) วิถีโคจรของยานพาหนะจะมีลักษณะไม่เสถียรขาดความราบรื่นของเส้นทางการเคลื่อนที่ สัมพันธ์กับมุมหันเห (ψ) จากรูปที่ 4.10(c) และมุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) จากรูปที่ 4.10(d) ที่มีความไม่เสถียรเป็นอย่างมาก



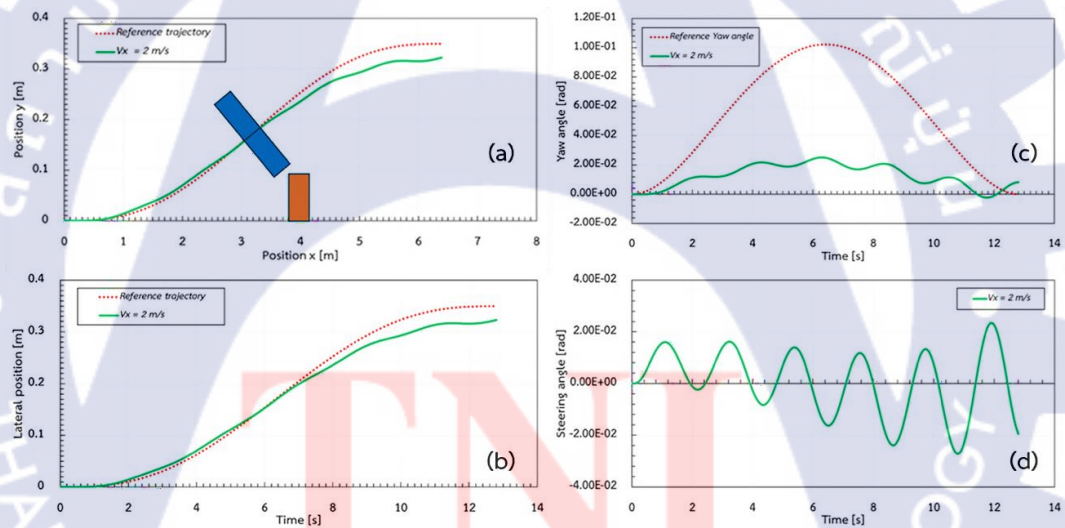
รูปที่ 4.11 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 2 ที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.12 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 2 ที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.13 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 2 ที่ความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.14 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 2 ที่ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 4.11 ถึง 4.14 ผลการศึกษาตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) โดยกำหนดให้ MPC 2 มีการปรับแต่งตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) ภายใต้ข้อจำกัดทางกายภาพของยานพาหนะ จากรูปที่ 4.11(a) – 4.14(a) ภายใต้การจำกัดความเร็วในระหว่างช่วง $v_x = 0.5$ ถึง 2 เมตรต่อวินาที พบว่า ยานพาหนะสามารถควบคุมเสถียรภาพในการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางโดยไม่เกิดการชนกันได้ในทุกสถานการณ์ความเร็วในการเข้าโค้งระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน ยกเว้นที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที ที่วิถีโคจรของยานพาหนะเกิดการชน และจากรูปที่ 4.11(b) - 4.14(b) ภายใต้การจำกัดตำแหน่งสถานะสุดท้ายตามแนวขวางสูงสุด $y_{tfmax} = 0.4$ เมตร พบว่า วิถีโคจรของยานพาหนะเคลื่อนที่โดยไม่ละเมิดข้อจำกัดด้านความปลอดภัย โดยที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที จากรูปที่ 4.11(b) วิถีโคจรของยานพาหนะ (y) มีวิถีใกล้เคียงกับวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) ตลอดการเคลื่อนที่ สัมพันธ์กับมุมหันเห (ψ) จากรูปที่ 4.11(c) และมุมบังคับเลี้ยว (δ_f) จากรูปที่ 4.11(d) ที่มีความเสถียร แต่เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น มุมหันเห (ψ) จากรูปที่ 4.12(c) – 4.14(c) และมุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) จากรูปที่ 4.12(d) – 4.14(d) เริ่มมีความไม่เสถียร แต่ความสามารถในการรักษาวิถีโคจรยังคงอยู่ภายใต้ข้อจำกัดด้านความปลอดภัย

นอกจากนี้ ตัวควบคุม MPC 1 – MPC 2 สามารถวัดประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าให้ครอบคลุมเกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดด้านพลศาสตร์ยานยนต์ โดยประเมินประสิทธิภาพการวางแผนวิถีได้จากค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองค่าเฉลี่ยราก (Root Mean Square Error: RMSE) ของวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) กับวิถีโคจรตามแนวขวาง (y) เพื่อสร้างวิถีที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ ได้จากตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ค่า RMSE การวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ในตัวควบคุม MPC 1 – MPC 2

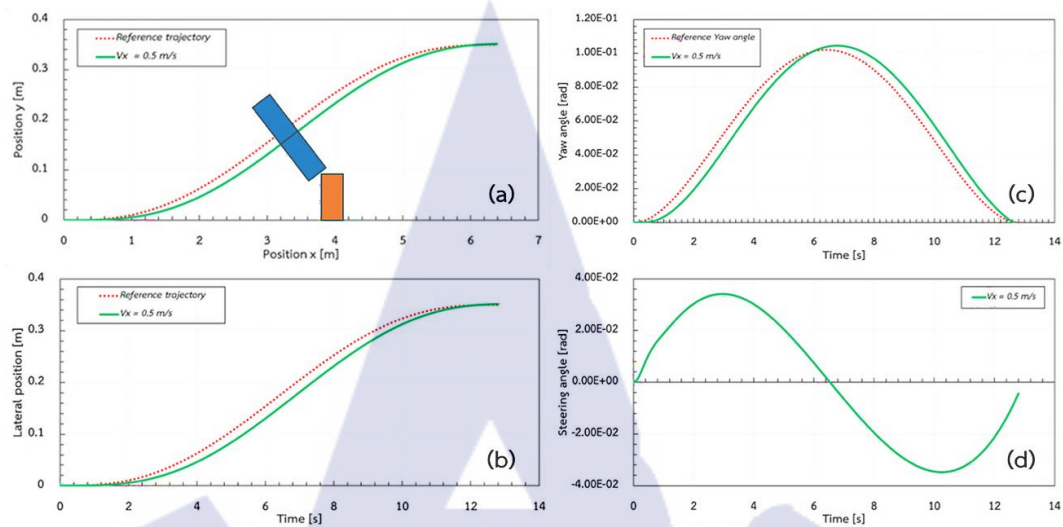
ความเร็วของยานพาหนะ (เมตรต่อวินาที)	ค่า RMSE	
	MPC 1	MPC 2
0.5	0.004512	0.018182
1	0.004512	0.014388
1.5	0.004598	0.01621
2	0.006665	0.017589

จากผลการประเมินประสิทธิภาพการวางแผนวิถีได้จากค่า RMSE พบว่า ตัวควบคุม MPC 1 มีค่าคลาดเคลื่อนในการวางแผนวิธีน้อยกว่าตัวควบคุม MPC 2 อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น ตัวควบคุม MPC 1 ที่ไม่มีการกำหนดข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) ส่งผลให้ยานพาหนะ

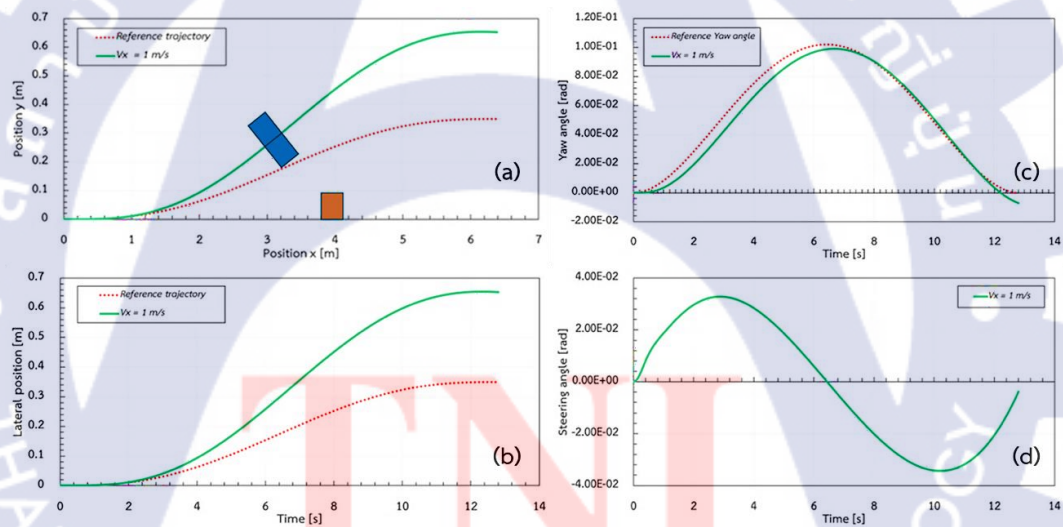
เคลื่อนที่เป็นอิสระ โดยปราศจากข้อจำกัดการควบคุมการบังคับเลี้ยวทางกายภาพ วิถีโคจรของยานพาหนะจึงมีพฤติกรรมความรุนแรงในระหว่างเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่าการไม่กำหนดตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) อาจทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะขาดความราบรื่น แม้ว่าวิถีโคจรของยานพาหนะมีวิธีการเคลื่อนที่เข้าใกล้วิถีโคจรอ้างอิงมากกว่า ดังนั้น ตัวควบคุม MPC 2 ที่มีการกำหนดตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) ภายใต้ข้อจำกัดทางกายภาพของยานพาหนะ ที่มุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) อยู่ในระหว่างช่วง $\delta_f = -18$ องศา ถึง 18 องศา ส่งผลกับตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ในการรักษาวิถีโคจรให้ยังคงอยู่ภายใต้ข้อจำกัดด้านความปลอดภัยที่เหมาะสม และสร้างเส้นทางที่มีความราบรื่น เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น

4.1.2 ผลการศึกษาตัวแปรน้ำหนักเอาต์พุตในตัวควบคุม MPC 2 – MPC 3

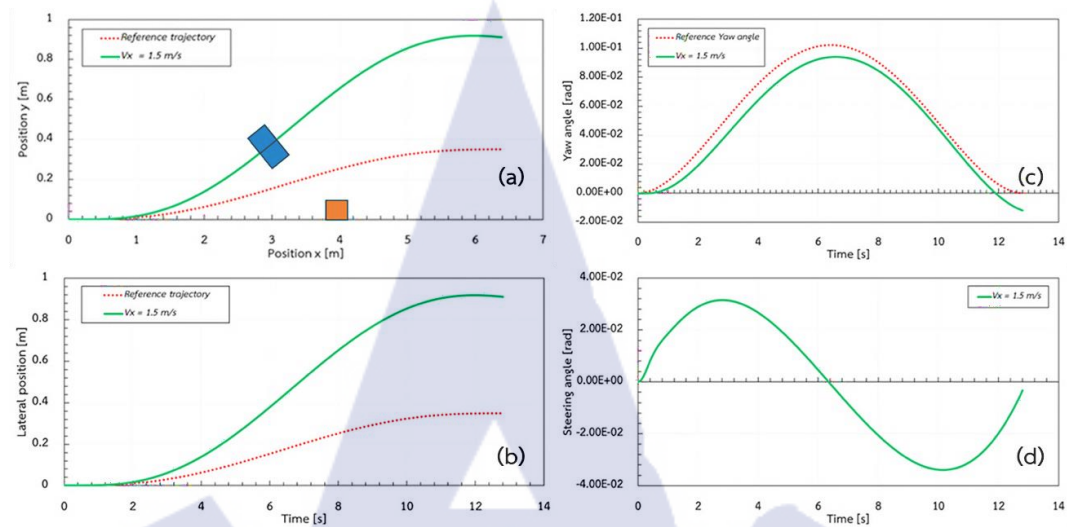
ศึกษาตัวแปรน้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{yy}) และน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) ในการปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า เพื่อประเมินประสิทธิภาพการวางแผนวิถีในการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน ในที่นี้เนื่องจากตัวควบคุม MPC 1 และ MPC 2 ในการทดลองที่ 1 ที่ศึกษาตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) มีการปรับแต่งตัวแปรน้ำหนักเอาต์พุตในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าในลักษณะเดียวกัน ที่ปรับแต่งน้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{yy}) มากกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) ซึ่งจากผลการทดลองที่ 1 บ่งชี้ได้ว่า ตัวควบคุม MPC 2 ที่มีการกำหนดตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) และมีการปรับแต่งน้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{yy}) มากกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) มีความเหมาะสมมากกว่าตัวควบคุม MPC 1 เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น เพื่อศึกษาตัวแปรน้ำหนักเอาต์พุตในการปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าให้มีความครอบคลุม สามารถแสดงผลการศึกษาตัวแปรน้ำหนักเอาต์พุตในตัวควบคุม MPC 3 ที่กำหนดให้มีการปรับแต่งน้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{yy}) น้อยกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) ภายใต้การกำหนดตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) ดังนี้



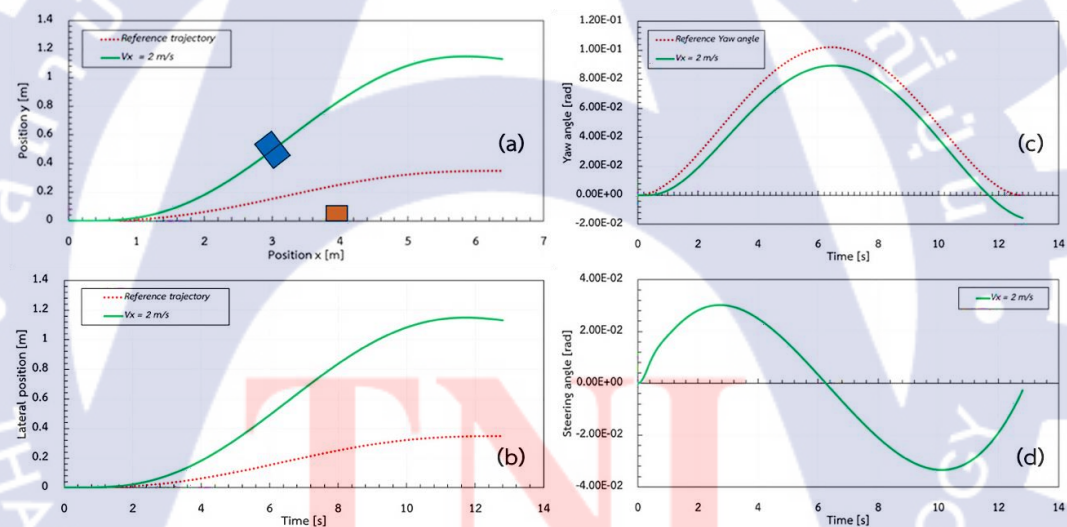
รูปที่ 4.15 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 3 ที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.16 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 3 ที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.17 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 3 ที่ความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.18 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 3 ที่ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 4.15 ถึง 4.18 ผลการศึกษาตัวแปรน้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{yy}) และน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) โดยกำหนดให้ MPC 3 มีการปรับแต่งน้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{yy}) น้อยกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) จากรูปที่ 4.15(a) – 4.18(a) ภายใต้การจำกัดความเร็วในระหว่างช่วง $v_x = 0.5$ ถึง 2 เมตรต่อวินาที พบว่า ยานพาหนะสามารถควบคุมเสถียรภาพในการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางโดยไม่เกิดการชนกันได้ทุกสถานการณ์ความเร็ว อย่างไรก็ตาม จากรูปที่ 4.15(b) – 4.18(b) ภายใต้การจำกัดตำแหน่งสถานะสุดท้ายตามแนวขวางสูงสุด $y_{tfmax} = 0.4$ เมตร พบว่า วิถีโคจรของยานพาหนะมีการละเมิดข้อจำกัดด้านความปลอดภัย แม้ว่ามุมหันเห (ψ) จากรูปที่ 4.15(c) – 4.18(c) และมุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) จากรูปที่ 4.15(d) – 4.18(d) ยังคงมีความเสถียร แต่เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น วิถีโคจรของยานพาหนะ (y) มีวิถีลู่ออกจากวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref})

นอกจากนี้ ตัวควบคุม MPC 2 – MPC 3 สามารถวัดประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าให้ครอบคลุมเกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดด้านพลศาสตร์ ยานยนต์ ได้จากค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองค่าเฉลี่ยราก (Root Mean Square Error: RMSE) ของวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) กับวิถีโคจรตามแนวขวาง (y) ได้จากตารางที่ 4.2 ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ค่า RMSE การวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ในตัวควบคุม MPC 2 – MPC 3

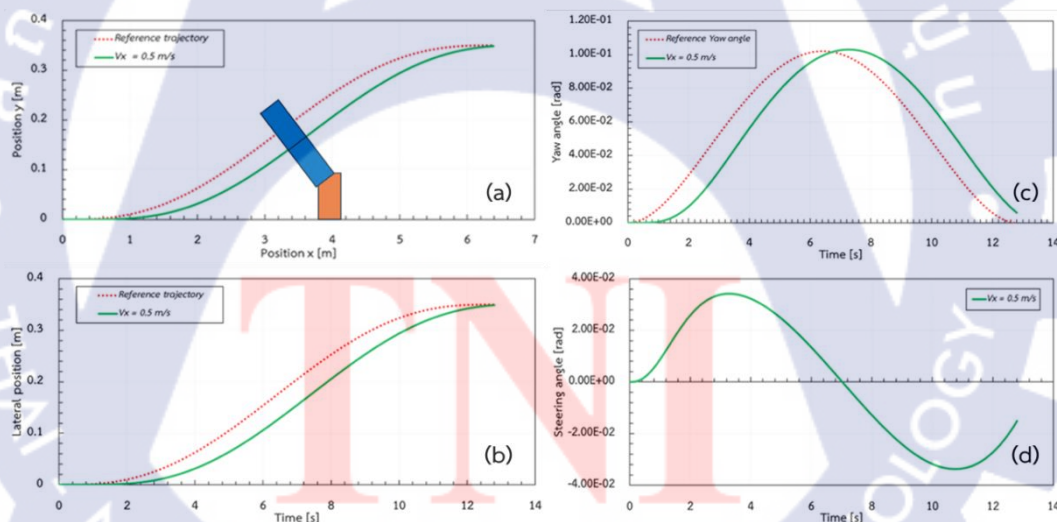
ความเร็วของยานพาหนะ (เมตรต่อวินาที)	ค่า RMSE	
	MPC 2	MPC 3
0.5	0.018182	0.014871
1	0.014388	0.181306
1.5	0.01621	0.351484
2	0.017589	0.504372

จากผลการประเมินประสิทธิภาพการวางแผนวิถีได้จากค่า RMSE พบว่า ตัวควบคุม MPC 2 มีค่าคลาดเคลื่อนในการวางแผนวิธียน้อยกว่าตัวควบคุม MPC 3 ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่า ตัวควบคุม MPC 2 ที่มีการปรับแต่งน้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{yy}) มากกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) ส่งผลกับตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ในการรักษาวិถีโคจรให้ยังคงอยู่ภายใต้การจำกัดตำแหน่งด้านความปลอดภัย และสร้างเส้นทางที่มีความราบรื่นภายใต้เกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสมมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม MPC 3 ที่มีการปรับแต่งตัวแปรน้ำหนัก

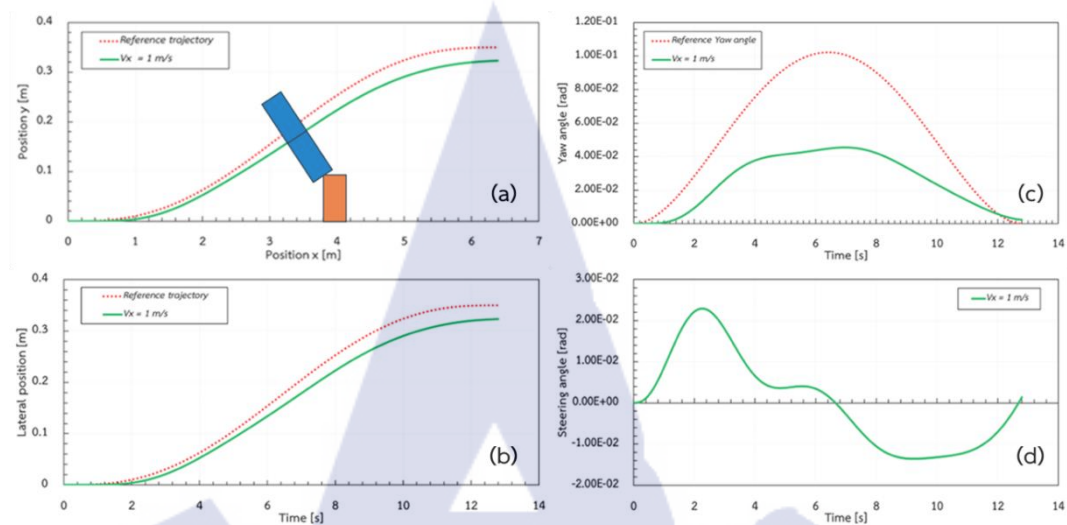
เอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{yy}) น้อยกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) ส่งผลให้วิถีโคจรของยานพาหนะ (y) มีวิถีลู่ออกจากวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น

4.1.3 ผลการศึกษาตัวแปรน้ำหนักอินพุตในตัวควบคุม MPC 4 – MPC 6

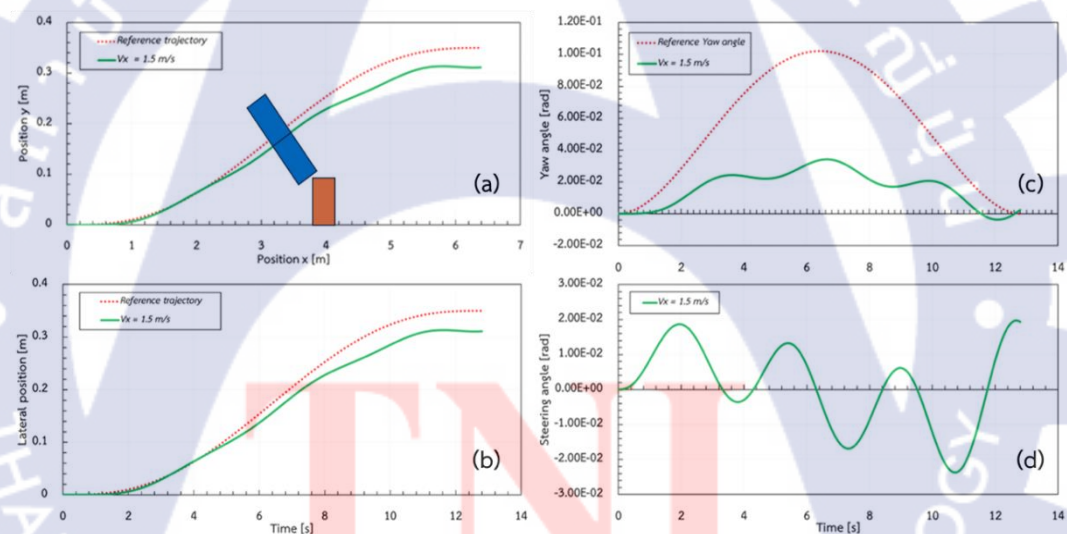
ศึกษาตัวแปรน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว (R_{u_δ}) ในการปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า เพื่อประเมินประสิทธิภาพการวางแผนวิถีในการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน เนื่องจากตัวควบคุม MPC 2 ในการทดลองที่ 1 และ 2 ที่มีการปรับแตงน้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{yy}) มากกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) ภายใต้การกำหนดตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) มีความเหมาะสมมากที่สุด อย่างไรก็ตาม ภายใต้การจำกัดความเร็วตามยาว $v_x = 0.5$ ถึง 2 เมตรต่อวินาที พบว่า ที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที วิถีโคจรของยานพาหนะเกิดการชน ดังนั้น เพื่อปรับแต่งตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าให้มีความครอบคลุมภายใต้ข้อจำกัดด้านการหลีกเลี่ยงการชน จึงควรพิจารณาการปรับแต่งตัวแปรน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว (R_{u_δ}) เพิ่มเติม โดยสามารถแสดงผลการศึกษาตัวควบคุม MPC 4 – MPC 6 ตามลำดับดังนี้



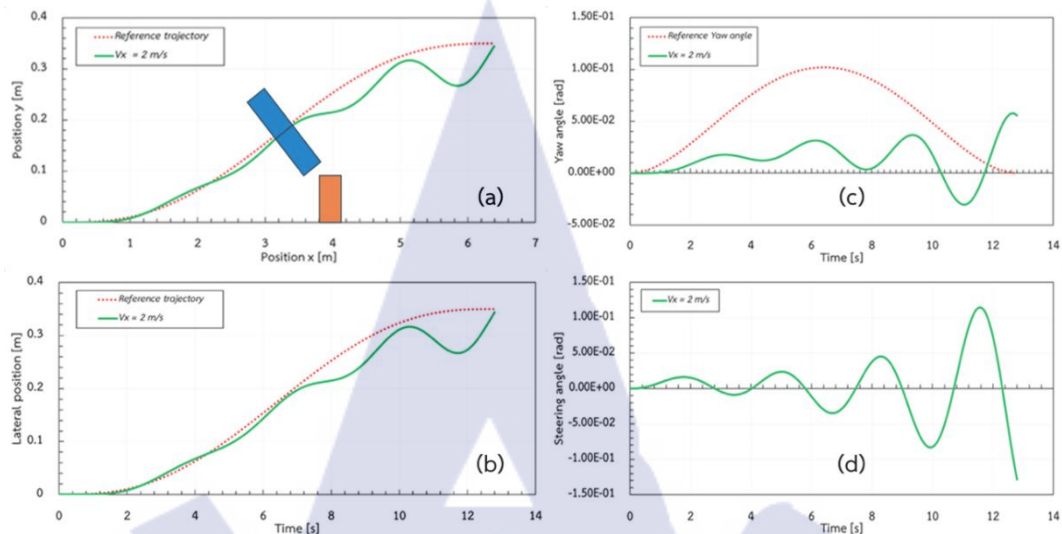
รูปที่ 4.19 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 4 ที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.20 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 4 ที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที

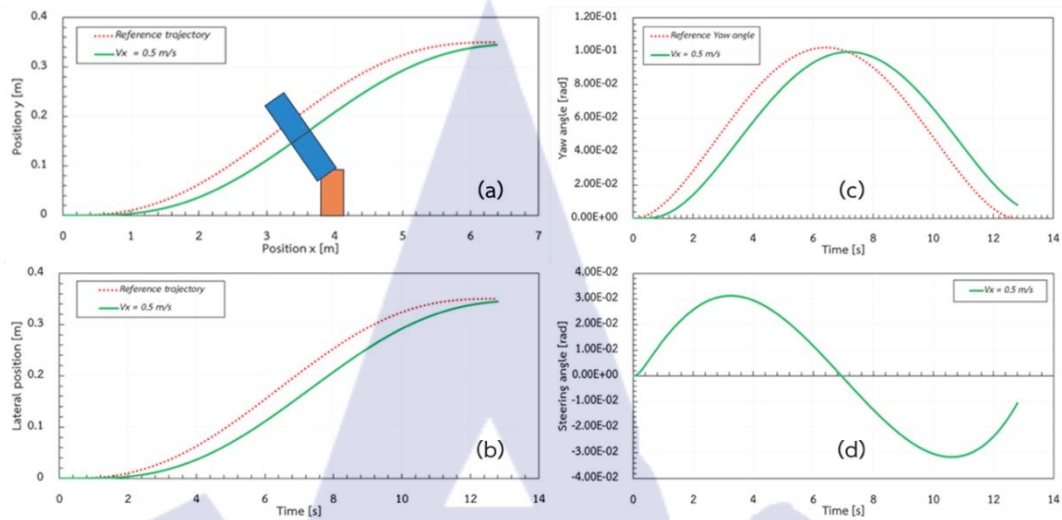


รูปที่ 4.21 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 4 ที่ความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที

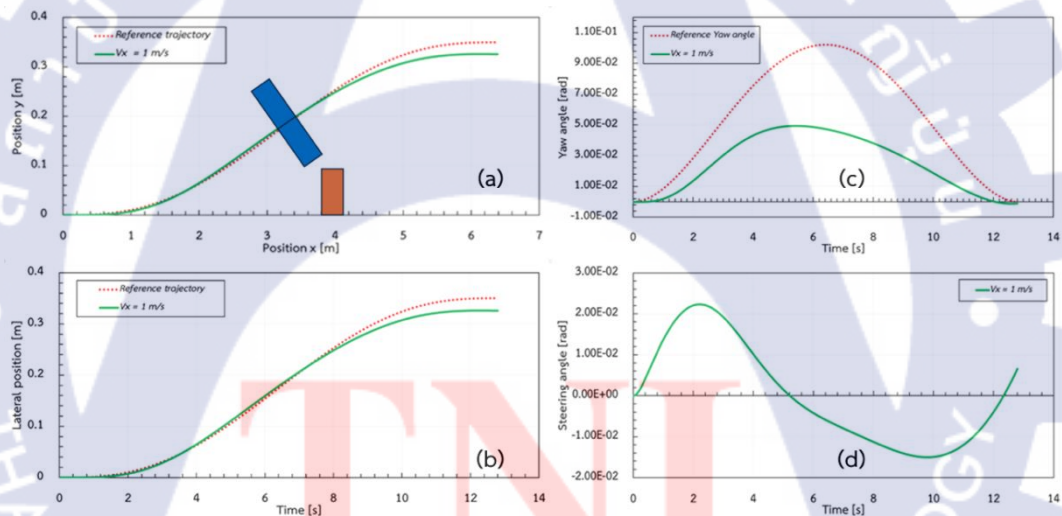


รูปที่ 4.22 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 4 ที่ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที

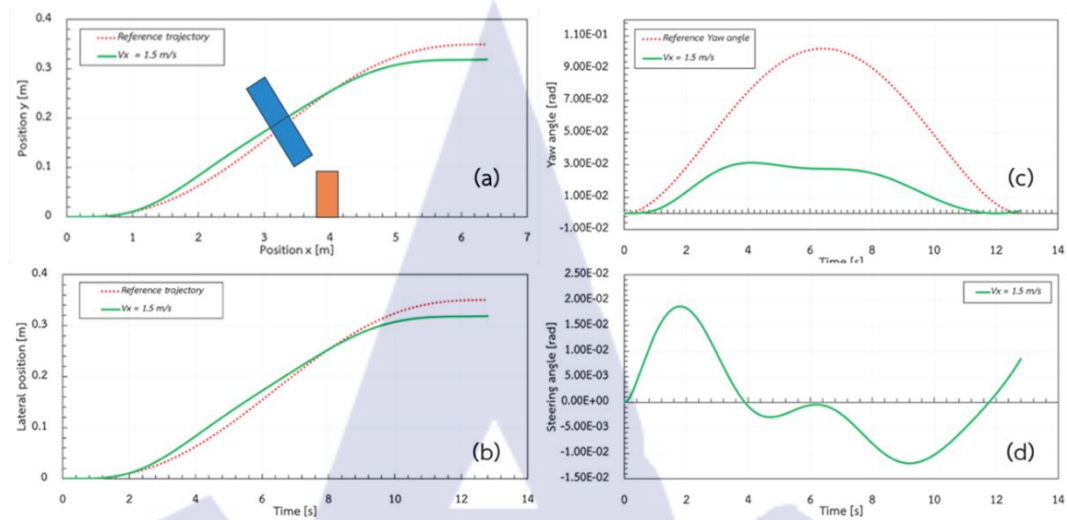
จากรูปที่ 4.19 ถึง 4.22 ผลการศึกษาตัวแปรน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว ($R_{u\delta}$) โดยกำหนดให้ MPC 4 มีการปรับแตงน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว ($R_{u\delta}$) เท่ากับน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) และมีการปรับแตงประสิทธิภาพตัวควบคุมแบบ Aggressive จากรูปที่ 4.19(a) – 4.22(a) ภายใต้การจำกัดความเร็วในระหว่างช่วง $v_x = 0.5$ ถึง 2 เมตรต่อวินาที พบว่า ยานพาหนะสามารถควบคุมเสถียรภาพในการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางโดยไม่เกิดการชนกันหากความเร็วมากกว่า 1.5 เมตรต่อวินาที และจากรูปที่ 4.19(b) - 4.22(b) ภายใต้การจำกัดตำแหน่งสถานะสุดท้ายตามแนวขวางสูงสุด $y_{tfmax} = 0.4$ เมตร พบว่า วิถีโคจรของยานพาหนะเคลื่อนที่โดยไม่ละเมิดข้อจำกัดด้านความปลอดภัย โดยที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที จากรูปที่ 4.19(b) วิถีโคจรของยานพาหนะ (y) มีวิถีใกล้เคียงกับวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) ตลอดการเคลื่อนที่ สัมพันธ์กับมุมหันเห (ψ) จากรูปที่ 4.19(c) และมุมบังคับเลี้ยว (δ_f) จากรูปที่ 4.19(d) ที่มีความเสถียร แต่เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น มุมหันเห (ψ) จากรูปที่ 4.20(c) – 4.21(c) และมุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) จากรูปที่ 4.20(d) – 4.21(d) เริ่มมีความไม่เสถียร แต่ความสามารถในการรักษาวิถีโคจรยังคงอยู่ภายใต้ข้อจำกัดด้านความปลอดภัย อย่างไรก็ตาม เมื่อความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที จากรูปที่ 4.22(b) วิถีโคจรของยานพาหนะจะมีลักษณะไม่เสถียรขาดความราบรื่นของเส้นทางการเคลื่อนที่ สัมพันธ์กับมุมหันเห (ψ) จากรูปที่ 4.22(c) และมุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) จากรูปที่ 4.22(d) ที่มีความไม่เสถียรมาก



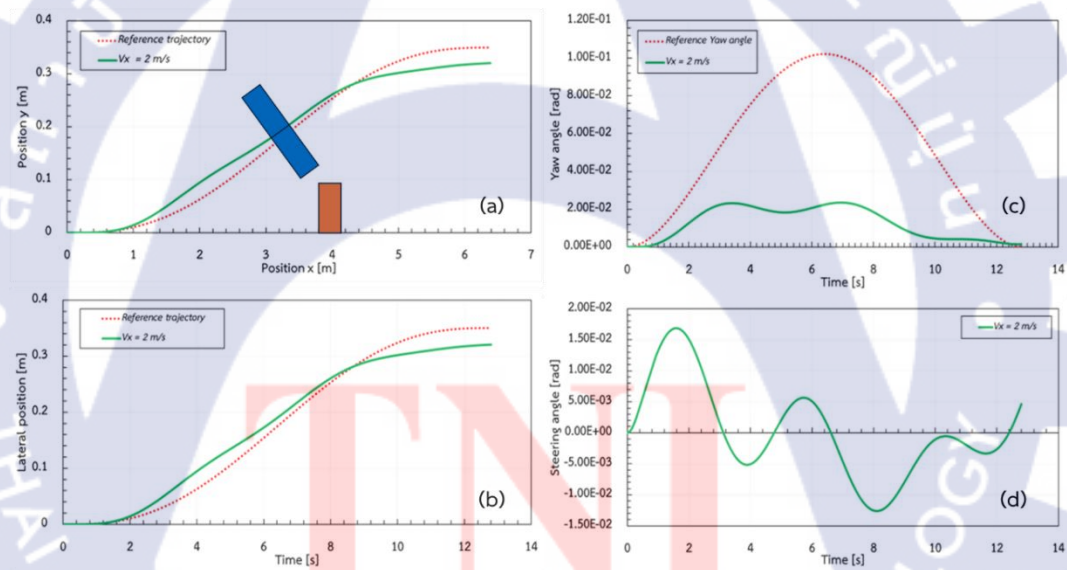
รูปที่ 4.23 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 5 ที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.24 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 5 ที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที

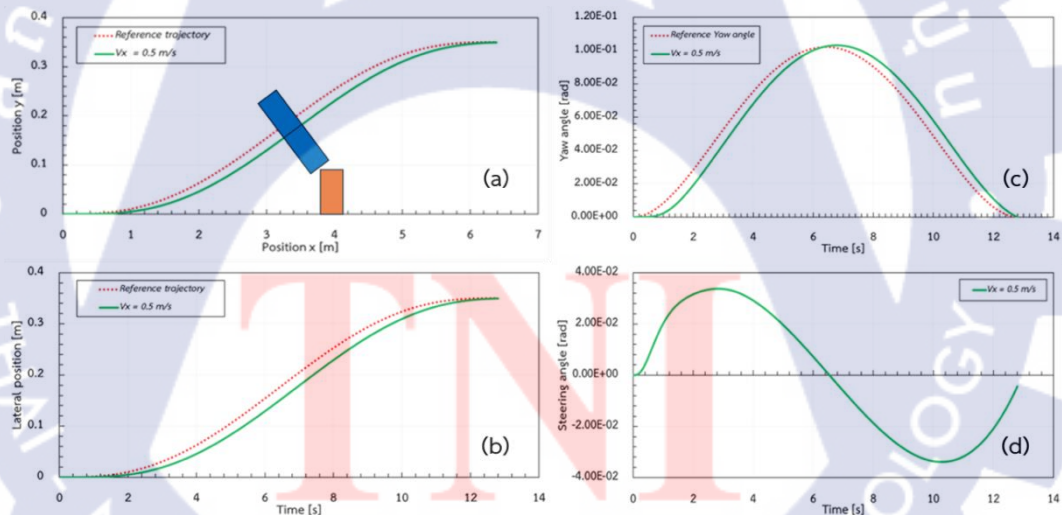


รูปที่ 4.25 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 5 ที่ความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที

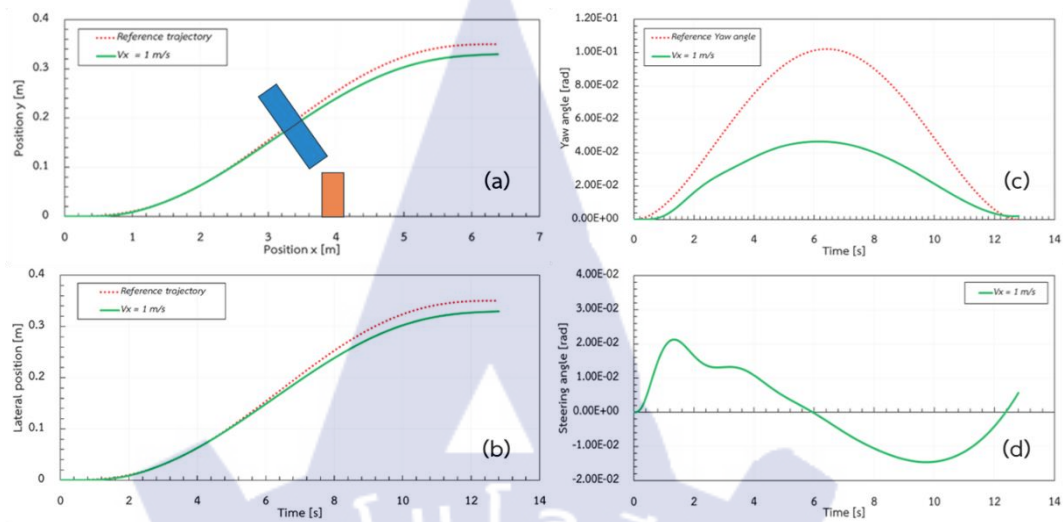


รูปที่ 4.26 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 5 ที่ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที

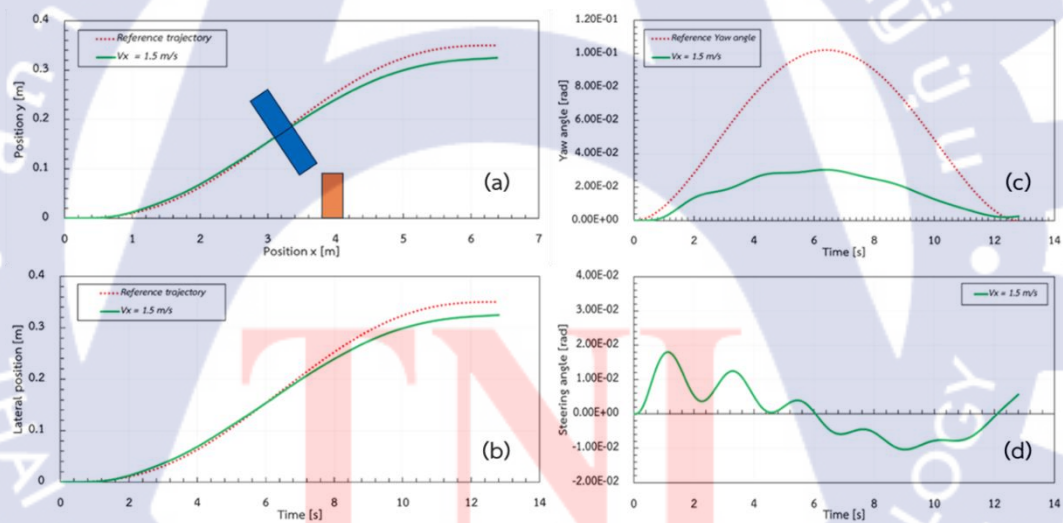
จากรูปที่ 4.23 ถึง 4.26 ผลการศึกษาตัวแปรน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว ($R_{u\delta}$) โดยกำหนดให้ MPC 5 มีการปรับแต่งน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว ($R_{u\delta}$) น้อยกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) และมีการปรับแต่งประสิทธิภาพตัวควบคุมแบบ Aggressive จากรูปที่ 4.23(a) – 4.26(a) ภายใต้การจำกัดความเร็วในระหว่างช่วง $v_x = 0.5$ ถึง 2 เมตรต่อวินาที พบว่า ยานพาหนะสามารถควบคุมเสถียรภาพในการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางโดยไม่เกิดการชนกันได้ทุกสถานการณ์ความเร็วในการเข้าโค้งระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน ยกเว้นที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที ที่วิถีโคจรของยานพาหนะเกิดการชน และจากรูปที่ 4.23(b) - 4.26(b) ภายใต้การจำกัดตำแหน่งสถานะสุดท้ายตามแนวขวางสูงสุด $y_{tfmax} = 0.4$ เมตร พบว่า วิถีโคจรของยานพาหนะเคลื่อนที่โดยไม่ละเมิดข้อจำกัดด้านความปลอดภัย โดยที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที จากรูปที่ 4.23(b) วิถีโคจรของยานพาหนะ (y) มีวิถีใกล้เคียงกับวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) ตลอดการเคลื่อนที่ สัมพันธ์กับมุมหันเห (ψ) จากรูปที่ 4.23(c) และมุมบังคับเลี้ยว (δ_f) จากรูปที่ 4.23(d) ที่มีความเสถียร แต่เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น มุมหันเห (ψ) จากรูปที่ 4.24(c) – 4.26(c) และมุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) จากรูปที่ 4.24(d) – 4.26(d) เริ่มมีความไม่เสถียร แต่ความสามารถในการรักษาวិถีโคจรยังคงอยู่ภายใต้ข้อจำกัดด้านความปลอดภัย



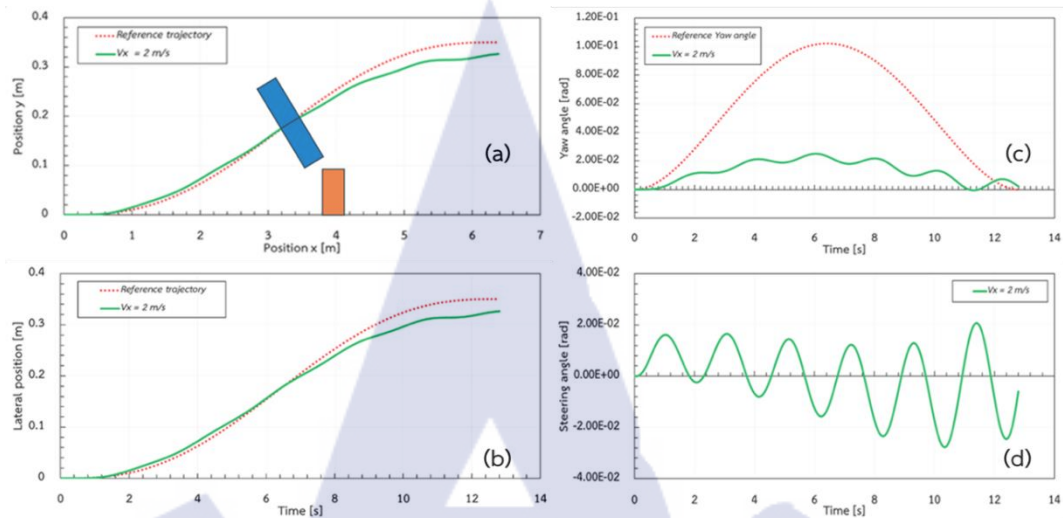
รูปที่ 4.27 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 6 ที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.28 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 6 ที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.29 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 6 ที่ความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 4.30 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 6 ที่ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที

จากรูปที่ 4.27 ถึง 4.30 ผลการศึกษาตัวแปรน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว (R_{u_δ}) โดยกำหนดให้ MPC 6 มีการปรับแตงน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว (R_{u_δ}) น้อยกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห (Q_{y_ψ}) และมีการปรับแตงประสิทธิภาพตัวควบคุมแบบ Robust จากรูปที่ 4.27(a) – 4.30(a) ภายใต้การจำกัดความเร็วในระหว่างช่วง $v_x = 0.5$ ถึง 2 เมตรต่อวินาที พบว่า ยานพาหนะสามารถควบคุมเสถียรภาพในการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางโดยไม่เกิดการชนกันได้ทุกสถานการณ์ความเร็วในการเข้าโค้งระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน และจากรูปที่ 4.27(b) – 4.30(b) ภายใต้การจำกัดตำแหน่งสถานะสุดท้ายตามแนวขวางสูงสุด $y_{tfmax} = 0.4$ เมตร พบว่า วิถีโคจรของยานพาหนะเคลื่อนที่โดยไม่ละเมิดข้อจำกัดด้านความปลอดภัย โดยที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที จากรูปที่ 4.27(b) วิถีโคจรของยานพาหนะ (y) มีวิธีสัมผัสกับวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) ตลอดการเคลื่อนที่ สัมพันธ์กับมุมหันเห (ψ) จากรูปที่ 4.27(c) และมุมบังคับเลี้ยว (δ_f) จากรูปที่ 4.30(d) ที่มีความเสถียร แต่เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น มุมหันเห (ψ) จากรูปที่ 4.28(c) – 4.30(c) และมุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) จากรูปที่ 4.28(d) – 4.30(d) เริ่มมีความไม่เสถียร แต่ความสามารถในการรักษาวិถีโคจรยังคงอยู่ภายใต้ข้อจำกัดด้านความปลอดภัย

นอกจากนี้ ตัวควบคุม MPC 4 – MPC 6 สามารถวัดประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าให้ครอบคลุมเกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสมภายใต้ข้อจำกัดด้านพลศาสตร์ ยานยนต์ ได้จากค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองค่าเฉลี่ยราก (Root Mean Square Error: RMSE) ของวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) กับวิถีโคจรตามแนวขวาง (y) ได้จากตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ค่า RMSE การวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ในตัวควบคุม MPC 4 – MPC 6

ความเร็วของยานพาหนะ (เมตรต่อวินาที)	ค่า RMSE		
	MPC 4	MPC 5	MPC 6
0.5	0.03192	0.029975	0.01619
1	0.022886	0.011396	0.013084
1.5	0.023603	0.017175	0.015182
2	0.030094	0.020791	0.016469

จากผลการประเมินประสิทธิภาพการวางแผนวิถีได้จากค่า RMSE พบว่า ตัวควบคุม MPC 6 มีค่าคลาดเคลื่อนในการวางแผนวิธิน้อยกว่าตัวควบคุม MPC 4 และ MPC 5 ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่า ตัวควบคุม MPC 6 ที่มีการปรับแตงน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว ($R_{u\delta}$) น้อยกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) และมีการปรับแตงประสิทธิภาพตัวควบคุมแบบ Robust ส่งผลกับตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ในการรักษาวิถีโคจรให้ยังคงอยู่ภายใต้การจำกัดตำแหน่งด้านความปลอดภัย และสร้างเส้นทางที่มีความราบรื่นภายใต้เกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสมมากกว่า รวมไปถึงการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางภายใต้การจำกัดความเร็วได้ทุกสถานการณ์ความเร็วในการเข้าโค้งระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน

4.2 อภิปรายผลการปรับแตงตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า

จากผลการจำลองสามารถแสดงผลการศึกษาตัวแปรพารามิเตอร์ที่ส่งผลกับตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC) ในการปรับแตงตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ดังนี้

จากผลการศึกษาตัวแปรข้อจำกัดอินพุตในตัวควบคุม MPC 1 – MPC 2 เพื่อศึกษาตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) ในการปรับแตงตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า พบว่า ตัวควบคุม MPC 2 ที่มีการกำหนดตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) ภายใต้ข้อจำกัดทางกายภาพของยานพาหนะ ส่งผลกับตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ในการรักษาวิถีโคจรให้ยังคงอยู่ภายใต้ข้อจำกัดด้านความปลอดภัยที่เหมาะสม และสร้างเส้นทางที่มีความราบรื่น เมื่อความเร็วเพิ่มสูงขึ้น

จากผลการศึกษาตัวแปรน้ำหนักเอาต์พุตในตัวควบคุม MPC 2 – MPC 3 เพื่อศึกษาตัวแปรน้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง ($Q_{y\psi}$) และน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) ในการปรับแตงตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า พบว่า ตัวควบคุม

MPC 2 ที่มีการปรับแตงน้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{yy}) ที่มากกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) ส่งผลกับตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ในการรักษาวิถีโคจรให้ยังคงอยู่ภายใต้การจำกัดตำแหน่งด้านความปลอดภัย และสร้างเส้นทางที่มีความราบรื่นภายใต้เกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสมมากกว่า

จากผลการศึกษาตัวแปรน้ำหนักอินพุตในตัวควบคุม MPC 4 – MPC 6 เพื่อศึกษาตัวแปรน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว ($R_{u\delta}$) ในการปรับแตงตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า พบว่า ตัวควบคุม MPC 6 ที่มีการปรับแตงน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว ($R_{u\delta}$) ให้น้อยกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) และมีการปรับแตงประสิทธิภาพตัวควบคุมแบบ Robust ส่งผลกับตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ในการรักษาวิถีโคจรให้ยังคงอยู่ภายใต้การจำกัดตำแหน่งด้านความปลอดภัย และสร้างเส้นทางที่มีความราบรื่นภายใต้เกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสมมากกว่า รวมไปถึงการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางภายใต้การจำกัดความเร็วได้ทุกสถานการณ์ความเร็วในการเข้าโค้งระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน

จากผลการทดลอง พบว่า ตัวควบคุม MPC 2 และ MPC 6 มีความเหมาะสมในการปรับแตงตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้ามากที่สุด นอกจากนี้ วิถีโคจรของยานพาหนะตามแนวขวาง (y) มุมหันเหชั่วขณะ (ψ) และมุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) ของตัวควบคุม MPC 2 และ MPC 6 มีลักษณะเดียวกัน ดังนั้น เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างในตัวควบคุม MPC 2 และ MPC 6 สามารถเปรียบเทียบได้จากการวัดประสิทธิภาพของตัวควบคุมจากค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองค่าเฉลี่ยราก (RMSE) ของวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) กับวิถีโคจรตามแนวขวาง (y) ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่า RMSE การวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ในตัวควบคุม MPC 2 และ MPC 6

ความเร็วของยานพาหนะ (เมตรต่อวินาที)	ค่า RMSE	
	MPC 2	MPC 6
0.5	0.018182	0.01619
1	0.014388	0.013084
1.5	0.01621	0.015182
2	0.017589	0.016469

จากผลการประเมินประสิทธิภาพการวางแผนวิถีได้จากค่า RMSE พบว่า ตัวควบคุม MPC 6 มีค่าคลาดเคลื่อนในการวางแผนวิธิน้อยกว่าตัวควบคุม MPC 2 ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่า ตัวควบคุม MPC 6 ที่มีการปรับแตงน้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{y_p}) มากกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห (Q_{y_ψ}) ภายใต้ตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) และการปรับแตงน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว (R_{u_δ}) น้อยกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห (Q_{y_ψ}) ที่มีการปรับแตงประสิทธิภาพตัวควบคุมแบบ Robust มีเกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสมมากที่สุดในการปรับแตงสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า เนื่องจาก สามารถรักษาเสถียรภาพของวิถีโคจรให้ยังคงอยู่ภายใต้การจำกัดตำแหน่งด้านความปลอดภัย สามารถสร้างเส้นทางที่มีเสถียรภาพความราบรื่นภายใต้เกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสม และมีเสถียรภาพในการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางภายใต้การจำกัดความเร็วได้ทุกสถานการณ์ความเร็วในการเข้าโค้งระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน



บทที่ 5

บทสรุป ข้อเสนอแนะ บทวิจารณ์

5.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการควบคุมเสถียรภาพความเร็วในการเข้าโค้งของแบบจำลองรถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 ในระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉินด้วยตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC) เพื่อสร้างวิถีโคจรของยานพาหนะตามแนวขวาง (y) ที่มีเสถียรภาพความแม่นยำและความปลอดภัย ภายใต้การจำกัดตำแหน่ง การจำกัดความเร็ว การหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวาง และเกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสมสำหรับพลศาสตร์ยานยนต์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าถูกนำมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองปริภูมิสถานะ (State Space Model) ของสมการแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ (Vehicle Dynamics Model) ในรูปแบบจำลองจักรยานเชิงเส้น (Linear Bicycle Model) ร่วมกับการวางแผนวิถีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะด้วยสมการพหุนามกำลังห้า (Quintic Polynomial Equations) เพื่อสร้างวิถีโคจรอ้างอิง (y_{ref}) และมุม headings (ψ_{ref}) โดยกำหนดให้แบบจำลองยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยการหักเลี้ยวทางซ้าย เพื่อเปลี่ยนช่องจราจรทางเดียว (Single Lane Change) ผ่านการสร้างแบบจำลองบนโปรแกรม MATLAB & Simulink® กำหนดเงื่อนไขการทดลองภายใต้การจำกัดความเร็วตามยาวของยานพาหนะในระหว่างช่วง $v_x = 0.5$ ถึง 2 เมตรต่อวินาที และกำหนดตัวแปรพารามิเตอร์ที่ควบคุมในการปรับแต่งสมการวัตถุประสงค์ (Cost function, J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าประกอบไปด้วย เวลาตัวอย่าง $T_s = 0.1$ วินาที ขอบฟ้าการทำนาย $N_p = 15$ และขอบเขตการควบคุม $N_c = 3$ จากผลการศึกษาการปรับแต่งตัวแปรพารามิเตอร์ในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุม MPC 1 – 6 ที่ประกอบไปด้วย ตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) ตัวแปรน้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{yy}) ตัวแปรน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) และตัวแปรน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว (R_{u_δ}) พบว่า ตัวควบคุม MPC 6 ที่มีการปรับแต่งสมการวัตถุประสงค์ (J) แบบ 1) การปรับแต่งตัวแปรข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว (u_δ) ภายใต้ข้อจำกัดทางกายภาพของยานพาหนะ ที่มุมบังคับเลี้ยวของล้อหน้า (δ_f) อยู่ในช่วง $\delta_f = -18$ องศา ถึง 18 องศา 2) การปรับแต่งน้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง (Q_{yy}) มากกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) และ 3) การปรับแต่งน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว (R_{u_δ}) น้อยกว่าน้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห ($Q_{y\psi}$) และมีการปรับแต่งประสิทธิภาพตัวควบคุมแบบ Robust ส่งผลกับตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าให้ยังคงสามารถรักษาเสถียรภาพของวิถีโคจรอยู่ภายใต้การจำกัดตำแหน่งด้านความปลอดภัย

สามารถสร้างเส้นที่มีเสถียรภาพความราบรื่นภายใต้เกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสม และมีเสถียรภาพในการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางภายใต้การจำกัดความเร็วได้ทุกสถานการณ์ความเร็วในการเข้าโค้งระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน ดังนั้นการปรับแต่งพารามิเตอร์ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า ช่วยให้สามารถทราบถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการควบคุมเสถียรภาพความเร็วในการเข้าโค้งของแบบจำลองรถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 ในระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉิน อาทิเช่น อิทธิพลของความเร็วของยานพาหนะและการปรับแต่งตัวแปรพารามิเตอร์ในตัวแปรในสมการวัตถุประสงค์ (J) ของตัวควบคุมที่แตกต่างกัน โดยการค้นพบนี้ เป็นตัวบ่งชี้ว่า การควบคุมเสถียรภาพความเร็วในการเข้าโค้งของแบบจำลองรถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 ในระหว่างการเปลี่ยนช่องจราจรแบบฉุกเฉินด้วยตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า (Model Predictive Control: MPC) สามารถสร้างเส้นทางการเปลี่ยนช่องจราจรฉุกเฉินที่มีเสถียรภาพในการหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางภายใต้การจำกัดความเร็วและการจำกัดตำแหน่งด้านความปลอดภัย รวมไปถึงการเพิ่มประสิทธิภาพวิถีโคจรของยานพาหนะตามแนวขวาง (y) ที่มีเสถียรภาพความแม่นยำและความปลอดภัยภายใต้เกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสม

5.2 ข้อเสนอแนะ

การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าในการควบคุมเสถียรภาพความเร็วในการเข้าโค้งของยานพาหนะในโลกแห่งความเป็นจริงอาจจำเป็นต้องมีการเพิ่มประสิทธิภาพภายใต้เกณฑ์การปรับวิถีโคจรที่เหมาะสม และการปรับปรุงความทนทานของตัวควบคุมเพิ่มเติม โดยการวิจัยในอนาคตจะมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงอัลกอริทึมตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า และบูรณาการเซนเซอร์ขั้นสูงสำหรับการตรวจสอบจับเส้นทางในโลกแห่งความเป็นจริง เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและความแม่นยำของยานพาหนะในบริบทของการควบคุมการขับขี่แบบอัตโนมัติ ภายใต้เงื่อนไขสถานการณ์การขับขี่ต่าง ๆ

บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

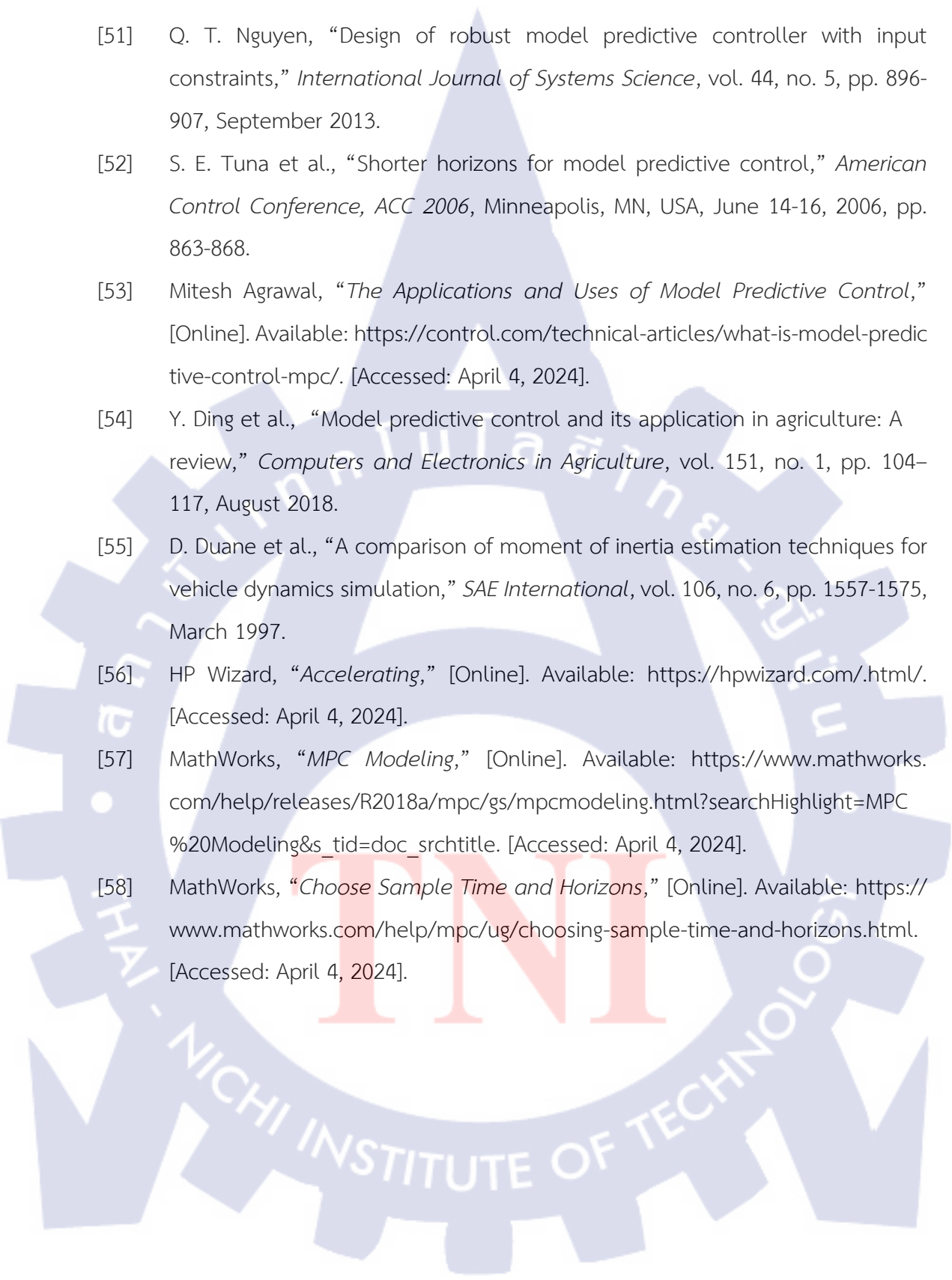
- [1] C. Hubmann et al., “Automated driving in uncertain environments: Planning with interaction and uncertain maneuver prediction,” *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 3, no. 1, pp. 5-17, March 2018.
- [2] B. Paden et al., “A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles,” *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 1, no. 1, pp. 33 – 55, March 2016.
- [3] E. Commission, “*Advanced Driver Assistance Systems*,” [Online]. Available: <https://www.synopsys.com /automotive/what-is-adas.html/>. [Accessed: April 4, 2024].
- [4] SAE International, “*Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*,” [Online]. Available: <https://www.sae.org/standards/content/>. [Accessed: April 4, 2024].
- [5] D. J. Yeong et al., “Sensor and sensor fusion technology in autonomous vehicles: A review,” *Sensors*, vol. 21, no. 6, pp. 21-40, February 2021.
- [6] J. Tang et al., “Lane-changes prediction based on adaptive fuzzy neural network,” *Expert Systems with Applications*, vol. 91, no.1, pp. 452-463, January 2018.
- [7] L. Chen et al., “A path and velocity planning method for lane changing collision avoidance of intelligent vehicle based on cubic 3-D Bezier curve,” *Advances in Engineering Software*, vol. 132, no. 1, pp. 65-73, June 2019.
- [8] H. Sazgar et al., “Trajectory planning and combined control design for critical high-speed lane change manoeuvres,” *Sage Journal*, vol. 234, no. 2, pp. 823–839, April 2019.
- [9] L. Yufeng et al., “Lateral collision avoidance robust control of electric vehicles combining a lane-changing model based on vehicle edge turning trajectory and a vehicle semi-uncertainty dynamic model,” *International Journal of Automotive Technology*, vol. 19, no. 1, pp. 331-343, February 2018.

- [10] S. Hui et al., "Lane-changing trajectory tracking and simulation of autonomous vehicles based on model predictive control," *Sustainability*, vol. 14, no. 20, pp. 13272, September 2022.
- [11] J. Liu et al., "Simulation performance evaluation of pure pursuit, stanley, lqr, mpc controller for autonomous vehicles," *IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics, RCAR 2021*, Xining, China, July 15–19, 2021, pp. 1444–1449.
- [12] A. Reda et al., "Model predictive control for automated vehicle steering," *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 17, no. 7, pp. 163–182, September 2020.
- [13] B. Paden et al., "A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles," *IEEE Transaction on Intelligent Vehicles*, vol. 1, no. 1, pp. 33–55, March 2016.
- [14] X. Qian, "Model predictive control for autonomous and cooperative driving," Ph.D. dissertation (Automatic Control Engineering), Université Paris sciences et lettres, Paris, France, 2016.
- [15] Y. Gao, "Model predictive control for autonomous and semiautonomous vehicles," Ph.D. dissertation (Automatic Control Engineering), Université Paris sciences et lettres, Paris, France, 2014.
- [16] M. Nolte et al., "Model predictive control-based trajectory generation for autonomous vehicles – an architectural approach," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, IV 2017*, Los Angeles, CA, USA, June 11–14, 2017, pp. 798–805.
- [17] R. Matthaei et al., "Autonomous driving – a top-down-approach," *Automatisierungstechnik*, vol. 63, no.3, pp. 155–167, March 2015.
- [18] N. H. Amer et al., "Modelling and control strategies in path tracking control for autonomous ground vehicles: A review of state of the art and challenges," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 86, no. 1, pp. 225–254, November 2016.
- [19] N. B. Sean, "On size and control: The use of dimensional analysis in controller design," Ph.D. dissertation (Mechanical Engineering), University of Illinois Urbana-Champaign, Illinois, United States, 2002.

- [20] C. L. A. van Maren et al., "Scaled Vehicle Dynamic of Davinci Project," Ph.D. dissertation (Mechanical Engineering), Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2001.
- [21] Sean N. Brennan, "Modeling and control issues associated with scaled vehicles," M.S. thesis (Mechanical Engineering), University of Illinois Urbana-Champaign, Illinois, United States, 1999.
- [22] P. Hoblet et al., "Scale-model vehicle analysis for the design of a steering controller," *Southeastern Symposium on System Theory, SSST 2003*, Morgantown, WV, USA, March 18-18, 2003, pp. 201-205.
- [23] P. Joop et al., "Real-time video-based monitoring of vehicle position and orientation within an automated vehicle framework," *IEEE Intelligent Automated Vehicles*, vol. 18, no. 17, pp. 1-7, March 2015.
- [24] S. Dominguez et al., "Comparison of lateral controllers for autonomous vehicle: Experimental results," *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC 2016*, Rio de Janeiro, Brazil, November 01-04, 2016, pp. 1418–1423.
- [25] G. Indiveri, "Kinematic time-invariant control of a 2D nonholonomic vehicle," *IEEE Conference on Decision and Control, DC 1999*, Phoenix, AZ, USA, December 7-10, 1999, pp. 2112–2117.
- [26] S. Blažič et al., "Lyapunov-based tracking control for a wheeled mobile robot," *IEEE Control Dynamic Systems and Robotics*, vol. 10, no. 8, pp. 667–676, April 2016.
- [27] P. Polack et al., "The kinematic bicycle model: A consistent model for planning feasible trajectories for autonomous vehicles," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, IV 2017*, Los Angeles, CA, USA, June 11-14, 2017, pp. 812–818.
- [28] R. C. Coulter, "Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm," Ph.D. dissertation (Robotics Institute), Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 1992.
- [29] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, Switzerland: Springer Science & Business Media, 2011.

- [30] R. Hasan-farag, "Full Vehicle Dynamic Modeling for Chassis Controls," Fisita [Online]. Available: <http://www.fisita.com/students/congress/sc08papers/f2008sc021.pdf>. [Accessed: April 4, 2024].
- [31] J. V. Frasch et al., "An auto-generated nonlinear mpc algorithm for real-time obstacle avoidance of ground vehicles," *European Control Conference, ECC 2013*, Zurich, Switzerland, July 17-19, 2013, pp. 4136–4141.
- [32] Albert Gu et al., "Efficiently modeling long sequences with structured state spaces," *International Conference on Learning Representations, ICLR 2022*, Stanford, California, USA, April 25-29, 2022, pp. 1-32.
- [33] M. Peraaho, "Driver Competence in a Hierarchical Perspective: Implications for Driver Education," [Online]. Available: <http://www.tricoachingpartnership.com>. [Accessed: April 4, 2024].
- [34] Feng Y et al., "Research on lane changing and overtaking for intelligent vehicle based on vision navigation," *International Conference on Industrial Technology, ICIT 2008*, Chengdu, China, April 21–24, 2008, pp.1–6.
- [35] D. Gonz'alez et al., "A review of motion planning techniques for automated vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 1135–1145, April 2016.
- [36] M. Yue et al., "Quintic polynomial-based obstacle avoidance trajectory planning and tracking control framework for tractor-trailer system," *Journal of Control Automation and Systems*, vol. 17, no. 10, pp. 2634–2646, July 2019.
- [37] A. Norouzi et al., "Path planning and re-planning of lane change manoeuvres in dynamic traffic environments," *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 239–264, May 2019.
- [38] Y. Ding et al., "Safe and optimal lane-change path planning for automated driving," *Journal of Automobile Engineering*, vol. 235, no. 4, pp. 1070–1083, May 2021.
- [39] Ian Stewart, *Discusses Galois Theory in General Including a Proof of Insolubility of the General Quintic*, United States: Wiley, 1989.

- [40] Y. Li et al., "Dynamic trajectory planning for automated lane changing using the quintic polynomial curve," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 23, no. 6, pp. 1-14, September 2023.
- [41] M. Yue et al., "Trajectory tracking control for tractor-trailer vehicles: A coordinated control approach," *Nonlinear Dynamics*, vol. 99, no. 3, pp. 1061–1074, November 2017.
- [42] N. H. Amer et al., "Modelling and control strategies in path tracking control for autonomous ground vehicles: A review of state of the art and challenges," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 86, no. 2, pp. 225-254, November 2016.
- [43] Y. Kebbati et al., "Lateral control for autonomous wheeled vehicles: A technical review," *Asian Journal of Control*, vol. 25, no. 4, pp. 2539–2563, July 2023.
- [44] A. Eskandarian, *Handbook of Intelligent Vehicles*, Switzerland: Springer, 2012.
- [45] B. Kouvaritakis and M. Cannon, *Model Predictive Control – Classical Robust and Stochastic*, Switzerland: Springer, 2016.
- [46] J. K. Fredlund, "Autonomous driving using model predictive control methods," M.S. thesis (Automatic Control), Lund University, Lund, Sweden, 2017.
- [47] P. Hang et al., "Path-tracking controller design for a 4wis and 4wid electric vehicle with steer-by-wire system," *SAE International*, vol. 17, no.1, pp. 1954–1965, September 2017.
- [48] MathWorks, "MPC Modeling," [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/releases/R2018a/mpc/gs/mpcmodeling.html?searchHighlight=MPC%20Modeling&s_tid=doc_srchttitle. [Accessed: April 4, 2024].
- [49] A. Reda et al., "Design and implementation of reinforcement learning for automated driving compared to classical mpc control," *Advanced Electric Vehicle Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 1–18, January 2023.
- [50] MathWorks, "Choose Sample Time and Horizons," [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/releases/R2018a/mpc/ug/choosing-sample-time-and-horizons.html?s_eid=PSM_15028. [Accessed: April 4, 2024].

- 
- [51] Q. T. Nguyen, "Design of robust model predictive controller with input constraints," *International Journal of Systems Science*, vol. 44, no. 5, pp. 896-907, September 2013.
- [52] S. E. Tuna et al., "Shorter horizons for model predictive control," *American Control Conference, ACC 2006*, Minneapolis, MN, USA, June 14-16, 2006, pp. 863-868.
- [53] Mitesh Agrawal, "*The Applications and Uses of Model Predictive Control*," [Online]. Available: <https://control.com/technical-articles/what-is-model-predictive-control-mpc/>. [Accessed: April 4, 2024].
- [54] Y. Ding et al., "Model predictive control and its application in agriculture: A review," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 151, no. 1, pp. 104-117, August 2018.
- [55] D. Duane et al., "A comparison of moment of inertia estimation techniques for vehicle dynamics simulation," *SAE International*, vol. 106, no. 6, pp. 1557-1575, March 1997.
- [56] HP Wizard, "*Accelerating*," [Online]. Available: <https://hpwizard.com/.html/>. [Accessed: April 4, 2024].
- [57] MathWorks, "*MPC Modeling*," [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/releases/R2018a/mpc/gs/mpcmodeling.html?searchHighlight=MPC%20Modeling&s_tid=doc_srchttitle. [Accessed: April 4, 2024].
- [58] MathWorks, "*Choose Sample Time and Horizons*," [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/mpc/ug/choosing-sample-time-and-horizons.html>. [Accessed: April 4, 2024].

ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวก ก.

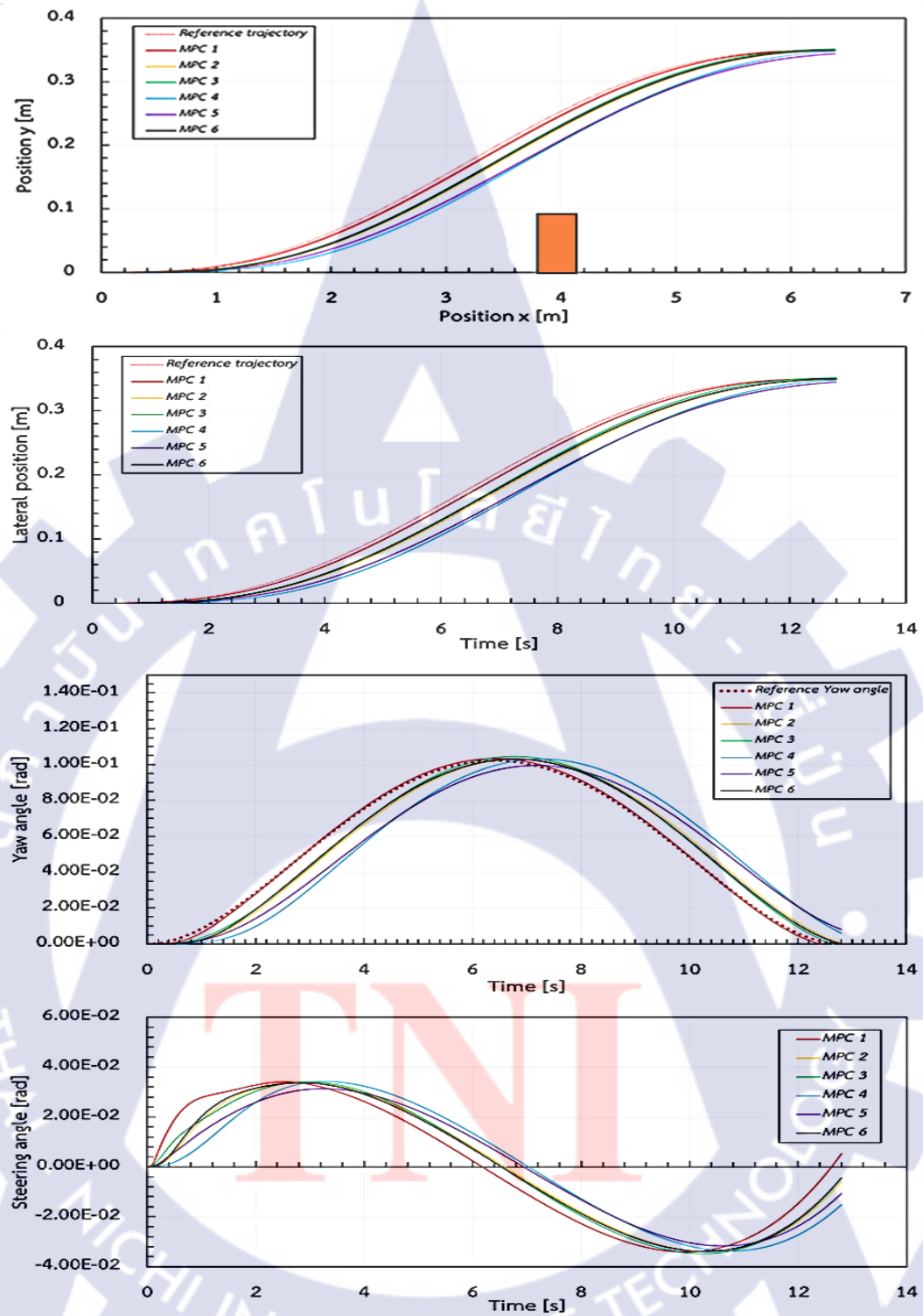
การปรับแต่งตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า

TNII

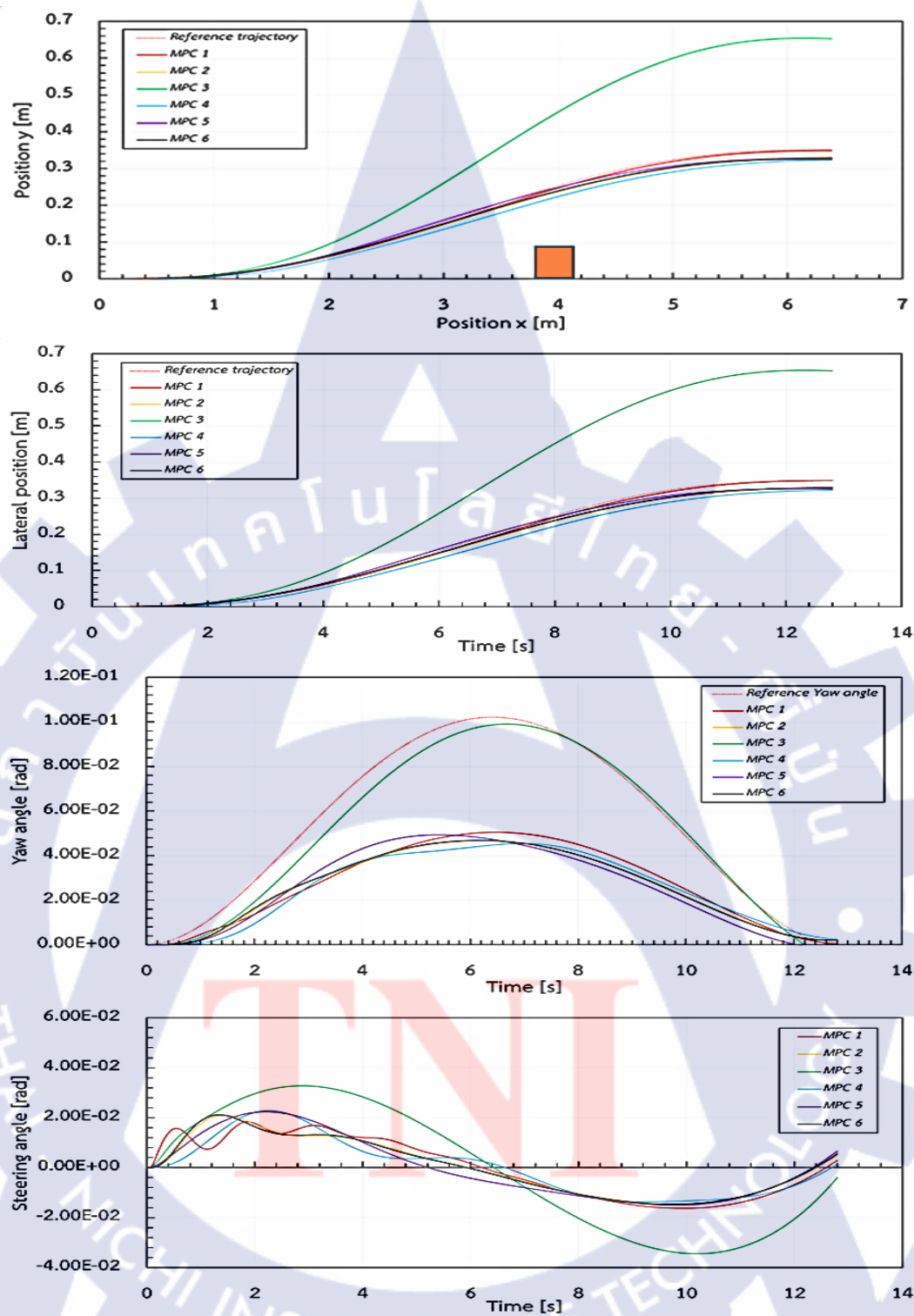
การปรับแต่งสมการวัตถุประสงค์ (Cost function, J) ของตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า MPC 1 – MPC 6

ตารางที่ ก.1 การปรับแต่งตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 1 – MPC 6

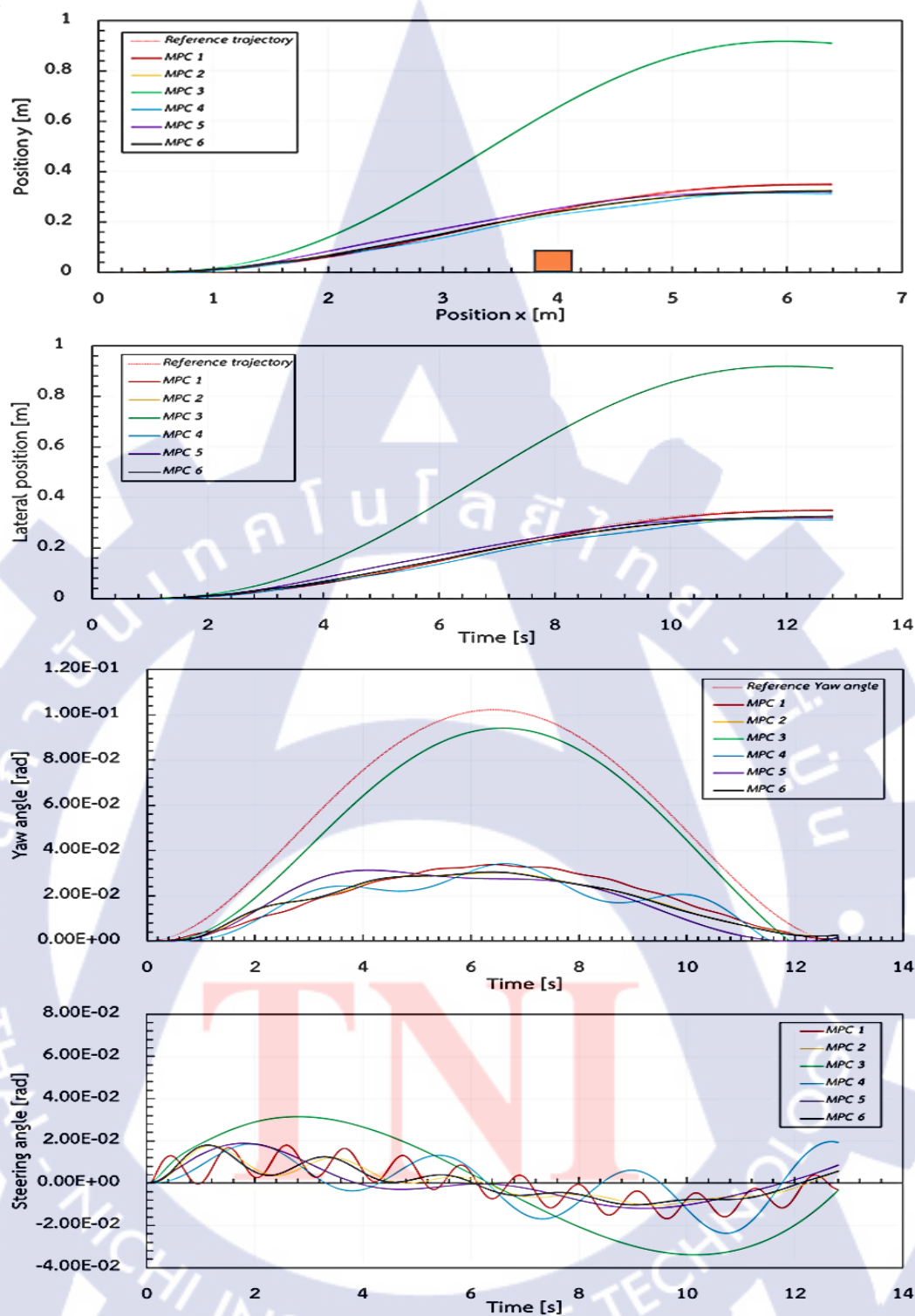
พารามิเตอร์	ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้า					
	MPC 1	MPC 2	MPC 3	MPC 4	MPC 5	MPC 6
เวลาตัวอย่าง	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
ขอบฟ้าการทำนาย	15	15	15	15	15	15
ขอบเขตการควบคุม	3	3	3	3	3	3
ข้อจำกัดของมุมบังคับเลี้ยว	ไม่กำหนด	-0.31415926 ถึง 0.31415926	-0.31415926 ถึง 0.31415926	-0.31415926 ถึง 0.31415926	-0.31415926 ถึง 0.31415926	-0.31415926 ถึง 0.31415926
น้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว	0	0	0	4.652547443	5.459815003	0.01
อัตราน้ำหนักอินพุตของมุมบังคับเลี้ยว	$4.0601 e^{-8}$	0.172044863	0.1	0.002149360	0.018315638	0.1
น้ำหนักเอาต์พุตของตำแหน่งแนวขวาง	0.002216716	11.62487478	0.099999999	46.52547443	54.59815003	10
น้ำหนักเอาต์พุตของมุมหันเห	$2.2167 e^{-8}$	0.581243739	0.999999999	4.652547443	27.29907501	0.1



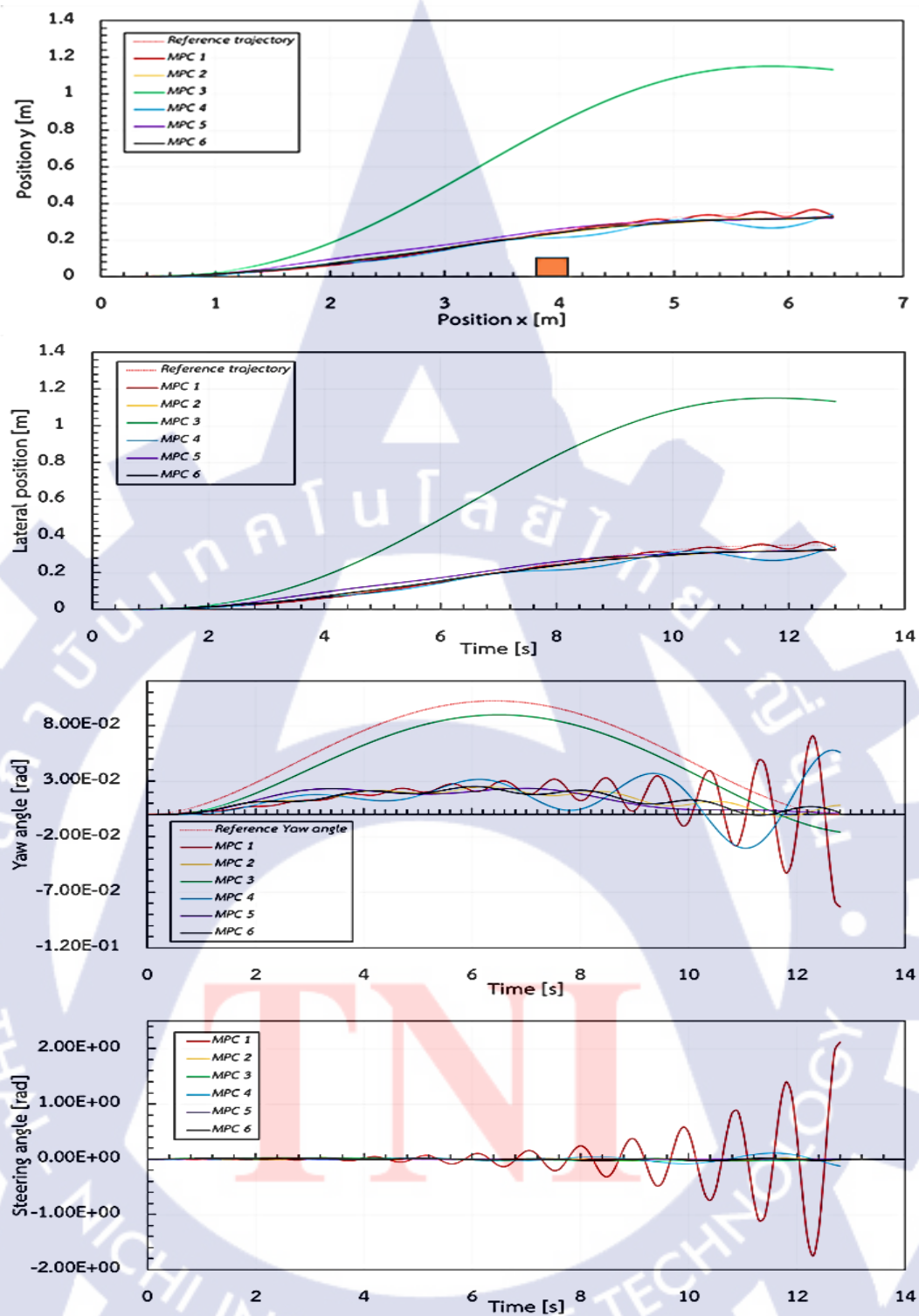
รูปที่ ก.1 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 1 – MPC 6 ที่ความเร็ว 0.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ ก.2 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 1 – MPC 6 ที่ความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที



รูปที่ ก.3 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 1 – MPC 6 ที่ความเร็ว 1.5 เมตรต่อวินาที



รูปที่ ก.4 ตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าของ MPC 1 – MPC 6 ที่ความเร็ว 2 เมตรต่อวินาที

ภาคผนวก ข.

การเขียนชุดคำสั่งโปรแกรม MATLAB & Simulink®

TNII

การเขียนชุดคำสั่งตัวควบคุมแบบคาดการณ์ล่วงหน้าแบบเชิงเส้น

```
%%
clc;
clear all; close all
%% Waypoints extraction
scenario = Final_Test_Driving_Scenario_Model_05ms_Path;
n = size(scenario);

Vx = 0.5;
for ii =1:n(2)
    refPose(:,ii) =
[scenario(ii).ActorPoses.Position(1);scenario(ii).ActorPoses.Position(2);sc
enario(ii).ActorPoses.Yaw];
    yaw_rate_pose(ii) = scenario(ii).ActorPoses.AngularVelocity(3);
end
xRef = refPose(1,:);
yRef = refPose(2,:);
yawRef = refPose(3,:);
refPose = refPose'; % reference waypoints
%% define reference time
Ts = 12.8;% simulation time for lane change road
s = size(xRef);
tRef = (linspace(0,Ts,s(2)))'; % this time variable is used in the "2D
Visualization" block for plotting the reference points.

%% Model parameters
m = 1.659; % kg
I_z = 0.0241; % kgm^2
l_f = 0.1247; % m
l_r = 0.1323; % m
c_f = 0.169; % N/rad
c_r = 0.495; % N/rad

% assuming constant velocity
v_x = Vx; %mps

%% Dynamic bicycle model
% continous A B C D matrixes
A = [-(2*c_f+2*c_r)/m/v_x, 0, -v_x-(2*c_f*l_f-2*c_r*l_r)/m/v_x, 0;
      0, 0, 1, 0;
      -(2*c_f*l_f-2*c_r*l_r)/I_z/v_x, 0, -(2*c_f*l_f^2+2*c_r*l_r^2)/I_z/v_x,
      0;
      1, Vx, 0, 0];
B = [2*c_f/m 0 2*c_f*l_f/I_z 0]';
C = [0 0 0 1; 0 1 0 0];
D = [0;0];
%%
vehicle = ss(A,B,C,D)
```

การเขียนชุดคำสั่งการวางแผนวิถีสมการพหุนามกำลังห้า

```

%% Calculate the polynomial coefficients
Vx = V;
L = 0.35; % Lane width from center to center in meters
T0 = 0; % initial time
Tf = Tf;
x_f = V*Tf;

t = 0:Ts:Tf;

%% writing the T-Matrix

T = [1 T0 T0^2 T0^3 T0^4 T0^5;
     0 1 2*(T0) 3*(T0)^2 4*(T0)^3 5*(T0)^4;
     0 0 2 6*(T0) 12*(T0)^2 20*(T0)^3;
     1 Tf Tf^2 Tf^3 Tf^4 Tf^5;
     0 1 2*(Tf) 3*(Tf)^2 4*(Tf)^3 5*(Tf)^4;
     0 0 2 6*(Tf) 12*(Tf)^2 20*(Tf)^3];

%% Defining Qx and Qy Matrix
Q_x = [0;V;0;x_f;V;0];
Q_y = [0;0;0;L;0;0];

%% Writing the equation for the a and b matrices
a = inv(T)*Q_x;
b = inv(T)*Q_y;

%% Calculating X_ref and Y_ref values
X_ref = a(1) + a(2)*t + a(3)*t.^2 + a(4)*t.^3 + a(5)*t.^4 + a(6)*t.^5;
Y_ref = b(1) + b(2)*t + b(3)*t.^2 + b(4)*t.^3 + b(5)*t.^4 + b(6)*t.^5;

%% Calculating the velocities (longitudinal and lateral)
Vx = a(2) + 2*a(3)*t + 3*a(4)*t.^2 + 4*a(5)*t.^3 + a(6)*t.^4;
Vy = b(2) + 2*b(3)*t + 3*b(4)*t.^2 + 4*b(5)*t.^3 + b(6)*t.^4;

%% Calculating the acceleration (lateral only)
Ax = 2*a(3) + 6*a(4)*t + 12*a(5)*t.^2 + 20*a(6)*t.^3;
Ay = 2*b(3) + 6*b(4)*t + 12*b(5)*t.^2 + 20*b(6)*t.^3;
a_max = max(abs(Ay));

%% Check for lateral acceleration (constraints)
% Aim: if in a number of iterations, we are unable to find our path
% we abandon the path planning.

n = 10; % The number of iterations

for ii = 1:n
    if a_max > 2
        Tf = Tf + 1;
        x_f = V*Tf;

        T = [1 T0 T0^2 T0^3 T0^4 T0^5;
             0 1 2*(T0) 3*(T0)^2 4*(T0)^3 5*(T0)^4;
             0 0 2 6*(T0) 12*(T0)^2 20*(T0)^3;

```

```

1 Tf Tf^2 Tf^3 Tf^4 Tf^5;
0 1 2*(Tf) 3*(Tf)^2 4*(Tf)^3 5*(Tf)^4;
0 0 2 6*(Tf) 12*(Tf)^2 20*(Tf)^3];

t = 0:Ts:Tf;

Q_x = [0;V;0;x_f;V;0];
Q_y = [0;0;0;L;0;0];

a = inv(T)*Q_x;
b = inv(T)*Q_y;

X_ref = a(1) + a(2)*t + a(3)*t.^2 + a(4)*t.^3 + a(5)*t.^4 +
a(6)*t.^5;
Y_ref = b(1) + b(2)*t + b(3)*t.^2 + b(4)*t.^3 + b(5)*t.^4 +
b(6)*t.^5;

Ay = 2*b(3) + 6*b(4)*t + 12*b(5)*t.^2 + 20*b(6)*t.^3;
a_max = max(abs(Ay));

else
    break
end
end

%% Calculating the yaw angle
xRef = X_ref;
yRef = Y_ref;

for ii = 2:length(xRef) - 1
    x_forward = xRef(ii + 1);
    x_back = xRef(ii - 1);
    y_forward = yRef(ii + 1);
    y_back = yRef(ii - 1);
    yawRef(ii) = atan2(y_forward-y_back,x_forward-x_back);
end

yawRef(1)= yawRef(2);
yawRef(end)= yawRef(end-1);
yawRef(1,length(yawRef)+1)= yawRef(end);
path.XRef = X_ref;
path.YRef = Y_ref;
path.yawRef = yawRef;
path.T_lane = Tf;
path.long_accl = Ax;
path.lat_accl = Ay;
path.long_velocity = Vx;
path.lat_velocity = Vy;

```

การเขียนชุดคำสั่งแสดงผลการวางแผนวิถีสมการพหุนามกำลังห้า

```
%%
clc; close all; clear all;

% ALC init script
%% Defining velocity and time values for lane change
Vx = 2; % Velocity in mps
Tf = 12.8; % Time to complete lane change in seconds
Ts = 0.1; % Sampling time in seconds

%% Lane change path planning
path = path_fcn(Vx,Tf,Ts);
xRef = path.XRef';
yRef = path.YRef';
yawRef = path.yawRef;
VxRef = path.long_velocity;
VyRef = path.lat_velocity;
AxRef = path.long_accl;
AyRef = path.lat_accl;

%% Defining the time vectors
T_lane = path.T_lane;
tRef = 0:Ts:T_lane;
%%
xRef_max = max(xRef); % Maximum longitudinal displacement

%% Model parameters
m = 1.659; % kg
I_z = 0.0241; % kgm^2
l_f = 0.1247; % m
l_r = 0.1323; % m
c_f = 0.169; % N/rad
c_r = 0.495; % N/rad
% assuming constant velocity
v_x = Vx; %mps

%% Dynamic bicycle model
% continuous A B C D matrixes
A = [-(2*c_f+2*c_r)/m/v_x, 0, -v_x-(2*c_f*l_f-2*c_r*l_r)/m/v_x, 0;
      0, 0, 1, 0;
      -(2*c_f*l_f-2*c_r*l_r)/I_z/v_x, 0, -(2*c_f*l_f^2+2*c_r*l_r^2)/I_z/v_x, 0;
      0;
      1, Vx, 0, 0];

B = [2*c_f/m 0 2*c_f*l_f/I_z 0]';

C = [0 0 0 1; 0 1 0 0];

D = [0;0];
%%
vehicle = ss(A,B,C,D)
%% Checking for safe distance N.B: Refer to flow chart for path planning
algorithm to recall
safe_d = 0.0334; % Defined safe distance between target and host in meters
```



```
target_x = 6.5; % Position of target vehicle after our lane change is  
complete in meters  
  
if (target_x - xRef_max) > safe_d  
    run model  
    out = sim mdl;  
    disp('Lane change performed')  
else  
    disp('Lane change not available')  
end
```



ประวัติย่อผู้วิจัย



ชื่อ – สกุล

นายธนโชติ โกลาซ

วัน – เดือน – ปี เกิด

23 เมษายน 2541

ที่อยู่ปัจจุบัน

738-738/1 บ้านสุขศรีการอพาร์ทเมนต์ ถนนพัฒนาการ
แขวงสวนหลวง เขตสวนหลวง กรุงเทพมหานคร 10250

โทรศัพท์มือถือ : 085-786-6729

E-mail : thanachot.golaz@gmail.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2566

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

พ.ศ. 2564

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

TNI

THAI - NICHII INSTITUTE OF TECHNOLOGY