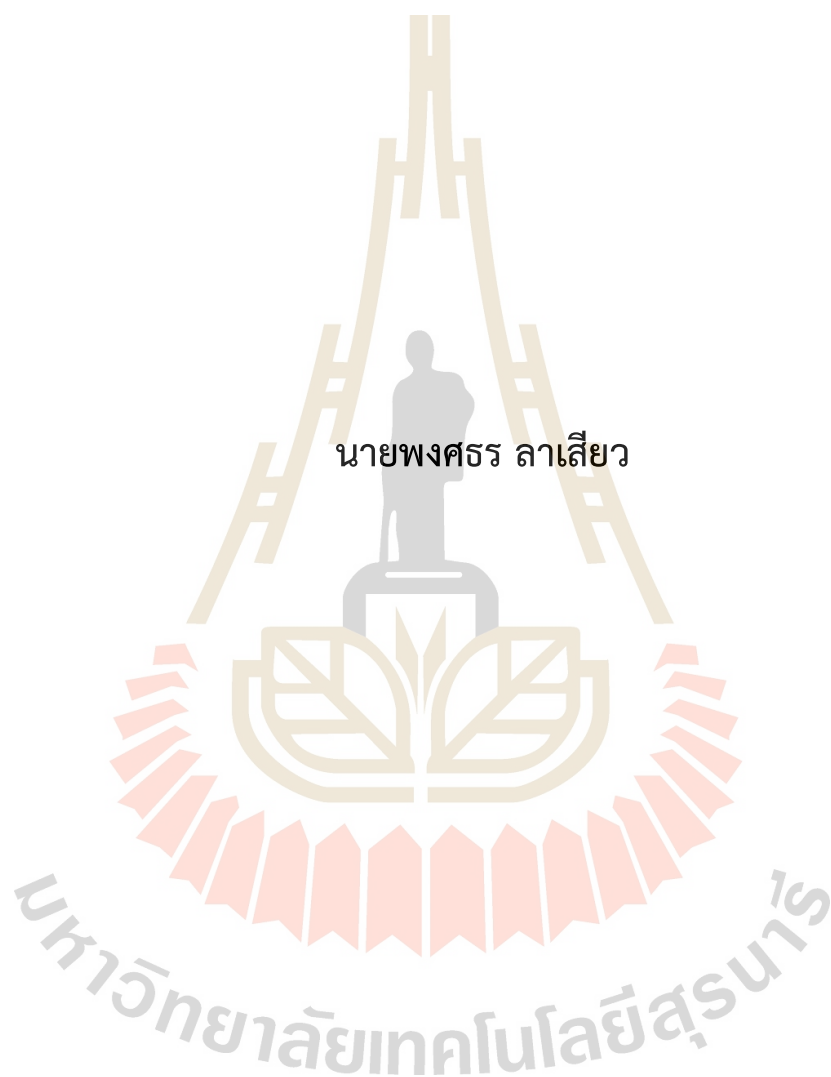
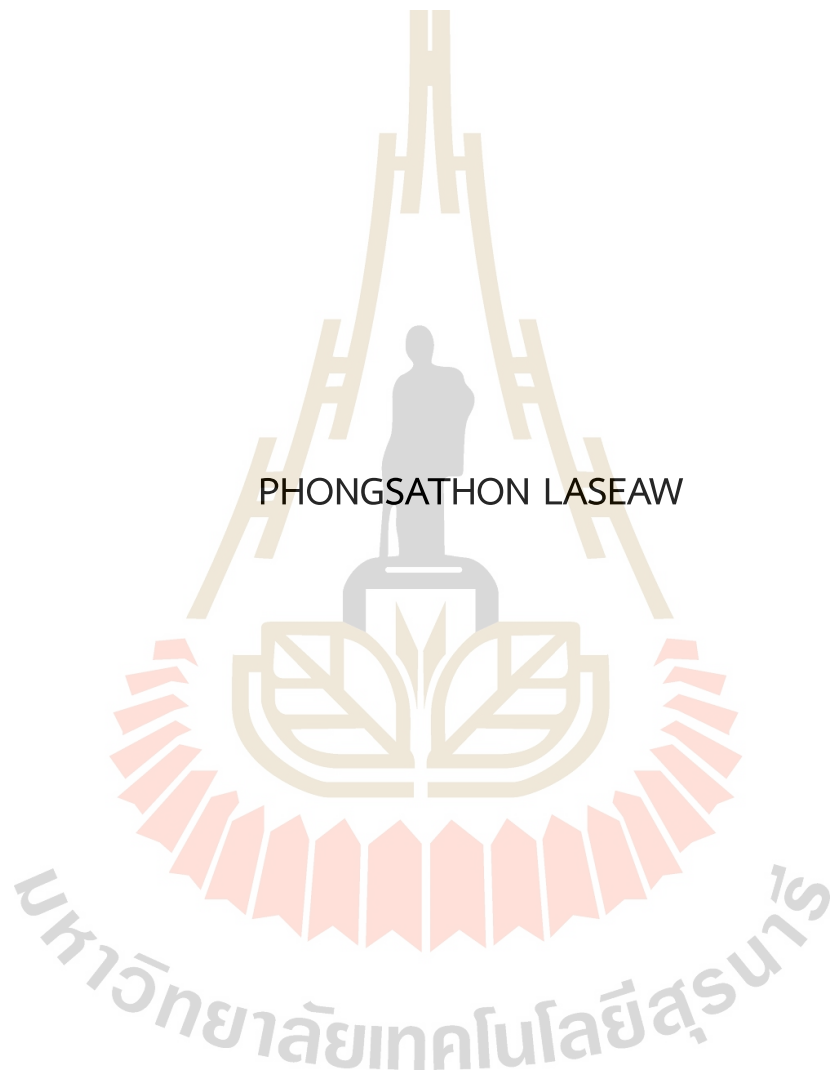


การประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2568

VEHICLE VELOCITY ESTIMATION BY USING NUMERICAL MODELS

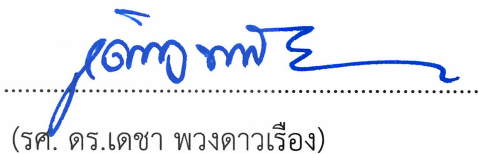


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2025

การประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข

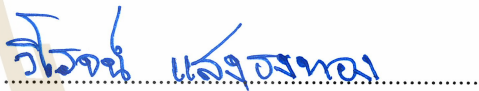
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง)

ประธานกรรมการ



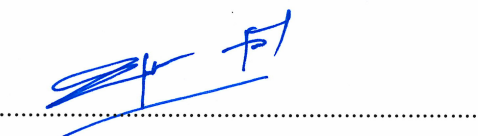
(ดร.วิโรจน์ แสงธงทอง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ศ. ดร.ก้องพันธ์ อารีรักษ์)

กรรมการ



(รศ. ดร.ยุพาพร รักสกุลพิวัฒน์)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

และประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พงศธร ลาเสียว : การประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลข
(VEHICLE VELOCITY ESTIMATION BY USING NUMERICAL MODELS)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร. วิโรจน์ แสงธทอง, 134 หน้า

คำสำคัญ : การประมาณค่าอัตราเร็ว/ แบบจำลองเชิงตัวเลข/ ยานพาหนะไฟฟ้า/ การจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในลูป/ ระบบควบคุมอัตราเร็ว

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ แบบจำลองเชิงตัวเลขดังกล่าวประกอบด้วยแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ ยานพาหนะภาคพื้นดินที่พิจารณามีแบบจำลองพลวัตไม่เชิงเส้นอันดับหนึ่งของการเคลื่อนที่ในทิศทางตามยาวในเวลาต่อเนื่อง เนื่องจากยานพาหนะมีแรงขับเคลื่อนและแรงเบรกที่เป็นปริมาณอินพุต และมีอัตราเร็วที่เป็นตัวแปรสถานะและปริมาณเอาต์พุต การสร้างตัวสังเกตสถานะที่ประมาณค่าอัตราเร็วจึงไม่สามารถใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดอัตราเร็ว เพราะตัวสังเกตสถานะต้องการอัตราเร็วที่ได้จากการวัดและใช้ปริมาณอินพุต นำมาประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ การประมาณค่าอัตราเร็วจึงเข้าซ้อนกับสัญญาณวัดอัตราเร็วและไม่มีประโยชน์ในทางวิศวกรรม เมื่อยานพาหนะมีการเคลื่อนที่และมีการหมุนของล้อยางที่ไม่มีการลื่นไถล วิธีเชิงตัวเลขที่คำนวณหาผลเฉลยหรือคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอันดับหนึ่งที่ประกอบด้วยวิธีออยเลอร์ย้อนหลัง วิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และวิธีอนุกรมเทย์เลอร์ จะเปลี่ยนรูปแบบจำลองพลวัตการเคลื่อนที่ในเวลาต่อเนื่องไปเป็นแบบจำลองเชิงตัวเลขในเวลาดิสครีตที่คำนวณหาอัตราเร็ว แบบจำลองเชิงตัวเลขใช้ปริมาณอินพุตเท่านั้นและไม่ต้องการอัตราเร็วที่ได้จากการวัด ถ้าระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะมีสัญญาณป้อนกลับที่เป็นสัญญาณวัดอัตราเร็วเกิดการขาดหายหรือเซนเซอร์วัดอัตราเร็วเกิดความล้มเหลวในการทำงาน แบบจำลองเชิงตัวเลขจะมีบทบาทและแทนที่เซนเซอร์วัดอัตราเร็ว และระบบควบคุมวงปิดได้รับสัญญาณป้อนกลับที่เป็นอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า ระบบควบคุมวงปิดยังคงควบคุมอัตราเร็วและรักษาการเคลื่อนที่ต่อไปได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อแบบจำลองเชิงตัวเลขมีค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง และยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลัง หรือยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้น อัตราเร็วคงที่ อัตราเร็วลดลง และอาจจะจอดหยุดนิ่ง เรียงตามลำดับซ้ำกันหลายรอบ

ผลการจำลองสถานการณ์และผลการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในลูป (Hardware In the Loop : HIL) ที่ใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หรือการ์ดคอนโทรล (control card) F28335 (TMDSCNCD28335 R2.2) จะแสดงถึงสมรรถนะสูงของการ

ประมาณค่าอัตราเร็วที่ติดตามผลตอบสนองอัตราเร็ว และยืนยันโอกาสและความเป็นไปได้ในการใช้งานแบบจำลองเชิงตัวเลขแทนที่เซนเซอร์วัดอัตราเร็วทางกายภาพ



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2568

ลายมือชื่อนักศึกษา.....พงศ์จร

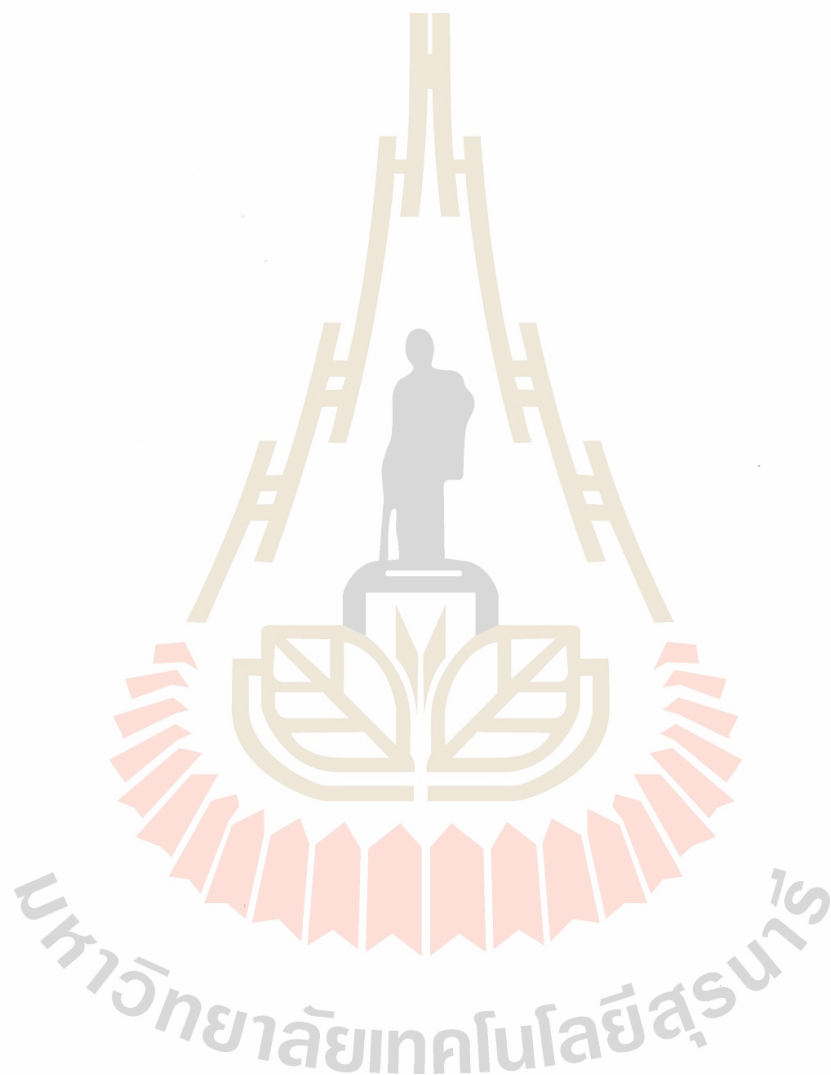
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....วิรัตน์ แสงทอง

PHONGSATHON LASEAW: VEHICLE VELOCITY ESTIMATION BY USING NUMERICAL MODELS. THESIS ADVISOR: WIROTE SANGTUNGTONG Ph.D, 134 PP

Keyword: Velocity estimation/ Numerical model/ Electric vehicle/ Hardware-in-loop simulation/ Velocity control system

This thesis describes a few of the numerical models which estimate the velocity of vehicle motion. Such numerical models enumerate the backward Euler model, the trapezoidal rule model, and the Taylor expansion model. The pondered ground vehicle characterizes a first-order nonlinear dynamic model of longitudinal motion in continuous time. The vehicle holds propulsion and braking forces as its one input-quantity and retains velocity as its one state-variable and output-quantity. Thus, the construction of a state observer that estimates the velocity is unable to replace the velocity sensor. Because the state observer needs the monitored velocity and employs the input quantity to estimate the vehicle velocity, the velocity estimation becomes redundant with the velocity signal and goes useless in view of engineering. When the vehicle travels and its wheels rotate without slip between tires and road surface, some numerical methods which determine the solution of the first-order ordinary differential equations, listing the backward Euler method, the trapezoidal rule method, and the Taylor expansion method, all convert the continuous-time dynamic model of motion into relevant numerical models in discrete-time that iteratively compute the velocity. These numerical models use only the input quantity and do not require the measured velocity. Whenever the closed-loop cruise control system of vehicle loses its velocity-feedback signal or the velocity sensor fails, the above numerical models play a role in availability and give the substitution of the velocity-sensor, and then the closed-loop control system receives the estimated velocity as its feedback signal, and therefore the control system still handles precisely the velocity and further maintains motion. When the numerical models are associated with their correct parameters and either the vehicle moves forward and reverses, or even the electric vehicle maneuvers repetitively under acceleration, constant velocity, as well as deceleration that may bring to a standstill respectively, the computer simulation and hardware-in-loop

simulation results yield the high performance of the velocity estimation tracking velocity response and confirm the opportunity and feasibility of the replacement of the physical velocity sensor by the proposed numerical models.



School of Electrical Engineering
Academic Year 2025

Student's Signature.....พยศธร
Advisor's Signature.....วิชัย แก้วทอง

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถและความช่วยเหลือจากหลายท่าน ซึ่งผู้วิจัยสำนึกในพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ก่อนอื่น ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณอย่างจริงใจต่อ ดร.วิโรจน์ แสงธทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด แนะนำแนวทางการทำวิจัยอย่างมีระบบ และสนับสนุนทั้งด้านวิชาการและแนวคิดตลอดระยะเวลาการทำงานครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ นายศุภกฤต ศิริสุกล สำหรับคำแนะนำที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และการประยุกต์ใช้เทคนิคฮาร์ดแวร์ในรูป ซึ่งมีส่วนช่วยให้การจำลองสถานการณ์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณต่อคุณครูและอาจารย์ทุกท่านที่เคยถ่ายทอดความรู้และจุดประกายความคิด ทั้งในอดีตและปัจจุบัน อันเป็นรากฐานสำคัญของความเข้าใจและการพัฒนาตนเองในเส้นทางวิชาการ ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอกล่าวคำขอบพระคุณอย่างสุดซึ้งต่อบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวทุกคน ที่เป็นแรงสนับสนุนที่มั่นคงทั้งด้านจิตใจ การศึกษา และการดำเนินชีวิตมาโดยตลอด ความรัก ความเข้าใจ และการดูแลเอาใจใส่ของท่านคือพลังสำคัญที่ทำให้ผู้วิจัยสามารถก้าวมาถึงจุดนี้ได้อย่างภาคภูมิใจ

พงศธร ลาเสียว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	4
1.3 สมมุติฐานการวิจัย	4
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	5
1.5 ขอบเขตการวิจัย	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.2 สรุป	16
3 ความรู้พื้นฐานที่ใช้ดำเนินงานวิจัย	18
3.1 กล่าวนำ	18
3.2 แบบจำลองพลวัตเชิงกลของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ	18
3.3 แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ดีซีแม่เหล็กถาวร	20
3.4 วงจรแฮบริดจ์และฟีดแบ็คเบิลยูเอ็ม	21
3.5 ตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีต	24
3.6 วิธีออยเลอร์ย้อนหลัง	27
3.7 วิธีกนูสี่เหลี่ยมคางหมู	28
3.8 วิธีอนุกรมเทย์เลอร์	28

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.9 สรุป	29
4 แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ	30
4.1 กล่าวนำ	30
4.2 แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง	30
4.3 แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู	34
4.4 แบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์	36
4.5 สรุป	39
5 การจำลองสถานการณ์แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ	40
5.1 กล่าวนำ	40
5.2 แนวทางในการจำลองสถานการณ์การประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ	40
5.3 ผลการจำลองสถานการณ์แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ประมาณค่าอัตราเร็วของ ยานพาหนะ	43
5.4 ผลการจำลองสถานการณ์แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ประมาณค่าอัตราเร็วของ ยานพาหนะไฟฟ้า	48
5.5 สรุป	71
6 การจำลองสถานการณ์แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป	73
6.1 กล่าวนำ	73
6.2 การดำเนินการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป	74
6.3 ผลการจำลองสถานการณ์แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป	76
6.4 สรุป	85
7 สรุปและข้อเสนอแนะ	86
7.1 สรุป	86
7.2 ข้อเสนอแนะ	88
รายการอ้างอิง	91
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การพัฒนาตัวประมาณค่าแบบปรับตัวที่ใช้ประมาณ ค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะ	94
ภาคผนวก ข รหัสเทียมของแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ	117

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่	
ในระหว่างการศึกษา	124
ประวัติผู้เขียน	134



สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
5.1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเชิงตัวเลขในการจำลองสถานการณ์	50
5.2 ค่าพารามิเตอร์และค่าเกณฑ์ในการจำลองสถานการณ์	51
6.1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเชิงตัวเลขในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป	78
6.2 ค่าพารามิเตอร์และค่าเกณฑ์ในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป	80
ก.1 ค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะไฟฟ้าและค่าเกณฑ์ของตัวประมาณค่าแบบปรับตัว	110
ก.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่าเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะ	113

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 วงจรเฮชบริดจ์ที่ใช้ควบคุมมอเตอร์ดีซี	22
3.2 พัดดับเบิลยูเอ็มที่เกิดจากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณพาหะ	23
4.1 ผลตอบสนองอัตราเร็วและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังที่ เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาคำตอบที่มีเครื่องหมายลบบ่อยู่ข้างหน้ารากที่สอง	32
4.2 แผนภาพกรอบของแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง	33
4.3 แผนภาพกรอบของแบบจำลองกลูสส์เหลี่ยมคางหมู	36
4.4 แผนภาพกรอบของแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์	39
5.1 แผนภาพกรอบของตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีต	42
5.2 แผนภาพกรอบของแบบจำลองของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่อง	42
5.3 แผนภาพกรอบของระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดที่มีการประมาณค่าอัตราเร็วในกรณีทีหนึ่ง	43
5.4 แผนภาพกรอบของการใช้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าเป็นสัญญาณป้อนกลับ ในกรณีที่สอง	43
5.5 ผลตอบสนองอัตราเร็วและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าที่เกิดจากตัวควบคุมพีไอ และแบบจำลองเชิงตัวเลขที่นำเสนอมีขนาดขั้น 0.001 วินาทีเท่ากัน	46
5.6 ผลตอบสนองอัตราเร็วและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าที่เกิดจากตัวควบคุมพีไอ มีขนาดขั้น 0.01 วินาทีและแบบจำลองเชิงตัวเลขมีขนาดขั้น 0.2 วินาที	46
5.7 อินทิเกรตค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาดการประมาณค่าอัตราเร็วเทียบกับเวลา	47
5.8 ผลตอบสนองอัตราเร็วและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าที่เกิดจากการขาดหาย ของสัญญาณวัดอัตราเร็วและการใช้งานแบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีขนาดขั้น 0.001 วินาที แทนที่การวัด	47
5.9 ผลตอบสนองอัตราเร็วและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าที่เกิดจากการขาดหาย ของสัญญาณวัดอัตราเร็วและการใช้งานแบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีขนาดขั้น 0.1 วินาที แทนที่การวัด	48
5.10 กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่เกิดจากบล็อกวงจรเฮชบริดจ์ที่มีโหมดพัดดับเบิลยูเอ็มจากมอเตอร์ดีซี แม่เหล็กถาวรที่ใช้โหมด PWM	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.11 กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่เกิดจากบล็อกลงจรเซชบริดจ์ที่มีโหมดเฉลี่ยสัญญาณ มอเตอร์ดีซี แม่เหล็กถาวรที่ใช้โหมด Average 54	54
5.12 อัตราเร็วอ้างอิงและอัตราเร็วของยานพาหนะที่เกิดจากบล็อกลงจรเซชบริดจ์ที่มีโหมด พีดับเบิลยูเอ็มที่ใช้โหมด PWM 54	54
5.13 อัตราเร็วอ้างอิงและอัตราเร็วของยานพาหนะที่เกิดจากบล็อกลงจรเซชบริดจ์ที่มีโหมดเฉลี่ย สัญญาณที่ใช้โหมด Average 55	55
5.14 อัตราเร็วอ้างอิงและผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าที่เกิดจากการเคลื่อนที่ ไปข้างหน้าการจอดหยุดนิ่ง และการเคลื่อนที่ถอยหลัง 56	56
5.15 แผนภาพกรอบของระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าที่มีการประมาณค่า อัตราเร็วในกรณีทีหนึ่ง 57	57
5.16 ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าและแบบจำลองเชิงตัวเลข 58	58
5.17 แผนภาพกรอบของระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าที่และการใช้อัตราเร็วที่ได้ จากการประมาณค่าเป็นสัญญาณป้อนกลับในกรณีที่สอง 59	59
5.18 ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าที่มีแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง 60	60
5.19 ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าที่มีแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู 61	61
5.20 ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าที่มีแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ 62	62
5.21 ผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า 63	63
5.22 อัตราเร็วอ้างอิงและผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าที่เกิดจากการขาดหาย ของสัญญาณวัดอัตราเร็วและการใช้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองออยเลอร์ ย้อนหลังแทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว 65	65
5.23 ผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า ของแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง 65	65
5.24 อัตราเร็วอ้างอิงและผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าที่เกิดจากการขาดหาย ของสัญญาณวัดอัตราเร็วและการใช้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า ของแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมูแทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว 66	66
5.25 ผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า ของแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู 66	66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.26 อัตราเร็วอ้างอิงและผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าที่เกิดจากการขาดหายของสัญญาณวัดอัตราเร็วและการใช้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์แทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว	67
5.27 ผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์	67
5.28 แรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอเมื่อสัญญาณป้อนกลับเกิดการขาดหายในช่วงระยะเวลา 800 วินาที.....	71
5.29 อัตราเร็วอ้างอิงและอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าเมื่อสัญญาณป้อนกลับเกิดการขาดหายในช่วงระยะเวลา 800 วินาที	71
6.1 แนวคิดของการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูปในการประเมินสมรรถนะของแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ	75
6.2 ลำดับของการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูปในแต่ละการวนซ้ำ	76
6.3 ระบบควบคุมอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าที่มีแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป	79
6.4 อัตราเร็วอ้างอิงและผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าที่เกิดจากการขาดหายของสัญญาณวัดอัตราเร็วและการใช้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังแทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็วในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป	82
6.5 ผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป	82
6.6 อัตราเร็วอ้างอิงและผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าที่เกิดจากการขาดหายของสัญญาณวัดอัตราเร็วและการใช้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมูแทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็วในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป	83
6.7 ผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมูในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป	83
6.8 อัตราเร็วอ้างอิงและผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าที่เกิดจากการขาดหายของสัญญาณวัดอัตราเร็วและการใช้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์แทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็วในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

6.9 ผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของ แบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป	84
ก.1 บล็อกซิมมูลิงค์ทั้งหมดที่ใช้จำลองสถานการณ์ยานพาหนะไฟฟ้า และตัวประมาณค่าแบบปรับตัว	106
ก.2 บล็อกซิมมูลิงค์ของตัวประมาณค่าแบบปรับตัว	107
ก.3 บล็อกซิมมูลิงค์ของกฎการปรับตัว	108
ก.4 บล็อกซิมมูลิงค์ที่ใช้คำนวณค่าเกณฑ์เปลี่ยนแปลงตามเวลาของตัวประมาณค่าแบบปรับตัว	109
ก.5 การประมาณค่าพารามิเตอร์ a^+	113
ก.6 การประมาณค่าพารามิเตอร์ a^-	114
ก.7 การประมาณค่าพารามิเตอร์ b^+	114
ก.8 การประมาณค่าพารามิเตอร์ b^-	115
ก.9 การประมาณค่าพารามิเตอร์ d^+	115
ก.10 การประมาณค่าพารามิเตอร์ d^-	116
ก.11 การประมาณค่าพารามิเตอร์ h	116

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

อัตราเร็ว (velocity หรือ speed) (Wikipedia contributors. "Speed.", 2025.) (Wikipedia contributors. "Velocity.", 2025.) หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของวัตถุหรือยานพาหนะต่อหนึ่งหน่วยเวลา อัตราเร็วเป็นปริมาณสเกลาร์ และมีหน่วยเมตรต่อวินาที หรือ กิโลเมตรต่อชั่วโมง อัตราเร็วขณะหนึ่ง (instantaneous speed) หมายถึงอัตราเร็วคงที่ในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก ๆ เมื่อผู้ขับขี่ยานพาหนะมองไปที่มาตรวัดอัตราเร็ว (speedometer) ที่อยู่ด้านหน้า ผู้ขับขี่จะทราบอัตราเร็วในขณะหนึ่งในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ถ้ามาตรวัดอัตราเร็วแสดงค่าที่อ่านได้ (reading) 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หมายความว่ายานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงในขณะนั้น ในเหตุการณ์ปกติหรือในสภาวะปกติ อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเกือบเท่ากับอัตราเร็วในการเคลื่อนที่แบบวงกลมของผิวล้ออย่างสัมผัสกับผิวถนน (แทบไม่มีการลื่นของล้อ หรือ ไม่มี wheel slip) อัตราเร็วในการเคลื่อนที่แบบวงกลมของผิวล้ออย่างสัมผัสกับผิวถนนเท่ากับ อัตราเร็วเชิงมุมในการหมุนของล้อคูณด้วยรัศมีของล้อ มาตรวัดอัตราเร็วจะแสดงค่าที่อ่านได้ของอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะตลอดเวลา และมาตรวัดอัตราเร็วในสภาพปกติจะแสดงค่าที่อ่านได้ถูกต้อง หรือ ค่อนข้างถูกต้อง แต่ถ้าสัญญาณวัดอัตราเร็วขาดหายไป มาตรวัดอัตราเร็วจะไม่ได้รับสัญญาณวัดอัตราเร็วและแสดงค่าที่อ่านได้ที่มีความผิดพลาด และผู้ขับขี่ยานพาหนะจะเข้าใจผิด และอาจจะตัดสินใจผิดพลาดในการขับขี่ยานพาหนะ การนำอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่ามาใช้แทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็วที่ขาดหายไปเป็นงานที่มีประโยชน์ เพราะถ้าสัญญาณวัดอัตราเร็วขาดหายไป มาตรวัดอัตราเร็วยังคงได้รับข้อมูลอัตราเร็ว และผู้ขับขี่ยานพาหนะจะรับทราบค่าที่อ่านได้ของอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเกือบตลอดเวลา และมีการตัดสินใจที่ถูกต้อง

อัตราเร็วของยานพาหนะ (vehicle velocity) (Wikipedia contributors. "Speedometer.", 2025.) คือค่าที่อ่านได้จากมาตรวัดอัตราเร็วที่ทำหน้าที่วัดอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ มาตรวัดอัตราเร็วแบบอะนาล็อก (analogue speedometer) มีเข็มชี้และมาตราส่วนบนหน้าปัดที่ใช้แสดงค่าที่อ่านได้ มาตรวัดอัตราเร็วแบบดิจิทัล (digital speedometer) มีจอแสดงผลตัวเลขและหน่วยของค่าที่อ่านได้ เช่น เซอร์ที่นับจำนวนรอบการหมุนและเชื่อมติดกับการ

ส่งผ่านกำลัง จะส่งสัญญาณวัดอัตราเร็วที่อยู่ในรูปของขบวนสัญญาณพัลส์ถึงมาตรวัดอัตราเร็ว ขบวนสัญญาณพัลส์มีความถี่เท่ากับอัตราเร็วที่อยู่ในรูปของขบวนสัญญาณพัลส์ถึงมาตรวัดอัตราเร็ว ขบวนสัญญาณพัลส์มีความถี่เท่ากับอัตราเร็วรอบในการหมุนของเพลาขับเคลื่อนล้อ อัตราเร็วรอบดังกล่าวเป็นส่วนโดยตรงกับอัตราเร็วของยานพาหนะ เซนเซอร์ประกอบด้วยแม่เหล็กหนึ่งชิ้นหรือมากกว่าหนึ่งชิ้นที่เชื่อมติดกับเพลาขับเคลื่อนล้อ (output shaft) หรือเพลาเฟืองท้าย (differential crown wheel) และเซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็ก (magnetic field sensor) ที่ยึดติดอยู่กับที่ เมื่อเพลาหมุน แม่เหล็กจะหมุนตาม ในแต่ละครั้งที่แม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าใกล้เซนเซอร์ บริเวณโดยรอบเซนเซอร์จะมีปริมาณฟลักซ์แม่เหล็กเพิ่มขึ้นมากกว่าค่าหนึ่ง เซนเซอร์จะตรวจจับฟลักซ์แม่เหล็กที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นและสร้างสัญญาณพัลส์หนึ่งลูก ถ้าแม่เหล็กไม่เชื่อมติดกับเพลาแต่ยึดติดอยู่กับที่ แม่เหล็กจะมีตำแหน่งตรงข้ามกับเซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็ก ซีพินของจานโลหะมีตำแหน่งอยู่ระหว่างแม่เหล็กและเซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็ก และจานโลหะเชื่อมติดกับเพลา เมื่อเพลาหมุน จานโลหะหมุนและซีพินและร่องระหว่างซีพินเคลื่อนที่ ซีพินปิดกั้นและร่องปล่อยฟลักซ์แม่เหล็กถึงเซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็กสลับกัน เซนเซอร์จะสร้างขบวนสัญญาณพัลส์ที่มีความถี่สัมพันธ์กับอัตราเร็วรอบในการหมุนของเพลา ในปัจจุบัน มาตรวัดอัตราเร็วมีไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่นับจำนวนสัญญาณพัลส์ในช่วงระยะเวลาที่แน่นอนช่วงหนึ่งตลอดเวลา และใช้สูตรคำนวณค่าที่อ่านได้อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ มาตรวัดอัตราเร็วแบบดิจิทัลได้รับและแสดงตัวเลขและหน่วยของค่าที่อ่านได้ แต่มาตรวัดอัตราเร็วแบบอะนาล็อกชนิดอิเล็กทรอนิกส์จะแปลงอัตราเร็วที่ได้จากการคำนวณไปเป็นระยะทางเชิงมุมที่เข็มชี้หมุนได้ ขีดมาตราส่วนที่ตรงกับการหยุดหมุนของเข็มชี้คือค่าที่อ่านได้อัตราเร็ว ถ้าเข็มชี้หยุดหมุนในตำแหน่งระหว่างขีดมาตราส่วนสองขีด การประมาณค่าจากขีดมาตราส่วนสองขีดนี้คือค่าที่อ่านได้อัตราเร็ว เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ถอยหลัง มาตรวัดอัตราเร็วจะแสดงค่าที่อ่านได้ของอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ถอยหลัง

สัญญาณวัดอัตราเร็วคือข้อมูลที่สำคัญในระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่ประกอบด้วย ระบบเบรกที่ป้องกันการล็อกล้อ (anti-lock braking system: ABS) (Wikipedia contributors. "Anti-lock braking system.", 2025) และระบบควบคุมอัตราเร็ว (cruise control system) (Wikipedia contributors. "Cruise control.", 2025) การคำนวณอัตราเร็วเฉลี่ยในการเดินทาง และการนับหรือการคำนวณระยะทางสะสมของการเดินทางในมาตรวัดระยะทาง (odometer) (Wikipedia contributors. "Odometer.", 2025) ผู้ขับขี่ต้องการทราบอัตราเร็วของยานพาหนะ เพราะผู้ขับขี่จะต้องควบคุมและรักษาอัตราเร็วของยานพาหนะที่ไม่เกินอัตราเร็วในกฎหมายหรือกฎจราจรที่กำหนดไว้ การเดินทางจึงมีความปลอดภัยเพิ่มขึ้น สัญญาณวัดอัตราเร็วจึงมีประโยชน์ในการเฝ้าติดตามข้อมูลอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะและเป็นสัญญาณป้อนกลับ (feedback signal) ในระบบควบคุมอัตราเร็ว

ระบบควบคุมวงปิด (closed-loop control system) (K. Ogata, 2010) คือระบบที่มีการป้อนกลับของสัญญาณวัด มีการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอ้างอิง (reference) และสัญญาณวัด มีตัวควบคุม (controller) หรือตัวชดเชย (compensator) ที่ได้รับความผิดพลาด (error) หรือความแตกต่างระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณวัดดังกล่าว และมีกระบวนการ (process) หรือพลานต์ (plant) ที่ได้รับสัญญาณควบคุม (control signal) และผลิตผลตอบสนอง (response) และสัญญาณวัดที่เหมือนกับหรือใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิง กระบวนการมีเซนเซอร์ (sensor) ที่สัมผัสหรือวัดปริมาณทางกายภาพที่ต้องการควบคุมหรือผลตอบสนองและให้สัญญาณวัดที่สัมพันธ์กับผลตอบสนอง สัญญาณวัดคือสัญญาณป้อนกลับ สัญญาณอ้างอิงคือสัญญาณวัดที่ต้องการและสัมพันธ์กับขนาดที่ต้องการของปริมาณทางกายภาพที่มีชนิดเดียวกับผลตอบสนอง ตัวควบคุมหรือตัวชดเชยมีฟังก์ชันการคำนวณหรืออัลกอริทึมที่นำความผิดพลาดมาประมวลผลหรือดำเนินการทางคณิตศาสตร์และสร้างสัญญาณควบคุม กระบวนการมีตัวขับเคลื่อน (actuator) ที่ได้รับสัญญาณควบคุมและผลิตปริมาณทางกายภาพที่เปลี่ยนแปลงผลตอบสนอง ระบบควบคุมวงปิดต้องมีเสถียรภาพ (stability) และการทำงานของระบบควบคุมวงปิดต้องการสัญญาณวัดตลอดเวลา (K. Ogata, 2010) ระบบควบคุมวงปิดมีประโยชน์ในกระบวนการผลิตภาคอุตสาหกรรม และการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ เพราะถ้าตัวควบคุมมีค่าเกณฑ์ถูกต้องและเหมาะสม และเซนเซอร์และตัวขับเคลื่อนมีพฤติกรรมในการทำงานปกติ ระบบควบคุมวงปิดจะให้ผลตอบสนองและสัญญาณวัดที่มีสมรรถนะที่ดีในการติดตามสัญญาณอ้างอิง ในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว และลดความผิดพลาดของผลตอบสนองที่เกิดจากการรบกวน (disturbance) ภายในและภายนอก

ปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ระบบควบคุมวงปิดมีการทำงานปกติและมีพฤติกรรมที่สอดคล้องกับการออกแบบ คือสัญญาณป้อนกลับหรือสัญญาณวัดที่ไม่ขาดหายและมีความถูกต้อง เพราะถ้าสัญญาณวัดเกิดการขาดหาย ระบบควบคุมวงปิดอาจจะเปลี่ยนเป็นระบบควบคุมวงเปิดที่ไม่สามารถควบคุมผลตอบสนองได้ และระบบอาจจะเกิดความเสียหายทางกายภาพ เมื่อพิจารณาการควบคุมอัตราเร็วของยานพาหนะ ถ้าสัญญาณวัดอัตราเร็วเกิดการขาดหายหรือการวัดอัตราเร็วเกิดความล้มเหลว ระบบควบคุมอัตราเร็วจะไม่มีสัญญาณป้อนกลับและไม่สามารถบังคับและควบคุมอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ได้ และยานพาหนะเกิดอุบัติเหตุ มาตราวัดอัตราเร็วจะแสดงค่าที่อ่านได้ที่มีความผิดพลาด ผู้ขับขี่มีความเข้าใจผิด และการขับขี่มีความปลอดภัยน้อยลง เพราะยานพาหนะอาจจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วมากกว่าอัตราเร็วในกฎหมายหรือกฎจราจรที่กำหนดไว้ และระบบเบรกที่ป้องกันการลื่นไถลมีการทำงานที่ผิดปกติ การลดอัตราเร็วและการหยุดการเคลื่อนที่ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในช่วงระยะเวลานั้น ยานพาหนะจึงเกิดอุบัติเหตุได้เช่นเดียวกัน เพราะระบบเบรกที่ป้องกันการลื่นไถลมีการเปรียบเทียบระหว่างอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะและอัตราเร็วในการหมุนของล้อ เมื่อระบบเบรกทำงาน การเปรียบเทียบดังกล่าวจะลดหรือเพิ่มแรงที่ห้ามการหมุนของล้อ ในขณะที่มีการ

เบรกทันทีหรือการเบรกกะทันหัน ล้อที่หมุนเร็วขึ้นหรือช้าลงจะป้องกันการลื่นหรือป้องกันการหยุดหมุนของล้อและรักษาการยึดเกาะผิวสัมผัสระหว่างล้อยางและถนน ผู้ขับขี่จึงไม่สูญเสียการควบคุมยานพาหนะที่เคลื่อนที่บนถนนผิวแห้งหรือถนนผิวลื่นบางส่วน ยานพาหนะจึงมีระยะทางลดลงในการหยุดการเคลื่อนที่

การขาดหายของสัญญาณวัดอัตราเร็วมีสาเหตุที่เกิดจากการเสื่อมสภาพของเซนเซอร์ การชนหรือการกระแทก การสะสมของสิ่งสกปรก และการติดตั้งเซนเซอร์ที่ไม่ถูกต้อง

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1) ศึกษาและสร้างแผนการประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ แผนการดังกล่าวไม่ต้องการสัญญาณวัดอัตราเร็วที่ใช้เป็นข้อมูลในการประมาณค่าอัตราเร็ว และแผนการนี้ประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังได้ ถ้าสัญญาณวัดอัตราเร็วเกิดการขาดหาย อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าจะนำมาใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับแทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว

2) จำลองสถานการณ์ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะและแผนการประมาณค่าอัตราเร็ว ตรวจสอบสมรรถนะในการประมาณค่าอัตราเร็ว และเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองของระบบควบคุมวงปิดและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า

3) จำลองสถานการณ์ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะไฟฟ้าและแผนการประมาณค่าอัตราเร็ว ระบบควบคุมวงปิดมีสัญญาณป้อนกลับคือสัญญาณวัดอัตราเร็วปกติ สัญญาณวัดอัตราเร็วที่ขาดหาย (ไม่มีการป้อนกลับ) และอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า ตามลำดับ

1.3 สมมุติฐานการวิจัย

1) ยานพาหนะคือวัตถุแข็ง (rigid body) ที่มีการเคลื่อนที่ภายใต้กฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 1 และข้อที่ 2 ของนิวตัน

2) การส่งผ่านกำลังขับเคลื่อนจากเพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์ ผ่านเฟืองทดรอบเฟืองท้าย และเพลลา ถึงล้อ มีประสิทธิภาพเชิงกล 100 เปอร์เซ็นต์

3) ยานพาหนะมีสัมประสิทธิ์การแปลงโมเมนต์ความเฉื่อยหมุนไปเป็นมวลเคลื่อนที่เท่ากับหนึ่ง

4) ยานพาหนะมีล้อยางที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1) ยานพาหนะมีการเคลื่อนที่เชิงเส้นตรงหรือทางตรงในหนึ่งมิติบนถนนผิวเรียบ แห้ง และ แข็ง ในแนวราบ
- 2) ยานพาหนะมีการหมุนของล้อที่ไม่มี การลื่นไถล (no wheel slip) หรือยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่เท่ากับผลคูณระหว่างรัศมีของล้อและอัตราเร็วเชิงมุมในการหมุนของล้อ ดังนั้นแรงกิริยา คือแรงดึง (tractive force) หรือแรงขับเคลื่อน (propulsion) หรือแรงผลักดัน ที่เกิดจากแรงบิดหรือทอร์กขับเคลื่อน ไม่มากกว่าแรงเสียดทานมากที่สุดระหว่างดอกยางและพื้นผิวถนน แรงเสียดทานดังกล่าวคือแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายใต้กฎการเคลื่อนที่ข้อ 3 ของนิวตัน
- 3) แรงต้านการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเท่ากับผลบวกระหว่างแรงเสียดทานหนืดหรือการหน่วงหนืด (viscous friction) แรงต้านจากอากาศ (aerodynamic drag) และแรงต้านการหมุนของล้อ (rolling resistance)
- 4) ยานพาหนะมีอัตราส่วนเฟืองทดรอบ (gear ratio) และอัตราส่วนการส่งผ่านกำลัง (transmission ratio) เท่ากับหนึ่ง
- 5) แผนการประมาณค่าอัตราเร็วมีค่าพารามิเตอร์เท่ากับค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ยานพาหนะที่พิจารณามีแบบจำลองพลวัตไม่เชิงเส้นในเวลาต่อเนื่อง มีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่เป็นตัวแปรสถานะ และมีค่าพารามิเตอร์คงที่
- 2) ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดที่ใช้งานมีตัวควบคุมพีไอที่ทำหน้าที่บังคับหรือคุมค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ
- 3) ยานพาหนะที่พิจารณาคือยานพาหนะไฟฟ้าที่มีมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อนทำหน้าที่สร้างแรงบิดหรือทอร์กขับเคลื่อนล้อให้เกิดการหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุมเพิ่มขึ้น และสร้างทอร์กที่ใช้ในการเบรกล้อให้หมุนช้าลงหรือการเบรกแบบคืนพลังงาน (regenerative braking)
- 4) ยานพาหนะที่พิจารณาคือยานพาหนะภาคพื้นดินที่เคลื่อนที่ในทางตรงและเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังได้
- 5) แผนการประมาณค่าอัตราเร็วแบบออนไลน์ที่นำเสนอประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังได้
- 6) แผนการประมาณค่าอัตราเร็วแบบออนไลน์ที่นำเสนอมีจุดประสงค์ใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดอัตราเร็วชั่วคราวหรือในช่วงระยะเวลาที่ไม่แน่นอนเท่านั้น
- 7) แผนการประมาณค่าอัตราเร็วแบบออนไลน์ที่นำเสนอมีโครงสร้างการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนมากเกินไป

8) การจำลองสถานการณ์จะนำมาใช้ตรวจสอบสมรรถนะในการประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของแผนการประมาณค่าอัตราเร็วแบบออนไลน์ที่นำเสนอ

9) การดำเนินการจำลองสถานการณ์แบ่งออกเป็น การจำลองสถานการณ์ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องคอมพิวเตอร์เท่านั้น (computer simulation) และการจำลองสถานการณ์ฮาร์ดแวร์ในลูป (hardware-in-the-loop simulation)

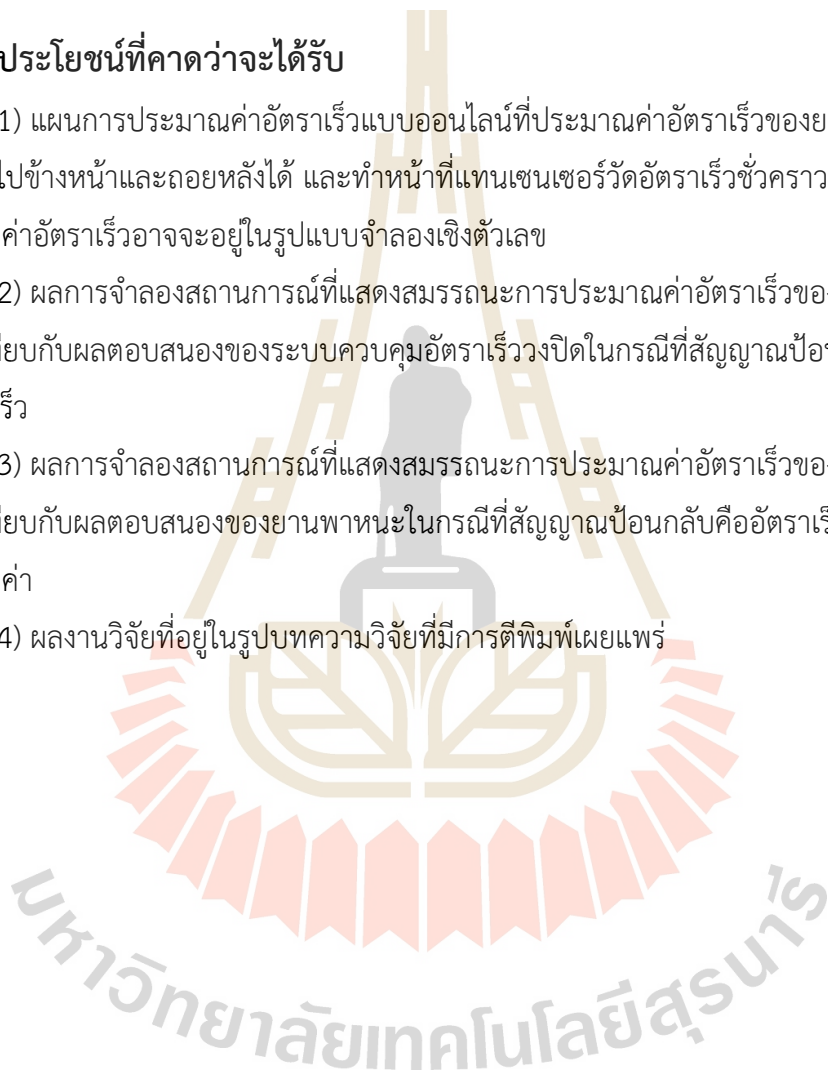
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) แผนการประมาณค่าอัตราเร็วแบบออนไลน์ที่ประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังได้ และทำหน้าที่แทนเซนเซอร์วัดอัตราเร็วชั่วคราว แผนการประมาณค่าอัตราเร็วอาจจะอยู่ในรูปแบบจำลองเชิงตัวเลข

2) ผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงสมรรถนะการประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะที่เปรียบเทียบกับผลตอบสนองของระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดในกรณีที่สัญญาณป้อนกลับคือสัญญาณวัดอัตราเร็ว

3) ผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงสมรรถนะการประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะที่เปรียบเทียบกับผลตอบสนองของยานพาหนะในกรณีที่สัญญาณป้อนกลับคืออัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า

4) ผลงานวิจัยที่อยู่ในรูปบทความวิจัยที่มีการตีพิมพ์เผยแพร่



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีเชิงตัวเลขที่ประกอบด้วยวิธีออยเลอร์ย้อนหลัง (backward Euler method) วิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal rule method) และวิธีอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor expansion method) นำมาใช้สร้างแผนการประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะในรูปของแบบจำลองเชิงตัวเลข เมื่อมาตรวจวัดอัตราเร็วในยานพาหนะเกิดความล้มเหลวหรือสัญญาณวัดอัตราเร็วเกิดการขาดหาย และแบบจำลองเชิงตัวเลขดังกล่าวประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดจะไม่ได้รับสัญญาณป้อนกลับที่เป็นสัญญาณวัดอัตราเร็ว แต่จะได้รับอัตราเร็วที่ได้จากประมาณค่าที่เป็นสัญญาณป้อนกลับ ระบบควบคุมวงปิดยังคงรักษาการทำงานและควบคุมอัตราเร็วของยานพาหนะได้อย่างถูกต้อง หรือผู้ขับขี่ยังคงได้รับข้อมูลอัตราเร็วได้อย่างต่อเนื่อง และบังคับการเคลื่อนที่ของยานพาหนะต่อไปได้ หัวข้อนี้มีเนื้อหางานวิจัยจากอดีตจนถึงปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์ใช้วิธีเชิงตัวเลขหาผลเฉลยหรือคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์การเคลื่อนที่ของยานพาหนะ แบบจำลองพลวัตการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในหนึ่งมิติ การใช้ตัวสังเกตสถานะและตัวกรองคาลมานประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ เนื้อหาจะเรียงลำดับตามปีที่ตีพิมพ์ และอธิบายถึงสาระสำคัญของแต่ละงานวิจัยพอสังเขป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ)	คณะผู้จัดทำ	สาระสำคัญของงานวิจัย
2006	G. Rill	บทความนี้นำเสนอการใช้วิธีออยเลอร์ย้อนหลังคำนวณหาผลเฉลยหรือคำตอบของสมการพลวัตยานพาหนะที่มีความแข็ง (stiffness) หรือขาดเสถียรภาพเชิงตัวเลข สมการพลวัตที่พิจารณาคือแบบจำลองรถยนต์หนึ่งในสี่ส่วน (quarter car model) ที่มีหลายวัตถุ (multibody) หรือระบบย่อยหลายระบบที่ประกอบด้วยโครงรถ ระบบส่งกำลัง และระบบบังคับเลี้ยว ความแข็งของสมการเกิดจากแรงและทอร์กของล้อยาง และความยืดหยุ่นเล็กน้อยในระบบป้องกันการสะเทือนเพลาและล้อ แบบจำลองพลวัตของตัวหน่วงและส่วนประกอบอย่างเป็นส่วนหนึ่งของสมการพลวัตยานพาหนะ เมื่อขนาดขั้นมีค่าในระดับมิลลิวินาทีวิธีออยเลอร์ย้อนหลังยังคงให้ผลเฉลยที่มีเสถียรภาพวิธีออยเลอร์ย้อนหลังที่ได้รับการดัดแปลงนำมาใช้หาผลเฉลยของแบบจำลองยานพาหนะที่มีแรงเสียดทานแห่งที่เกิดขึ้นในตัวหน่วงและบนจานเบรก วิธีออยเลอร์ย้อนหลังดังกล่าวลดทอนจำนวนครั้งในการคำนวณหรือภาระในการคำนวณในแต่ละรอบของการวนซ้ำเชิงตัวเลข
2006	L. Imsland, T. A. Johansen, T. I. Fossen, H. F. Grip, J. C. Kalkkuhl, and A. Suissa	บทความนี้พิจารณาการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันและการเคลื่อนที่เลี้ยวโค้งของยานพาหนะสองมิติหรือเชิงระนาบที่มีแบบจำลองพลวัตไม่เชิงเส้น และได้พัฒนาตัวสังเกตสถานะและตัวกรองคาลมานที่ใช้ประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ แบบจำลองพลวัตดังกล่าวพิจารณา

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ)	คณะผู้จัดทำ	สาระสำคัญของงานวิจัย
		แรงเสียดทานไม่เชิงเส้นระหว่างผิวถนนและผิวล้อ ยาง และมีตัวแปรสถานะมากกว่าหนึ่งตัวที่ประกอบด้วยอัตราเร็วในทิศทางตามยาว (ในทิศทางไปข้างหน้าหรือถอยหลังหรือการเคลื่อนที่ในแกน x) อัตราเร็วในทิศทางด้านข้าง (ในทิศทางด้านซ้ายหรือด้านขวาหรือการเคลื่อนที่ในแกน y) และอัตราเร็วเชิงมุมในการหมุนของตัวถังยานพาหนะรอบแกนตั้งที่ตั้งฉากกับระนาบ (การหมุนรอบแกน z) ตัวสังเกตสถานะไม่เชิงเส้นต้องการข้อมูลที่ได้จากการวัดที่ประกอบด้วยอัตราเร่งในการเคลื่อนที่ในทิศทางตามยาว (longitudinal acceleration) อัตราเร่งในการเคลื่อนที่ในทิศทางด้านข้าง (lateral acceleration) อัตราเร็วเชิงมุมในการหมุนของตัวถังยานพาหนะรอบแกนตั้ง (yaw rate) อัตราเร็วเชิงมุมในการหมุนของล้อ 4 ล้อ และมุมเลี้ยวของล้อ 4 ล้อ (steering angle) และใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดนี้เข้ามาประมาณค่าตัวแปรสถานะ 3 ตัวแปร ตัวสังเกตสถานะไม่เชิงเส้นมีโครงสร้าง (module) สองส่วนที่แยกอิสระจากกัน โครงสร้างส่วนแรกคือตัวสังเกตสถานะอันดับหนึ่งที่มีประมาณค่าอัตราเร็วในทิศทางตามยาว และโครงสร้างส่วนที่สองคือตัวสังเกตสถานะอันดับสองที่มีประมาณค่าอัตราเร็วในทิศทางด้านข้างและอัตราเร็วเชิงมุมในการหมุนรอบแกนตั้ง (yaw rate) โครงสร้างส่วนที่สองใช้อัตราเร็วในทิศทางตามยาวที่ได้จากการประมาณค่า นำมาเป็น

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ)	คณะผู้จัดทำ	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ข้อมูลหนึ่งในการประมาณค่าตัวแปรสถานะ การประมาณค่าอัตราเร็วในทิศทางตามยาวและการประมาณค่าอัตราเร็วในทิศทางด้านข้างจึงแยกอิสระจากกัน ตัวสังเกตสถานะไม่เชิงเส้นที่มีโครงสร้างสองส่วนที่รวมเข้าด้วยกันจะรวมพจน์แรงสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่วงกลม (Coriolis term) และประมาณค่าอัตราเร็วในทิศทางตามยาวและอัตราเร็วในทิศทางด้านข้างพร้อมกัน การประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะจึงใช้เซนเซอร์หลายตัว และสมมุติว่ายานพาหนะไม่มีการเคลื่อนที่ถอยหลัง เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่บนถนนที่ลาดยางมะตอยหรือแอสฟัลต์ (asphalt) ที่มีผิวหน้าเรียบและแห้ง ตัวสังเกตสถานะไม่เชิงเส้นจะประมาณค่าอัตราเร็วที่มีความผิดพลาดน้อยและติดตามการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วจริง
2015	Z. Zhao, H. Chen, J. Yang, X. Wu, and Z. Yu	บทความนี้ นำเสนอตัวกรองคาลมานไร้กลิ่น (unscented Kalman filter) ที่ทำหน้าที่ประมาณค่าอัตราเร็วของรถยนต์ไฮบริด ตัวกรองคาลมานไร้กลิ่นมีส่วนหนึ่งของโครงสร้างเป็นแบบจำลองพลวัตการเคลื่อนที่ของยานพาหนะไม่เชิงเส้นที่มีเจ็ดระดับความเสรี (7 degree of freedom) และมีอินพุตคือทอร์กขับเคลื่อนล้อ ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมาณค่านำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบภายใต้โหมดการขับขี่ที่แตกต่างกัน รถยนต์ไฮบริดเคลื่อนที่บนเส้นทางตัวเลข 8 ในโหมดขับเคลื่อน

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ)	คณะผู้จัดทำ	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ด้วยไฟฟ้า และเคลื่อนที่บนเส้นทางตัว S ในโหมดไฮบริดสี่ล้อ ตัวกรองคาลมานไร้กลืนประมาณค่าอัตราเร็วที่มีความถูกต้อง
2016	E. Hashemi, A. Kasaiezadeh, S.Khosravani, A. Khajepour, N.Moshchuk, and S. Chen	บทความนี้นำเสนอแผนการประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะที่ปรับตัวได้ตามสภาพถนนที่เปลี่ยนแปลงในระนาบสองมิติ แผนการพิจารณาแบบจำลองของยางแต่ละมุมของรถที่ผสมระหว่างแบบจำลองยาง LuGre และกฎการเคลื่อนที่ของรถ เนื่องจากการประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะไม่ได้พิจารณาแรงจากยาง การประมาณค่าจึงมีความผิดพลาด และบทความนี้เสนอตัวกรองคาลมานที่พิจารณาสภาพไม่เชิงเส้นของยางและสภาพถนนที่มีความไม่แน่นอน ในกรณีที่ถนนแห้งและถนนลื่น ผลการจำลองสถานการณ์แสดงถึงการประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะมีความผิดพลาดเฉลี่ยต่ำ
2018	Z. Yin, Q. Dai, H. Guo, H. Chen, L. Chao	บทความนี้เสนอการพัฒนาตัวสังเกตสถานะไม่เชิงเส้นอันดับเต็ม (nonlinear full-order observer) ที่ประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะในแนวตามยาว (แกน x) และความลาดชันของถนน ยานพาหนะมีการขับเคลื่อน 4 ล้อ (four-wheel drive vehicle) การควบคุมยานพาหนะอัตโนมัติต้องการเซนเซอร์และตัวสังเกตสถานะไม่เชิงเส้นดังกล่าว ซอร์ฟแวร์จำลองสถานการณ์พลวัตการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ (veDYNA) ประเมินความถูกต้องของอัตราเร็วและความลาดชันของถนนที่ได้

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ)	คณะผู้จัดทำ	สาระสำคัญของงานวิจัย
		จากการประมาณค่า ตัวสังเกตสถานะมีอัตราเร็วในแนวตามยาวที่แก้ไขความผิดพลาด (correction term) และตัวสังเกตสถานะมีอัตราเร่งในแนวตามยาวที่แก้ไขความผิดพลาด ในการจำลองสถานการณ์ เมื่อถนนมีความลาดชัน 1 องศา, 10 องศา และ 20 องศา และตัวสังเกตสถานะมีอัตราเร็วในแนวตามยาวที่แก้ไขความผิดพลาด ตัวสังเกตสถานะจะประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะและความลาดชันของถนนที่มีความถูกต้องมากกว่าตัวสังเกตสถานะที่มีอัตราเร่งในการแก้ไขความผิดพลาด ผลการจำลองสถานการณ์มีความถูกต้องที่ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ของตัวสังเกตสถานะและข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ และถ้าแรงเสียดทานระหว่างล้อและผิวถนนมีการเปลี่ยนแปลง การประมาณค่าจะมีความผิดพลาด
2020	X. Ding, Z. Wang, L. Zhang, and C. Wang	บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับตัวประมาณอัตราเร็วยานพาหนะในระนาบหนึ่งมิติ แบบพหุชั้นหลายเซ็นเซอร์ โดยใช้โมดูลระบบกำหนดตำแหน่งทั่วโลก (GPS) ระบบกำหนดตำแหน่งนำทางเปย์โต่ว (GPS-BD) และหน่วยวัดแรงเฉื่อยราคาประหยัด (IMU) ในการประมาณอัตราเร็วของยานพาหนะ เนื่องจาก GPS-DB และ IMU มีความไวต่อความลาดชันของถนนสูง จึงทำการประมาณความลาดชันของถนนก่อน โดยเป็นการใช้รวมกันระหว่างข้อมูลอัตราเร็วของล้อยานพาหนะกับข้อมูลความชันของถนนจากระบบกำหนดตำแหน่งนำทางเปย์โต่ว เพื่อชดเชย

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ)	คณะผู้จัดทำ	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ผลกระทบของความลาดชันของถนนต่อความถูกต้องของสัญญาณ GPS-BD และ IMU และใช้การวัดสัญญาณของเซ็นเซอร์หลายตัวมารวมกันเพื่อสร้างเซ็นเซอร์เสมือนที่จะวัดอัตราเร็วของยานพาหนะ 3 ตัว ซึ่งแต่ละตัวจะทำการสร้างอัตราเร็วอ้างอิงในแนวระนาบหนึ่งมิติ และใช้อัลกอริทึมเพื่อรวมเซ็นเซอร์ทั้งหมดเพื่อประมาณอัตราเร็วของยานพาหนะโดยอิงค่าตามสัมประสิทธิ์น้ำหนักที่ปรับตามความเหมาะสมด้วยการทำงานร่วมของตัวกรองคาลมาน ผลการทดสอบการประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะมีความถูกต้องและสามารถทำงานภายใต้สภาวะการขับขี่ที่หลากหลาย
2020	X. Jin, J. Yang, Y. Li, B. Zhu, J. Wang, and G. Yin	บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการใช้ Dual unscented Kalman filter (DUKF) ซึ่งทำงานสองตัวพร้อมกันเพื่อใช้ในการประเมินสถานะ และพารามิเตอร์ของยานพาหนะ เช่น มวล โมเมนตัม การหมุน วิธีการนี้ใช้การวัดข้อมูลจากแรงบิดของมอเตอร์ในล้อและเซ็นเซอร์ในรถยนต์มาตรฐาน โดยผลลัพธ์จากการจำลองสถานการณ์ แสดงให้เห็นว่าวิธีการดังกล่าวสามารถประเมินพารามิเตอร์เชิงเฉื่อยของยานพาหนะไฟฟ้าน้ำหนักเบา (LEV) ได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาวะที่แตกต่าง
2021	M. H. Mobarak, R. N. Kleiman and J. Bauman	บทความนี้แนะนำแบบจำลองพลวัตไม่เชิงเส้นในเวลาต่อเนื่องในการเคลื่อนที่หนึ่งมิติของยานพาหนะ (รถยนต์หรือรถไฟฟ้า) บนถนนทาง

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ)	คณะผู้จัดทำ	สาระสำคัญของงานวิจัย
		ตรงที่มีพื้นผิวแห้งแข็งเรียบในแนวระดับ กฎการเคลื่อนที่ข้อ 2 ของนิวตันนำมาใช้สร้างแบบจำลองดังกล่าวที่พิจารณาแรงขับเคลื่อนหรือแรงผลักดันแรงเสียดทานที่เกิดจากการเบรก แรงเสียดทานหนืด แรงต้านจากอากาศ และแรงต้านการหมุนของล้อยาง และสมมุติว่ายานพาหนะมีการหมุนของล้อยางที่ไม่มีการลื่นไถล แบบจำลองมีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่เป็นตัวแปรสถานะและเอาต์พุต และมีค่าพารามิเตอร์คงที่ ยานพาหนะมีมอเตอร์ไฟฟ้าทำหน้าที่สร้างทอร์กขับเคลื่อนล้อให้เกิดการหมุน แบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์ถึงมอเตอร์ไฟฟ้า และแผงเซลล์แสงอาทิตย์จ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านวงจรแปลงผันบูสต์ถึงแบตเตอรี่ บทความนี้พิจารณาอัตราส่วนการทรอบของการขับเคลื่อนภาคสุดท้าย ประสิทธิภาพของการขับเคลื่อนภาคสุดท้าย ประสิทธิภาพของมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์ และประสิทธิภาพของวงจรแปลงผันบูสต์ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของยานพาหนะคือระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดที่ใช้ตัวควบคุมพีโอเลียนแบบพฤติกรรมของผู้ขับขี่ยานพาหนะ บทความนี้ไม่พิจารณาแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้า
2023	S. MOHITE, M. ALMA, A. ZEMOUCHE, M. HADDAD	บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการพัฒนาตัวสังเกตสถานะไม่เชิงเส้นแบบ Linear Matrix Inequality (LMI) โดยใช้เกณฑ์ H^∞ พร้อมกับการหาสถานะ LMI ใหม่ โดยตัวสังเกตสถานะไม่เชิงเส้นนี้ถูกพัฒนา

ตารางที่ 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ปีที่ตีพิมพ์ (ค.ศ)	คณะผู้จัดทำ	สาระสำคัญของงานวิจัย
		มาจากเกณฑ์วงกลมและใช้คุณสมบัติ Lipschitz ที่ปรับปรุงแล้ว รวมถึงความสัมพันธ์ Young และการใช้ตัวคูณแมทริกซ์เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นเพื่อให้ LMI สามารถใช้งานได้ โดยในการจำลองสถานการณ์ตัวสังเกตสถานะจะถูกใช้กับโมเดลรถยนต์อัตโนมัติพบว่าตัวสังเกตสถานะสามารถประมาณค่าระยะทาง ความเร็ว และความเร่ง ได้อย่างถูกต้องในสถานะอยู่ตัว
2023	H. Bessafa, C. Delattre, Z. Belkhatir, A. Zemouche, R. Rajamani	บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการพัฒนาตัวสังเกตสถานะอัตราขยายสูง โดยใช้เมทริกซ์น้ำหนักเป็นพารามิเตอร์ในการปรับแต่ง ซึ่งจะรวมเทคนิค LPV และ LMI เข้าด้วยกัน จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่า การประมาณค่าระยะทาง อัตราเร็ว และอัตราเร่งของยานพาหนะเมื่อเปรียบเทียบกับตัวสังเกตสถานะแบบเดิม ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าในสถานะชั่วคราว แต่ยังคงมีข้อจำกัดที่ค่าเกนของตัวสังเกตสถานะในบทวิจยนี้อาจจะต่ำเกินไป
2024	H. Bessafa, Z. Belkhatir, C. Delattre, R. Khemmar, A. Zemouche, R. Rajamani	บทความนี้ นำเสนอเกี่ยวกับการประมาณการเคลื่อนที่ในระนาบหนึ่งมิติของยานพาหนะ โดยใช้เซ็นเซอร์เรดาร์จับเสียงรบกวน โดยมีการรวมข้อมูลความเร็วเพิ่มเติมเข้าไป โดยนำเสนอการปรับปรุงตัวสังเกตสถานะอัตราขยายสูง โดยใช้ CARLA simulator ในการจำลองสถานการณ์ ผลการจำลองพบว่าตัวสังเกตสถานะแบบอัตราขยายสูงที่เสนอทำได้ดีกว่าตัวสังเกตแบบเดิม ในเรื่องความเร็วในการรวบรวมข้อมูล และความถูกต้อง

2.2 สรุป

ยานพาหนะภาคพื้นดินคือระบบหรือพลานต์ที่พิจารณาและมีอัตราเร็วในการเคลื่อนที่เป็นตัวแปรสถานะและเป็นปริมาณเอาต์พุต งานวิจัยก่อนหน้านี้พิจารณาแบบจำลองพลวัตไม่เชิงเส้นในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะอันดับสองและอันดับสูงกว่าสอง และออกแบบตัวสังเกตสถานะไม่เชิงเส้น (nonlinear observer) และตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) ที่ทำหน้าที่ประมาณค่าอัตราเร็ว ตัวสังเกตสถานะและตัวกรองคาลมานดังกล่าวจะนำมาใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดอัตราเร็ว แต่ตัวสังเกตสถานะไม่เชิงเส้นและตัวกรองคาลมานมีโครงสร้างการคำนวณที่ซับซ้อน ใช้ทรัพยากรมากในการคำนวณ และต้องการเซนเซอร์หลายตัว งานวิจัยนี้จึงศึกษาและสร้างแผนการประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะที่มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ใช้ทรัพยากรที่น้อยกว่าในการคำนวณ และต้องการเซนเซอร์ในจำนวนที่น้อยกว่า ยานพาหนะภาคพื้นดินที่พิจารณาเป็นแบบจำลองพลวัตการเคลื่อนที่ในหนึ่งมิติไม่เชิงเส้นอันดับหนึ่งหรือแบบจำลองพลวัตการเคลื่อนที่ในทางตรง (ทิศทางตามยาว) ในเวลาต่อเนื่อง (first-order continuous-time nonlinear longitudinal dynamic model of ground-vehicle motion) แบบจำลองการเคลื่อนที่ของยานพาหนะมีปริมาณอินพุต (input) คือแรงดึง (แรงขับเคลื่อนหรือแรงผลักดัน) และแรงเบรก (แรงที่ห้ามการหมุนของล้อ) และมีตัวแปรสถานะและปริมาณเอาต์พุต (output) คืออัตราเร็วในการเคลื่อนที่ ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าหรือถอยหลังได้และมีตัวแปรสถานะหนึ่งตัวเท่านั้น ตัวสังเกตสถานะที่ประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะจึงเป็นตัวสังเกตสถานะอันดับหนึ่งที่มีปริมาณเอาต์พุตคือตัวแปรสถานะที่ได้จากการประมาณค่า ตัวสังเกตสถานะใช้ปริมาณอินพุตและปริมาณเอาต์พุตของระบบ นำมาประมาณค่าตัวแปรสถานะตัวเดียว ตัวสังเกตสถานะจึงประมาณค่าอัตราเร็วที่เป็นปริมาณเดียวกับหรือซ้ำซ้อนกับอัตราเร็วที่ได้จากการวัด และความซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นไม่มีประโยชน์ในทางวิศวกรรม เพราะตัวสังเกตสถานะอันดับหนึ่งไม่สามารถใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดอัตราเร็วได้ ถ้าสัญญาณวัดอัตราเร็วหรืออัตราเร็วที่ได้จากการวัดเกิดการขาดหายหรือการวัดอัตราเร็วเกิดความล้มเหลว ตัวสังเกตสถานะอันดับหนึ่งจะไม่ได้รับข้อมูลอัตราเร็วและมีการประมาณค่าที่ผิดพลาด

วิธีการหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ในการประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะและไม่ต้องการสัญญาณวัดอัตราเร็ว คือการใช้วิธีเชิงตัวเลข (numerical methods) และแบบจำลองพลวัตไม่เชิงเส้นอันดับหนึ่งในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่อง นำมาสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ วิธีเชิงตัวเลขที่พิจารณาประกอบด้วย วิธีออยเลอร์ย้อนหลัง (backward Euler method) วิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal rule method) และวิธีอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor expansion method) แบบจำลองเชิงตัวเลขดังกล่าวมีผลเฉลยคืออัตราเร็วของยานพาหนะ และมีโครงสร้างการคำนวณที่ซับซ้อนน้อยกว่าตัวสังเกตสถานะไม่เชิงเส้นและตัวกรองคาลมาน แบบจำลองเชิงตัวเลขนี้ต้องการปริมาณอินพุตเท่านั้น และต้องการค่าพารามิเตอร์ของ

ยานพาหนะที่ถูกต้อง และแบบจำลองเชิงตัวเลขนี้มีจุดประสงค์ในการใช้งานแทนที่เซ็นเซอร์วัด
อัตราเร็วชั่วคราวเท่านั้น



บทที่ 3

ความรู้พื้นฐานที่ใช้ดำเนินงานวิจัย

3.1 กล่าวนำ

บทนี้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่ประกอบด้วยแบบจำลองพลวัตเชิงกลไม่เชิงเส้นของการเคลื่อนที่ยานพาหนะในเวลาต่อเนื่อง วิธีออยเลอร์ย้อนหลัง วิธีกนูสี่เหลี่ยมคางหมู และวิธีอนุกรมเทย์เลอร์ ความรู้ดังกล่าวจะนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการที่ประมาณค่าอัตราเร็วแบบจำลองยานพาหนะไฟฟ้าที่มีแบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้าดีซีที่สร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนล้อและเบรกแบบจำลองพลวัตเชิงกลของการเคลื่อนที่ วงจรเซชบริดจ์และพีดับเบิลยูเอ็ม บังคับทิศทางการหมุนของเพลามอเตอร์และเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุนของเพลามอเตอร์แบบจำลองพลวัตเชิงกลของการเคลื่อนที่จึงเป็นโพลตเชิงกล และตัวควบคุมพีไอแบบดิสคริตเลียนแบบพฤติกรรมของผู้ขับขี่ยานพาหนะและควบคุมอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ การป้อนกลับของอัตราเร็วที่เปรียบเทียบกับอัตราเร็วอ้างอิงทำให้เกิดระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะที่ผลิตผลตอบสนองที่ติดตามอัตราเร็วอ้างอิงในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว

3.2 แบบจำลองพลวัตเชิงกลของการเคลื่อนที่ยานพาหนะ

ยานพาหนะที่เคลื่อนที่บนถนนทางเรียบที่มีผิวแข็ง แห้ง และเคลื่อนที่ในทางตรงหนึ่งมิติ คือระบบไม่เชิงเส้นอันดับหนึ่งที่มีอินพุตเดียวเอาต์พุตเดียว และมีอัตราเร็วที่เป็นตัวแปรสถานะตัวเดียว และเป็นเอาต์พุต การพิจารณาการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน จะให้สมการเชิงอนุพันธ์สามัญไม่เชิงเส้นอันดับหนึ่งที่มีสัมประสิทธิ์คงที่ (M. H. Mobarak, R. N. Kleiman and J. Bauman, 2021) ดังนี้

$$\sum F = m\dot{v}_c = F_{net}$$

$$F_{net} = F_{tract} - F_{viscous} - F_{drag} - F_{rolling}$$

$$m\dot{v}_c + \mu_2 mgv_c + 0.5\rho_{air}AC_d v_c^2 + \mu_1 mg = \frac{\tau_{wheel} + \tau_{brake}}{r_{wheel}} \quad (3-1)$$

โดยที่

$$F_{tract} = \frac{\tau_{wheel} + \tau_{brake}}{r_{wheel}} \text{ คือ แรงดึง (tractive force) หรือแรงขับเคลื่อน (propulsion) หรือ}$$

แรงผลักดัน และแรงเบรกหรือแรงห้ามล้อ (braking force) (N)

$F_{drag} = 0.5\rho_{air}AC_d v_c^2$ คือ แรงต้านการเคลื่อนที่จากอากาศ (aerodynamic force หรือ drag) (N)

$F_{viscous} = \mu_2 mg v_c$ คือ แรงเสียดทานหนืดที่ต้านการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ (viscous damping) (N)

$F_{rolling} = \mu_1 mg$ คือ แรงเสียดทานระหว่างล้อยางและผิวถนนที่เกิดจากน้ำหนักของยานพาหนะที่ต้านการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ (rolling resistance) (N)

$F_{net} = m\dot{v}_c$ คือ แรงลัพธ์ที่กระทำกับยานพาหนะ (resultant force) (N)

v_c คือ อัตราเร็วของยานพาหนะ (chassis velocity) (m/s) และเป็นตัวแปรสถานะและเอาต์พุตของยานพาหนะ

m คือ มวลของยานพาหนะ (kg)

g คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s^2)

ρ_{air} คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A คือ พื้นที่ด้านหน้าของยานพาหนะ (m^2)

C_d คือ สัมประสิทธิ์ของแรงต้านจากอากาศ

μ_1 คือ สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างล้อยางและผิวถนนที่เกิดจากน้ำหนักของยานพาหนะ

μ_2 คือ สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืด (s/m)

τ_{wheel} คือ แรงบิดหรือทอร์กขับเคลื่อนล้อ (N·m)

τ_{brake} คือ แรงบิดหรือทอร์กที่เกิดจากการเบรกหรือการห้ามล้อ หรือทอร์กเบรก (N·m)

r_{wheel} คือ รัศมีของล้อยานพาหนะ (m)

และกำหนดให้ $F_{tract} = \frac{\tau_{wheel} + \tau_{brake}}{r_{wheel}} = u_w$ คือ อินพุตของยานพาหนะ

การนำ m หารสมการที่ (1) ทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$\dot{v}_c + \mu_2 g v_c + \frac{0.5\rho_{air}AC_d}{m} v_c^2 + \mu_1 g = \frac{1}{m} u_w \quad (3-2)$$

ต่อมากำหนดให้

$$a = \mu_2 g \text{ มีหน่วย } \text{s}^{-1}$$

$$b = \frac{0.5\rho_{air}AC_d}{m} \text{ มีหน่วย } \text{m}^{-1}$$

$$d = \mu_1 g \text{ มีหน่วย } \text{m/s}^2$$

และ $h = \frac{1}{m}$ มีหน่วย kg^{-1}

จะได้แบบจำลองเชิงกลการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่มีพจน์ (เทอม) ทุกพจน์เป็นอัตราเร่งดังนี้

$$\dot{v}_c + av_c + bv_c^2 + d = hu_w \quad (3-3)$$

และมีสมการปริภูมิสถานะ

$$\dot{v}_c = -av_c - bv_c^2 - d + hu_w \quad (3-4)$$

โดยที่ $b = b' \text{sgn}(v_c)$, $d = d' \text{sgn}(v_c)$, $b' = \frac{0.5\rho_{air}AC_d}{m}$ และ $d' = \mu_1 g$

ถ้ายานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ($v_c > 0$) จะได้ว่า $\text{sgn}(v_c) = +1$ และถ้ายานพาหนะเคลื่อนที่ถอยหลัง ($v_c < 0$) จะได้ว่า $\text{sgn}(v_c) = -1$ และถ้า $v_c = 0$ จะได้ว่า $\text{sgn}(v_c) = 0$ เมื่อยานพาหนะกำลังเปลี่ยนแปลงทิศทางของการเคลื่อนที่ นั่นคือ v_c มีค่าที่กำลังเปลี่ยนแปลงเครื่องหมาย $\text{sgn}(v_c)$ จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไม่ต่อเนื่อง จึงประมาณค่า $\text{sgn}(v_c) \approx \frac{v_c}{|v_c| + \varepsilon}$

โดยที่ ε คือค่าบวกคงที่ที่มีค่าน้อยมาก และกำหนดให้ $\varepsilon = 0.01$ ดังนั้นเมื่อ v_c มีค่าที่กำลังเปลี่ยนแปลงเครื่องหมาย $\frac{v_c}{|v_c| + \varepsilon}$ จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

3.3 แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ดีซีแม่เหล็กถาวร

มอเตอร์ไฟฟ้าที่พิจารณาและขับเคลื่อนล้อของยานพาหนะให้เกิดการหมุน คือมอเตอร์กระแสตรงหรือมอเตอร์ดีซีแม่เหล็กถาวร (permanent-magnet DC motor: PMDC) ที่มีแปรงถ่านและมีแม่เหล็กถาวรที่สร้างสนามแม่เหล็กแทนที่ขดลวดสนาม (field winding) แม่เหล็กถาวรเป็นส่วนหนึ่งของสเตเตอร์ และมอเตอร์มีขดลวดอาร์เมเจอร์และแกนอาร์เมเจอร์ที่เป็นส่วนหนึ่งของโรเตอร์ มอเตอร์ดังกล่าวมีขนาดเล็ก มีน้ำหนักเบา มีประสิทธิภาพสูง และสร้างแรงบิดหรือทอร์กเริ่มเดินเครื่องสูง (high starting torque) ระบบควบคุมความเร็วที่มีมอเตอร์ดีซีที่ทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อน ไม่มีความซับซ้อนและให้ผลตอบแทนที่มีความแม่นยำ (S. Das, 2021) การประยุกต์ใช้งานมอเตอร์ดีซีเกิดขึ้นและได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิต ระบบอัตโนมัติ หุ่นยนต์ ระบบเคลื่อนที่และยานพาหนะไฟฟ้าขนาดเล็ก

มอเตอร์ดีซีแม่เหล็กถาวรมีแบบจำลองพลวัตทางไฟฟ้า (electrical dynamic model) (LibreTexts™ Engineering Introduction to Control Systems (Iqbal))

$$v_a(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + K_e \omega_m(t) \quad (3-5)$$

โดยที่

$v_a(t)$ คือ แรงดันอาร์เมเจอร์ (V)

$i_a(t)$ คือ กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (A)

R_a คือ ความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ (Ω)

L_a คือ ความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ (H) K_e คือ ค่าคงที่ของการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (V·s)

และ $\omega_m(t)$ คือ อัตราเร็วเชิงมุมในการหมุนของเพลลา (rad/s)

และมีแบบจำลองพลวัตทางกล (mechanical dynamic model)

$$J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B_m \omega_m(t) = K_t i_a(t) \quad (3-6)$$

โดยที่

J_m คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

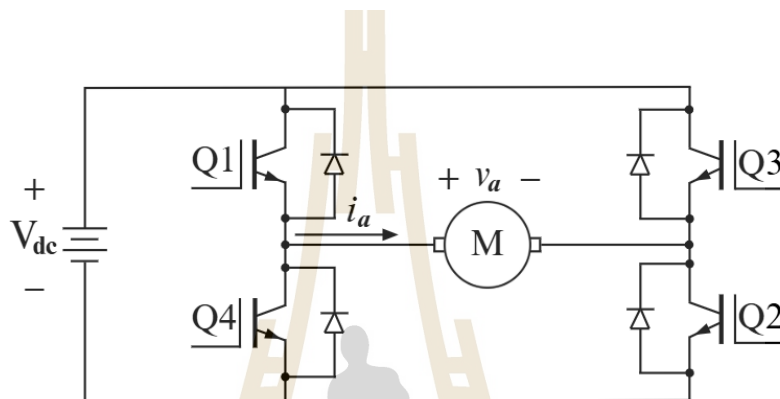
B_m คือ สัมประสิทธิ์การหน่วงหนืด ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$)

และ K_t คือ ค่าคงที่ของการสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$)

3.4 วงจรเฮชบริดจ์และพีดับเบิลยูเอ็ม

วงจรเฮชบริดจ์ (H-bridge) (D. W. Hart, 2011) ที่แสดงในรูปที่ 3.1 ใช้ควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าและบังคับทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่จ่ายและไหลผ่านโหลด วงจรเฮชบริดจ์ประกอบด้วยสวิตช์ 4 ตัว มอสเฟตกำลังหรือไอจีบีทีที่มีไดโอดต่อคร่อมแบบกลับด้าน (antiparallel) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์แต่ละตัว สวิตช์ 4 ตัวแบ่งออกเป็นสวิตช์ 2 คู่ สวิตช์ 2 ตัวในคู่ที่หนึ่งเชื่อมต่ออนุกรม และสวิตช์ 2 ตัวในคู่ที่สองเชื่อมต่ออนุกรม สวิตช์แต่ละตัวมีตำแหน่งที่ตรงกับแขน (arms) แต่ละแขนของ ‘H’ สวิตช์ตัวที่หนึ่งในคู่ที่หนึ่งและในคู่ที่สองมีตำแหน่งด้านบน (high side) และสวิตช์ตัวที่สองในคู่ที่หนึ่งและในคู่ที่สองมีตำแหน่งด้านล่าง (low side) โหลดมีตำแหน่งตรงกลางของ ‘H’ และมีขั้วต่อขั้วที่หนึ่งเชื่อมต่อกับจุดเชื่อมต่อระหว่างสวิตช์ 2 ตัวในคู่ที่หนึ่ง และมีขั้วต่อขั้วที่สองเชื่อมต่อกับจุดเชื่อมต่อ

ระหว่างสวิตช์ 2 ตัวในคู่ที่สอง แรงดันที่ตกคร่อมโพลมีตำแหน่งของขั้วบวกและขั้วลบที่สัมพันธ์กับสถานะเปิด (on-state) ของสวิตช์ 2 ตัวที่อยู่ในคู่ที่แตกต่างกันและอยู่ในด้านที่แตกต่างกัน และสถานะปิด (off-state) ของสวิตช์ 2 ตัวที่เหลือ เนื่องจากสถานะปิดตรงข้ามกับสถานะเปิด เมื่อสวิตช์แต่ละตัวมีสถานะที่ตรงข้ามกับสถานะเดิม สวิตช์แต่ละตัวจะมีความทำงานที่ตรงข้ามกับการทำงานเดิม และแรงดันที่ตกคร่อมโพลจะกลับขั้ว



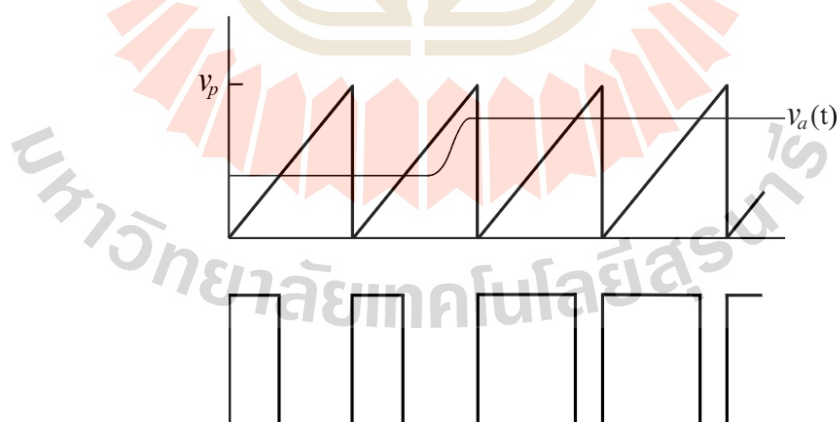
รูปที่ 3.1 วงจรแฮชบริดจ์ที่ใช้ควบคุมมอเตอร์ดีซี

ถ้าโพลคือมอเตอร์ดีซีที่มีเพลาคู่ต่อ (coupling) กับโพลเชิงกล แรงดันที่ตกคร่อมคือแรงดันอาร์เมเจอร์ เมื่อมอเตอร์มีกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่ไหลผ่านจากขั้วบวกของแรงดันอาร์เมเจอร์ถึงขั้วลบ มอเตอร์จะเปลี่ยนรูปกำลังไฟฟ้าไปเป็นกำลังเชิงกลหรือดูดกลืนกำลัง และมอเตอร์ขับเคลื่อนโพลเชิงกลให้หมุนด้วยความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นหรือหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ (forward rotation) แต่เมื่อมอเตอร์มีแรงดันอาร์เมเจอร์กลับขั้ว มอเตอร์จะมีกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่ไหลผ่านจากขั้วลบของแรงดันอาร์เมเจอร์ถึงขั้วบวก มอเตอร์จะเปลี่ยนรูปกำลังเชิงกลไปเป็นกำลังไฟฟ้าหรือจ่ายกำลัง และมอเตอร์ทำหน้าที่เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือแหล่งจ่ายไฟฟ้า มอเตอร์มีเพลาคู่ที่หมุนช้าลงและโพลเชิงกลหมุนด้วยความเร็วรอบลดลง เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนี้คือการเบรกแบบคืนพลังงาน (regenerative braking) มอเตอร์มีกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่ไหลผ่านลดลงอย่างต่อเนื่องและกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์เริ่มต้นกลับทิศทางของการไหล และมอเตอร์และโพลเชิงกลหมุนช้าลงอย่างต่อเนื่องและเริ่มต้นหมุนกลับทิศทาง (reverse rotation)

พีดับเบิลยูเอ็มหรือการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM: pulse width modulation) (D. W. Hart, 2011) ที่แสดงในรูปที่ 3.2 คือวิธีการสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างเปลี่ยนแปลงได้ สัญญาณอ้างอิงจะนำมาใช้เปลี่ยนแปลงความกว้างของสัญญาณพัลส์ ถ้าสัญญาณอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น สัญญาณพัลส์จะมีความกว้างเพิ่มขึ้น แต่ถ้าสัญญาณอ้างอิงมีค่าลดลง สัญญาณพัลส์จะมีความกว้างลดลง เช่นเดียวกัน ความกว้างของสัญญาณพัลส์ในแต่ละรอบ (cycle) คือช่วงระยะเวลาที่สวิตช์มีสถานะเปิด

และช่วงระยะเวลาที่เหลือของสัญญาณพัลส์ในแต่ละรอบ คือช่วงระยะเวลาที่สวิตช์มีสถานะปิด การเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอ้างอิง (reference signal) และสัญญาณพาหะสามเหลี่ยม (triangular carrier) ที่มีความถี่สูง จะสร้างขบวนสัญญาณพัลส์ที่ซับซ้อนของมอสเฟตกำลังหรือไอจีบีทีที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ถ้าสัญญาณอ้างอิงมากกว่าสัญญาณพาหะ สัญญาณพัลส์จะมีค่าบวกค่าหนึ่งที่สมมูลกับลอจิกหนึ่ง ถ้าสัญญาณอ้างอิงน้อยกว่าสัญญาณพาหะ สัญญาณพัลส์จะมีค่าศูนย์ที่สมมูลกับลอจิกศูนย์ ช่วงระยะเวลาที่สัญญาณพัลส์มีค่าบวก คือความกว้างของสัญญาณพัลส์ และความถี่ของสัญญาณพัลส์ คือความถี่ของสัญญาณพาหะสามเหลี่ยม

เมื่อสัญญาณอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ช่วงระยะเวลาที่สัญญาณอ้างอิงมากกว่าสัญญาณพาหะ จะเพิ่มขึ้นหรือนานกว่า และช่วงระยะเวลาที่สัญญาณอ้างอิงน้อยกว่าสัญญาณพาหะ จะลดลงหรือสั้นลง นั่นคือสวิตช์มีสถานะเปิดที่มีช่วงระยะเวลาเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบ และสวิตช์ตัวเดียวกันมีสถานะปิดที่มีช่วงระยะเวลาสั้นลงในแต่ละรอบ โหลดจึงมีแรงดันที่ตกคร่อมเพิ่มขึ้น แต่เมื่อสัญญาณอ้างอิงมีค่าลดลง ช่วงระยะเวลาที่สัญญาณอ้างอิงมากกว่าสัญญาณพาหะ จะลดลงหรือสั้นลง และช่วงระยะเวลาที่สัญญาณอ้างอิงน้อยกว่าสัญญาณพาหะ จะเพิ่มขึ้นหรือนานกว่า นั่นคือสวิตช์มีสถานะเปิดที่มีช่วงระยะเวลาสั้นลงในแต่ละรอบ และสวิตช์ตัวเดียวกันมีสถานะปิดที่มีช่วงระยะเวลาเพิ่มขึ้นในแต่ละรอบ โหลดจึงมีแรงดันที่ตกคร่อมลดลง สัญญาณพัลส์หนึ่งรอบมีคาบเวลา (T_{pwm}) เท่ากับผลบวกระหว่างช่วงระยะเวลาที่สวิตช์มีสถานะเปิด (t_{on}) และช่วงระยะเวลาที่สวิตช์ตัวเดียวกันมีสถานะปิด (t_{off}) สัญญาณพัลส์ที่เกิดจากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณพาหะ มีความกว้างที่เรียกว่ารอบการทำงาน (duty cycle)



รูปที่ 3.2 พัลส์เบิกลูเอ็่มที่เกิดจากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณพาหะ

$$D_{pwm} = \frac{t_{on}}{T_{pwm}} \times 100\% \quad (3-7)$$

โดยที่

D_{pwm} คือ รอบการทำงานในหนึ่งคาบเวลา

t_{on} คือ ช่วงระยะเวลาที่สวิตช์มีสถานะเปิด (s)

และ $T_{pwm} = t_{on} + t_{off}$ คือ คาบเวลาของสัญญาณพัลส์หนึ่งรอบ (s)

การเปลี่ยนแปลงรอบการทำงาน คือการเปลี่ยนแปลงความกว้างของสัญญาณพัลส์และแรงดันที่ตกคร่อมโหลดหรือแรงดันอาร์เมเจอร์ เมื่อพีดับเบิลยูเอ็มได้รับสัญญาณอ้างอิงที่มีการเปลี่ยนแปลง พีดับเบิลยูเอ็มจะสร้างขบวนสัญญาณพัลส์ที่มีรอบการทำงานเปลี่ยนแปลง มอเตอร์ดีซีจะมีแรงดันอาร์เมเจอร์ที่เปลี่ยนแปลง มีกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่ไหลผ่านเปลี่ยนแปลง และสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน เมื่อทอร์กที่ขับเคลื่อนโหลดเชิงกลเกิดการเปลี่ยนแปลง เพลาของมอเตอร์และโหลดเชิงกลจะหมุนด้วยความเร็วรอบที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอ้างอิง จะเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการหมุนของมอเตอร์และโหลดเชิงกล และเมื่อสวิตช์ที่อยู่ในวงจรแฮบริดจ์มีสถานะเปิดที่เปลี่ยนไปเป็นสถานะปิด และสวิตช์มีสถานะปิดที่เปลี่ยนไปเป็นสถานะเปิด นั่นคือสวิตช์ 4 ตัวมีสถานะการทำงานที่ตรงข้ามกับสถานะเดิม มอเตอร์ดีซีจะมีแรงดันอาร์เมเจอร์ที่กลับขั้ว มีกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่ไหลผ่านลดลงและกลับทิศทาง และสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีขนาดลดลงและกลับทิศทางเช่นเดียวกัน เมื่อทอร์กที่ขับเคลื่อนโหลดเชิงกลมีขนาดลดลงและเกิดการกลับทิศทาง เพลาของมอเตอร์และโหลดเชิงกลจะหมุนช้าลงและหมุนกลับทิศทาง โหลดเชิงกลที่พิจารณาคือยานพาหนะที่มีล้อเปลี่ยนการหมุนไปเป็นการเคลื่อนที่

3.5 ตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีต

ผู้ขับขี่ยานพาหนะในสภาพปกติมีพฤติกรรมในการขับขี่ที่คล้ายกับตัวควบคุมพีไอในเวลาต่อเนื่อง (M. H. Mobarak, R. N. Kleiman and J. Bauman, 2021; S. Das, 2021) ที่มีโครงสร้างดังนี้

$$u_w(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3-8)$$

โดยที่

$u_w(t)$ คือ เอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอ (PI controller output) (N) ที่ทำหน้าที่เป็นแรงขับเคลื่อนหรือแรงผลักดันและแรงเบรกในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ หรือทำหน้าที่เป็นสัญญาณอ้างอิงหรือแรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงที่จ่ายถึงพีดับเบิลยูเอ็ม (V) ในยานพาหนะไฟฟ้า

$e(t) = v_r(t) - v_c(t)$ คือ ความผิดพลาดหรือความแตกต่างระหว่างอัตราเร็วอ้างอิงและอัตราเร็วของยานพาหนะ (ผลตอบสนอง) (m/s)

$v_r(t)$ คือ อัตราเร็วอ้างอิงของยานพาหนะ (m/s)

K_p คือ ค่าเกนสัดส่วน (proportional gain) หรือค่าเกนพี

K_i คือ ค่าเกนอินทิกรัล (integral gain) หรือค่าเกนไอ

และ t คือ เวลา (s)

ในสมการที่ (3-8) พจน์อินทิกรัลของความผิดพลาดที่เทียบกับเวลาตั้งแต่เวลาเริ่มต้นศูนย์จนถึงเวลาปัจจุบัน คือพื้นที่ใต้กราฟของความผิดพลาดและเวลาตั้งแต่เวลาเริ่มต้นศูนย์จนถึงเวลาปัจจุบัน เนื่องจากเครื่องคอมพิวเตอร์ไม่สามารถคำนวณหาอินทิกรัลของความผิดพลาดที่เทียบกับเวลาได้โดยตรง การใช้เครื่องคอมพิวเตอร์คำนวณหาอินทิกรัลของความผิดพลาดที่เทียบกับเวลา จึงดำเนินการได้ดังนี้ การแบ่งพื้นที่ใต้กราฟของความผิดพลาดและเวลา ออกเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้างน้อยมากหลายรูปต่อเนื่องกัน สี่เหลี่ยมผืนผ้าแต่ละรูปมีความกว้างเท่ากันและความกว้างเท่ากับขนาดขั้นของเวลา (คาบเวลา) และมีความยาวเท่ากับความผิดพลาดที่เวลาตรงกับการพิจารณาสี่เหลี่ยมผืนผ้าแต่ละรูปจึงมีพื้นที่เท่ากับผลคูณระหว่างขนาดขั้นของเวลาและความผิดพลาดที่เวลาตรงกับการพิจารณา การคำนวณหาพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ละรูปที่เริ่มต้นจากสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ตรงกับเวลาเริ่มต้นศูนย์ การคำนวณหาพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ตรงกับเวลาถัดไป และการบวกพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าเข้าด้วยกัน การคำนวณหาพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ตรงกับเวลาถัดไปอีก และการบวกระหว่างพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าและผลบวกของพื้นที่ก่อนหน้านี้เข้าด้วยกัน การดำเนินการดังกล่าวจะเกิดวนซ้ำจนถึงการบวกระหว่างพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เวลาปัจจุบันและผลบวกของพื้นที่ก่อนหน้านี้เข้าด้วยกัน และการวนซ้ำในแต่ละครั้งเกิดขึ้นห่างกันด้วยช่วงระยะเวลาเท่ากับขนาดขั้น ผลบวกที่ได้รับคือค่าประมาณของพจน์อินทิกรัลความผิดพลาดที่เทียบกับเวลาตั้งแต่เวลาเริ่มต้นศูนย์จนถึงเวลาปัจจุบัน

$$u_w(k) = K_p e(k) + K_i T \sum_{n=0}^k (e(n)) \quad (3-9)$$

โดยที่

T คือ ขนาดขั้น (step size) หรือคาบเวลาในการวนซ้ำหนึ่งรอบ (s)

$$e(k) = v_r(k) - v_c(k)$$

$$k = \frac{t}{T} = 0, 1, 2, 3, 4, \dots \text{ คือ จำนวนครั้งในการวนซ้ำที่เวลาปัจจุบัน}$$

$$\text{และ } \int_0^t e(\tau) d\tau \approx T \sum_{n=0}^k (e(n))$$

ในสมการที่ (3-8) พจน์อินทิกรัลของความผิดพลาดที่เทียบกับเวลาตั้งแต่เวลาเริ่มต้นศูนย์ จนถึงเวลาปัจจุบัน คือพื้นที่ใต้กราฟของความผิดพลาดและเวลาตั้งแต่เวลาเริ่มต้นศูนย์จนถึงเวลา ปัจจุบัน เนื่องจากเครื่องคอมพิวเตอร์ไม่สามารถคำนวณหาอินทิกรัลของความผิดพลาดที่เทียบกับ เวลาได้โดยตรง การใช้เครื่องคอมพิวเตอร์คำนวณหาอินทิกรัลของความผิดพลาดที่เทียบกับเวลา จึง ดำเนินการได้ดังนี้ การแบ่งพื้นที่ใต้กราฟของความผิดพลาดและเวลา ออกเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มี ความกว้างน้อยมากหลายรูปต่อเนื่องกัน สี่เหลี่ยมผืนผ้าแต่ละรูปมีความกว้างเท่ากันและความกว้าง เท่ากับขนาดขั้นของเวลา (คาบเวลา) (T) และมีความยาวเท่ากับความผิดพลาดที่เวลาตรงกับการ พิจารณา ($e(k)$) สี่เหลี่ยมผืนผ้าแต่ละรูปจึงมีพื้นที่เท่ากับผลคูณระหว่างขนาดขั้นของเวลาและความ ผิดพลาดที่เวลาตรงกับการพิจารณา ($Te(k)$) การคำนวณหาพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ละรูปที่เริ่มต้นจาก สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ตรงกับเวลาเริ่มต้นศูนย์ ($Te(0)$) การคำนวณหาพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ตรงกับเวลา ถัดไป ($Te(1)$) และการบวกพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าเข้าด้วยกัน ($Te(0) + e(1)$) การคำนวณหาพื้นที่ สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ตรงกับเวลาถัดไปอีก ($Te(2)$) และการบวกระหว่างพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าและผลบวก ของพื้นที่ก่อนหน้านี้เข้าด้วยกัน ($Te(0) + e(1) + e(2)$) การดำเนินการดังกล่าวจะเกิดวนซ้ำจนถึงการ บวกระหว่างพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าที่เวลาปัจจุบันและผลบวกของพื้นที่ก่อนหน้านี้เข้าด้วยกัน ($Te(0) + e(1) + e(2) + \dots + e(k)$) และการวนซ้ำในแต่ละครั้ง ($k = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots$) เกิดขึ้นห่างกันด้วย ช่วงระยะเวลาเท่ากับขนาดขั้น (T) ผลบวกที่ได้รับคือค่าประมาณของพจน์อินทิกรัลความผิดพลาดที่ เทียบกับเวลาตั้งแต่เวลาเริ่มต้นศูนย์จนถึงเวลาปัจจุบัน ($T \sum_{n=0}^k (e(n))$)

เมื่อตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีตทำหน้าที่คุมค่าหรือชดเชยระบบทางกายภาพในระบบควบคุม วงปิดและมีค่าเกินถูกต้อง และสัญญาณอ้างอิงมีค่าคงที่ ตัวควบคุมพีไอดังกล่าวจะบังคับระบบให้หรือ ผลิตผลตอบสนองที่มีความผิดพลาดน้อยมากในสถานะอยู่ตัว และตัวควบคุมพีไอมีพจน์ผลบวกของความ ผิดพลาดที่สมมูลกับพจน์อินทิกรัลของความผิดพลาดที่เกือบคงที่ในสถานะอยู่ตัว ถ้าสัญญาณวัด ที่เป็นสัญญาณป้อนกลับเกิดการขาดหายและมีค่าศูนย์ ระบบควบคุมวงปิดจะกลายเป็นระบบวงเปิด และความผิดพลาดจะเท่ากับอัตราเร็วอ้างอิง พจน์ผลบวกของความผิดพลาดจะมีขนาดเพิ่มขึ้นที่ไม่มี ขอบเขต นั่นคือตัวควบคุมพีไอยุ่จะสร้างสัญญาณควบคุมที่มีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีขอบเขตเช่นเดียวกัน แต่ตัวควบคุมพีไอที่ใช้งานในทางปฏิบัติมีเอาต์พุตที่มีขอบเขตที่แน่นอน นั่นคือตัวควบคุมพีไอยุ่จะต้อง สร้างสัญญาณควบคุมที่ไม่มากกว่าและไม่น้อยกว่าขอบเขตของเอาต์พุต วิธีหนึ่งที่ใช้ป้องกันการเพิ่มขึ้น ที่ไม่มีขอบเขตของสัญญาณควบคุม คือการใช้เงื่อนไขในการลดขนาดของพจน์ผลบวกความผิดพลาด ถ้าสัญญาณควบคุมมีค่าอยู่ภายในขอบเขตของเอาต์พุต พจน์ผลบวกของความผิดพลาดจะรวมความ

ผิดพลาดตามปกติ และมีขนาดเพิ่มขึ้นหรือลดลง แต่ถ้าสัญญาณควบคุมเริ่มมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าขอบเขตของเอาต์พุต พจน์ผลบวกของความผิดพลาดจะมีขนาดลดลงเท่านั้น และสัญญาณควบคุมจะมีขนาดลดลงเช่นเดียวกัน การใช้เงื่อนไขนี้ คือกลไกการลดการสะสมของความผิดพลาดที่เกินความจำเป็น (anti-windup)

ในระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้า ตัวควบคุมอัตราเร็วที่เลียนแบบพฤติกรรมการขับในสภาพปกติของผู้ขับขี่ยานพาหนะ คือตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีตที่มีกลไกการลดการสะสมของความผิดพลาด เพราะตัวควบคุมอัตราเร็วมีเอาต์พุตที่เป็นแรงดันอาร์มเจอร์อ้างอิงที่มีค่ามากที่สุดหรือขอบเขตเท่ากับ +5 V และมีค่าน้อยที่สุดหรือขอบเขตเท่ากับ -5 V

3.6 วิธีออยเลอร์ย้อนหลัง

วิธีออยเลอร์ย้อนหลัง (backward Euler method) คือวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ประมาณคำตอบหรือผลเฉลย (solution) ของระบบพลวัตที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ $\dot{y} = f(t, y)$ วิธีเชิงตัวเลขนี้มีความเสถียรมากกว่า นั่นคือวิธีออยเลอร์ย้อนหลังจะคำนวณคำตอบได้อย่างถูกต้องมากกว่าคำตอบที่คำนวณได้จากวิธีออยเลอร์ไปหน้า (forward Euler method) แต่จะมีความซับซ้อนในการหาคำตอบมากกว่า เพราะวิธีออยเลอร์ย้อนหลังให้สมการที่มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (unknown) ทั้งสองข้างของสมการ จึงต้องจัดสมการที่ให้อยู่ในรูปแบบปิด (closed-form solution) ที่มีคำตอบชัดเจน (S. C. Chapra and R. P. Canale, 2015) ถ้าการจัดสมการไม่สามารถดำเนินการได้ จำเป็นต้องใช้วิธีการหาคำตอบวนซ้ำเชิงตัวเลข (Wikipedia contributors. "Backward Euler method.", 2024) วิธีออยเลอร์ย้อนหลังมีสมการดังนี้

$$y_{k+1} = y_k + T f(t_{k+1}, y_{k+1}) \quad (3-10)$$

โดยที่

T คือ ขนาดขั้น (step size) หรือคาบเวลาการวนซ้ำในหนึ่งรอบ

y_k คือ คำตอบหรือตัวแปรสถานะที่เวลาปัจจุบัน

y_{k+1} คือ คำตอบหรือตัวแปรสถานะที่เวลาอนาคตถัดจากเวลาปัจจุบันหนึ่งขนาดขั้น

t_{k+1} คือ เวลาอนาคตถัดจากเวลาปัจจุบันหนึ่งขนาดขั้น

และ $f(t_{k+1}, y_{k+1})$ คือ ฟังก์ชันต่อเนื่องที่เวลาอนาคตถัดจากเวลาปัจจุบันหนึ่งขนาดขั้น

ตัวแปร y_k และ t_{k+1} คือตัวแปรที่ทราบค่า และ y_{k+1} คือตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

3.7 วิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมู

วิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal rule method) คือวิธีเชิงตัวเลขอีกวิธีหนึ่งที่ใช้ประมาณคำตอบหรือผลเฉลยของระบบพลวัตที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ $\dot{y} = f(t, y)$ วิธีเชิงตัวเลขนี้มีความเสถียรและมีความซับซ้อนมากกว่าวิธีออยเลอร์ย้อนหลัง วิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมูให้สมการที่มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าทั้งสองข้างของสมการเช่นเดียวกัน จึงต้องจัดสมการที่ให้อยู่ในรูปแบบปิดที่มีคำตอบชัดเจน (S. C. Chapra and R. P. Canale, 2015) ถ้าการจัดสมการไม่สามารถดำเนินการได้ จำเป็นต้องใช้วิธีการหาคำตอบวนซ้ำเชิงตัวเลข (Wikipedia contributors. "Trapezoidal rule (differential equations).", 2024) วิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมูมีสมการดังนี้

$$y_{k+1} = y_k + 0.5T(f(t_k, y_k) + f(t_{k+1}, y_{k+1})) \tag{3-11}$$

โดยที่

t_k คือ เวลาปัจจุบัน

และ $f(t_k, y_k)$ คือ ฟังก์ชันต่อเนื่องที่เวลาปัจจุบัน

ตัวแปร y_k, t_k และ t_{k+1} คือตัวแปรที่ทราบค่า และ y_{k+1} คือตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

3.8 วิธีอนุกรมเทย์เลอร์

วิธีอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor expansion method) คือวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ประมาณคำตอบหรือผลเฉลยของระบบพลวัตที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ $\dot{y} = f(t, y)$ วิธีเชิงตัวเลขนี้ให้ความถูกต้องในการคำนวณและมีความซับซ้อนมากกว่าวิธีออยเลอร์ไปหน้า เพราะวิธีออยเลอร์ไปหน้าพิจารณาพจน์หรือเทอมของอนุพันธ์อันดับหนึ่งเท่านั้นในอนุกรมเทย์เลอร์ แต่วิธีอนุกรมเทย์เลอร์พิจารณาพจน์ของอนุพันธ์อันดับหนึ่งและพจน์ของอนุพันธ์อันดับสองในอนุกรมเทย์เลอร์ (S. C. Chapra and R. P. Canale, 2015) วิธีอนุกรมเทย์เลอร์ให้สมการที่มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในข้างเดียวของสมการ หรือให้สมการที่มีรูปแบบปิดที่มีคำตอบชัดเจน (Wikipedia contributors. "Euler method.", 2024) วิธีอนุกรมเทย์เลอร์มีสมการดังนี้

$$y_{k+1} = y_k + T\dot{y}_k + 0.5T^2\ddot{y}_k \tag{3-12}$$

โดยที่

$\dot{y}_k = f(t_k, y_k)$

และ $\ddot{y}_k = \dot{f}(t_k, y_k)$

ตัวแปร t_k , y_k , $\dot{y}_k$ และ $\ddot{y}_k$ คือตัวแปรที่ทราบค่า และ y_{k+1} คือตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

3.9 สรุป

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐานที่จะใช้พัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการที่ทำหน้าที่ประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ และที่จะใช้สร้างระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะและยานพาหนะไฟฟ้า ความรู้พื้นฐานดังกล่าวจะให้แนวทางในการจัดเตรียมบล็อกซิมมูลิคส์ซิมสเคปและระบบย่อยซิมมูลิคส์ที่ใช้จำลองสถานการณ์การควบคุมอัตราเร็วของยานพาหนะ และการตรวจสอบสมรรถนะของการประมาณค่าอัตราเร็วและการทำงานของแบบจำลองเชิงตัวเลขแทนที่การวัดอัตราเร็ว แบบจำลองพลวัตเชิงกลไม่เชิงเส้นในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในทางตรงหนึ่งมิติ และวิธีเชิงตัวเลข 3 วิธี จะนำมาใช้สร้างแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ แบบจำลองพลวัตเชิงกลในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ จะนำมาสร้างระบบย่อยซิมมูลิคส์ที่ใช้จำลองสถานการณ์การเคลื่อนที่ของยานพาหนะ และนำมาเลือกบล็อกซิมมูลิคส์ซิมสเคปที่ตรงกันและใช้ในการจำลองสถานการณ์ แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ดีซีแม่เหล็กถาวรจะนำมาเลือกบล็อกซิมมูลิคส์ซิมสเคปที่ตรงกันและใช้จำลองสถานการณ์ วงจรเฮชบริดจ์และฟีดแบ็คเบิลยูเอ็มบีบล็อกซิมมูลิคส์ซิมสเคปที่พร้อมใช้งาน และตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีตมีสมการที่นำมาสร้างระบบย่อยซิมมูลิคส์ที่ใช้จำลองสถานการณ์



บทที่ 4

แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ

4.1 กล่าวนำ

บทที่ 4 จะกล่าวถึงการนำแบบจำลองพลวัตเชิงกลอันดับหนึ่งในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่อง วิธีออยเลอร์ย้อนหลัง วิธีกุกส์-เฮลล์มคางหมู และวิธีอนุกรมเทย์เลอร์ มาสร้างแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกุกส์-เฮลล์มคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ตามลำดับ แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการดังกล่าวคือแบบจำลองพลวัตในเวลาดิสครีต และมีหน้าที่ประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าหรือถอยหลังของยานพาหนะในทางตรงหนึ่งมิติ แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการได้รับปริมาณอินพุตที่เป็นแรงขับเคลื่อนและแรงเบรกเท่านั้น และไม่ต้องการสัญญาณวัดอัตราเร็วหรืออัตราเร็วที่ได้จากการวัด แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการจึงมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและมีประโยชน์ในทางวิศวกรรม เพราะเมื่อสัญญาณวัดอัตราเร็วเกิดการขาดหาย แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการจะมีโอกาสแทนที่การวัดอัตราเร็ว นั่นคืออัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่ามีโอกาสแทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว และนำมาใช้เป็นข้อมูลที่แสดงบนหน้าจอหรือบนหน้าปัดของมาตรวัดอัตราเร็ว หรืออาจจะนำมาใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับในระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิด ดังนั้นแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการประมาณค่าอัตราเร็วที่ไม่ซ้ำซ้อนกับการวัดอัตราเร็วของยานพาหนะ

4.2 แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง

การเคลื่อนที่ในทางตรงหรือหนึ่งมิติของยานพาหนะที่พิจารณา มีแบบจำลองพลวัตเชิงกลไม่เชิงเส้นในเวลาต่อเนื่องในสมการที่ (3-4) กล่าวคือ

$$\dot{v}_c = -av_c - bv_c^2 - d + hu_w = f(v_c, u_w) \quad (4-1)$$

$$\text{โดยที่ } b = b' \frac{v_c}{|v_c| + \varepsilon}, \quad d = d' \frac{v_c}{|v_c| + \varepsilon}, \quad b' = \frac{0.5\rho_{air}AC_d}{m}, \quad d' = \mu_1 g,$$

$$a = \mu_2 g \quad \text{และ} \quad h = \frac{1}{m} \quad \text{วิธีออยเลอร์ย้อนหลังในสมการที่ (3-10) เปลี่ยนแบบจำลองพลวัต}$$

ในสมการที่ (4-1) ไปเป็นความสัมพันธ์เวียนบังเกิด (recurrence relation) หรือสมการผลต่าง
สืบเนื่อง (difference equation)

$$v_c(k + 1) = v_c(k) + Tf(v_c(k + 1), u_w(k + 1)) \quad (4-2)$$

โดยที่

T คือ ขนาดขั้นหรือคาบเวลาการวนซ้ำในหนึ่งรอบ (s)

$v_c(k)$ คือ อัตราเร็วหรือตัวแปรสถานะที่เวลาปัจจุบัน (m/s)

$v_c(k + 1)$ คือ อัตราเร็วหรือตัวแปรสถานะที่เวลาอนาคตถัดจากเวลาปัจจุบันหนึ่งขนาดขั้น (m/s)

$u_w(k + 1)$ คือ แรงดึงหรือแรงขับเคลื่อนหรือแรงผลักดัน และแรงเบรกหรือแรงห้ามล้อ (อินพุต
ของยานพาหนะ) ที่เวลาอนาคตถัดจากเวลาปัจจุบันหนึ่งขนาดขั้น (N)

และ $f(v_c(k + 1), u_w(k + 1))$ คือ ฟังก์ชันต่อเนื่องที่เวลาอนาคตถัดจากเวลาปัจจุบันหนึ่ง
ขนาดขั้น (m/s²)

ตัวแปรสถานะ $v_c(k)$ คือตัวแปรที่ทราบค่า แต่ $v_c(k + 1)$ และ $u_w(k + 1)$ คือตัว
แปรสถานะที่ไม่ทราบค่าและอินพุตของยานพาหนะที่ไม่ทราบค่าตามลำดับ

เมื่อ T มีค่าน้อยมาก จะสมมติว่า $u_w(k + 1) \approx u_w(k)$ โดยที่ $u_w(k)$ คือ แรงดึง
หรือแรงขับเคลื่อนหรือแรงผลักดัน และแรงเบรกหรือแรงห้ามล้อ (อินพุตของยานพาหนะ) ที่เวลา
ปัจจุบัน (N) นั่นคือ $u_w(k)$ คืออินพุตของยานพาหนะที่ทราบค่า และเขียนสมการที่ (4-2) ใหม่ได้
ดังนี้

$$v_c(k + 1) = v_c(k) + T(-av_c(k + 1) - bv_c^2(k + 1) - d + hu_w(k)) \quad (4-3)$$

โดยที่ $b = b' \frac{v_c(k)}{|v_c(k)| + \varepsilon}$ และ $d = d' \frac{v_c(k)}{|v_c(k)| + \varepsilon}$

$v_c(k + 1)$ คืออัตราเร็วหรือตัวแปรสถานะที่ไม่ทราบค่า ต่อมาจัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า

$$v_c(k + 1) = v_c(k) - aTv_c(k + 1) - bTv_c^2(k + 1) - dT + hTu_w(k)$$

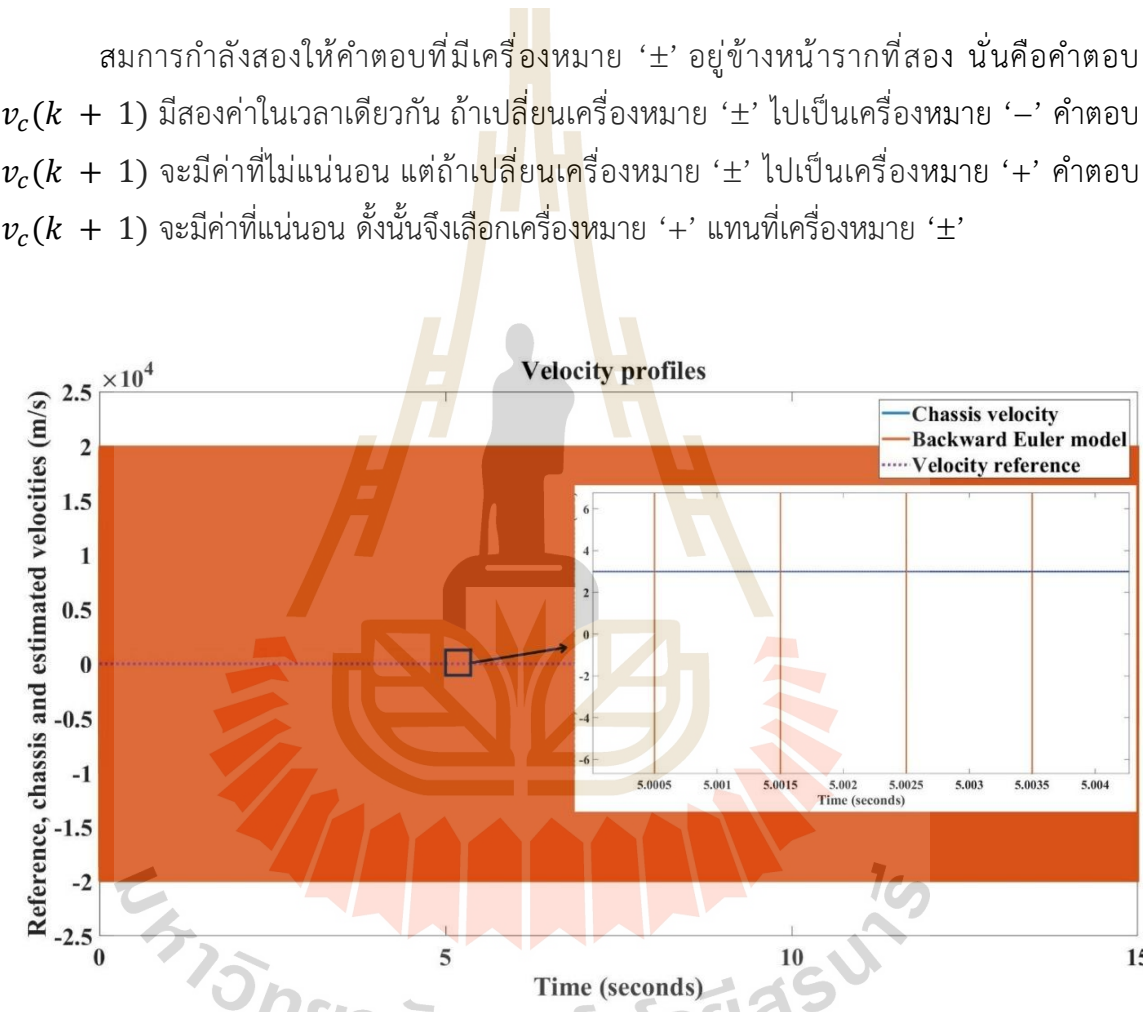
$$bTv_c^2(k + 1) + v_c(k + 1) + aTv_c(k + 1) + dT - hTu_w(k) - v_c(k) = 0$$

$$bTv_c^2(k + 1) + (1 + aT)v_c(k + 1) + T(d - hu_w(k)) - v_c(k) = 0$$

สมการกำลังสองที่ได้รับ มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า $v_c(k + 1)$ เพียงตัวเดียวเท่านั้น และให้รากหรือคำตอบที่ชัดเจนที่มีรูปแบบปิดดังนี้

$$v_c(k + 1) = \frac{-(1 + aT) \pm \sqrt{(1 + aT)^2 - 4bT(T(d - hu_w(k)) - v_c(k))}}{2bT} \tag{4-4}$$

สมการกำลังสองให้คำตอบที่มีเครื่องหมาย ‘±’ อยู่ข้างหน้ารากที่สอง นั่นคือคำตอบ $v_c(k + 1)$ มีสองค่าในเวลาเดียวกัน ถ้าเปลี่ยนเครื่องหมาย ‘±’ ไปเป็นเครื่องหมาย ‘-’ คำตอบ $v_c(k + 1)$ จะมีค่าที่ไม่แน่นอน แต่ถ้าเปลี่ยนเครื่องหมาย ‘±’ ไปเป็นเครื่องหมาย ‘+’ คำตอบ $v_c(k + 1)$ จะมีค่าที่แน่นอน ดังนั้นจึงเลือกเครื่องหมาย ‘+’ แทนที่เครื่องหมาย ‘±’



รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองอัตราเร็วและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองอยเลอร์ย้อนหลังที่เกิดขึ้นเมื่อพิจารณาคำตอบที่มีเครื่องหมายลบอยู่ข้างหน้ารากที่สอง

สมการกำลังสองให้คำตอบที่มีเครื่องหมายบวกอยู่ข้างหน้ารากที่สอง และให้คำตอบที่มีเครื่องหมายลบอยู่ข้างหน้ารากที่สอง เมื่ออัตราเร็วอ้างอิง (velocity reference) และผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะ (chassis velocity) มีค่าที่จำกัดและแน่นอน แบบจำลองอยเลอร์ย้อนหลังที่เกิดจากคำตอบที่มีเครื่องหมายลบอยู่ข้างหน้ารากที่สอง จะประมาณค่าอัตราเร็ว (backward Euler

วิธีกฏสี่เหลี่ยมคางหมูในสมการที่ (3-11) เปลี่ยนแบบจำลองพลวัตในเวลาต่อเนื่องในสมการที่ (4-1) ไปเป็นความสัมพันธ์เวียนบังเกิดหรือสมการผลต่างสืบเนื่อง

$$v_c(k+1) = v_c(k) + 0.5T(f(v_c(k), u_w(k)) + f(v_c(k+1), u_w(k+1))) \quad (4-6)$$

โดยที่

$f(v_c(k), u_w(k))$ คือ ฟังก์ชันต่อเนื่องที่เวลาปัจจุบัน (m/s^2)

เมื่อ T มีค่าน้อยมาก จะสมมุติว่า $u_w(k+1) \approx u_w(k)$ และเขียนสมการที่ (4-6) ใหม่ได้ดังนี้

$$v_c(k+1) = v_c(k) + 0.5T(-av_c(k) - bv_c^2(k) - d + hu_w(k) - av_c(k+1) - bv_c^2(k+1) - d + hu_w(k)) \quad (4-7)$$

โดยที่ $b = b' \frac{v_c(k)}{|v_c(k)| + \varepsilon}$ และ $d = d' \frac{v_c(k)}{|v_c(k)| + \varepsilon}$

$v_c(k+1)$ คืออัตราเร็วหรือตัวแปรสถานะที่ไม่ทราบค่า ต่อมาจัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า

$$v_c(k+1) - v_c(k) = 0.5T(-av_c(k) - bv_c^2(k)) + 0.5T(-d + hu_w(k)) + 0.5T(-av_c(k+1) - bv_c^2(k+1)) + 0.5T(-d + hu_w(k))$$

$$v_c(k+1) - v_c(k) = -0.5aTv_c(k) - 0.5bTv_c^2(k) - 0.5aTv_c(k+1) - 0.5bTv_c^2(k+1) + T(-d + hu_w(k))$$

$$0.5bTv_c^2(k+1) + v_c(k+1) + 0.5aTv_c(k+1) + 0.5bTv_c^2(k) - v_c(k) + 0.5aTv_c(k) - T(-d + hu_w(k)) = 0$$

$$0.5bTv_c^2(k+1) + (1 + 0.5aT)v_c(k+1) + 0.5bTv_c^2(k) - (1 - 0.5aT)v_c(k) + T(d - hu_w(k)) = 0$$

$$0.5bTv_c^2(k+1) + (1 + 0.5aT)v_c(k+1) + T(0.5bv_c^2(k) + d - hu_w(k)) - (1 - 0.5aT)v_c(k) = 0$$

$$0.5bTv_c^2(k+1) + (1 + 0.5aT)v_c(k+1) + \Delta(k) = 0 \quad (4-8)$$

โดยที่

$$\Delta(k) = T(0.5bv_c^2(k) + d - hu_w(k)) - (1 - 0.5aT)v_c(k)$$

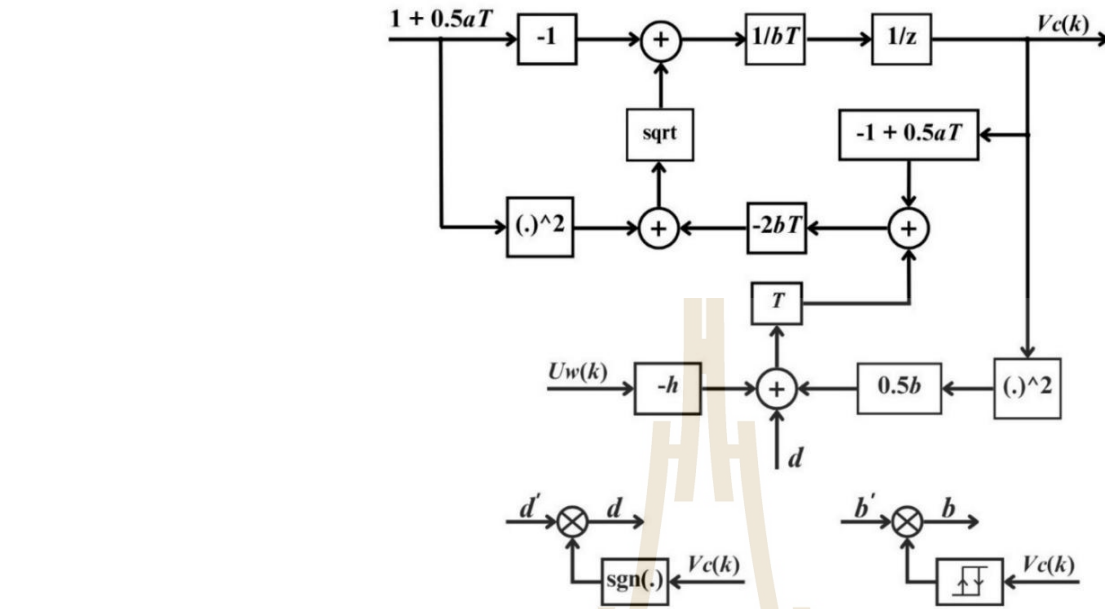
สมการกำลังสองที่ได้รับ มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า $v_c(k + 1)$ เพียงตัวเดียวเท่านั้น และให้รากหรือคำตอบที่ชัดเจนที่มีรูปแบบปิดดังนี้

$$v_c(k + 1) = \frac{-(1 + 0.5aT) \pm \sqrt{(1 + 0.5aT)^2 - 2bT\Delta(k)}}{bT} \quad (4-9)$$

สมการกำลังสองให้คำตอบที่มีเครื่องหมาย ‘ $\pm$ ’ อยู่ข้างหน้ารากที่สอง นั่นคือคำตอบ $v_c(k + 1)$ มีสองค่าในเวลาเดียวกัน ถ้าเปลี่ยนเครื่องหมาย ‘ $\pm$ ’ ไปเป็นเครื่องหมาย ‘ $-$ ’ คำตอบ $v_c(k + 1)$ จะมีค่าที่ไม่แน่นอน แต่ถ้าเปลี่ยนเครื่องหมาย ‘ $\pm$ ’ ไปเป็นเครื่องหมาย ‘ $+$ ’ คำตอบ $v_c(k + 1)$ จะมีค่าที่แน่นอน ดังนั้นจึงเลือกเครื่องหมาย ‘ $+$ ’ แทนที่เครื่องหมาย ‘ $\pm$ ’

$$v_c(k + 1) = \frac{-(1 + 0.5aT) + \sqrt{(1 + 0.5aT)^2 - 2bT\Delta(k)}}{bT} \quad (4-10)$$

สมการที่ (4-10) คือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal rule model) ที่ประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ และ $b \neq 0$ เพราะตัวหารต้องไม่เท่ากับศูนย์ แต่เมื่อ $v_c(k) = 0$ จะได้ว่า $b = b' \frac{v_c(k)}{|v_c(k)| + \varepsilon} = b' \frac{0}{|0| + \varepsilon} = 0$ ถ้าต้องการ $b \neq 0$ จะกำหนดเงื่อนไขใหม่ดังนี้ เมื่อ $|v_c(k)| \leq \varepsilon$ และ $v_c(k) - v_c(k - 1) < 0$ จะได้ว่า $b = b'$ หรือ เมื่อ $v_c(k) > \varepsilon$ จะได้ว่า $b = b'$ และ เมื่อ $|v_c(k)| \leq \varepsilon$ และ $v_c(k) - v_c(k - 1) > 0$ จะได้ว่า $b = -b'$ หรือ เมื่อ $v_c(k) < -\varepsilon$ จะได้ว่า $b = -b'$ โดยที่ ε คือค่าบวกที่มีค่าน้อยมาก แนวคิดของการสร้างแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมูแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพกรอบของแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู

4.4 แบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์

วิธีอนุกรมเทย์เลอร์ในสมการที่ (3-12) เปลี่ยนแบบจำลองพลวัตในเวลาต่อเนื่องในสมการที่ (4-1) ไปเป็นความสัมพันธ์เวียนบังเกิดหรือสมการผลต่างสืบเนื่อง

$$v_c(k+1) = v_c(k) + T\dot{v}_c(k) + 0.5T^2\ddot{v}_c(k) \quad (4-11)$$

การพิจารณาแบบจำลองพลวัตในสมการที่ (4-1) ในการวนซ้ำที่เวลาปัจจุบัน จะได้ว่า

$$\dot{v}_c(k) = -av_c(k) - b(k)v_c^2(k) - d(k) + hu_w(k) \quad (4-12)$$

โดยที่

$$b = b(k) = b' \frac{v_c(k)}{|v_c(k)| + \varepsilon} \quad \text{และ} \quad d = d(k) = d' \frac{v_c(k)}{|v_c(k)| + \varepsilon}$$

การหาอนุพันธ์แบบจำลองพลวัตการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่องในสมการที่ (4-1) เทียบกับเวลา จะได้ว่า

$$\dot{v}_c = -\dot{a}v_c - a\dot{v}_c - \dot{b}v_c^2 - 2bv_c\dot{v}_c - \dot{d} + \dot{h}u_w + hu_{\dot{w}}$$

โดยที่ $\dot{a} = 0$, $\dot{h} = 0$, $\dot{b}' = 0$ และ $\dot{d}' = 0$

$$\ddot{v}_c = -a\dot{v}_c - \dot{b}v_c^2 - 2bv_c\dot{v}_c - \dot{d} + h\dot{u}_w$$

เมื่อพิจารณาการวนซ้ำที่เวลาปัจจุบัน จะเขียนได้ว่า

$$\ddot{v}_c(k) = -a\dot{v}_c(k) - \dot{b}(k)v_c^2(k) - 2b(k)v_c(k)\dot{v}_c(k) - \dot{d}(k) + h\dot{u}_w(k)$$

$$\ddot{v}_c(k) = -(a + 2b(k)v_c(k))\dot{v}_c(k) - \dot{b}(k)v_c^2(k) - \dot{d}(k) + h\dot{u}_w(k)$$

โดยที่

$$\dot{u}_w = \dot{u}_w(k) = \frac{u_w(k) - u_w(k-1)}{T}$$

การหาอนุพันธ์ $b = b' \frac{v_c}{|v_c| + \epsilon}$ และ $d = d' \frac{v_c}{|v_c| + \epsilon}$ เทียบกับเวลา การพิจารณา $|v_c| = v_c \text{sgn}(v_c)$ และ $\dot{\epsilon} = 0$ และการประมาณว่า $\text{sgn}(v_c)$ เป็นค่าคงที่ จะได้ว่า

$$\dot{b} = b' \frac{(|v_c| + \epsilon)\dot{v}_c - v_c(\dot{v}_c \text{sgn}(v_c) + \dot{\epsilon})}{(|v_c| + \epsilon)^2}$$

$$\dot{b} = b' \frac{|v_c|\dot{v}_c + \epsilon\dot{v}_c - \dot{v}_c v_c \text{sgn}(v_c)}{(|v_c| + \epsilon)^2}$$

$$\dot{b} = b' \frac{\dot{v}_c |v_c| + \epsilon\dot{v}_c - \dot{v}_c |v_c|}{(|v_c| + \epsilon)^2}$$

$$\dot{b} = b' \frac{\epsilon}{(|v_c| + \epsilon)^2} \dot{v}_c$$

เมื่อพิจารณาการวนซ้ำที่เวลาปัจจุบัน จะได้ว่า

$$\dot{b} = \dot{b}(k) = \frac{b'\epsilon}{(|v_c(k)| + \epsilon)^2} \dot{v}_c(k)$$

$$\dot{b}(k)v_c^2(k) = \frac{b'\varepsilon v_c^2(k)}{(|v_c(k)| + \varepsilon)^2} \dot{v}_c(k)$$

$$\text{และ } \dot{d} = d' \frac{(|v_c| + \varepsilon)v_c - v_c(v_c \text{sgn}(v_c) + \varepsilon)}{(|v_c| + \varepsilon)^2}$$

$$\dot{d} = d' \frac{\varepsilon}{(|v_c| + \varepsilon)^2} \dot{v}_c$$

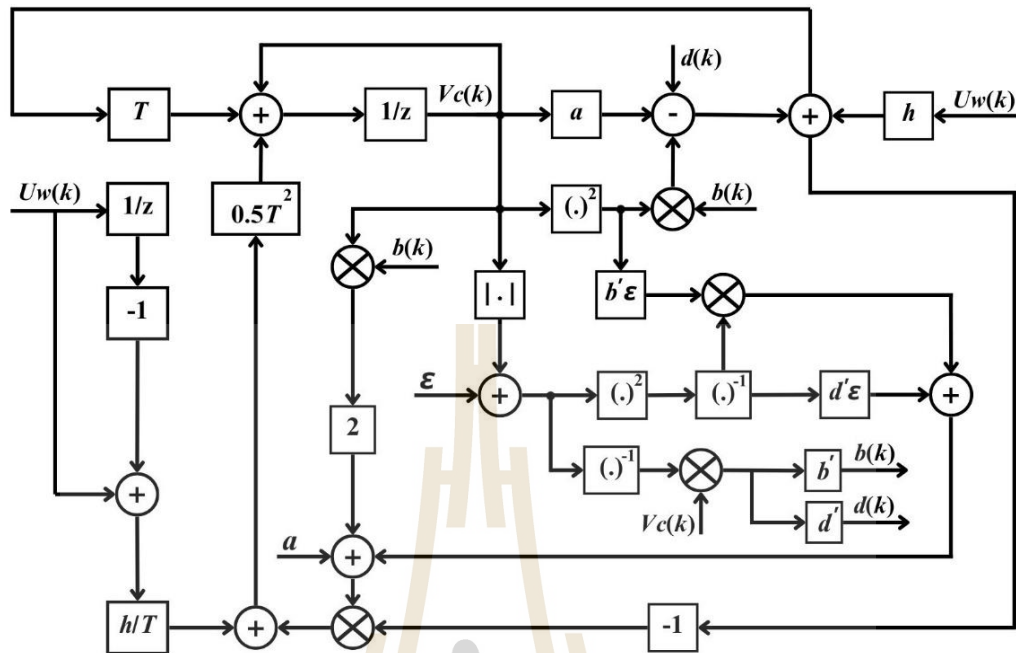
เมื่อพิจารณาการวนซ้ำที่เวลาปัจจุบัน จะได้ว่า

$$\dot{d} = \dot{d}(k) = \frac{d'\varepsilon}{(|v_c(k)| + \varepsilon)^2} \dot{v}_c(k)$$

หลังจากการหาอนุพันธ์แบบจำลองพลวัตของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่องเทียบกับเวลา และการหาอนุพันธ์พจน์ที่เกี่ยวข้องเทียบกับเวลา ต่อมาแทนค่าพจน์ $\dot{b}(k)v_c^2(k)$ และ $\dot{d}(k)$ และจัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \ddot{v}_c(k) = & - \left(a + 2b(k)v_c(k) + \frac{b'\varepsilon v_c^2(k)}{(|v_c(k)| + \varepsilon)^2} + \frac{d'\varepsilon}{(|v_c(k)| + \varepsilon)^2} \right) \dot{v}_c(k) \\ & + h\ddot{u}_w(k) \end{aligned} \quad (4-13)$$

สมการที่ (4-11), (4-12) และ (4-13) คือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor expansion model) ที่ประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ แนวคิดของการสร้างแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภาพกรอบของแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์

4.5 สรุป

บทนี้ได้สร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการที่ประกอบด้วย แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ ที่มีหน้าที่ประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าหรือถอยหลังของยานพาหนะในทางตรงหนึ่งมิติ การประมาณค่าอัตราเร็วดังกล่าวเปรียบเทียบกับการใช้วิธีออยเลอร์ย้อนหลัง วิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และวิธีอนุกรมเทย์เลอร์ ประมาณค่าคำตอบหรือผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ไม่เชิงเส้นอันดับหนึ่ง แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังมีความเสถียร เพราะเมื่อวิธีออยเลอร์ย้อนหลังและวิธีออยเลอร์ไปหน้ามีขนาดขั้นเท่ากัน วิธีออยเลอร์ย้อนหลังจะมีความเสถียรมากกว่า และแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมูมีความเสถียรเช่นเดียวกัน แต่แบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์มีโครงสร้างการคำนวณที่ซับซ้อนมากกว่า แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการคือแบบจำลองพลวัตในเวลา discret ที่มีการคำนวณอัตราเร็วในลักษณะวนซ้ำ นั่นคือปริมาณอินพุตและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าในรอบของการคำนวณที่เวลาปัจจุบัน จะนำมาคำนวณหาอัตราเร็วของยานพาหนะในรอบของการคำนวณถัดไป การนำบล็อกซิมมูลิงค์ที่มีฟังก์ชันแตกต่างกันมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน จะสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการที่อยู่ในรูปของระบบย่อยที่ใช้จำลองสถานการณ์ การเขียนโปรแกรมหรือชุดคำสั่งภาษาซีที่ไม่มีการทำงานบกพร่อง จะสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการที่ประมาณค่าอัตราเร็วในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูปและแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการต้องการค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องในการประมาณค่าอัตราเร็ว

บทที่ 5

การจำลองสถานการณ์แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ประมาณค่าอัตราเร็วของ ยานพาหนะ

5.1 กล่าวนำ

บทที่ 5 กล่าวถึงการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะและยานพาหนะไฟฟ้า พร้อมกับการจำลองสถานการณ์แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ ที่ประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ การเปรียบเทียบระหว่างอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าและผลตอบสนองอัตราเร็ว จะใช้ตรวจสอบและแสดงถึงสมรรถนะของการประมาณค่าอัตราเร็วในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว เมื่อพิจารณาระบบควบคุมอัตราเร็วของยานพาหนะ แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการดังกล่าว จะได้รับปริมาณอินพุตที่เป็นเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีต เมื่อพิจารณาระบบควบคุมอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้า แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ จะได้รับปริมาณอินพุตที่เป็นสัญญาณวัดกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ เมื่อสัญญาณวัดอัตราเร็วที่เป็นสัญญาณป้อนกลับเกิดการขาดหาย แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง หรือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ (แผนการหนึ่งเท่านั้น) จะจ่ายและให้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า แทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว นั่นคือสัญญาณป้อนกลับเปลี่ยนไปเป็นอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า ผลการจำลองสถานการณ์แสดงถึงความสมมูลกันระหว่างการวัดอัตราเร็วและการประมาณค่าอัตราเร็วของแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ

5.2 แนวทางในการจำลองสถานการณ์การประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ

การจำลองสถานการณ์จะนำมาใช้ตรวจสอบสมรรถนะในการประมาณค่าอัตราเร็วของแบบจำลองเชิงตัวเลขที่นำเสนอที่ประกอบด้วย แบบจำลองออยเลอร์ย้อนกลับ แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ โปรแกรมแมทแลบซิมูลิงค์ซิมสเคป (MATLAB-Simulink-Simscape) มีระบบย่อยและบล็อกที่เป็นองค์ประกอบของอัลกอริทึมการดำเนินการทางคณิตศาสตร์และตรรกะ ฟังก์ชันเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น การจัดการข้อมูลและสัญญาณ การประมวลผล

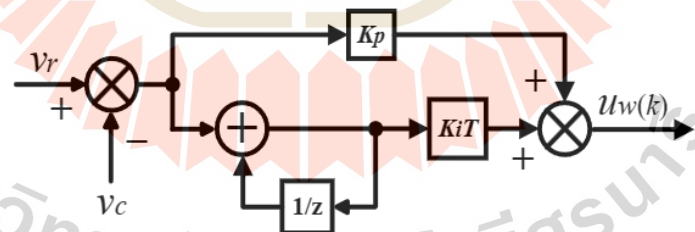
สัญญาณในเวลาต่อเนื่องและในเวลาติดครีต การสร้างและการแสดงสัญญาณในโดเมนเวลาและในโดเมนความถี่ และการอำนวยความสะดวกในการสร้างแบบจำลองวงจรไฟฟ้า วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ระบบพลวัตทางไฟฟ้า ระบบพลวัตเชิงกล และระบบไฟฟ้าเชิงกล ระบบพลวัตทางวิศวกรรมที่ซับซ้อนจะเกิดจากการนำระบบย่อยและบล็อกดังกล่าวมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน นั่นคือการสร้างแบบจำลองของระบบพลวัตทางวิศวกรรมที่ซับซ้อนมีความสะดวกและใช้เวลาไม่นานมาก เพราะขั้นตอนการเขียนโปรแกรมหรือการเขียนโค๊ดแทบไม่มีความจำเป็นในการสร้างแบบจำลองของระบบโปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงค์ซิมสเคปจึงนำมาใช้สร้างระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดที่ประกอบด้วยแบบจำลองพลวัตการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่อง (vehicle model) หรือแบบจำลองของยานพาหนะไฟฟ้า ตัวควบคุมพีไอแบบติดครีต แบบจำลองออยเลอร์ย้อนกลับ แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ แนวคิดของการสร้างตัวควบคุมพีไอแบบติดครีตแสดงในรูปที่ 5.1 แนวคิดของการสร้างแบบจำลองของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่องแสดงในรูปที่ 5.2 แนวคิดของการสร้างแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ แสดงในรูปที่ 4.2 ในรูปที่ 4.3 และในรูปที่ 4.4 ตามลำดับ แนวคิดของการสร้างระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดที่มีแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง หรือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ที่ประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะที่เปรียบเทียบกับผลตอบสนอง (กรณีหนึ่ง) แสดงในรูปที่ 5.3 และแนวคิดของการใช้สัญญาณป้อนกลับที่เป็นอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าแทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว หลังจากการขาดหายของสัญญาณวัดอัตราเร็วในทางเดินป้อนกลับ (กรณีที่สอง) แสดงในรูปที่ 5.4

การจำลองสถานการณ์ในกรณีหนึ่งพิจารณาระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ (cruise control) ที่แสดงในรูปที่ 5.3 ตัวควบคุมพีไอแบบติดครีตในสมการที่ (3-9) จะเลียนแบบพฤติกรรมของการขับขี่ในสภาพปกติของผู้ขับขี่ยานพาหนะ และได้รับสัญญาณป้อนกลับที่เป็นสัญญาณวัดอัตราเร็วตลอดเวลา แบบจำลองเชิงกลการเคลื่อนที่ของยานพาหนะคือแบบจำลองพลวัตในเวลาต่อเนื่องในสมการที่ (3-4) ตัวควบคุมพีไอแบบติดครีตจ่ายแรงขับเคลื่อนและแรงเบรกถึงแบบจำลองเชิงกลของยานพาหนะ แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ ได้รับเอาต์พุตของตัวควบคุมพีไอและประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะพร้อมกันและนำมาเปรียบเทียบกับผลตอบสนองอัตราเร็ว (velocity response) การเปรียบเทียบจะแสดงถึงสมรรถนะของการประมาณค่าในสถานะชั่วครู่และในสถานะอยู่ตัว เมื่อยานพาหนะที่พิจารณาคือยานพาหนะไฟฟ้า ตัวควบคุมพีไอแบบติดครีตจะเลียนแบบผู้ขับขี่ยานพาหนะ และแบบจำลองยานพาหนะไฟฟ้าจะ

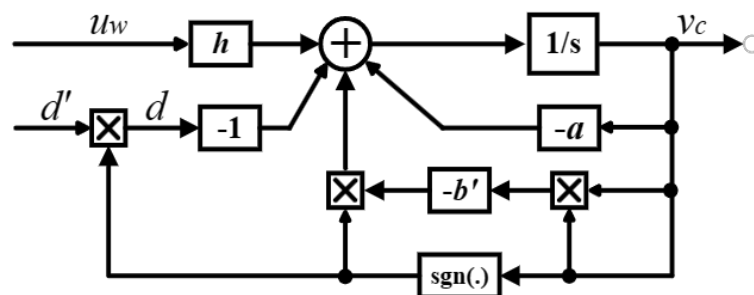
ประกอบด้วยแบบจำลองเชิงกลซิมมูลิ์คซิมสเคปของยานพาหนะ แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ดีซีแม่เหล็กถาวรในสมการที่ (3-5) และ (3-6) วงจรเซชบริดจ์ และพีดับเบิลยูเอ็ม ตัวควบคุมพีโอแบบดิสครีต

ได้รับสัญญาณป้อนกลับที่เป็นสัญญาณวัดอัตราเร็วตลอดเวลา และจ่ายแรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงหรือสัญญาณอ้างอิงถึงพีดับเบิลยูเอ็ม แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์สร้างทอร์กขับเคลื่อนและทอร์กเบรก และจ่ายถึงแบบจำลองเชิงกลของยานพาหนะ แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ ได้รับสัญญาณวัดกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์และประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะพร้อมกัน

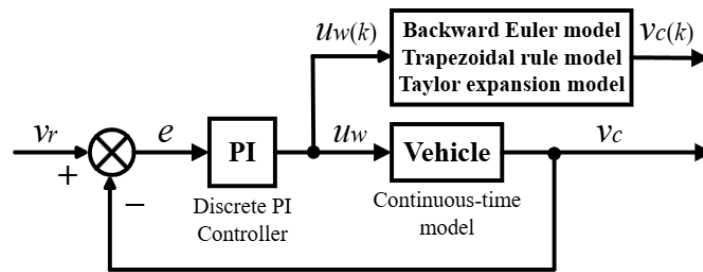
การจำลองสถานการณ์ในกรณีที่สองพิจารณาระบบควบคุมอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่แสดงในรูปที่ 5.4 และเหมือนกับการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่หนึ่ง แต่หลังจากระบบควบคุมวงปิดให้ผลตอบสนองที่ติดตามอัตราเร็วอ้างอิง สัญญาณวัดอัตราเร็ว (v_c) จะเกิดการขาดหาย ระบบควบคุมวงปิดจะเปลี่ยนไปเป็นระบบวงเปิดในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เพราะระบบดังกล่าวไม่มีสัญญาณป้อนกลับ ต่อมาแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง หรือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ (แผนการหนึ่งเท่านั้น) จ่ายอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า ($v_c(k)$) ถึงตัวควบคุม นั่นคือสัญญาณป้อนกลับคืออัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจะใช้ตรวจสอบสมรรถนะของผลตอบสนองอัตราเร็วและตรวจสอบความเป็นไปได้ในการใช้งานแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ แทนที่การวัดอัตราเร็ว



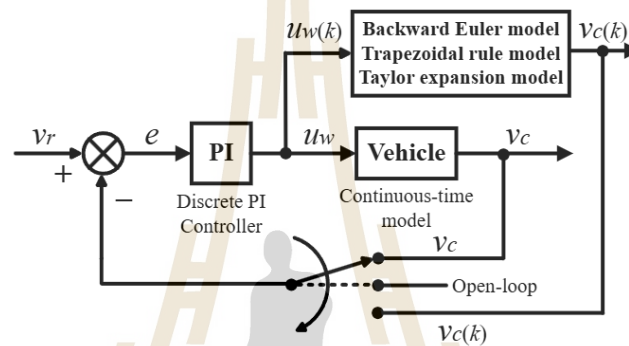
รูปที่ 5.1 แผนภาพกรอบของตัวควบคุมพีโอแบบดิสครีต



รูปที่ 5.2 แผนภาพกรอบของแบบจำลองของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่อง



รูปที่ 5.3 แผนภาพกรอบของระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดที่มีการประมาณค่าอัตราเร็วในกรณีทีหนึ่ง



รูปที่ 5.4 แผนภาพกรอบของการใช้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าเป็นสัญญาณป้อนกลับในกรณีที่สอง

5.3 ผลการจำลองสถานการณ์แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ

ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดที่แสดงในรูปที่ 5.3 และ 5.4 ที่ประกอบด้วยแบบจำลองพลวัตไม่เชิงเส้นของการเคลื่อนที่ยานพาหนะในเวลาต่อเนื่อง ในสมการที่ (3-4) และตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีตรวมถึงแบบจำลองออยเลอร์ย้อนกลับ แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์มีค่าพารามิเตอร์และค่าเกณฑ์ดังนี้ $a = 1 \text{ s}^{-1}$, $b' = 0.1 \text{ m}^{-1}$, $d' = 0.1 \text{ m/s}^2$, $h = 2 \text{ kg}^{-1}$, $K_p = 2 \text{ kg/s}$, $K_i = 2 \text{ kg/s}^2$ และ $\varepsilon = 0.01$ และการจำลองสถานการณ์มีขนาดขั้นคงที่ (fixed stepsize) 0.001 วินาที

ในการจำลองสถานการณ์ในกรณีทีหนึ่ง อัตราเร็วอ้างอิง (velocity reference) $v_r = 3 \text{ m/s}$ จะบังคับให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าในช่วงระยะเวลา 9 วินาที ต่อมาอัตราเร็วอ้างอิง $v_r = 0$ จะบังคับให้ยานพาหนะจอดหยุดนิ่งในช่วงระยะเวลา 9 วินาที และอัตราเร็วอ้างอิง $v_r = -3 \text{ m/s}$ จะบังคับให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ถอยหลังในช่วงระยะเวลา 9 วินาที เมื่อตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีต แบบจำลองออยเลอร์ย้อนกลับ แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ มีขนาดขั้น 0.001 วินาทีเท่ากัน แบบจำลองเชิงตัวเลขที่นำเสนอ 3 แผนการ จะ

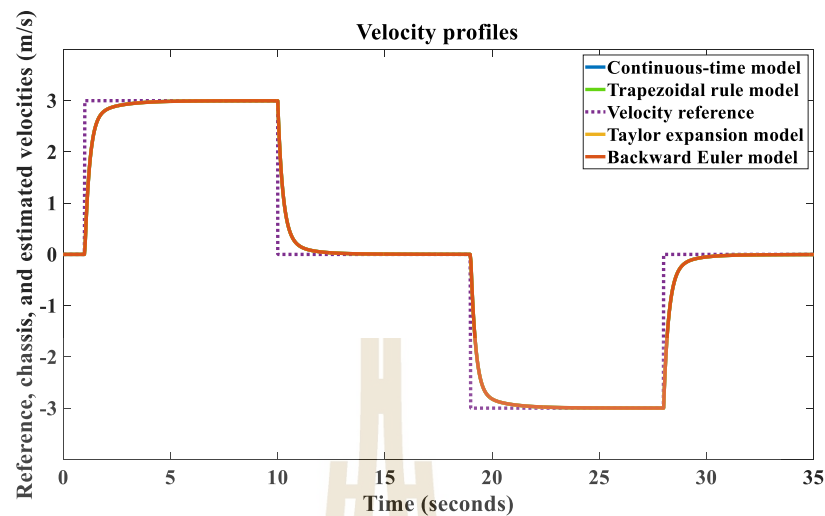
ประมาณค่าอัตราเร็วที่มีความถูกต้องและตรงกับผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะ (continuous-time model) ในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.5

และเมื่อตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีตมีขนาดขั้น 0.01 วินาที และแบบจำลองออยเลอร์ย้อนกลับ แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ มีขนาดขั้น 0.2 วินาที เท่ากัน แบบจำลองเชิงตัวเลขที่นำเสนอ 3 แผนการจะประมาณค่าอัตราเร็วที่มีความผิดพลาดและช้ากว่าผลตอบสนองอัตราเร็วในสถานะชั่วคราวที่แสดงในรูปที่ 5.6 เพราะแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการมีการประวิงเวลาของการคำนวณในแต่ละการวนซ้ำ แต่แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการจะประมาณค่าอัตราเร็วที่มีความถูกต้องในสถานะอยู่ตัว นั่นคือเมื่อแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการมีขนาดขั้นเพิ่มขึ้น แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการยังคงมีความเสถียรในการประมาณค่าอัตราเร็ว เมื่อพิจารณา รูปที่ 5.7 เมื่อเวลาผ่านไป อินทิเกรตค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาดการประมาณค่าอัตราเร็วเทียบกับเวลา จะสะสมขนาดของความผิดพลาดระหว่างผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าที่เกิดขึ้นในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัวตลอดช่วงระยะเวลาในการจำลองสถานการณ์ อินทิเกรตค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาดจึงไม่มีค่าลดลง และนำมาใช้เปรียบเทียบกับสมรรถนะของแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ อินทิเกรตค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาดที่น้อยกว่าตั้งแต่เวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาที่พิจารณา หมายความว่า การประมาณค่าอัตราเร็วมีสมรรถนะที่ดีกว่าในเวลาที่พิจารณา ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะดังกล่าวแสดงในรูปที่ 5.7 อินทิเกรตค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในสถานะชั่วคราว และเกือบคงที่ในสถานะอยู่ตัว แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู ให้อินทิเกรตค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (เส้นสีเขียว) น้อยที่สุดเกือบตลอดช่วงระยะเวลาในการจำลองสถานการณ์ แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมูจึงมีการประมาณค่าอัตราเร็วที่มีสมรรถนะดีที่สุด แต่แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง ให้อินทิเกรตค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (เส้นสีน้ำตาล) มากที่สุดเกือบตลอดช่วงระยะเวลาในการจำลองสถานการณ์ แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง จึงมีการประมาณค่าอัตราเร็วที่มีสมรรถนะต่ำที่สุด และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ ให้อินทิเกรตค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาด (เส้นสีเหลือง) น้อยกว่าเกือบตลอดช่วงระยะเวลาในการจำลองสถานการณ์ แบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์จึงมีการประมาณค่าอัตราเร็วที่มีสมรรถนะดีกว่า

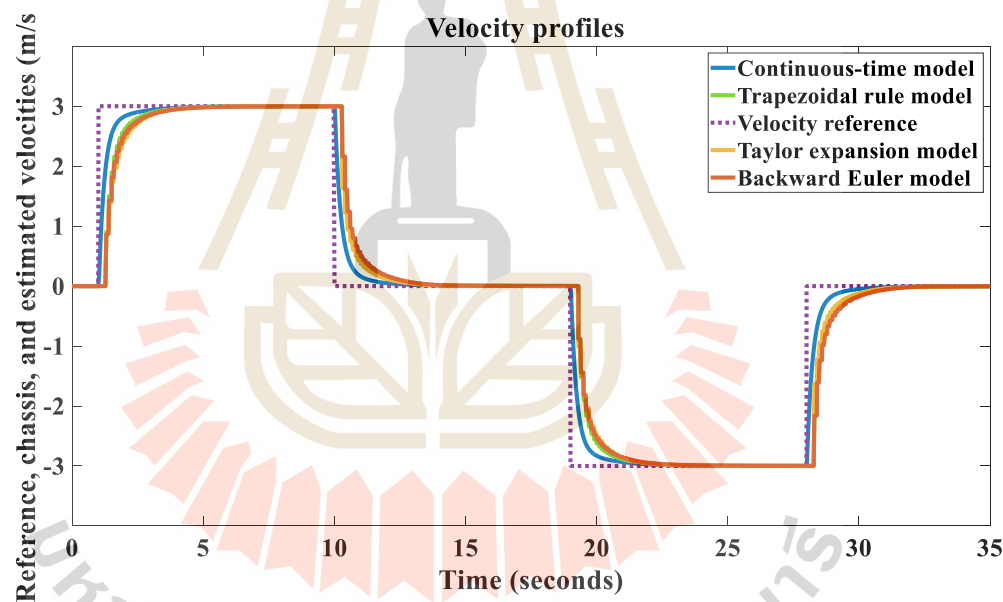
ในการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่สอง ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดที่แสดงในรูปที่ 5.4 มีอัตราเร็วอ้างอิงที่เหมือนกับอัตราเร็วอ้างอิงในการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่หนึ่ง แต่สัญญาณวัดอัตราเร็ว (v_c) ที่เป็นสัญญาณป้อนกลับจะเกิดการขาดหายในวินาทีที่ 5 จนถึงวินาทีที่ 6 นั่นคือระบบควบคุมวงปิดเปลี่ยนไปเป็นระบบวงเปิดในช่วงระยะเวลา 1 วินาที หลังจากตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีตได้รับสัญญาณป้อนกลับที่เป็นอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า ($v_c(k)$) ระบบวงเปิดจะเปลี่ยนไปเป็นระบบควบคุมวงปิดอีกครั้งหนึ่ง แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง หรือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ (แผนการหนึ่งเท่านั้น) จำยอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า ($v_c(k)$)

ถึงตัวควบคุม เมื่อตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีต แบบจำลองออยเลอร์ย้อนกลับ แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ มีขนาดขั้น 0.001 วินาทีเท่ากัน หลังจากสัญญาณวัดอัตราเร็ว (v_c) ขาดหาย ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้น ความแตกต่างระหว่างอัตราเร็วอ้างอิงและอัตราเร็วของยานพาหนะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและไม่มีขอบเขตภายในช่วงระยะเวลาสั้น เพราะยานพาหนะไร้การควบคุม และแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ ประมาณค่าอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นและตรงกับอัตราเร็วของยานพาหนะ แต่หลังจากตัวควบคุมพีไอได้รับสัญญาณป้อนกลับที่เป็นอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า ($v_c(k)$) การควบคุมการประมาณค่าอัตราเร็วเกิดขึ้น และมีความสมมูลกับการควบคุมอัตราเร็วของยานพาหนะ นั่นคือระบบควบคุมวงปิดเสมือนเกิดขึ้น และให้อัตราเร็วของยานพาหนะ (continuous-time model) ที่แตกต่างจากอัตราเร็วอ้างอิง (velocity reference) ลดลง ยานพาหนะจึงเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว (v_c) ที่ติดตามอัตราเร็วอ้างอิง (v_r) ที่แสดงในรูปที่ 5.8

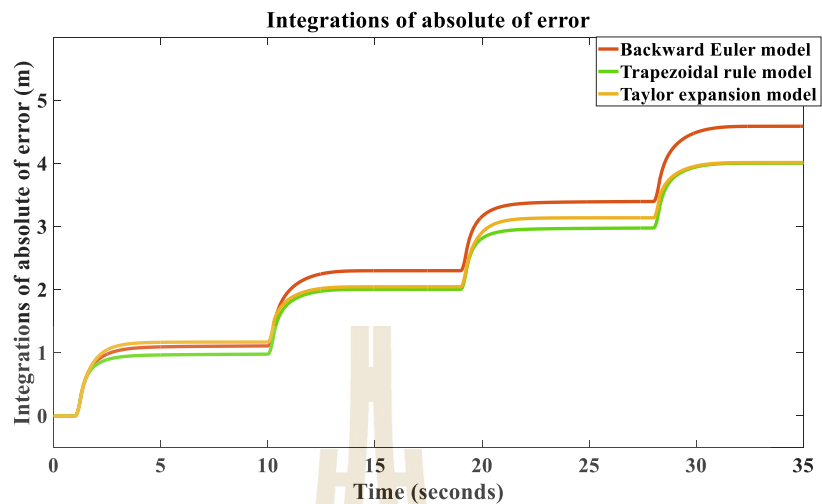
เมื่อตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีตมีขนาดขั้น 0.01 วินาที และแบบจำลองออยเลอร์ย้อนกลับ แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ มีขนาดขั้น 0.1 วินาทีเท่ากัน เนื่องจากแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ ประมาณค่าอัตราเร็วที่มีความผิดพลาดและช้ากว่าผลตอบสนองอัตราเร็วในสถานะชั่วครู่ ความสมมูลระหว่างการควบคุมการประมาณค่าอัตราเร็วและการควบคุมอัตราเร็วของยานพาหนะ จึงน้อยลง นั่นคือการควบคุมดังกล่าวมีความแตกต่างกัน หลังจากสัญญาณวัดอัตราเร็ว (v_c) ขาดหาย ยานพาหนะไร้การควบคุม ต่อมาตัวควบคุมพีไอได้รับสัญญาณป้อนกลับที่เป็นอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า ($v_c(k)$) ระบบควบคุมวงปิดเสมือนให้อัตราเร็วของยานพาหนะที่แตกต่างจากอัตราเร็วอ้างอิงลดลง ยานพาหนะยังคงเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่ติดตามอัตราเร็วอ้างอิงที่แสดงในรูปที่ 5.9 แต่มีการแกว่งในสถานะชั่วครู่ ดังนั้นการใช้งานแบบจำลองออยเลอร์ย้อนกลับ แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ แทนที่การวัดอัตราเร็ว มีความเป็นไปได้ เพราะแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการที่มีขนาดขั้นไม่น้อย มีพลวัตที่แตกต่างจากแบบจำลองของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่อง และยังคงให้ระบบควบคุมเสมือนรักษาการควบคุมการเคลื่อนที่ของยานพาหนะได้



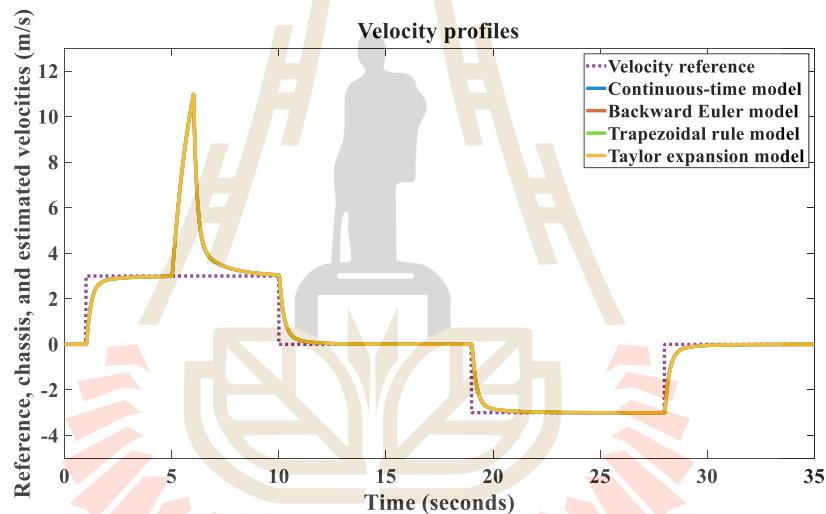
รูปที่ 5.5 ผลตอบสนองอัตราเร็วและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าที่เกิดจากตัวควบคุมพีไอ และแบบจำลองเชิงตัวเลขที่นำเสนอมีขนาดขั้น 0.001 วินาทีเท่ากัน



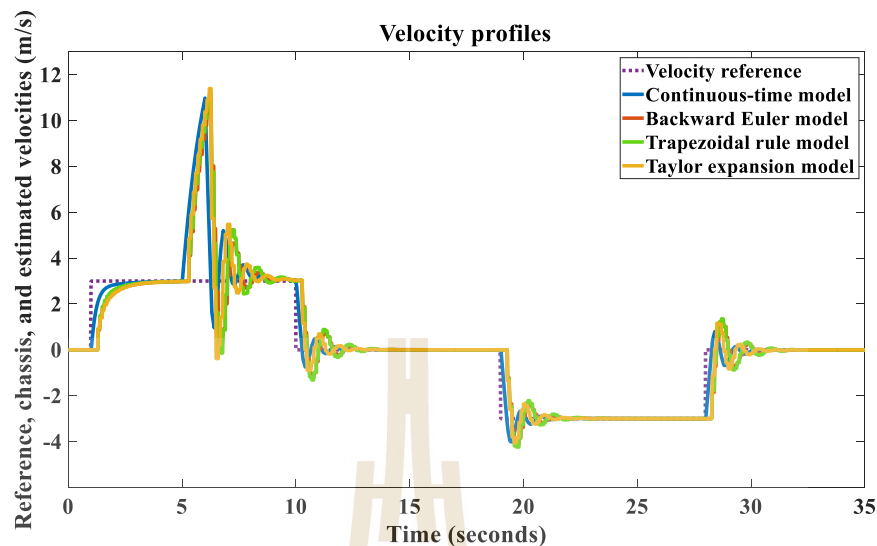
รูปที่ 5.6 ผลตอบสนองอัตราเร็วและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าที่เกิดจากตัวควบคุมพีไอ มีขนาดขั้น 0.01 วินาทีและแบบจำลองเชิงตัวเลขมีขนาดขั้น 0.2 วินาที



รูปที่ 5.7 อินทิเกรตค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาดการประมาณค่าอัตราเร็วเทียบกับเวลา



รูปที่ 5.8 ผลตอบสนองอัตราเร็วและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าที่เกิดจากการขาดหายของสัญญาณวัดอัตราเร็วและการทำงานแบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีขนาดขั้น 0.001 วินาที แทนที่การวัด



รูปที่ 5.9 ผลตอบสนองอัตราเร็วและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าที่เกิดจากการขาดหายของสัญญาณวัดอัตราเร็วและการใช้งานแบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีขนาดขั้น 0.1 วินาที แทนที่การวัด

5.4 ผลการจำลองสถานการณ์แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้า

แบบจำลองยานพาหนะไฟฟ้าที่ใช้จำลองสถานการณ์ ประกอบด้วยแบบจำลองเชิงกลซิมูลิงค์ซิมสเคปของยานพาหนะ (Simscape driveline) (S. Nayak, A. K. Bohre, P. Kumar and M. L. Kolhe , 2022) แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ดีซีแม่เหล็กถาวรในสมการที่ (3-5) และ (3-6) วงจรแฮชบริดจ์ และฟีดแบ็คเบิลยูเอ็ม โปรแกรมแมทแลบซิมูลิงค์ซิมสเคป มีบล็อกหรือระบบย่อยของมอเตอร์ดีซีแม่เหล็กถาวร วงจรแฮชบริดจ์ และฟีดแบ็คเบิลยูเอ็มที่พร้อมใช้งานและเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเป็นระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนโพลตเชิงกล ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าที่มีแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ แสดงในรูปที่ 5.16 แบบจำลองเชิงตัวเลขดังกล่าวประมาณค่าอัตราเร็วพร้อมกัน ระบบควบคุมอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าที่มีแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังหรือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ (แผนการหนึ่งเท่านั้น) แสดงในรูปที่ 5.18 รูปที่ 5.19 และรูปที่ 5.20 ตามลำดับ หลังจากสัญญาณวัดอัตราเร็วที่เป็นสัญญาณป้อนกลับเกิดการขาดหาย แบบจำลองเชิงตัวเลขหนึ่งแผนการเท่านั้นจะจ่ายและให้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า แทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว นั่นคือสัญญาณป้อนกลับเปลี่ยนไปเป็นอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า

บล็อกฟีดแบ็คเบิลยูเอ็ม (PWM) และบล็อกวงจรแฮชบริดจ์ (H-bridge) ที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกันมีอัตราขยายหรือค่าเกนค่าหนึ่ง บล็อกฟีดแบ็คเบิลยูเอ็มที่มีหน่วยสร้างสัญญาณพาหะภายในบล็อก ได้รับ

สัญญาณอ้างอิงหรือแรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิง และเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณขับเคลื่อนที่มีรูปคลื่นเป็นขบวนสัญญาณพัลส์ แรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงที่มีค่าเปลี่ยนแปลง จะปรับเปลี่ยนความกว้างของขบวนสัญญาณพัลส์ และบล็อกวงจรแฮชบริดจ์ที่มีแหล่งจ่ายแรงดันดีซีภายในบล็อก สร้างแรงดันดีซีเฉลี่ยที่เท่ากับผลคูณระหว่างแรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงและค่าเกนดังกล่าว บล็อกมอเตอร์ดีซีได้รับแรงดันเฉลี่ยที่เป็นแรงดันอาร์เมเจอร์ นั่นคือถ้าแรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงมีค่าเปลี่ยนแปลง บล็อกมอเตอร์ดีซีจะได้รับแรงดันอาร์เมเจอร์เฉลี่ยที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน ตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีต ได้รับความผิดพลาดระหว่างอัตราเร็วอ้างอิงและอัตราเร็วของยานพาหนะหรือผลตอบสนอง และคำนวณแรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิง ถ้าตัวควบคุมพีไอให้แรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงที่มีค่าลบ บล็อกวงจรแฮชบริดจ์จะสร้างแรงดันอาร์เมเจอร์เฉลี่ยที่กลับขั้ว บล็อกวงจรแฮชบริดจ์จ่ายกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ถึงบล็อกมอเตอร์ดีซีที่ทำหน้าที่สร้างทอร์กขับเคลื่อนล้อและทอร์กเบรก ถ้ากระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์มีค่าเปลี่ยนแปลง บล็อกมอเตอร์ดีซีจะสร้างทอร์กที่มีขนาดเปลี่ยนแปลง และถ้ากระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์เปลี่ยนแปลงทิศทางการไหล บล็อกมอเตอร์ดีซีจะสร้างทอร์กกลับทิศทาง บล็อกล้อของยานพาหนะจะเปลี่ยนทอร์กขับเคลื่อนล้อและทอร์กเบรกไปเป็นแรงขับเคลื่อนและแรงเบรกหรือแรงห้ามล้อที่กระทำกับแบบจำลองเชิงกลของยานพาหนะ การเคลื่อนที่ของยานพาหนะจะสัมพันธ์กับกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน นั่นคือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วและอัตราเร่ง หรือหยุดการเคลื่อนที่ และระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดให้ผลตอบสนอง

หน่วยกำเนิดรอบการขับ (drive cycle source FTP75) ของซิมสเคป (S. Nayak, A. K. Bohre, P. Kumar and M. L. Kolhe , 2022) จะสร้างอัตราเร็วอ้างอิงที่มีการเปลี่ยนแปลงเลียนแบบพฤติกรรมเคลื่อนที่ของยานพาหนะในเมืองหรือในชุมชนที่เทียบกับเวลาที่ผ่านมา กล่าวคือยานพาหนะจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้น อัตราเร็วคงที่ และอัตราเร็วลดลง และอาจจะจอดหยุดนิ่ง ช้ากันหลายครั้งหรือหลายรอบ (go-stop-go) แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ ได้รับสัญญาณวัดกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์และประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ ก่อนการคำนวณอัตราเร็ว แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการจะนำสัญญาณวัดกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (i_a) มาคูณกับค่าเกน $\frac{K_t}{r_{wheel}}$ ผลคูณที่ได้รับคือแรงขับเคลื่อนและแรงเบรก (u_w) ที่เป็นอินพุตของแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ นั่นคือ
$$u_w = \frac{K_t}{r_{wheel}} i_a$$

การจำลองสถานการณ์มีค่าพารามิเตอร์และค่าเกนดังนี้ บล็อกพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) มีสัญญาณพาหะภายในที่มีความถี่ 4000 Hz เมื่อแรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงหรือสัญญาณอ้างอิงมีค่าเท่ากับศูนย์ บล็อกพีดับเบิลยูเอ็มสร้างสัญญาณขับเคลื่อนที่เป็นขบวนสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้าง (duty cycle) 0% หรือไม่มีสัญญาณพัลส์ และเมื่อแรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงมีค่าเท่ากับ 5 V บล็อกพีดับเบิลยูเอ็มสร้างสัญญาณขับเคลื่อนที่เป็นขบวนสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้าง 100% และสัญญาณพัลส์มีแรงดัน

5 V บล็อกวงจรเซชบริดจ์ได้รับสัญญาณขับเคลื่อนที่มีแรงดัน 5 V และมีแหล่งจ่ายแรงดันดีซี 400 V อยู่ภายใน บล็อกมอเตอร์ดีซีแม่เหล็กถาวรมีค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ $0.1 \, \Omega$ มีค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ $0.01 \, \text{H}$ มีค่าคงที่ของการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ $0.15 \, \text{V} \cdot \text{s}$ มีค่าคงที่ของการสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า $1.5 \, \text{N} \cdot \text{m/A}$ มีโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ $0.0002 \, \text{kg} \cdot \text{m}^2$ และมีสัมประสิทธิ์การหน่วงหนืด $5 \times 10^{-6} \, \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ และตัวควบคุมฟีดแบ็คดิสครีตมีค่าเกนสัดส่วนหรือค่าเกนพี $2 \, \text{V} \cdot \text{s/m}$ มีค่าเกนอินทิกรัลหรือค่าเกนไอ $0.2 \, \text{V/m}$ และมีขนาดขั้น 0.01 วินาที

แบบจำลองเชิงกลการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่องซิมสเคปมี $\mu_2 = 0$, $g = 9.81 \, \text{m/s}^2$, $\rho_{air} = 1.18 \, \text{kg/m}^3$, $A = 3 \, \text{m}^2$, $C_d = 0.4$, $m = 1200 \, \text{kg}$ และ $\mu_1 = 0.015$ แบบจำลองเชิงกลของยานพาหนะซิมสเคปมีล้อ 4 ล้อ

แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ มี $\mu_2 = 0 \, \text{s/m}$, $g = 9.81 \, \text{m/s}^2$, $\rho_{air} = 1.18 \, \text{kg/m}^3$, $A = 3 \, \text{m}^2$, $C_d = 0.4$, $m = 1200 \, \text{kg}$ และ $\mu_1 = 0.015$ การจำลองสถานการณ์มีช่วงระยะเวลา 2474 วินาที (S. Das, 2021) และมีขนาดขั้นคงที่ (fixed stepsize) 0.001 วินาที และแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการมีขนาดขั้น 0.01 วินาทีเท่ากัน ($T = 0.01 \, \text{s}$) และมีค่าพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 5.1 และค่าพารามิเตอร์และค่าเกนที่สำคัญทุกค่าที่ใช้จำลองสถานการณ์ แสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเชิงตัวเลขในการจำลองสถานการณ์

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเชิงตัวเลข
a	$a = \mu_2 g = (0)(9.81) = 0$
b'	$b' = \frac{0.5 \rho_{air} A C_d}{m} = \frac{(0.5)(1.18)(3)(0.4)}{1200} = 0.00059$
d'	$d' = \mu_1 g = (0.015)(9.81) = 0.14715$
h	$h = \frac{1}{m} = \frac{1}{1200} = 0.00083$

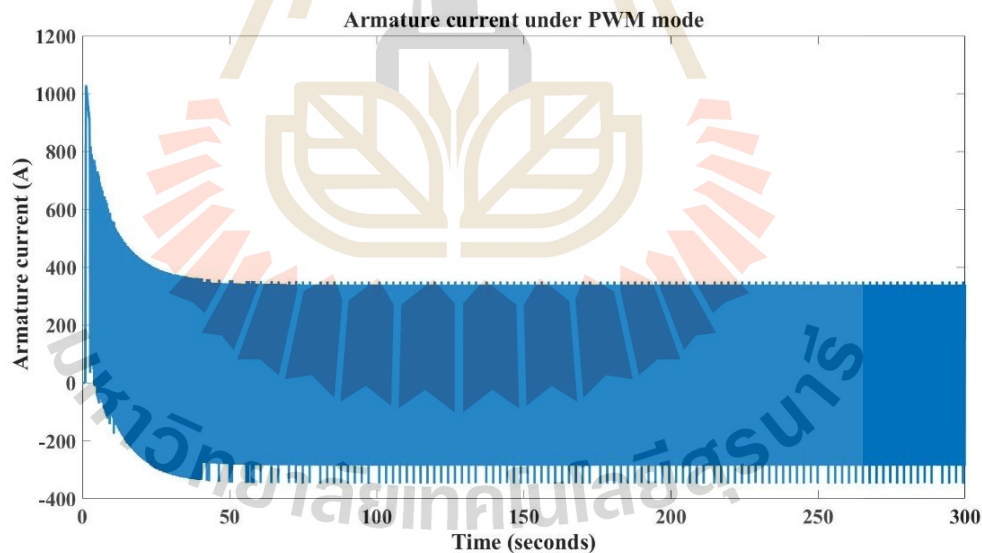
ตารางที่ 5.2 ค่าพารามิเตอร์และค่าเกณฑ์ในการจำลองสถานการณ์

บล็อกพีดับเบิลยูเอ็ม	ความถี่พีดับเบิลยูเอ็ม	4000 Hz
	แรงดันอินพุตที่ 0% ดิวตีไซเคิล	0 V
	แรงดันอินพุตที่ 100% ดิวตีไซเคิล	5 V
	แรงดันเอาต์พุต	5 V
บล็อกเฮชบริดจ์	ความถี่พีดับเบิลยูเอ็ม	4000 Hz
	แอมพลิจูดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม	5 V
	แรงดันดีซีภายใน	400 V
มอเตอร์ดีซีแม่เหล็กถาวร	ค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์	0.1 Ω
	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์	0.01 H
	ค่าคงที่ของการสร้างทอร์ก	1.5 N · m/A
	โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์	0.0002 kg · m ²
ยานพาหนะและล้อ	มวล	1200 kg
	อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	9.81 m/s ²
	พื้นที่ด้านหน้าของยานพาหนะ	3 m ²
	สัมประสิทธิ์ของแรงต้านจากอากาศ	0.4
	ความหนาแน่นของอากาศ	1.18 kg/m ³
	รัศมีของล้อ	0.3 m
	สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างล้อ ยางและผิวถนนที่เกิดจากน้ำหนักรถของ	0.015
	ยานพาหนะ (μ_1)	
	สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืด (μ_2)	0 s/m
ตัวควบคุมพีไอแบบดิส ครีต	ค่าเกณฑ์สัดส่วนหรือค่าเกณฑ์	2 V · s/m
	ค่าเกณฑ์อินทิกรัลหรือค่าเกณฑ์	0.2 V/m

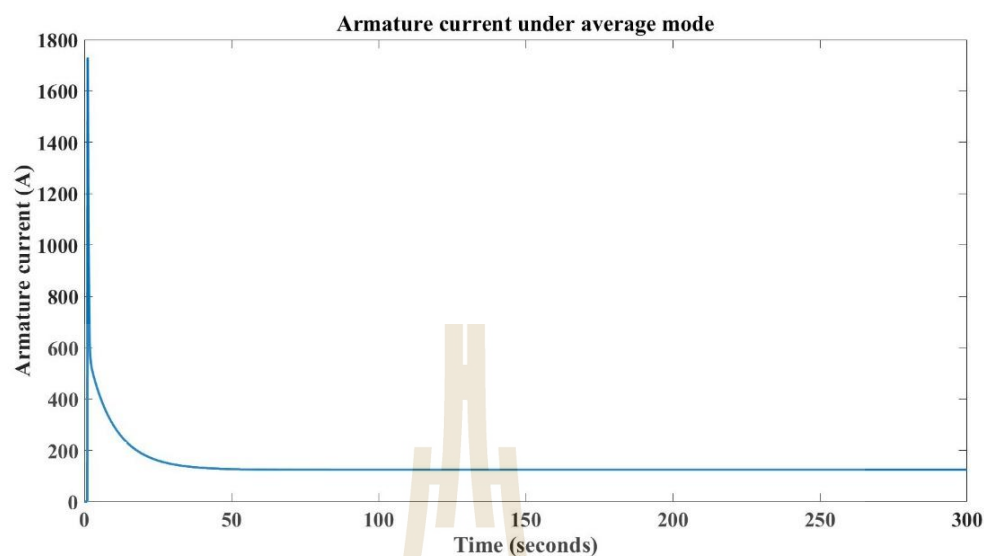
ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าที่ใช้งาน มีบล็อกพีดับเบิ้ลยูเอ็มและบล็อกวงจรเฮชบริดจ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงแรงดันอาร์เมเจอร์เฉลี่ย เมื่อบล็อกมอเตอร์ดีซีได้รับแรงดันอาร์เมเจอร์เฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลง กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่ไหลผ่านบล็อกมอเตอร์ดีซีจะเกิดการเปลี่ยนแปลง และบล็อกมอเตอร์ดีซีจะสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นทอร์กขับเคลื่อนล้อและทอร์กเบรกที่เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน บล็อกล้อของยานพาหนะจะสร้างแรงขับเคลื่อนและแรงเบรกที่เปลี่ยนแปลง นั่นคือบล็อกแบบจำลองเชิงกลของยานพาหนะมีแรงขับเคลื่อนและแรงเบรกที่กระทำที่เปลี่ยนแปลง ยานพาหนะไฟฟ้าจึงเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่เปลี่ยนแปลง บล็อกวงจรเฮชบริดจ์มีสวิทช์แต่ละตัวที่มีลำดับของสถานะเปิดและสถานะปิดที่เกิดจากการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณอ้างอิงและสัญญาณพาหะสามเหลี่ยมที่มีความถี่สูง สวิทช์แต่ละตัวที่มีช่วงระยะเวลาของสถานะเปิดและช่วงระยะเวลาของสถานะปิดที่เปลี่ยนแปลง จะสร้างแรงดันอาร์เมเจอร์เฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลง

เมื่อพิจารณาบล็อกวงจรเฮชบริดจ์ที่มีโหมดพีดับเบิ้ลยูเอ็ม (PWM) การจำลองสถานการณ์ยานพาหนะไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยอัตราเร็ว 25 m/s หรือ 90 km/h ต้องกำหนดให้อัตราเร็วอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 25 m/s ยานพาหนะไฟฟ้าจึงเริ่มต้นเคลื่อนที่จากการหยุดนิ่งและเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้น เพราะแรงดันอาร์เมเจอร์เฉลี่ยมีค่าบวก กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่แสดงในรูปที่ 5.10 มีค่าบวกและเพิ่มขึ้น หลังจากยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง แรงดันอาร์เมเจอร์เฉลี่ยมีค่าบวกที่มากกว่าและค่าบวกที่น้อยกว่าสลับกัน กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกัน ต่อมาแรงดันอาร์เมเจอร์เฉลี่ยมีค่าบวกและค่าลบสลับกัน แต่แรงดันอาร์เมเจอร์เฉลี่ยมีค่าบวกในช่วงระยะเวลาที่นานกว่า และมีค่าลบในช่วงระยะเวลาที่สั้นกว่า กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่แสดงในรูปที่ 5.10 จึงมีค่าบวกและค่าลบสลับกัน แต่กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์มีค่าบวกในช่วงระยะเวลาที่นานกว่า และมีค่าลบในช่วงระยะเวลาที่สั้นกว่าเช่นเดียวกัน กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์เฉลี่ยจึงมีค่าบวก และทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นมีค่าบวก ยานพาหนะไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว (chassis velocity) ที่เพิ่มขึ้นและเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วอ้างอิง (velocity reference) ในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.11 แต่ยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่แสดงในรูปที่ 5.11 ที่เพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันเล็กน้อย เพราะกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์มีค่าบวกและค่าลบสลับกัน แต่กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์มีค่าบวกที่นานกว่า และมีค่าลบที่สั้นกว่า กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์เฉลี่ยจึงมีค่าบวก และทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าเฉลี่ยที่เกิดขึ้นยังคงมีค่าบวก การจำลองสถานการณ์ตั้งแต่ยานพาหนะไฟฟ้าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ในสถานะชั่วคราวจนถึงการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเกือบคงที่ในสถานะอยู่ตัว จะใช้ช่วงระยะเวลายาวนานมาก

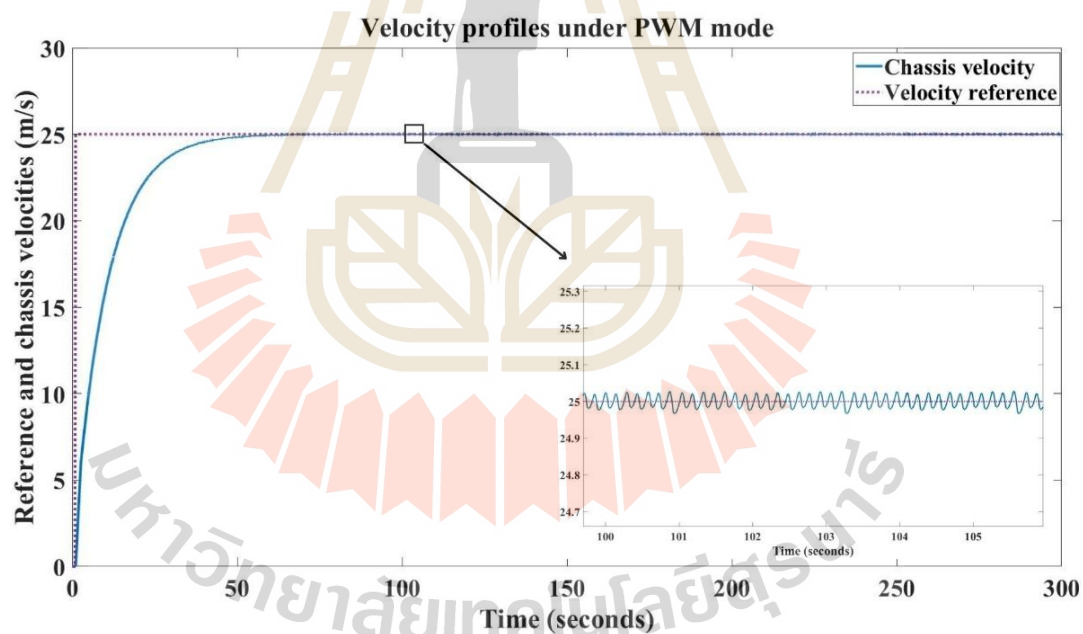
และเมื่อพิจารณาบล็อกรวมจรเฮชบริดจ์ที่มีโหมดเฉลี่ยสัญญาณ (average) ในการจำลองสถานการณ์เหตุการณ์เดียวกัน กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่แสดงในรูปที่ 5.12 ไม่มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกัน และกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ไม่มีค่าบวกและค่าลบสลับกัน นั่นคือกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่แสดงในรูปที่ 5.12 มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ราบเรียบ (smooth) ทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ราบเรียบเช่นเดียวกัน และยานพาหนะไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ที่เท่ากับอัตราเร็วอ้างอิงในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.13 การจำลองสถานการณ์ตั้งแต่ยานพาหนะไฟฟ้าเริ่มต้นการเคลื่อนที่ในสถานะชั่วคราวจนถึงการเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ในสถานะอยู่ตัว จะใช้ช่วงระยะเวลาที่สั้นกว่า ดังนั้นบล็อกรวมจรเฮชบริดจ์ที่มีโหมดพีดับเบิลยูเอ็มและโหมดเฉลี่ยสัญญาณ จะให้ผลการจำลองสถานการณ์อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะไฟฟ้าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้า จะเลือกและกำหนดให้บล็อกรวมจรเฮชบริดจ์มีโหมดเฉลี่ยสัญญาณ การจำลองสถานการณ์ในแต่ละครั้งจึงใช้ช่วงระยะเวลานั้นลง



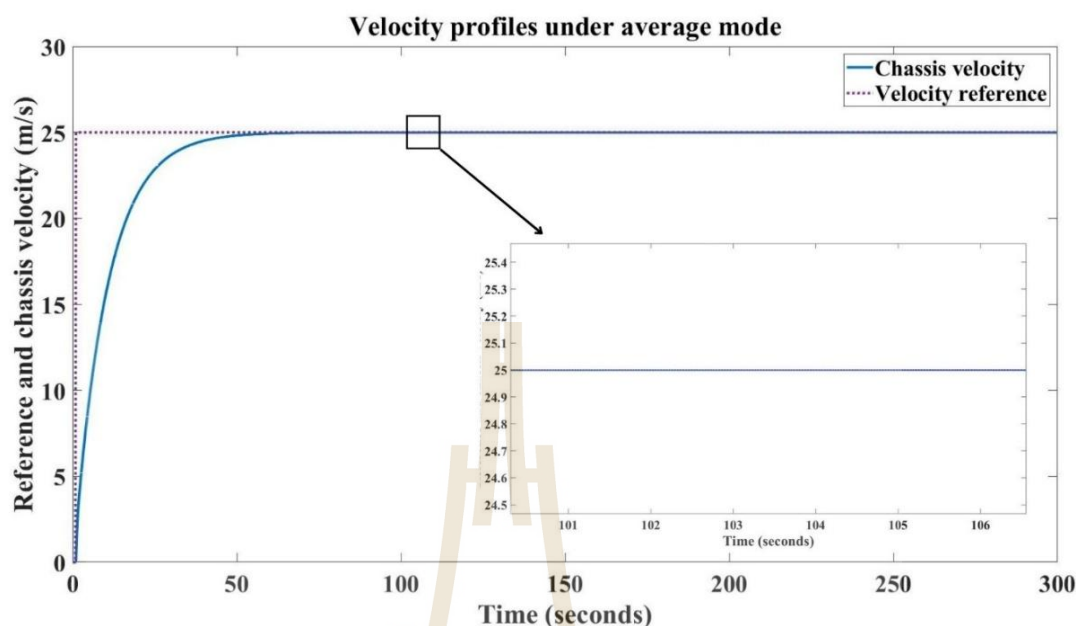
รูปที่ 5.10 กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่เกิดจากบล็อกรวมจรเฮชบริดจ์ที่มีโหมดพีดับเบิลยูเอ็ม จากมอเตอร์ซีแม่เหล็กถาวรที่ใช้โหมด PWM



รูปที่ 5.11 กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่เกิดจากบล็อกวงจรแฮชบริดจ์ที่มีโหมดเฉลี่ยสัญญาณ มอเตอร์
ดีซีแม่เหล็กถาวรที่ใช้โหมด Average



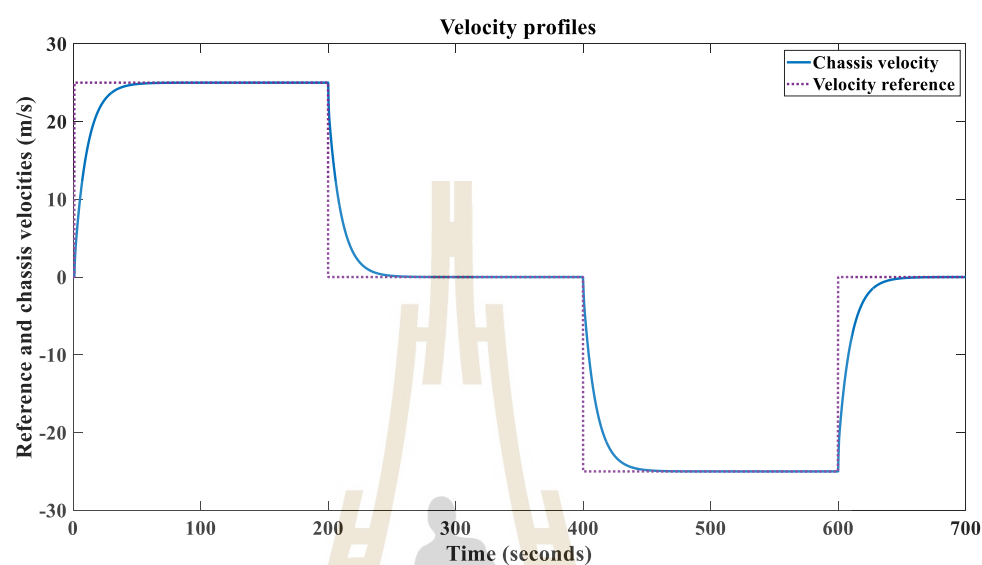
รูปที่ 5.12 อัตราเร็วอ้างอิงและอัตราเร็วของยานพาหนะที่เกิดจากบล็อกวงจรแฮชบริดจ์ที่มีโหมด
พีดับเบิลยูเอ็มที่ใช้โหมด PWM



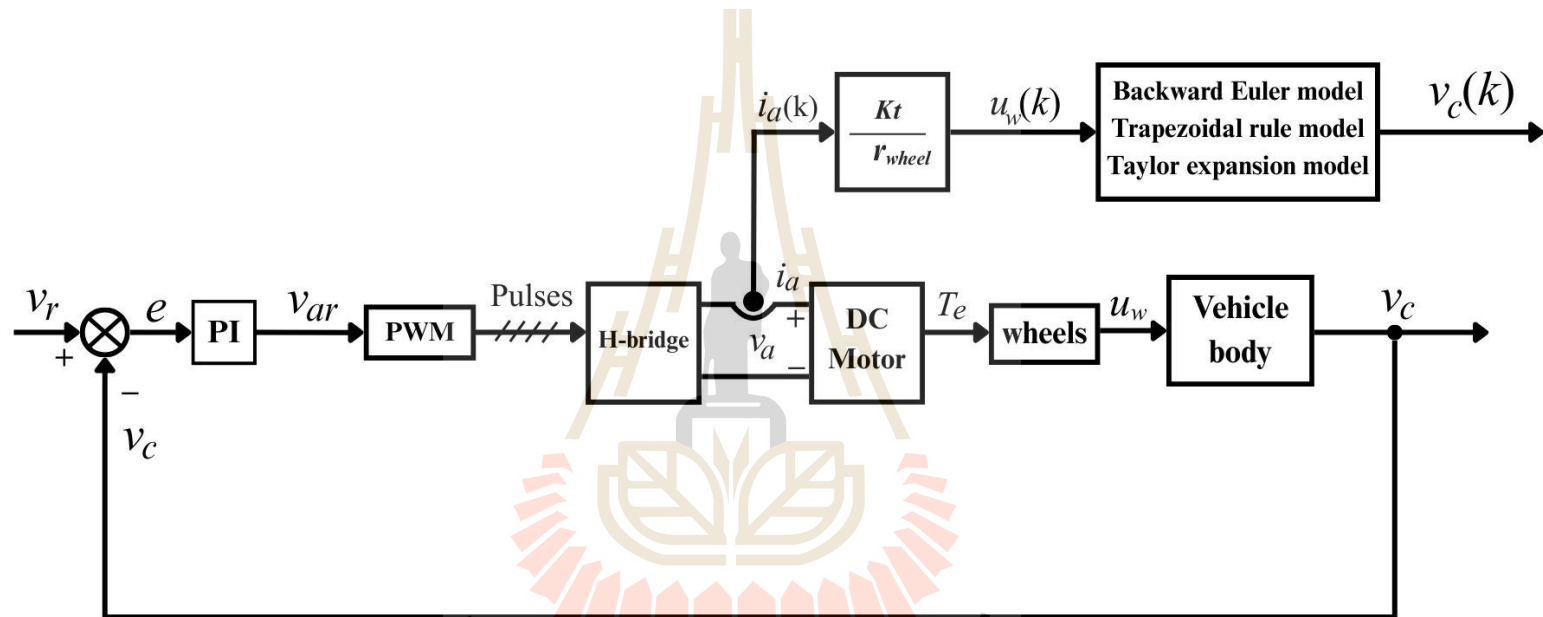
รูปที่ 5.13 อัตราเร็วอ้างอิงและอัตราเร็วของยานพาหนะที่เกิดจากบล็อกวงจรเซชบริดจ์ที่มีโหมดเฉลี่ย สัญญาณที่ใช้โหมด Average

เมื่อพิจารณาเหตุการณ์ที่ยานพาหนะไฟฟ้าต้องเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยอัตราเร็วอ้างอิง (velocity reference) 25 m/s จอดหยุดนิ่ง (มีอัตราเร็วอ้างอิง 0 m/s) เคลื่อนที่ถอยหลังด้วยอัตราเร็วอ้างอิง 25 m/s (-25 m/s) ที่แสดงในรูปที่ 5.14 และจอดหยุดนิ่งอีกครั้งหนึ่ง ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้า จะบังคับให้ยานพาหนะไฟฟ้าเริ่มต้นเคลื่อนที่จากการจอดหยุดนิ่งเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยอัตราเร็ว (chassis velocity) ที่เพิ่มขึ้นในสถานะชั่วคราว เคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยอัตราเร็วคงที่ที่เท่ากับอัตราเร็วอ้างอิงในสถานะอยู่ตัว เคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยอัตราเร็วที่ลดลงในสถานะชั่วคราว จอดหยุดนิ่งในสถานะอยู่ตัว และต่อมายานพาหนะไฟฟ้าเริ่มต้นเคลื่อนที่จากการจอดหยุดนิ่ง เคลื่อนที่ถอยหลังด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นในสถานะชั่วคราว เคลื่อนที่ถอยหลังด้วยอัตราเร็วคงที่ที่เท่ากับอัตราเร็วอ้างอิงในสถานะอยู่ตัว เคลื่อนที่ถอยหลังด้วยอัตราเร็วที่ลดลงในสถานะชั่วคราว และจอดหยุดนิ่งอีกครั้งหนึ่งในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.14 ดังนั้นระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้า จะบังคับให้ยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลัง หรือเคลื่อนที่ได้สองทิศทาง และให้ผลตอบสนองที่มีสมรรถนะที่ดีในการติดตามอัตราเร็วอ้างอิง นั่นคือบล็อกมอเตอร์ดีซีมีกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่ไหลผ่านเพิ่มขึ้น ลดลง และกลับทิศทาง หรือมีกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่ไหลผ่านได้สองทิศทาง และบล็อกมอเตอร์ดีซีจะสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นทอร์กขับเคลื่อนล้อและทอร์กเบรกได้ในทิศทางเข็มนาฬิกาและในทิศทวนเข็มนาฬิกา บล็อกล้อของยานพาหนะจะ

หมุนได้ในทิศทางเข็มนาฬิกาและในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา และสร้างแรงขับเคลื่อนและแรงเบรกที่กระทำกับล้อแบบจำลองเชิงกลของยานพาหนะได้ในสองทิศทางของการเคลื่อนที่

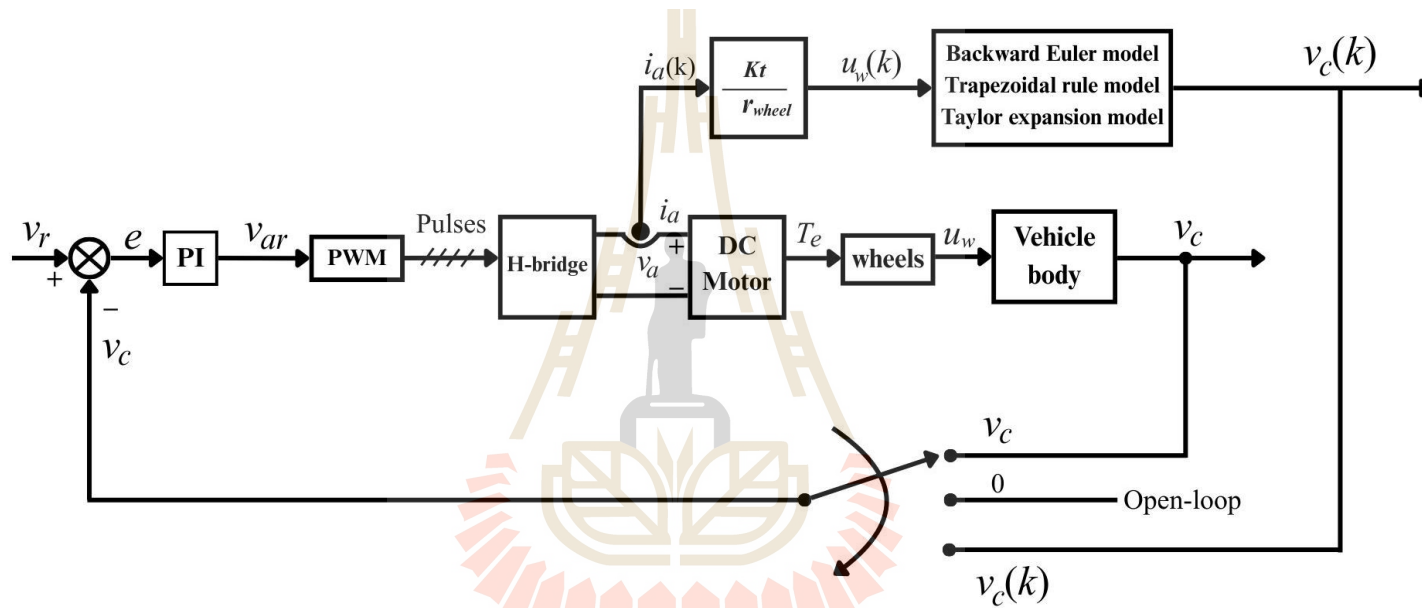


รูปที่ 5.14 อัตราเร็วอ้างอิงและผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าที่เกิดจากการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าการจอดหยุดนิ่ง และการเคลื่อนที่ถอยหลัง



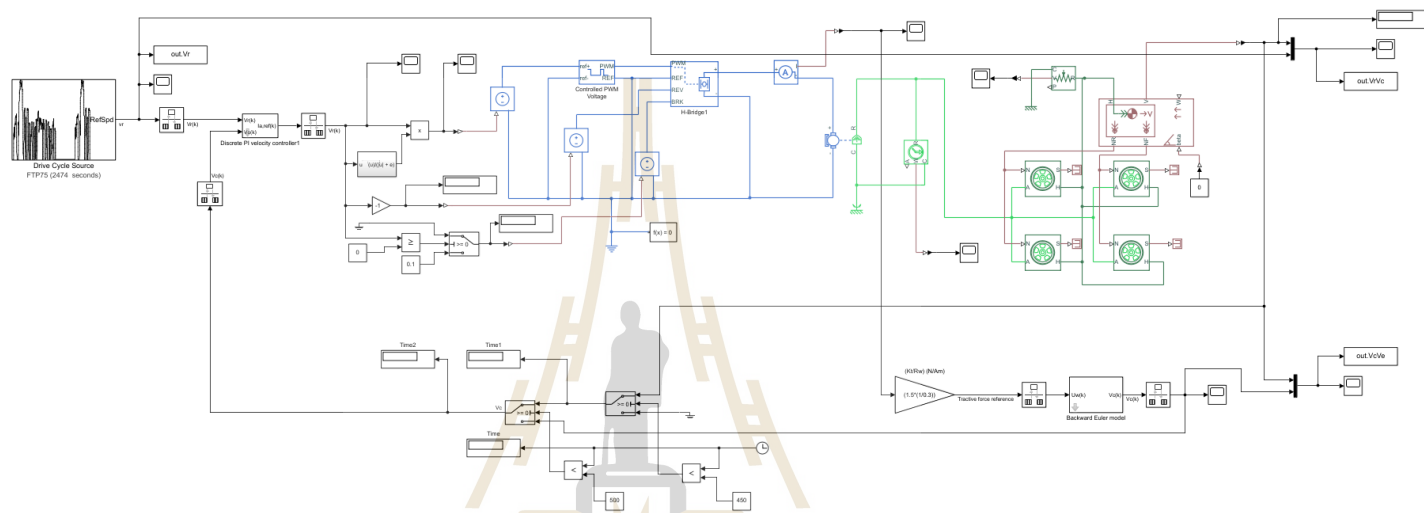
รูปที่ 5.15 แผนภาพกรอบของระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าที่มีการประมาณค่าอัตราเร็วในกรณีทีหนึ่ง



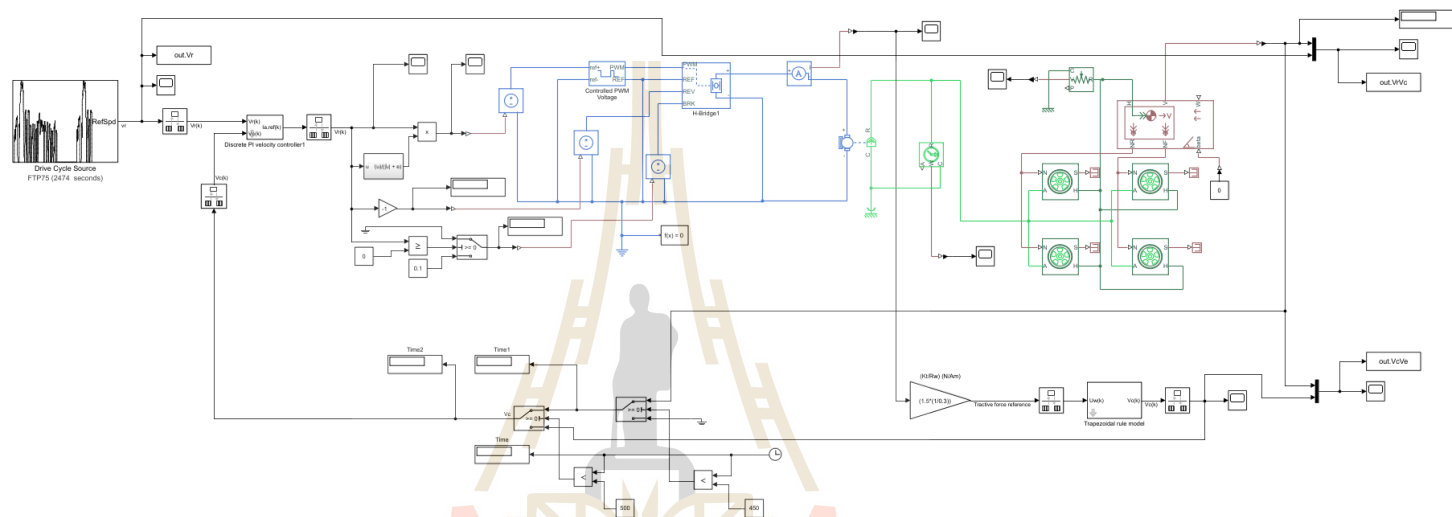


รูปที่ 5.17 แผนภาพกรอบของระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้า และการใช้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าเป็นสัญญาณป้อนกลับ

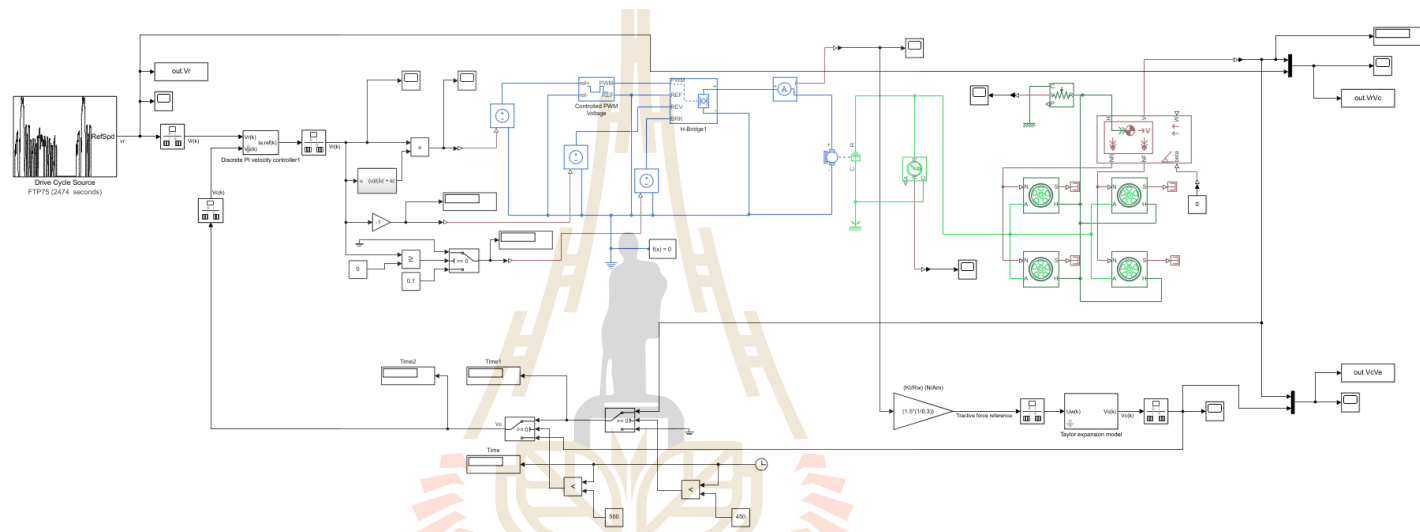
ในกรณีที่สอง



รูปที่ 5.18 ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าที่มีแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง



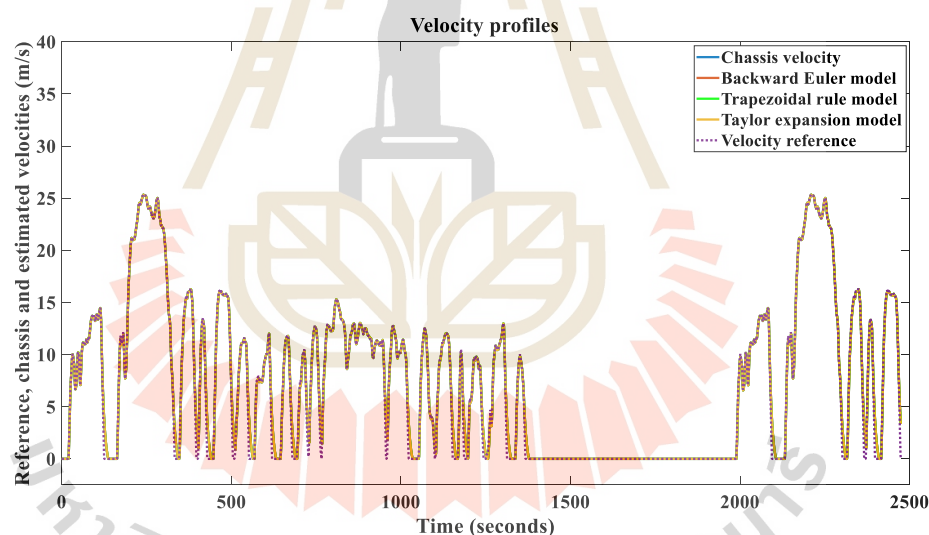
รูปที่ 5.19 ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าที่มีแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 5.20 ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าที่มีแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

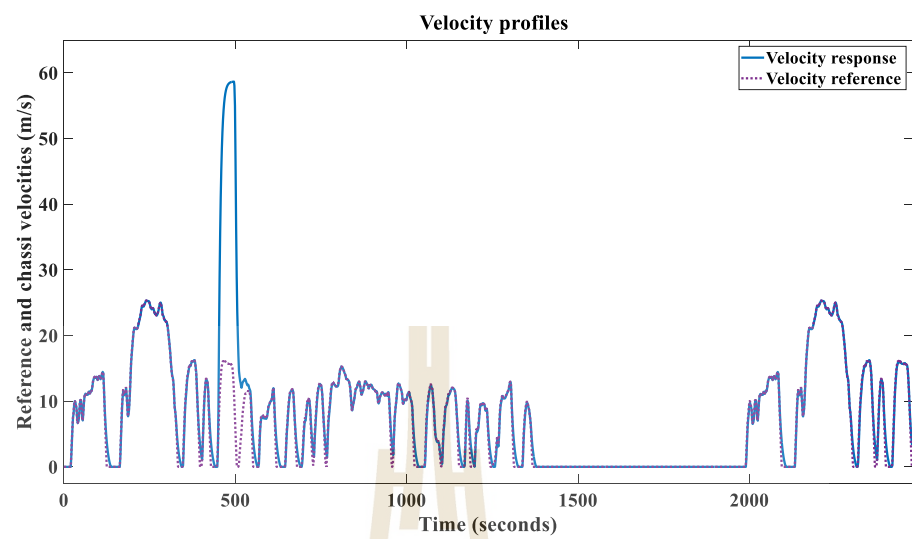
ในการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่หนึ่งแสดงดังรูปที่ 5.15 คือแผนภาพกรอบของระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าที่มีการประมาณค่าอัตราเร็วในกรณีที่หนึ่ง ตัวควบคุมพีไอแบบดิสคริตได้รับสัญญาณป้อนกลับที่เป็นสัญญาณวัดอัตราเร็วตลอดเวลา เมื่ออัตราเร็วอ้างอิง (velocity reference) กำหนดให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้น อัตราเร็วคงที่ และอัตราเร็วลดลง และอาจจะจอดหยุดนิ่ง ซ้ำกันหลายครั้งหรือหลายรอบ และการเคลื่อนที่ในแต่ละรอบอาจจะไม่สมมาตรกัน ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดจะบังคับให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว (chassis velocity) หรือมีผลตอบสนองที่ติดตามอัตราเร็วอ้างอิงในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.21 แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ จะประมาณค่าอัตราเร็วที่มีความถูกต้องและตรงกับผลตอบสนองอัตราเร็วในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว นั่นคือแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ มีสมรรถนะที่ดีในการประมาณค่าอัตราเร็ว และมีพลวัตที่เหมือนกับพลวัตของแบบจำลองเชิงกลการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่องซิมสเคป



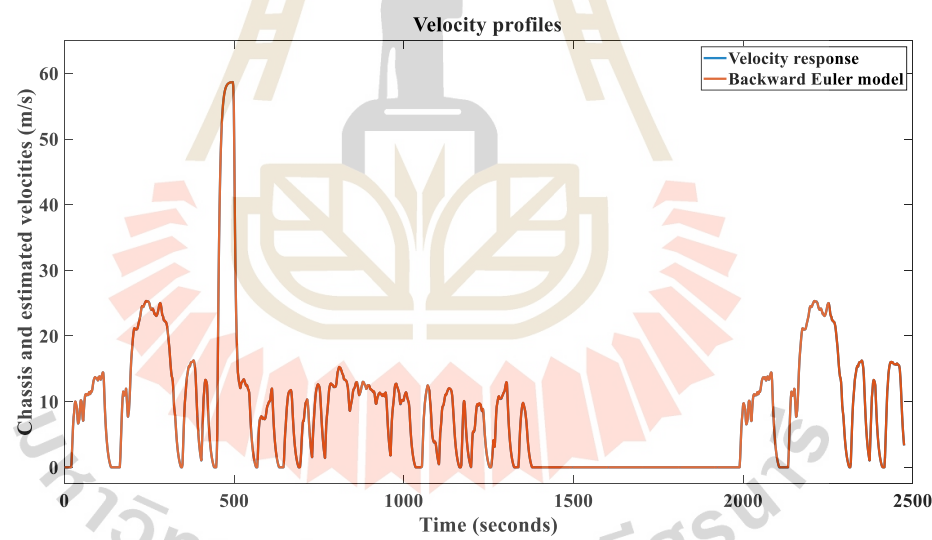
รูปที่ 5.21 ผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า

การจำลองสถานการณ์ในกรณีที่สองแสดงดังรูปที่ 5.17 คือแผนภาพกรอบของระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้า และการใช้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าเป็นสัญญาณป้อนกลับในกรณีที่สอง จะเหมือนกับการจำลองสถานการณ์ในกรณีที่หนึ่ง แต่สัญญาณวัดอัตราเร็วที่เป็นสัญญาณป้อนกลับ เกิดการขาดหายในวินาทีที่ 450 ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดเปลี่ยนไปเป็นระบบวงเปิด เมื่อเวลาผ่านไปจนถึงวินาทีที่ 500 แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังจะจ่ายอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าถึงตัวควบคุมพีไอแบบดิสคริต ระบบวงเปิดเปลี่ยนไปเป็นระบบควบคุมวงปิดเสมือน เพราะสัญญาณป้อนกลับคืออัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า แทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว

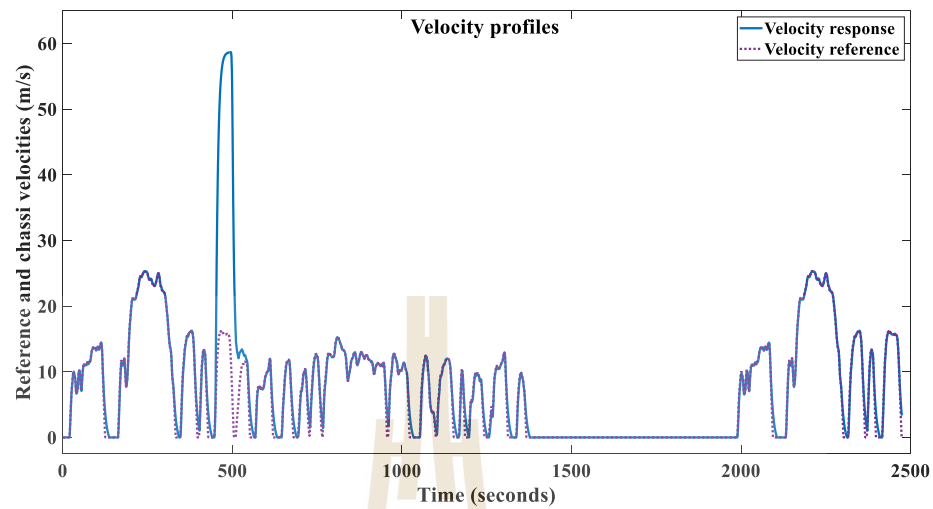
ก่อนสัญญาณวัดอัตราเร็วเกิดการขาดหาย ผลตอบสนองและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าจะเหมือนกับผลการจำลองสถานการณ์ในกรณีนี้ที่หนึ่ง หลังจากสัญญาณวัดอัตราเร็วเกิดการขาดหาย การเคลื่อนที่ของยานพาหนะได้รับการควบคุม กล่าวคือ ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและไม่มีขอบเขต อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน เมื่อแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังจ่ายอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าถึงตัวควบคุมพีไอ ระบบควบคุมวงปิดเสมือนจะเกิดขึ้นและใช้ช่วงระยะเวลาหนึ่งในการบังคับการประมาณค่าอัตราเร็วให้ติดตามอัตราเร็วอ้างอิงได้ นั่นคือระบบควบคุมวงปิดเสมือนให้การลดลงของความแตกต่างระหว่างอัตราเร็วอ้างอิงและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า เนื่องจากแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังมีพลวัตที่เหมือนกับพลวัตของแบบจำลองเชิงกลการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่อง ระบบควบคุมวงปิดเสมือนจึงให้การลดลงของความแตกต่างระหว่างอัตราเร็วอ้างอิง (velocity reference) และอัตราเร็วของยานพาหนะหรือผลตอบสนอง (velocity response) ที่แสดงในรูปที่ 5.22 ได้อย่างต่อเนื่อง นั่นคือระบบควบคุมวงปิดเสมือนยังคงให้ผลตอบสนองอัตราเร็วที่ติดตามอัตราเร็วอ้างอิงในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว เพราะแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังรักษาการประมาณค่าอัตราเร็วได้อย่างถูกต้องและตรงกับอัตราเร็วของยานพาหนะที่แสดงในรูปที่ 5.23 ดังนั้นการใช้งานแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังแทนที่เซนเซอร์วัดอัตราเร็วที่เป็นทางเดินป้อนกลับในระบบควบคุม จึงมีความเป็นไปได้มากขึ้น การใช้งานแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ แทนที่แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง จะให้ผลลัพธ์ที่เหมือนกันและแสดงได้ในรูปที่ 5.24, 5.25, 5.26 และ 5.27 ตามลำดับ ดังนั้นการใช้งานแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมูและแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์แทนที่เซนเซอร์วัดอัตราเร็วจึงมีความเป็นไปได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน



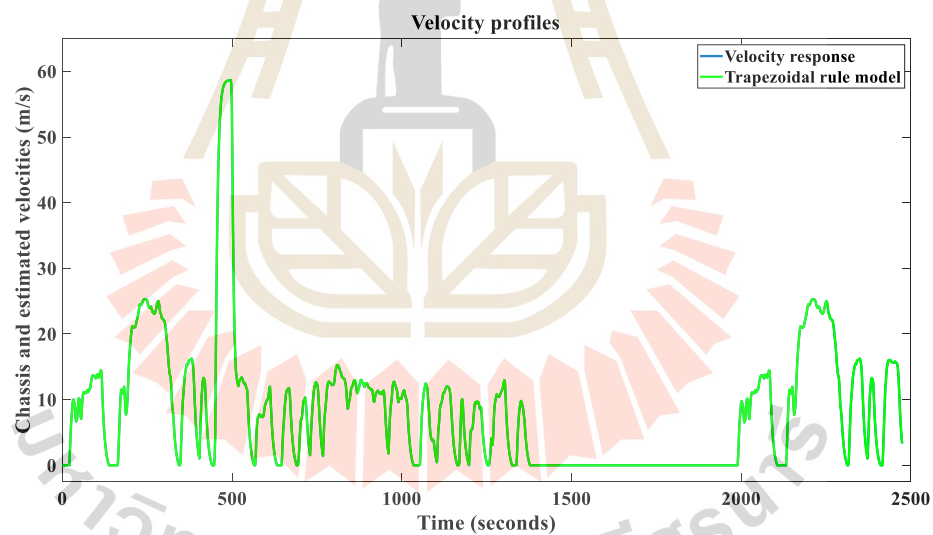
รูปที่ 5.22 อัตราเร็วอ้างอิงและผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าที่เกิดจากการขาดหายของสัญญาณวัดอัตราเร็วและการใช้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังแทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว



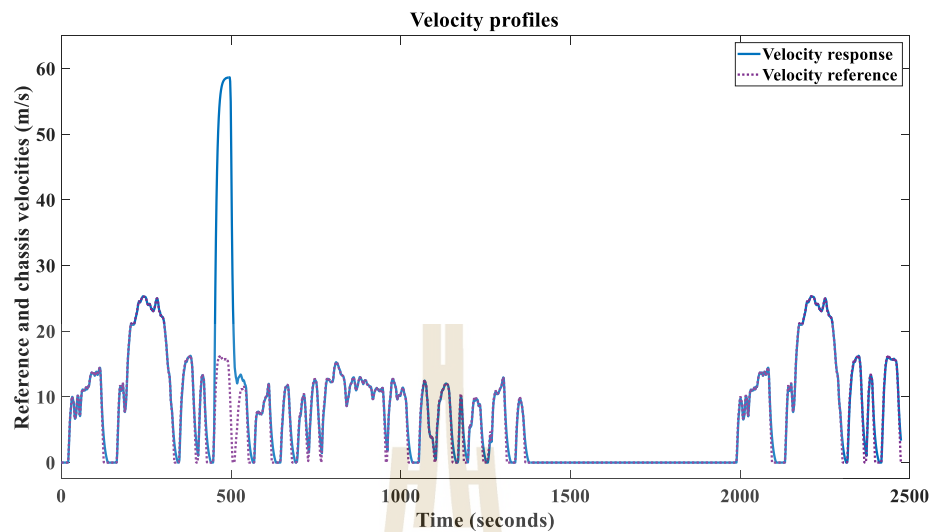
รูปที่ 5.23 ผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง



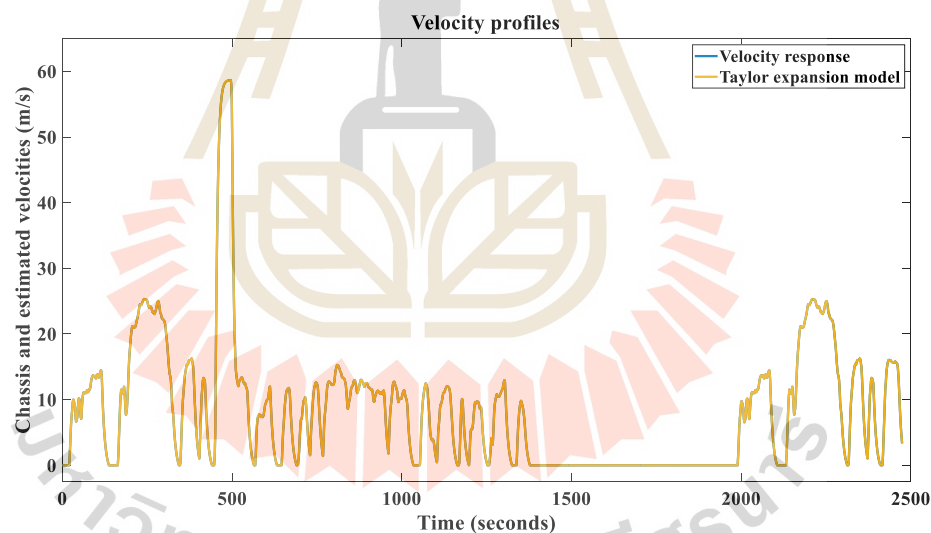
รูปที่ 5.24 อัตราเร็วอ้างอิงและผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าที่เกิดจากการขาดหายของสัญญาณวัดอัตราเร็วและการใช้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมูแทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว



รูปที่ 5.25 ผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 5.26 อัตราเร็วอ้างอิงและผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าที่เกิดจากการขาดหายของสัญญาณวัดอัตราเร็วและการใช้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์แทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว



รูปที่ 5.27 ผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์

เมื่อพิจารณาเหตุการณ์ที่ยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยอัตราเร็วที่มีการเปลี่ยนแปลงบ่อยครั้ง สัญญาณป้อนกลับที่เป็นสัญญาณวัดอัตราเร็วเกิดการขาดหายในวินาทีที่ 450 จนถึงวินาทีที่ 1250 และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ที่ทำหน้าที่ประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าตลอดเวลา ก่อนการขาดหายของสัญญาณป้อนกลับ ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้า จะให้ผลตอบสนองอัตราเร็ว (chassis velocity) ในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าที่มี

สมรรถนะและติดตามอัตราเร็วอ้างอิง (velocity reference) ที่แสดงในรูปที่ 5.28 ในช่วงระยะเวลาที่ยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้น ตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีตสร้างแรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงที่มีค่าบวกภายในช่วง 0 ถึง +2 V โดยประมาณที่แสดงในรูปที่ 5.29 บล็อกวงจรเฮชบริดจ์สร้างแรงดันอาร์เมเจอร์ที่มีค่าบวก บล็อกมอเตอร์ดีซีมีกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่ไหลผ่านที่มีค่าบวก และสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นทอร์กขับเคลื่อนล้อ บล็อกล้อของยานพาหนะสร้างแรงขับเคลื่อนที่มีค่าบวกและกระทำกับบล็อกแบบจำลองเชิงกลของยานพาหนะ แต่ในช่วงระยะเวลาที่ยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยอัตราเร็วที่ลดลงที่แสดงในรูปที่ 5.28 ตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีตสร้างแรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงที่กลับขั้วและมีค่าลบภายในช่วง -5 V ถึง 0 ที่แสดงในรูปที่ 5.29 บล็อกวงจรเฮชบริดจ์สร้างแรงดันอาร์เมเจอร์ที่กลับขั้วและมีค่าลบ บล็อกมอเตอร์ดีซีมีกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่ไหลผ่านที่กลับทิศทางและมีค่าลบ และสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่กลับทิศทางและเป็นทอร์กเบรก บล็อกล้อของยานพาหนะสร้างแรงเบรกที่มีค่าลบและกระทำกับบล็อกแบบจำลองเชิงกลของยานพาหนะ

หลังจากการขาดหายของสัญญาณป้อนกลับ ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดกลายเป็นระบบวงเปิด ยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกือบไม่มีขอบเขตที่แสดงในรูปที่ 5.28 นั่นคือยานพาหนะไร้การควบคุมและเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่มากกว่าอัตราเร็วอ้างอิง เพราะตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีตที่ใช้งาน ได้รับความผิดพลาดที่เท่ากับอัตราเร็วอ้างอิงที่มีค่าบวก มีพจน์ผลบวกของความผิดพลาดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และสร้างสัญญาณควบคุมที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน หลังจากสัญญาณควบคุมมีค่ามากกว่าหรือเกินขอบเขต +5 V กลไกการลดการสะสมของความผิดพลาดที่เกินความจำเป็น (anti-windup) จะเริ่มทำงานและลดพจน์ผลบวกของความผิดพลาดให้มีขนาดน้อยลง ตัวควบคุมพีไอจึงให้แรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงที่มีค่าบวกและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ไม่เกิน +5 V ที่แสดงในรูปที่ 5.29 บล็อกวงจรเฮชบริดจ์สร้างแรงดันอาร์เมเจอร์มากที่สุด บล็อกมอเตอร์ดีซีมีกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่ไหลผ่านมากที่สุด และสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นทอร์กขับเคลื่อนล้อมากที่สุด บล็อกล้อของยานพาหนะสร้างแรงขับเคลื่อนมากที่สุดและกระทำกับบล็อกแบบจำลองเชิงกลของยานพาหนะ

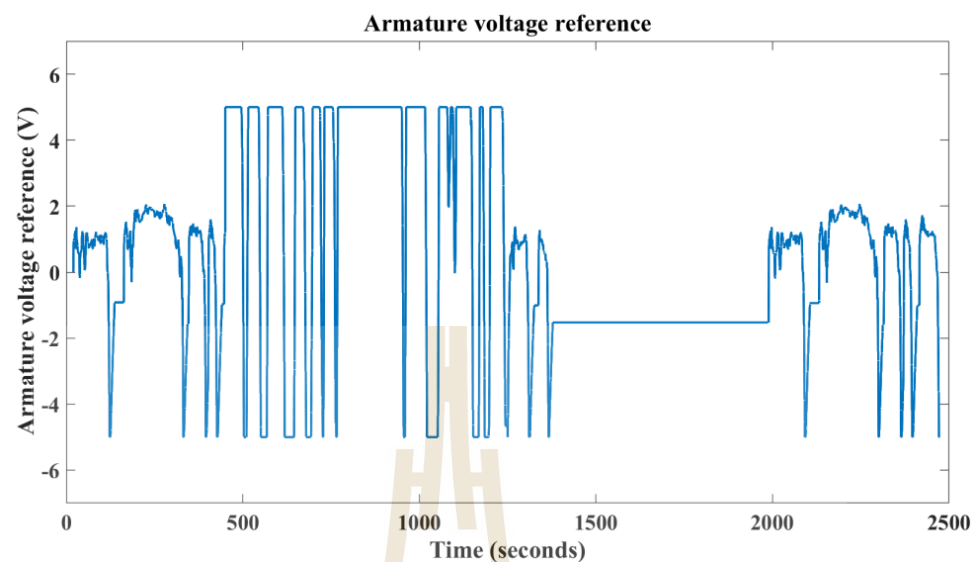
เมื่ออัตราเร็วอ้างอิงมีค่าลดลงเหลือศูนย์ ยานพาหนะไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่ลดลงอย่างรวดเร็วที่แสดงในรูปที่ 5.28 เพราะตัวควบคุมพีไอจะได้รับความผิดพลาดที่มีค่าบวกลดลงเหลือศูนย์ แต่กลไกการลดการสะสมของความผิดพลาดยังคงมีการทำงานอย่างต่อเนื่อง และลดพจน์ผลบวกของความผิดพลาดให้มีขนาดน้อยลงได้รวดเร็วกว่าการเพิ่มขึ้นของพจน์ผลบวกความผิดพลาด ตัว

ควบคุมพีไอจึงสร้างสัญญาณควบคุมที่ลดลงอย่างรวดเร็วและเปลี่ยนจากค่าบวกไปเป็นค่าลบที่เกินขอบเขต -5 V และตัวควบคุมพีไอให้แรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงที่ลดลงอย่างรวดเร็วและเปลี่ยนจากค่าบวกไปเป็นค่าลบ แต่ไม่เกิน -5 V ที่แสดงในรูปที่ 5.29 บล็อกวงจรเฮชบริดจ์สร้างแรงดันอาร์เมเจอร์ที่ลดลงอย่างรวดเร็วและกลับขั้ว บล็อกมอเตอร์ดีซีมีกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่ไหลผ่านลดลงอย่างรวดเร็วและกลับทิศทาง และสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ลดลงอย่างรวดเร็วและกลับทิศทางกลายเป็นทอร์กเบรกมากที่สุด บล็อกล้อของยานพาหนะสร้างแรงที่ลดลงอย่างรวดเร็วและกลับทิศทางกลายเป็นแรงเบรกมากที่สุดที่กระทำกับบล็อกแบบจำลองเชิงกลของยานพาหนะ เนื่องจากอัตราเร็วอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงเหลือศูนย์สลับกันหลายครั้ง ยานพาหนะไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วสลับกันหลายครั้งเช่นเดียวกัน แต่เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างจากอัตราเร็วอ้างอิงที่แสดงในรูปที่ 5.28 และตัวควบคุมพีไอให้แรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงที่เพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็ว และเปลี่ยนจากค่าบวกไปเป็นค่าลบสลับกันหลายครั้ง แต่ไม่เกิน $\pm 5\text{ V}$ ที่แสดงในรูปที่ 5.29

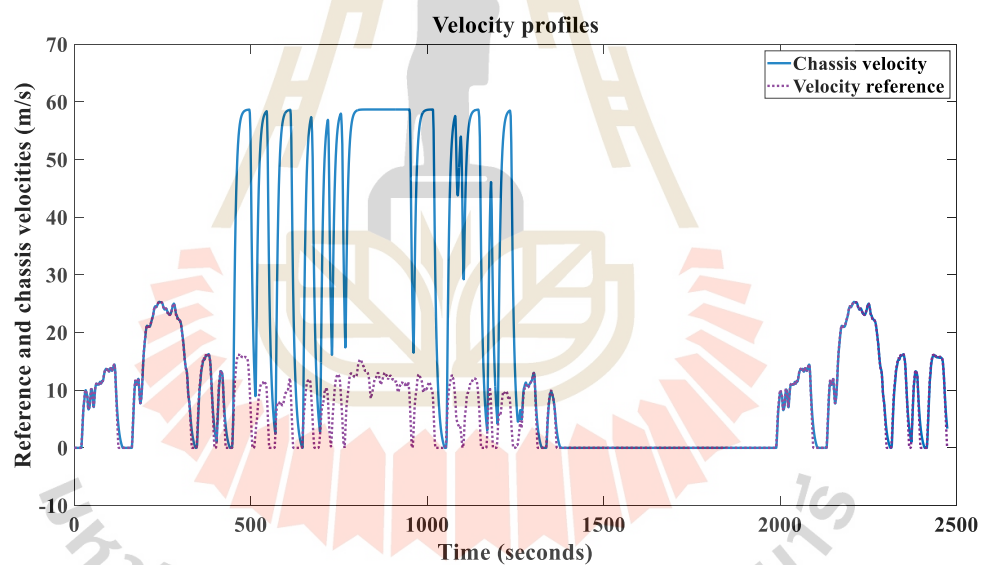
หลังจากแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์จ่ายอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าถึงตัวควบคุมพีไอแบบดิสคริต ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดเสมือนจะเกิดขึ้น เนื่องจากแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์มีพลวัตที่เหมือนกับพลวัตของแบบจำลองเชิงกลการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่อง แบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์จะประมาณค่าอัตราเร็วที่ใกล้เคียงกับผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัวตลอดเวลา ก่อนการเกิดขึ้นของระบบควบคุมวงปิดเสมือน ความผิดพลาดเท่ากับอัตราเร็วอ้างอิงมีค่าบวก อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าและผลตอบสนองอัตราเร็ว มีค่ามากกว่าอัตราเร็วอ้างอิง นั่นคือหลังจากการเกิดขึ้นของระบบควบคุมวงปิดเสมือน อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าคือสัญญาณป้อนกลับ และความผิดพลาดจะเปลี่ยนจากค่าบวกไปเป็นค่าลบ เพราะความผิดพลาดระหว่างอัตราเร็วอ้างอิงและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่ามีค่าลบ ตัวควบคุมพีไอมีพจน์ผลบวกของความผิดพลาดที่มีขนาดน้อยลง และสร้างสัญญาณควบคุมที่มีค่าลดลงและเปลี่ยนจากค่าบวกไปเป็นค่าลบ และตัวควบคุมพีไอให้แรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงที่ลดลงและเปลี่ยนจากค่าบวกไปเป็นค่าลบเช่นเดียวกัน แต่ไม่เกิน -5 V ที่แสดงในรูปที่ 5.29 บล็อกวงจรเฮชบริดจ์สร้างแรงดันอาร์เมเจอร์ที่ลดลงและกลับขั้ว บล็อกมอเตอร์ดีซีมีกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่ไหลผ่านลดลงและกลับทิศทาง และสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่ลดลงและกลับทิศทางกลายเป็นทอร์กเบรก บล็อกล้อของยานพาหนะสร้างแรงที่มีขนาดลดลงและกลับทิศทางกลายเป็นแรงเบรกที่กระทำกับบล็อกแบบจำลองเชิงกลของยานพาหนะ ระบบควบคุมวงปิดเสมือนจึงบังคับให้แบบจำลองอนุกรม

เทย์เลอร์ประมาณค่าอัตราเร็วที่ลดลง เข้าใกล้อัตราเร็วอ้างอิง และเริ่มน้อยกว่าอัตราเร็วอ้างอิง และ
 ยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่ลดลง เข้าใกล้อัตราเร็วอ้างอิงที่แสดงในรูปที่ 5.28 และเริ่ม
 น้อยกว่าอัตราเร็วอ้างอิงเช่นเดียวกัน ความผิดพลาดจะมีขนาดลดลงและเริ่มเปลี่ยนจากค่าลบไปเป็น
 ค่าบวก ตัวควบคุมพีไอมีพจน์ผลบวกของความผิดพลาดที่เริ่มมีขนาดเพิ่มขึ้น และสร้างสัญญาณ
 ควบคุมที่มีค่าเพิ่มขึ้นและเปลี่ยนจากค่าลบไปเป็นค่าบวก และตัวควบคุมพีไอให้แรงดันอาร์เมเจอร์
 อ้างอิงที่เพิ่มขึ้นและเปลี่ยนจากค่าลบไปเป็นค่าบวกที่ไม่เกิน $+2\text{ V}$ ที่แสดงในรูปที่ 5.29 บล็อกวงจร
 เฮชบริดจ์สร้างแรงดันอาร์เมเจอร์ที่เพิ่มขึ้นและกลับขั้ว บล็อกมอเตอร์ซีมีกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่
 ไหลผ่านเพิ่มขึ้นและกลับทิศทาง และสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นและกลับทิศทาง
 กลายเป็นทอร์กขับเคลื่อนล้อ บล็อกล้อของยานพาหนะสร้างแรงที่มีขนาดเพิ่มขึ้นและกลับทิศทาง
 กลายเป็นแรงขับเคลื่อนที่กระทำกับบล็อกแบบจำลองเชิงกลของยานพาหนะ ระบบควบคุมวงปิด
 เหมือนจึงบังคับให้แบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ประมาณค่าอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้น และเข้าใกล้อัตราเร็ว
 อ้างอิง และยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้น และเข้าใกล้อัตราเร็วอ้างอิงที่แสดงในรูป
 ที่ 5.28 เช่นเดียวกัน ดังนั้นระบบควบคุมวงปิดเหมือนให้ผลตอบสนองของอัตราเร็วที่มีสมรรถนะที่ดี
 และติดตามอัตราเร็วอ้างอิงในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 5.28 อีกครั้งหนึ่ง





รูปที่ 5.28 แรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงที่สร้างได้จากตัวควบคุมพีไอเมื่อสัญญาณป้อนกลับเกิดการขาดหายในช่วงระยะเวลานาน 800 วินาที



รูปที่ 5.29 อัตราเร็วอ้างอิงและอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าเมื่อสัญญาณป้อนกลับเกิดการขาดหายในช่วงระยะเวลานาน 800 วินาที

5.5 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะและยานพาหนะไฟฟ้า แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ ในการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมอัตราเร็วและแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการที่มีขนาดขั้นที่เล็กเพียงพอพร้อมกัน เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า จอดหยุดนิ่ง และถอยหลัง และยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้น อัตราเร็วคงที่ และอัตราเร็วลดลง และ

อาจจะจดหยุดนิ่ง ซ้ำกันหลายครั้งหรือหลายรอบ ผลการจำลองสถานการณ์จะแสดงถึงการประมาณค่าอัตราเร็วที่มีสมรรถนะติดตามผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว เมื่อพิจารณาการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมอัตราเร็วของยานพาหนะหรือยานพาหนะไฟฟ้า รวมถึงแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง หรือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ (แผนการหนึ่งเท่านั้น) หลังจากสัญญาณวัดอัตราเร็วที่เป็นสัญญาณป้อนกลับเกิดการขาดหาย แบบจำลองเชิงตัวเลขจะจ่ายและให้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า แทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว นั่นคือสัญญาณป้อนกลับเปลี่ยนไปเป็นอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า ผลการจำลองสถานการณ์แสดงถึงระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดที่ยังคงบังคับให้ยานพาหนะและยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่ติดตามอัตราเร็วอ้างอิงได้ดีในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ที่มีค่าพารามิเตอร์ถูกต้อง มีโอกาสใช้งานแทนที่การวัดหรือเซนเซอร์วัดอัตราเร็วได้ในช่วงระยะเวลาหนึ่งหรือได้อย่างชั่วคราว และแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมูมีโอกาสมากกว่าในการใช้งาน เพราะถ้าแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการมีขนาดขั้นที่มากเพียงพอ แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมูมีแนวโน้มในการให้สมรรถนะของการประมาณค่าอัตราเร็วที่ดีกว่า



บทที่ 6

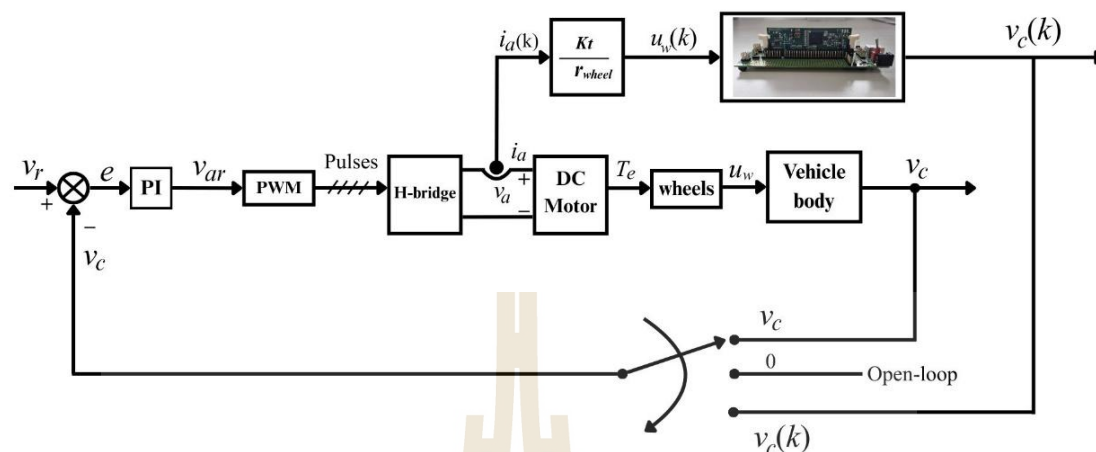
การจำลองสถานการณ์แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป

6.1 กล่าวนำ

การจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป (hardware-in-the-loop: HIL) มีฮาร์ดแวร์เป็นส่วนหนึ่งในสภาพแวดล้อมของการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมหรือระบบทางด้านวิศวกรรม ฮาร์ดแวร์ดังกล่าวไม่ได้อยู่ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ แต่อยู่ภายนอกเครื่องคอมพิวเตอร์ และเชื่อมต่อ (interface) เข้ากับพอร์ตสื่อสารข้อมูลของเครื่องคอมพิวเตอร์ ฮาร์ดแวร์จึงทำหน้าที่เป็นระบบย่อยหรือโมดูลหนึ่งในการจำลองสถานการณ์ นั่นคือการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูปจะแตกต่างจากการจำลองสถานการณ์ที่มีสภาพแวดล้อมทั้งหมดหรือระบบย่อยทุกระบบอยู่ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ (computer simulation) ฮาร์ดแวร์ที่มีลักษณะเป็นหน่วยเดียว มีความสะดวก และนิยมใช้งานกันมาก คือบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีราคาไม่แพงหรือมีต้นทุนน้อย เมื่อฮาร์ดแวร์เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ การเขียนโปรแกรมที่กำหนดฟังก์ชันที่ต้องการของระบบย่อย จึงเป็นงานที่มีความสะดวกและมีความยืดหยุ่นมาก เพราะไมโครคอนโทรลเลอร์มีทรัพยากรและหน่วยความจำที่ใช้คำนวณ ดำเนินการทางคณิตศาสตร์และตรรกะ และประมวลผลอัลกอริทึมและวิธีคิดที่เลียนแบบมนุษย์ เนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบทางกายภาพแทบทุกระบบในกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม ควบคุมการทำงานของเครื่องใช้ไฟฟ้าในชีวิตประจำวัน และควบคุมการทำงานของระบบทางไฟฟ้าและระบบเชิงกลแทบทุกส่วนในยานพาหนะสมัยใหม่ การจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ในรูป จึงมีความใกล้เคียงกับเหตุการณ์จริงมากขึ้น และนำมาใช้ประเมินสมรรถนะและความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานแผนการหรืออัลกอริทึมในทางปฏิบัติ นั่นคือหลังจากการออกแบบและพัฒนาแผนการหรืออัลกอริทึมที่เป็นระบบย่อย การเขียนโปรแกรมจะแปลงแผนการหรืออัลกอริทึมไปเป็นชุดคำสั่ง บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับและเก็บชุดคำสั่งในหน่วยความจำ การจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูปจะบังคับชุดคำสั่งที่ทำหน้าที่เป็นระบบย่อยและอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำงานและควบคุมระบบย่อยที่อยู่ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ การส่งผ่านสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และเครื่องคอมพิวเตอร์ จะเกิดขึ้นในพอร์ตสื่อสารหรือช่องทางสื่อสารข้อมูลระบบย่อยที่อยู่ภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ คือแบบจำลองที่เลียนแบบพฤติกรรมของระบบหรือส่วนประกอบทางกายภาพในกระบวนการผลิต ในเครื่องใช้ไฟฟ้า หรือในยานพาหนะ

6.2 การดำเนินการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป

การจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป (ทศพร ณรงค์ฤทธิ์, 2557) ในงานวิจัยนี้ มีโปรแกรมแมทแลบซิมูลิงค์ (MATLAB-Simulink) ที่ปฏิบัติการ (run) ในเครื่องคอมพิวเตอร์ และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หรือการ์ดคอนโทรล (control card) F28335 (TMDSCNCD28335 R2.2) ที่เป็นฮาร์ดแวร์ การส่งผ่านข้อมูลและสัญญาณระหว่างโปรแกรมแมทแลบซิมูลิงค์และการ์ดคอนโทรลดังกล่าว จะเกิดขึ้นในพอร์ตสื่อสารยูเอสบี (USB port และ JTAG emulator) โปรแกรมแมทแลบซิมูลิงค์จัดเตรียมสภาพแวดล้อมที่มีระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของการเคลื่อนที่ยานพาหนะไฟฟ้า ที่แสดงในรูปที่ 6.1 ระบบควบคุมประกอบด้วยระบบย่อย 7 ระบบดังนี้ หน่วยสร้างอัตราเร็วอ้างอิงหรือหน่วยกำเนิดรอบการขับ ตัวควบคุมพีโอแบบดิสครีตที่เลียนแบบพฤติกรรมของผู้ขับขี่ พีดับเบิลยูเอ็ม วงจรแฮชบริดจ์ แบบจำลองมอเตอร์ดีซีแม่เหล็กถาวร แบบจำลองเชิงกลของการเคลื่อนที่ยานพาหนะในเวลาต่อเนื่องซิมสเคปที่มีล้อ 4 ล้อ และสวิตช์เลือกสัญญาณป้อนกลับที่ทำงานในเวลาที่กำหนดไว้ล่วงหน้า การ์ดคอนโทรลคือระบบย่อยที่ทำหน้าที่แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง หรือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ (แผนการหนึ่งเท่านั้น) ที่ประมาณค่าอัตราเร็ว ชุดคำสั่งภาษาซีจะกำหนดให้การ์ดคอนโทรลทำหน้าที่เป็นแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ หลังจากการเขียนโปรแกรมที่แปลงแบบจำลองเชิงตัวเลขไปเป็นชุดคำสั่งภาษาซี ตัวแปลภาษา (compiler) ในโค้ดคอมโพสเซอร์สตูดิโอ (code composer studio) เวอร์ชัน 3.3 จะเปลี่ยนชุดคำสั่งภาษาซี (C source code) ไปเป็นภาษาเครื่อง (machine code) และการ์ดคอนโทรลได้รับและเก็บชุดคำสั่งภาษาเครื่องในหน่วยความจำ การจำลองสถานการณ์จะบังคับให้การ์ดคอนโทรลคำนวณพจน์และนิพจน์ของแบบจำลองเชิงตัวเลข และประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้า การ์ดคอนโทรลจะทำงานแบบวนซ้ำและมีการทำงานในแต่ละครั้งที่มีช่วงระยะเวลาห่างกันเท่ากับขนาดขั้นที่กำหนดไว้ การ์ดคอนโทรลจึงเสมือนประมาณค่าอัตราเร็วในเวลาจริง (real-time computation) (นนทการณ มังคลา, 2566) ภาคผนวก ข จะกล่าวถึงคำสั่งเทียมหรือรหัสเทียม (pseudocode) ของชุดคำสั่งภาษาซีที่ใช้งาน ผลการจำลองสถานการณ์จะนำมาใช้ประเมินสมรรถนะและความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการในทางปฏิบัติ การจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูปมีลำดับที่เกิดขึ้นในแต่ละการวนซ้ำที่แสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.1 แนวคิดของการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในลูบในการประเมินสมรรถนะ
ของแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ

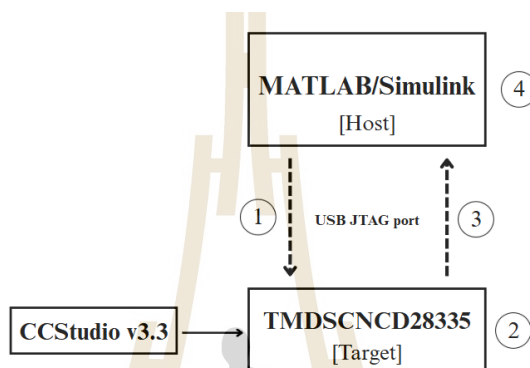
ลำดับที่ 1 บล็อกเซนเซอร์จ่ายสัญญาณวัดกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ และบล็อก RTDX write ของโปรแกรมแมทแลบซิมมูลิงค์ (MATLAB Simulink) ได้รับและส่งสัญญาณวัดกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่เป็นตัวเลข ผ่านพอร์ตสื่อสารยูเอสบี (USB JTAG emulator) ถึงการ์ดคอนโทรล F28335

ลำดับที่ 2 คำสั่ง Read from RTDX จะบังคับให้การ์ดคอนโทรล F28335 รอรับสัญญาณวัดกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ เมื่อการ์ดคอนโทรลได้รับสัญญาณวัดกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ การ์ดคอนโทรลจะนำตัวเลขของกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ มาคำนวณพจน์และนิพจน์ของแบบจำลองเชิงตัวเลขทุกส่วน และประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้า ชุดคำสั่งภาษาเครื่อง จะกำหนดรูปแบบวิธีการคำนวณที่มีการดำเนินการทางคณิตศาสตร์และตรรกะ

ลำดับที่ 3 คำสั่ง Write to RTDX จะบังคับให้การ์ดคอนโทรล F28335 ส่งตัวเลขของอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า ผ่านพอร์ตสื่อสารยูเอสบี ถึงบล็อก RTDX read ของโปรแกรมแมทแลบซิมมูลิงค์

และลำดับที่ 4 บล็อก RTDX read ได้รับและจ่ายตัวเลขของอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า ถึงบล็อกสวิตช์เลือกสัญญาณป้อนกลับ และบล็อกเซนเซอร์จ่ายสัญญาณวัดอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าหรือผลตอบสนอง ถึงบล็อกสวิตช์เลือกสัญญาณป้อนกลับเช่นเดียวกัน หลังจากบล็อกสวิตช์เลือกสัญญาณป้อนกลับ ได้รับสัญญาณวัดอัตราเร็วและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า บล็อกสวิตช์เลือกสัญญาณป้อนกลับจะใช้เงื่อนไขของเวลาในการจ่ายสัญญาณวัดอัตราเร็วหรืออัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าหรือสัญญาณศูนย์ (null) ถึงตัวควบคุมพีไอแบบดิสคริต ถ้าสัญญาณป้อนกลับคือสัญญาณวัดอัตราเร็ว ระบบควบคุมวงปิดจะให้พลวัตของอัตราเร็วและพลวัตของกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ ถ้าสัญญาณป้อนกลับคือสัญญาณศูนย์หรือไม่มีสัญญาณป้อนกลับ ระบบวงเปิดจะให้พลวัตของอัตราเร็ว

และพลวัตของกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ แต่ถ้าสัญญาณป้อนกลับคืออัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า ระบบควบคุมวงปิดเสมือนจะให้พลวัตของอัตราเร็วและพลวัตของกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ บล็อก เซนเซอร์ได้รับปริมาณของกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ และจ่ายสัญญาณวัดกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ ถึง บล็อก RTDX write



รูปที่ 6.2 ลำดับของการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในลูบในแต่ละการวนซ้ำ

6.3 ผลการจำลองสถานการณ์แบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในลูบ

แบบจำลองยานพาหนะไฟฟ้าที่ใช้จำลองสถานการณ์ ประกอบด้วยแบบจำลองเชิงกลซิมมูลิงค์ซิมสเคปของยานพาหนะ (Simscape driveline) (S. Nayak, A. K. Bohre, P. Kumar and M. L. Kolhe , 2022) แบบจำลองพลวัตของมอเตอร์ดีซีแม่เหล็กถาวรในสมการที่ (3-5) และ (3-6) วงจรแฮชบริดจ์ และฟีดแบ็คเบิเลยูเอเอ็ม โปรแกรมแมทแลบซิมมูลิงค์ซิมสเคป มีบล็อกหรือระบบย่อยของมอเตอร์ดีซีแม่เหล็กถาวร วงจรแฮชบริดจ์ และฟีดแบ็คเบิเลยูเอเอ็มที่พร้อมใช้งานและเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเป็นระบบไฟฟ้าขับเคลื่อนโพลเชิงกล ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าที่มีแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง หรือแบบจำลองกลูสึเหลียมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ (แผนการหนึ่งเท่านั้น) แสดงในรูปที่ 6.3 หลังจากสัญญาณวัดอัตราเร็วที่เป็นสัญญาณป้อนกลับเกิดการขาดหาย แบบจำลองเชิงตัวเลขหนึ่งแผนการเท่านั้นจะจ่ายและให้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าแทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว นั่นคือสัญญาณป้อนกลับเปลี่ยนไปเป็นอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า

แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกลูสึเหลียมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ ได้รับสัญญาณวัดกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์และประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้า ก่อนการคำนวณอัตราเร็ว แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการจะนำสัญญาณวัดกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (i_a) มาคูณกับค่าเกน $\frac{K_t}{r_{wheel}}$ ผลคูณที่ได้รับคือแรงขับเคลื่อนและแรงเบรก (u_w) ที่เป็นอินพุตของแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ นั่นคือ
$$\frac{\tau_{wheel} + \tau_{brake}}{r_{wheel}} = u_w = \frac{K_t}{r_{wheel}} i_a$$

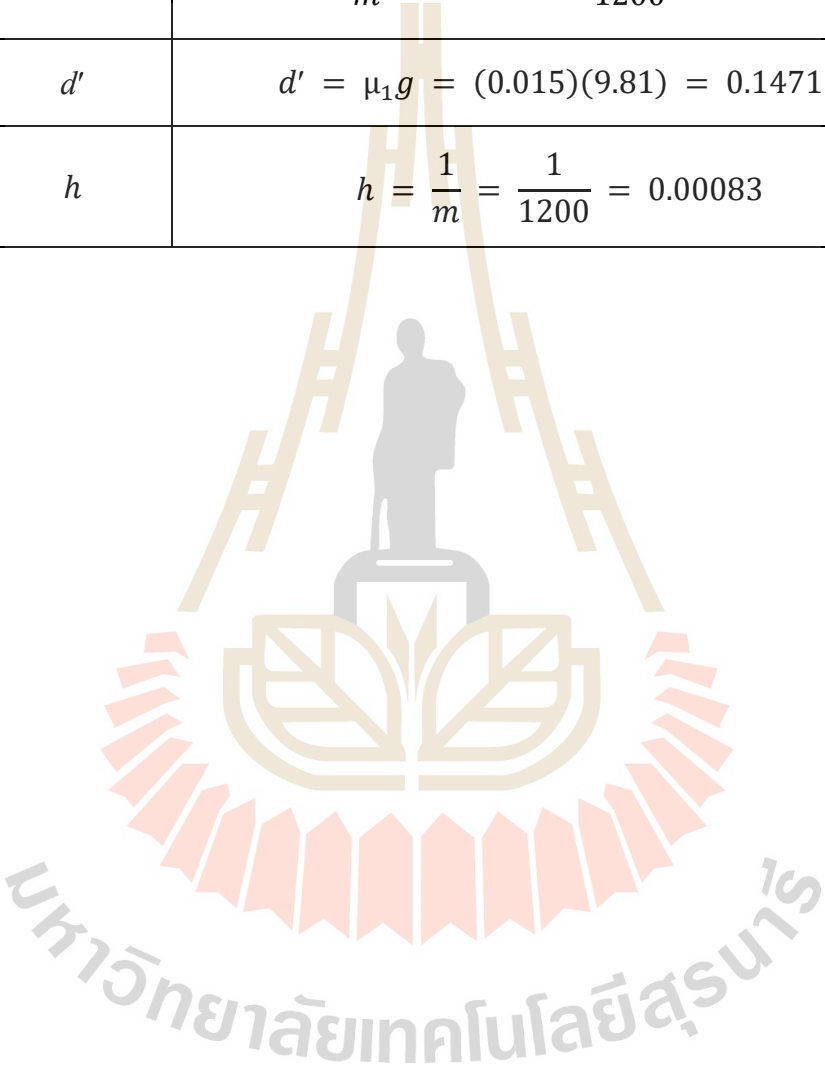
การจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป มีค่าพารามิเตอร์และค่าเกณฑ์ดังนี้ บล็อกพีดับเบิลยูเอ็ม (PWM) มีสัญญาณพาหะภายในที่มีความถี่ 4000 Hz เมื่อแรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงหรือสัญญาณอ้างอิงมีค่าเท่ากับศูนย์ บล็อกพีดับเบิลยูเอ็มสร้างสัญญาณขับเคลื่อนที่เป็นขบวนสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้าง (duty cycle) 0% หรือไม่มีสัญญาณพัลส์ และเมื่อแรงดันอาร์เมเจอร์อ้างอิงมีค่าเท่ากับ 5 V บล็อกพีดับเบิลยูเอ็มสร้างสัญญาณขับเคลื่อนที่เป็นขบวนสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้าง 100% และสัญญาณพัลส์มีแรงดัน 5 V บล็อกวงจรแฮชบริดจ์ได้รับสัญญาณขับเคลื่อนที่มีแรงดัน 5 V และมีแหล่งจ่ายแรงดันดีซี 400 V อยู่ภายใน บล็อกมอเตอร์ดีซีแม่เหล็กถาวรมีความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์ 0.1Ω มีค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์ 0.01 H มีค่าคงที่ของการสร้างแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ $0.15 \text{ V} \cdot \text{s}$ มีค่าคงที่ของการสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้า $1.5 \text{ N} \cdot \text{m/A}$ มีโมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ $0.0002 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ และมีสัมประสิทธิ์การหน่วงหนืด $5 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ และตัวควบคุมฟีดแบ็คดิสครีตมีค่าเกณฑ์ส่วนหรือค่าเกณฑ์ $2 \text{ V} \cdot \text{s/m}$ มีค่าเกณฑ์กริลหรือค่าเกณฑ์ 0.2 V/m และมีขนาดขั้น 0.01 วินาที

แบบจำลองเชิงกลการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่องซิมสเคปมี $\mu_2 = 0$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $\rho_{air} = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $A = 3 \text{ m}^2$, $C_d = 0.4$, $m = 1200 \text{ kg}$ และ $\mu_1 = 0.015$ แบบจำลองเชิงกลของยานพาหนะซิมสเคปมีล้อ 4 ล้อ

แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ มี $\mu_2 = 0 \text{ s/m}$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, $\rho_{air} = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $A = 3 \text{ m}^2$, $C_d = 0.4$, $m = 1200 \text{ kg}$ และ $\mu_1 = 0.015$ การจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป มีช่วงระยะเวลา 2474 วินาที (S. Das, 2021) และมีขนาดขั้นคงที่ (fixed stepsize) 0.01 วินาที และแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการมีขนาดขั้น 0.1 วินาทีเท่ากัน ($T = 0.1 \text{ s}$) และมีค่าพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 6.1 และค่าพารามิเตอร์และค่าเกณฑ์สำคัญทุกค่าที่ใช้จำลองสถานการณ์ แสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเชิงตัวเลขในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเชิงตัวเลข
a	$a = \mu_2 g = (0)(9.81) = 0$
b'	$b' = \frac{0.5\rho_{air}AC_d}{m} = \frac{(0.5)(1.2)(3)(0.4)}{1200} = 0.0006$
d'	$d' = \mu_1 g = (0.015)(9.81) = 0.14715$
h	$h = \frac{1}{m} = \frac{1}{1200} = 0.00083$

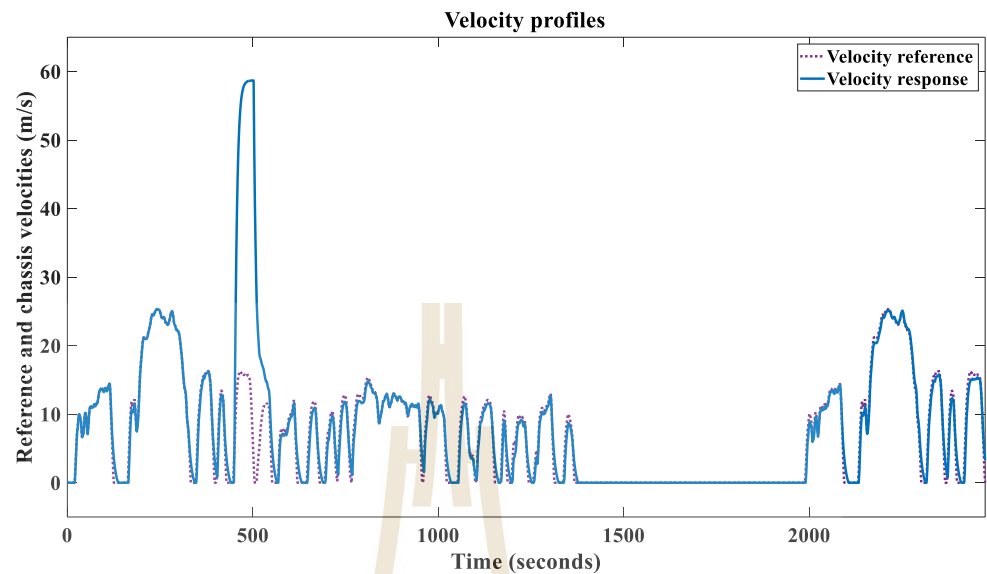


ตารางที่ 6.2 ค่าพารามิเตอร์และค่าเกณฑ์ในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป

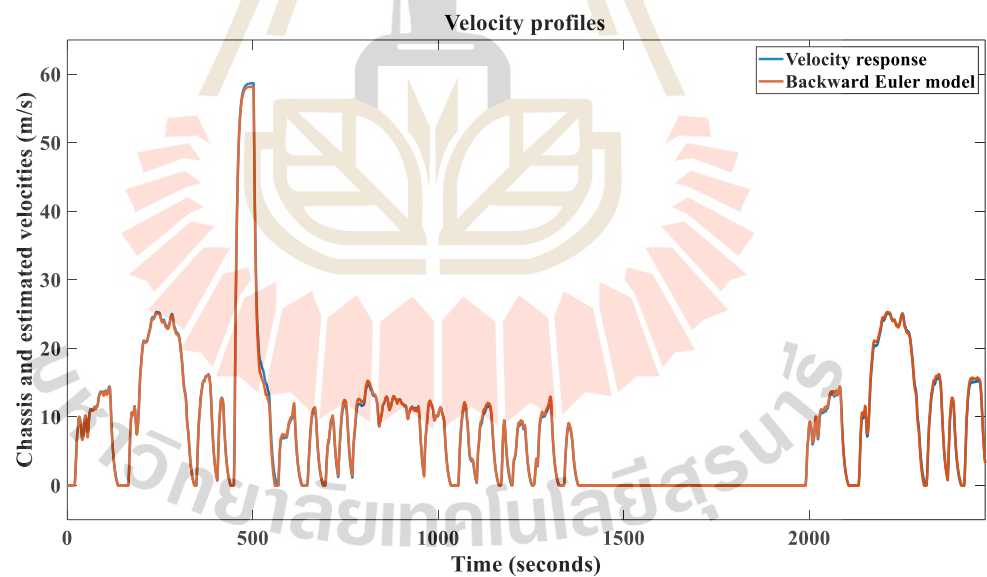
บล็อกพีดับเบิลยูเอ็ม	ความถี่พีดับเบิลยูเอ็ม	4000 Hz
	แรงดันอินพุตที่ 0% ดิวตีไซเคิล	0 V
	แรงดันอินพุตที่ 100% ดิวตีไซเคิล	5 V
	แรงดันเอาต์พุต	5 V
บล็อกเฮกบริดจ์	ความถี่พีดับเบิลยูเอ็ม	4000 Hz
	แอมพลิจูดสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม	5 V
	แรงดันดีซีภายใน	400 V
มอเตอร์ดีซีแม่เหล็กถาวร	ค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์	0.1 Ω
	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์	0.01 H
	ค่าคงที่ของการสร้างทอร์ก	1.5 N · m/A
	โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์	0.0002 kg · m ²
ยานพาหนะและล้อ	มวล	1200 kg
	อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	9.81 m/s ²
	พื้นที่ด้านหน้าของยานพาหนะ	3 m ²
	สัมประสิทธิ์ของแรงต้านจากอากาศ	0.4
	ความหนาแน่นของอากาศ	1.2 kg/m ³
	รัศมีของล้อ	0.3 m
	สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างล้อ ยางและผิวถนนที่เกิดจากน้ำหนักรถของ ยานพาหนะ (μ_1)	0.015
	สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืด (μ_2)	0 s/m
ตัวควบคุมพีไอแบบดิส ครีต	ค่าเกนสัดส่วนหรือค่าเกนพี	2 V · s/m
	ค่าเกนอินทิกรัลหรือค่าเกนไอ	0.2 V/m

เมื่อการจำลองคอนโทรลทำหน้าที่เป็นแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังที่ประมาณค่าอัตราเร็วตลอดเวลา และในช่วงระยะเวลา 0 ถึง 450 วินาที ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดได้รับสัญญาณป้อนกลับที่เป็นสัญญาณวัดอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้า ระบบควบคุมวงปิดให้ผลตอบสนอง

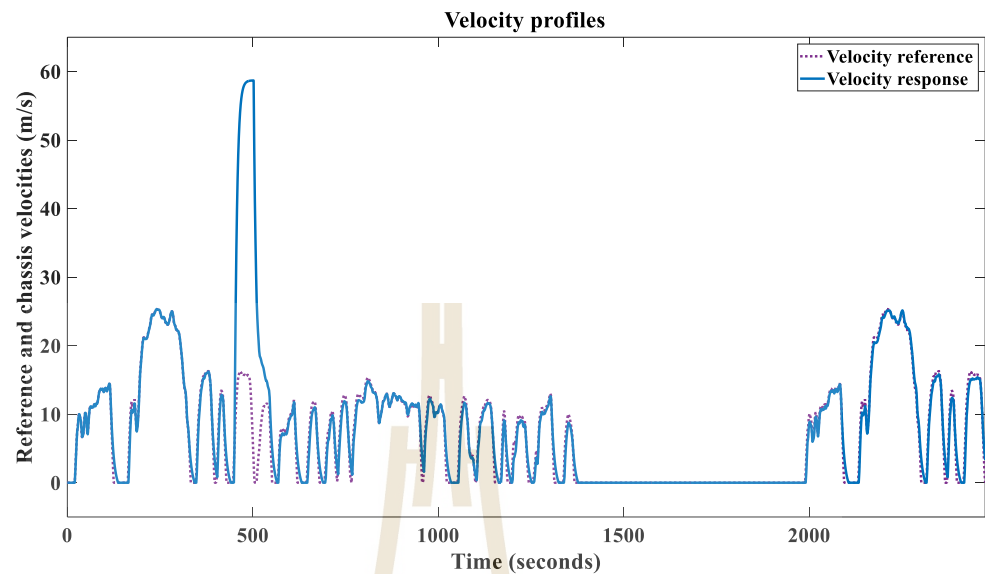
อัตราเร็ว (velocity response) ที่ติดตามอัตราเร็วอ้างอิง (velocity reference) ในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัวที่แสดงในรูปที่ 6.4 กล่าวคือยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่มีพลวัตติดตามอัตราเร็วอ้างอิง ต่อมาสัญญาณวัดอัตราเร็วเกิดการขาดหายในวินาทีที่ 450 ถึงวินาทีที่ 500 ระบบควบคุมวงปิดจึงไม่มีสัญญาณป้อนกลับและเปลี่ยนไปเป็นระบบวงเปิดในช่วงระยะเวลา 50 วินาที ยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและไม่มีขอบเขต เพราะยานพาหนะไร้การควบคุม แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังประมาณค่าอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นเหมือนกับผลตอบสนองเช่นเดียวกัน หลังจากแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังจ่ายอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า ถึงตัวควบคุมฟิวส์แบบดิสครีต นั่นคืออัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าเป็นสัญญาณป้อนกลับแทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว ระบบควบคุมวงปิดเสมือนเกิดขึ้นและบังคับการประมาณค่าอัตราเร็วของแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง ความแตกต่างระหว่างอัตราเร็วอ้างอิงและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า จะลดลงอย่างต่อเนื่อง ระบบควบคุมวงปิดเสมือนใช้ช่วงระยะเวลาหนึ่งในการบังคับการประมาณค่าอัตราเร็วให้ติดตามอัตราเร็วอ้างอิงได้ และการประมาณค่าอัตราเร็วติดตามอัตราเร็วอ้างอิงในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว เนื่องจากแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังมีพลวัตที่แตกต่างจากพลวัตของแบบจำลองเชิงกลยานพาหนะในเวลาต่อเนื่องซิมสเคป อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าจะมีความผิดพลาดเล็กน้อยจากอัตราเร็วของยานพาหนะหรือผลตอบสนองที่แสดงในรูปที่ 6.5 นั่นคือระบบควบคุมวงปิดเสมือนให้ยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างจากอัตราเร็วอ้างอิงเล็กน้อย ดังนั้นการใช้งานแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังแทนที่เซนเซอร์วัดอัตราเร็วที่เป็นทางเดินป้อนกลับในระบบควบคุมได้อย่างชั่วคราว จึงมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ การใช้งานแบบจำลองกลสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ แทนที่แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง จะให้ผลลัพธ์ที่เหมือนกันและแสดงได้ในรูปที่ 6.6, 6.7, 6.8 และ 6.9 ตามลำดับ ดังนั้นการใช้งานแบบจำลองกลสี่เหลี่ยมคางหมูและแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ แทนที่เซนเซอร์วัดอัตราเร็วได้อย่างชั่วคราว จึงมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติเช่นเดียวกัน



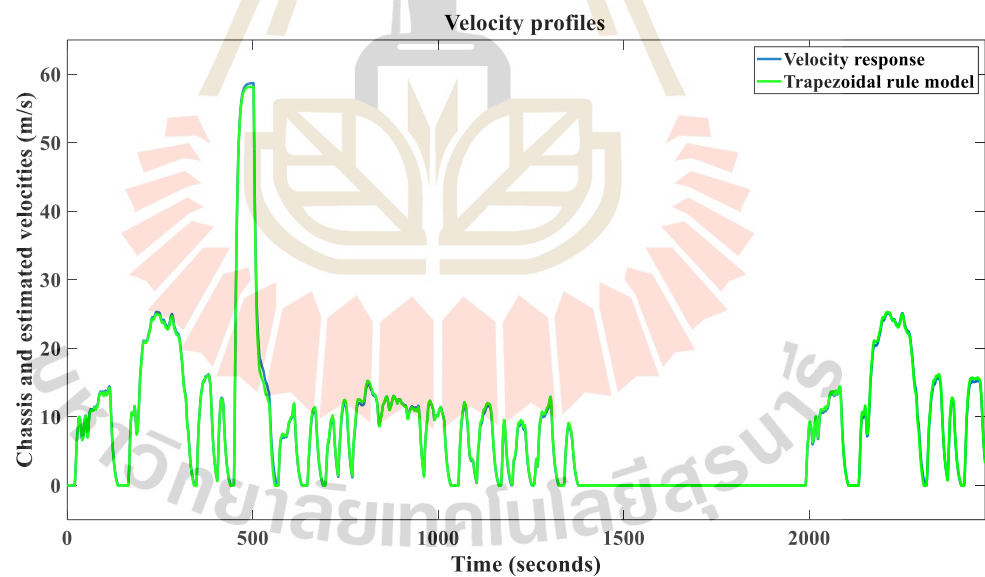
รูปที่ 6.4 อัตราเร็วอ้างอิงและผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าที่เกิดจากการขาดหายของสัญญาณวัดอัตราเร็วและการใช้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังแทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็วในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป



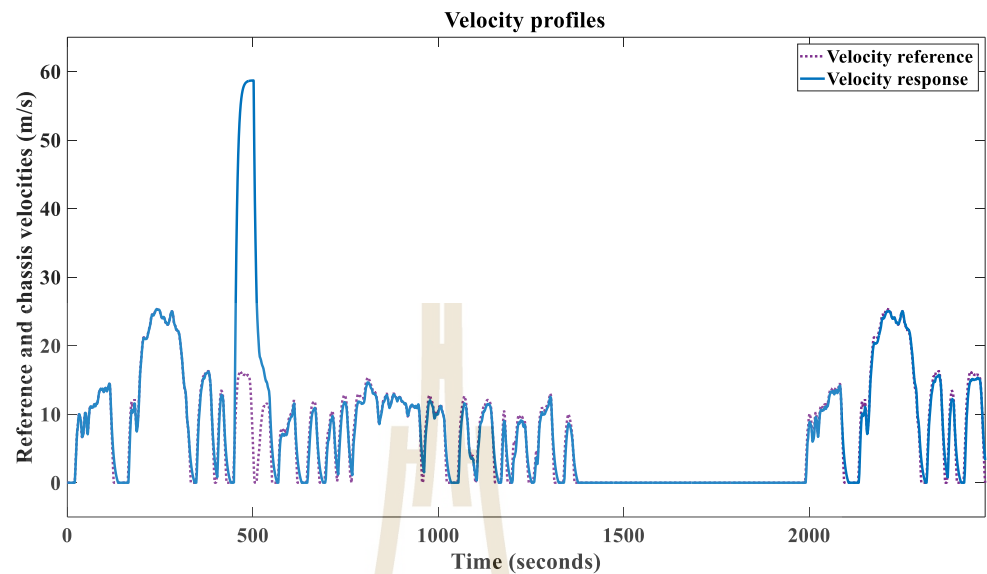
รูปที่ 6.5 ผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป



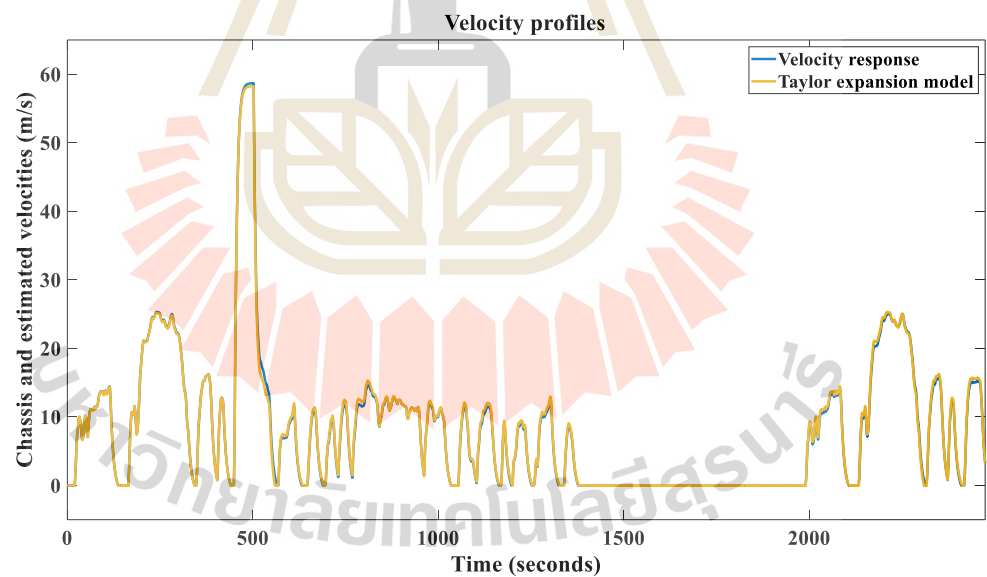
รูปที่ 6.6 อัตราเร็วอ้างอิงและผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าที่เกิดจากการขาดหายของสัญญาณวัดอัตราเร็วและการใช้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมูแทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็วในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในลูป



รูปที่ 6.7 ผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมูในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในลูป



รูปที่ 6.8 อัตราเร็วอ้างอิงและผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าที่เกิดจากการขาดหายของสัญญาณวัดอัตราเร็วและการใช้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์แทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็วในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในลูป



รูปที่ 6.9 ผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้าและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าของแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในลูป

6.4 สรุป

บทนี้ได้กล่าวถึงการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูปที่มีจุดประสงค์ของการตรวจสอบความเป็นไปได้ในการใช้งานแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการที่ใกล้เคียงกับเหตุการณ์ในทางปฏิบัติ ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดจะบังคับให้ยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้น อัตราเร็วคงที่ และอัตราเร็วลดลง และอาจจะจอดหยุดนิ่ง ช้ำกันหลายครั้งหรือหลายรอบ หลังจากสัญญาณวัดอัตราเร็วที่เป็นสัญญาณป้อนกลับเกิดการขาดหาย และระยะเวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง หรือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ (แผนการหนึ่งเท่านั้น) จะจ่ายและให้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า แทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว นั่นคือสัญญาณป้อนกลับเปลี่ยนไปเป็นอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า และเมื่อระยะเวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง ระบบควบคุมวงปิดยังคงรักษาสมรรถนะการเคลื่อนที่ของยานพาหนะไฟฟ้าที่มีอัตราเร็วที่ติดตามอัตราเร็วอ้างอิงในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นเมื่อแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการมีขนาดขั้นที่เล็กเพียงพอและมีค่าพารามิเตอร์ถูกต้อง แบบจำลองเชิงตัวเลขจะมีการทำงานและพลวัตที่เทียบเท่ากับเซนเซอร์วัดอัตราเร็ว และแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการมีโอกาสและความเป็นไปได้ในการแทนที่เซนเซอร์วัดอัตราเร็วทางกายภาพในทางเดินป้อนกลับภายในช่วงระยะเวลาหนึ่งหรือได้อย่างชั่วคราว ไมโครคอนโทรลเลอร์อาจจะทำหน้าที่เป็นแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง หรือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ (แผนการหนึ่งเท่านั้น) ในทางปฏิบัติ



บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการที่ทำหน้าที่ประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในหนึ่งมิติหรือในทางตรง วิธีออยเลอร์ย้อนหลัง (backward Euler method) วิธีกฎสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal rule method) และวิธีอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor expansion method) นำมาใช้พัฒนาหรือแปลงระบบพลวัตในเวลาต่อเนื่องที่เป็นโครงสร้างพื้นฐานของแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ ดังนั้นวิธีการเชิงตัวเลขดังกล่าวแปลงแบบจำลองพลวัตเชิงกลในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะไม่เชิงเส้นในเวลาต่อเนื่อง ไปเป็นแบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีการคำนวณแบบวนซ้ำในช่วงระยะเวลาที่ห่างกันแน่นอน แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการที่มีขนาดขั้นที่เล็กเพียงพอ จะให้พลวัตในการคำนวณอัตราเร็วที่เหมือนกับอัตราเร็วของยานพาหนะ นั่นคือแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการมีสมรรถนะในการประมาณค่าอัตราเร็วที่สมมูลหรือเทียบเท่ากับอัตราเร็วที่ได้จากการวัด การนำแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการมาใช้งานแทนที่เซนเซอร์ทางกายภาพที่วัดอัตราเร็ว จึงมีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ แต่การใช้งานแทนที่นี้ต้องเกิดขึ้นในช่วงระยะเวลาที่ไม่ยาวนานเกินไปหรือการใช้งานแทนที่ที่เกิดขึ้นในลักษณะชั่วคราวเท่านั้น

แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการได้รับแรงขับเคลื่อนและแรงเบรกเท่านั้นที่เป็นปริมาณอินพุต และประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ หรือแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการได้รับสัญญาณวัดกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์เท่านั้นที่เป็นปริมาณอินพุต และประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะไฟฟ้า แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการที่นำเสนอมีโครงสร้างที่ง่ายกว่าตัวสังเกตสถานะและตัวกรองคาลมาน เพราะแบบจำลองพลวัตเชิงกลในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่นำมาใช้พัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลข คือระบบไม่เชิงเส้นอันดับหนึ่ง แต่แบบจำลองพลวัตเชิงกลของยานพาหนะที่นำมาใช้พัฒนาตัวสังเกตสถานะและตัวกรองคาลมาน คือระบบไม่เชิงเส้นที่มีอันดับสองหรือมีอันดับสูงกว่า ตัวสังเกตสถานะและตัวกรองคาลมานจึงมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากกว่า และต้องการแรงขับเคลื่อนและแรงเบรก และสัญญาณวัดปริมาณทางกายภาพที่เพิ่มเติมอื่น ๆ เช่น อัตราเร่ง อัตราเร็วเชิงมุมการหมุนของล้อ นำมาเป็นข้อมูลที่ใช้ประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ นั่นคือตัวสังเกตสถานะและตัวกรองคาลมานต้องการข้อมูล และสัญญาณวัดในจำนวนที่มากกว่า นำมาใช้ประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ

และการใช้แบบจำลองพลวัตการเคลื่อนที่ของยานพาหนะอันดับหนึ่ง นำมาพัฒนาตัวสังเกตสถานะ และตัวกรองคาลมาน เป็นงานที่ไม่มีประโยชน์ทางวิศวกรรม เพราะตัวสังเกตสถานะและตัวกรองคาลมานต้องการสัญญาณวัดอัตราเร็วและปริมาณอินพุตในการประมาณค่าอัตราเร็วที่เข้าช้อนกับอัตราเร็วที่ได้จากการวัดหรือสัญญาณวัดอัตราเร็ว ดังนั้นถ้าสัญญาณวัดอัตราเร็วเกิดการขาดหาย ตัวสังเกตสถานะและตัวกรองคาลมานจะทำงานผิดพลาดและไม่สามารถประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะได้ แต่แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการที่ประกอบด้วย แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ จะประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะได้อย่างปกติ เพราะแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการไม่ต้องการสัญญาณวัดอัตราเร็วในการประมาณค่าอัตราเร็ว

เมื่อพิจารณาการจำลองสถานการณ์ที่มีระบบหรือส่วนประกอบทุกส่วนอยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์ บล็อกและระบบย่อยในโปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงค์พื้นฐานที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน จะสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ และสร้างระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะ และบล็อกและระบบย่อยในโปรแกรมแมทแล็บซิมูลิงค์ซิมสเคปที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกัน จะสร้างระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้า ถ้าแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการมีขนาดขั้นที่เล็กเพียงพอ เมื่อระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะบังคับให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า จอดหยุดนิ่ง เคลื่อนที่ถอยหลัง และจอดหยุดนิ่งอีกครั้งหนึ่ง แบบจำลองเชิงตัวเลขจะประมาณค่าอัตราเร็วที่ถูกต้องและตรงกับผลตอบสนองอัตราเร็วของยานพาหนะในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว และถ้าแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการมีขนาดขั้นที่มากเพียงพอ แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู มีแนวโน้มในการให้สมรรถนะของการประมาณค่าอัตราเร็วที่ต่ำกว่า เมื่อแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการมีขนาดขั้นที่เล็กเพียงพอ และสัญญาณวัดอัตราเร็วที่เป็นสัญญาณบ่อนกลับเกิดการขาดหาย ระบบควบคุมวงปิดจะกลายเป็นระบบวงเปิดภายในช่วงระยะเวลาหนึ่งที่ไม่แน่นอนเกินไป หลังจากแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง หรือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ (แผนการหนึ่งเท่านั้น) จำยสัญญาณบ่อนกลับที่เป็นอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าแทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว ระบบวงเปิดจะกลายเป็นระบบควบคุมวงปิดเสมือนที่บังคับการประมาณค่าอัตราเร็วที่ติดตามอัตราเร็วอ้างอิงในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว และยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่เท่ากับและตรงกับอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัวเช่นเดียวกัน

ถ้าแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการมีขนาดขั้นที่เล็กเพียงพอ เมื่อระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าบังคับให้ยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้นและอัตราเร็วลดลงอย่างสลับกันหลายครั้งและจอดหยุดนิ่ง แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการจะประมาณค่าอัตราเร็วที่ถูกต้องและตรงกับผลตอบสนองอัตราเร็วที่ติดตามอัตราเร็วอ้างอิงในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว และเมื่อสัญญาณวัดอัตราเร็วที่เป็นสัญญาณบ่อนกลับเกิดการขาดหาย ระบบควบคุมวงปิดจะ

กลายเป็นระบบวงเปิดภายในช่วงระยะเวลาหนึ่งที่ไม่แน่นอนเกินไป หลังจากแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง หรือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ (แผนการหนึ่งเท่านั้น) จำยสัญญาณป้อนกลับที่เป็นอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าแทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว ระบบวงเปิดจะกลายเป็นระบบควบคุมวงปิดเสมือนที่บังคับการประมาณค่าอัตราเร็วที่ติดตามอัตราเร็วอ้างอิงในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว และยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่เท่ากับและตรงกับอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัวเช่นเดียวกัน ยานพาหนะไฟฟ้าจึงเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่ติดตามอัตราเร็วอ้างอิง

เมื่อพิจารณาการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป การ์ดคอนโทรล F28335 ที่อยู่ภายนอกเครื่องคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่เป็นแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง หรือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ (แผนการหนึ่งเท่านั้น) นั่นคือแบบจำลองเชิงตัวเลขแต่ละแผนการจะอยู่ในรูปของชุดคำสั่งภาษาเครื่อง แต่ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าบรรจุอยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์ ถ้าแบบจำลองเชิงตัวเลขมีขนาดขั้นที่เล็กเพียงพอ เมื่อระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าบังคับให้ยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเพิ่มขึ้นและอัตราเร็วลดลงอย่างสลับกันหลายครั้งและจุดหยุดนิ่ง และสัญญาณวัดอัตราเร็วที่เป็นสัญญาณป้อนกลับเกิดการขาดหาย ระบบควบคุมวงปิดจะกลายเป็นระบบวงเปิดภายในช่วงระยะเวลาหนึ่งที่ไม่แน่นอนเกินไป หลังจากแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง หรือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ (แผนการหนึ่งเท่านั้น) จำยสัญญาณป้อนกลับที่เป็นอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าแทนที่สัญญาณวัดอัตราเร็ว ระบบวงเปิดจะกลายเป็นระบบควบคุมวงปิดเสมือนที่บังคับการประมาณค่าอัตราเร็วที่ติดตามอัตราเร็วอ้างอิงในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว และยานพาหนะไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่เท่ากับและตรงกับอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัวเช่นเดียวกัน ยานพาหนะไฟฟ้าจึงเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่ติดตามอัตราเร็วอ้างอิง

ดังนั้นถ้าแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการมีขนาดขั้นที่เล็กเพียงพอ และมีค่าพารามิเตอร์ทุกค่าเท่ากับค่าพารามิเตอร์ที่ตรงกันของยานพาหนะไฟฟ้า แบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการดังกล่าวจะมีความเป็นไปได้สูงในการใช้งานแทนที่เซนเซอร์วัดอัตราเร็วได้อย่างชั่วคราวในทางปฏิบัติ และแบบจำลองเชิงตัวเลขที่มีแนวโน้มให้สมรรถนะในการประมาณค่าอัตราเร็วที่ดีกว่า คือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู

7.2 ข้อเสนอแนะ

1) การใช้งานแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ทุกค่าที่ถูกต้องของยานพาหนะหรือระบบ แต่ในทางปฏิบัติ การทราบค่าพารามิเตอร์ทุกค่าที่ถูกต้องตลอดเวลา เป็น

งานวิศวกรรมขั้นสูงและต้องใช้ทรัพยากรในการคำนวณและการประมวลผลที่ซับซ้อน วิธีการหนึ่งที่ใช้คำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง คือการออกแบบและสร้างตัวประมาณค่าพารามิเตอร์ทุกค่าพร้อมกันแบบออนไลน์ การบังคับให้ยานพาหนะหรือระบบเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังหลายครั้งหรือหลายรอบในช่วงระยะเวลานานเพียงพอ จะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้การประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์เท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์จริงของระบบในสถานะอยู่ตัว นั่นคือตัวประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ต้องได้รับแรงขับเคลื่อนและแรงเบรกที่เป็นปริมาณอินพุตของยานพาหนะตลอดเวลา และต้องได้รับสัญญาณวัดอัตราเร็วหรืออัตราเร็วที่ได้จากการวัดที่เป็นปริมาณเอาต์พุตของยานพาหนะตลอดเวลาเช่นเดียวกัน ภาคผนวก ก จะกล่าวถึงตัวอย่างของตัวประมาณค่าแบบปรับตัวที่ทำหน้าที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะทุกค่าพร้อมกันแบบออนไลน์

2) เมื่อยานพาหนะมีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงจากค่าเดิมก่อนการเคลื่อนที่หรือในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ การใช้งานแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการในทางปฏิบัติ ต้องการอัลกอริทึมหรือหน่วยประมาณค่าพารามิเตอร์ในเวลาจริง (real time) เพิ่มเติมที่ใช้ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ เนื่องจากยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าในจำนวนครั้งที่มากกว่าจำนวนครั้งของการเคลื่อนที่ถอยหลัง และมีรูปแบบของการเคลื่อนที่ที่ไม่แน่นอน อัลกอริทึมหรือหน่วยประมาณค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะในเวลาจริงดังกล่าว ยังคงต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องหรือมีความแตกต่างน้อยมากจากค่าพารามิเตอร์จริง นั่นคือก่อนสัญญาณวัดอัตราเร็วเกิดการขาดหาย อัลกอริทึมหรือหน่วยประมาณค่าพารามิเตอร์ในเวลาจริง ต้องได้รับแรงขับเคลื่อนและแรงเบรกที่เป็นปริมาณอินพุตของยานพาหนะตลอดเวลา และต้องได้รับสัญญาณวัดอัตราเร็วหรืออัตราเร็วที่ได้จากการวัดที่เป็นปริมาณเอาต์พุตของยานพาหนะตลอดเวลาเช่นเดียวกัน และหลังจากสัญญาณวัดอัตราเร็วเกิดการขาดหาย อัลกอริทึมหรือหน่วยประมาณค่าพารามิเตอร์ในเวลาจริง จะหยุดการทำงานหรือหยุดการคำนวณ แต่แบบจำลองเชิงตัวเลขยังคงประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะอย่างต่อเนื่องและทำหน้าที่แทนที่เซนเซอร์วัดอัตราเร็ว เมื่อการพัฒนอัลกอริทึมหรือหน่วยประมาณค่าพารามิเตอร์ในเวลาจริงมีความชัดเจนและมีประสิทธิภาพแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการจะมีความสมบูรณ์ในการใช้งานมากขึ้น

3) ในทางปฏิบัติ การใช้งานแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง หรือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ (แผนการหนึ่งเท่านั้น) แทนที่เซนเซอร์วัดอัตราเร็ว ต้องการวิธีหรืออัลกอริทึมที่ตรวจสอบการขาดหายของสัญญาณวัดอัตราเร็ว นั่นคือวิธีหรืออัลกอริทึมดังกล่าว แยกแยะสัญญาณวัดอัตราเร็วที่ผิดปกติออกจากสัญญาณวัดอัตราเร็วที่มีสภาพปกติได้ ก่อนสัญญาณวัดอัตราเร็วเกิดการขาดหาย วิธีหรืออัลกอริทึมจะปล่อยผ่านสัญญาณวัดอัตราเร็วที่เป็นสัญญาณบ่อนกกลับ และปิดกั้นอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า แต่หลังจากสัญญาณวัดอัตราเร็วเกิดการขาดหาย วิธีหรืออัลกอริทึมจะใช้ช่วงระยะเวลาสั้นช่วงหนึ่งในการคำนวณค่าความน่าจะเป็นและตัดสินใจ

ว่าสัญญาณวัดอัตราเร็วผิดปกติ และวิธีหรืออัลกอริทึมจะปล่อยผ่านอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าที่เป็นสัญญาณบ่อนกลับ





รายการอ้างอิง

รายการอ้างอิง

- นนทการณ มังคลา, กองพล อารีรักษ์, ชาศริต ปานแป้น, กองพัน อารีรักษ์. (2566). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการจำลองสถานการณ์ด้วยวิธีฮาร์ดแวร์ในรูปสำหรับระบบยานยนต์ไฟฟ้า. วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม. 16(3). หน้า 105-118.
- ทศพร ณรงค์ฤทธิ์. (2557). การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyแบบปรับตัวสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบขนานในระบบสามเฟสสมดุล. วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- D. W. Hart, *Power Electronics*, New York: McGraw-Hill, 2011.
- E. Hashemi, A. Kasaiezadeh, S.Khosravani, A. Khajepour, N.Moshchuk, and S. Chen, "Estimation of Longitudinal Speed Robust to Road Conditions for Ground Vehicles," *Vehicle System Dynamics*, 54(8), pp. 1120–1146, doi: 10.1080/00423114.2016.1178391.
- G. Rill, "A Modified Implicit Euler Algorithm for Solving Vehicle Dynamic Equations," *Multibody System Dynamics* (2006) 15, 1–24 DOI: 10.1007/s11044-006-2359-z
- H. Bessafa, C. Delattre, Z. Belkhatir, A. Zemouche, R. Rajamani, "High-Gain Like Observer Design for Nonlinear Systems Applied to Vehicle Motion Estimation," *IFAC-PapersOnLine*, vol.56, Issue 2, 2023, pp.5673-5678, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.495>.
- H. Bessafa, Z. Belkhatir, C. Delattre, R. Khemmar, A. Zemouche and R. Rajamani, "Radar Sensor-Based Longitudinal Motion Estimation by Using a Generalized High-Gain Observer," *2024 American Control Conference (ACC)*, Toronto, ON, Canada, 2024, pp. 4919-4923, doi: 10.23919/ACC60939.2024.10644906.
- H. K. Khalil, "Nonlinear Systems". 3rd ed, Prentice Hall, 2002
- K. Ogata, "Modern Control Engineering". 5th ed, Prentice Hall, 2010

LibreTexts™ Engineering Introduction to Control Systems (Iqbal) Available from:
[https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Introduction_to_Control_Systems_\(Iqbal\)/01:_Mathematical_Models_of_Physical_Systems/1.04:_An_Electro-Mechanical_System_Model](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Introduction_to_Control_Systems_(Iqbal)/01:_Mathematical_Models_of_Physical_Systems/1.04:_An_Electro-Mechanical_System_Model) [Accessed 5th June 2025]

L. Imsland, T. A. Johansen, T. I. Fossen, H. F. Grip, J. C. Kalkkuhl, and A. Suissa, "Vehicle velocity estimation using nonlinear observers," *Automatica* 42 (2006), 2091–2103

M. H. Mobarak, R. N. Kleiman and J. Bauman, "Solar-Charged Electric Vehicles: A Comprehensive Analysis of Grid, Driver, and Environmental Benefits," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 2, pp. 579-603, June 2021, doi: 10.1109/TTE.2020.2996363.

S. C. Chapra and R. P. Canale, *Numerical Methods for Engineers*. 7th ed. NY, USA: McGraw-Hill, 2015.

S. Das, *Modeling for Hybrid and Electric Vehicles Using Simscape*. Morgan & Claypool Publishers series, 2021.

S. Mohite, M. Alma, A. Zemouche and M. Haddad, "State Estimation of Longitudinal Vehicle Model Using H^∞ LMI-Based Nonlinear Observer," *2023 31st Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Limassol, Cyprus, 2023, pp. 293-298, doi: 10.1109/MED59994.2023.10185645.

S. Nayak, A. K. Bohre, P. Kumar and M. L. Kolhe, "Modeling and Performance Analysis of an Electric Vehicle," *2022 International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON)*, Bangalore, India, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/SMARTGENCON56628.2022.10084234.

Wikipedia contributors. "Anti-lock braking system." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*.

Wikipedia, The Free Encyclopedia, 4 Dec. 2024. Web. 19 Jan. 2025.

Wikipedia contributors. "Backward Euler method." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*.

Wikipedia, The Free Encyclopedia, 17 Jun. 2024. Web. 19 Jan. 2025.

Wikipedia contributors. "Cruise control." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Wikipedia,

The Free Encyclopedia, 5 Dec. 2024. Web. 19 Jan. 2025.

- Wikipedia contributors. "Euler method." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 15 Nov. 2024. Web. 19 Jan. 2025.
- Wikipedia contributors. "Speed." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 19 Sep. 2024. Web. 19 Jan. 2025.
- Wikipedia contributors. "Speedometer." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 6 Jan. 2025. Web. 19 Jan. 2025.
- Wikipedia contributors. "Trapezoidal rule (differential equations)." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 16 Sep. 2024. Web. 19 Jan. 2025.
- Wikipedia contributors. "Velocity." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 23 Aug. 2024. Web. 21 Jan. 2025.
- X. Ding, Z. Wang, L. Zhang and C. Wang, "Longitudinal Vehicle Speed Estimation for Four-Wheel-Independently-Actuated Electric Vehicles Based on Multi-Sensor Fusion," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 11, pp. 12797-12806, Nov. 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3026106
- Zhao Z, Chen H, Yang J, Wu X and Yu Z, "Estimation of the vehicle speed in the driving mode for a hybrid electric car based on an unscented Kalman filter," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2015, 229(4), 437-456, doi:10.1177/0954407014546918
- Z. Yin, Q. Dai, H. Guo, H. Chen and L. Chao, "Estimation Road slope and Longitudinal Velocity for Four-wheel Drive Vehicle," "Estimation Road Slope and Longitudinal Velocity for Four-wheel Drive Vehicle." *IFAC-PapersOnLine* 51 (2018), 57

ภาคผนวก ก
การพัฒนาตัวประมาณค่าแบบปรับตัวที่ใช้ประมาณค่าพารามิเตอร์ของ
ยานพาหนะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

เมื่อแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ มีค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้อง แผนการเชิงตัวเลข 3 แผนการดังกล่าวจะประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะได้อย่างถูกต้อง การหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องของยานพาหนะจึงเป็นสิ่งสำคัญในการประมาณค่าอัตราเร็วที่ให้สมรรถนะที่ดี แต่การหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องไม่ใช่งานที่ง่ายและสะดวก เนื่องจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องเป็นงานที่มีความซับซ้อน วิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดคือการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ทุกค่าพร้อมกัน และการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในทางตรงหนึ่งมิติคือตัวอย่างหนึ่งของระบบไม่เชิงเส้น การพัฒนาตัวประมาณค่าแบบปรับตัว (adaptive estimator) ที่ทำหน้าที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ทุกค่าพร้อมกัน จึงมีความจำเป็นเมื่อพิจารณาแบบจำลองพลวัตการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในทางตรงหนึ่งมิติในสมการที่ (3-4) จะได้ว่า

$$\dot{v}_c = -av_c - bv_c^2 - d + hu_w \quad (\text{ผ-1})$$

การเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของยานพาหนะ ($v_c > 0$) และการเคลื่อนที่ถอยหลัง ($v_c < 0$) มีความเป็นไปได้ที่ค่าพารามิเตอร์ a ไม่เท่ากัน และ b ไม่เท่ากัน และ d ไม่เท่ากัน กล่าวคือ ถ้า $v_c > 0$ จะได้ว่า $a = a^+$ และ $b = b^+$ และ $d = d^+$ และถ้า $v_c < 0$ จะได้ว่า $a = a^-$ และ $b = -b^-$ และ $d = -d^-$ ดังนั้นถ้ายานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นและอัตราเร็วที่ลดลง สมการที่ (ผ-1) คือ $\dot{v}_c = -a^+v_c - b^+v_c^2 - d^+ + hu_w$ และถ้ายานพาหนะเคลื่อนที่ถอยหลังด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นและอัตราเร็วที่ลดลง สมการที่ (ผ-1) คือ $\dot{v}_c = -a^-v_c + b^-v_c^2 + d^- + hu_w$ นั่นคือการเคลื่อนที่ของยานพาหนะมีค่าพารามิเตอร์ที่เขียนได้ดังนี้

$$a = 0.5a^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5a^-(1 - \text{sgn}(v_c))$$

$$b = 0.5b^+(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5b^-(1 - \text{sgn}(v_c))$$

$$\text{และ } d = 0.5d^+(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5d^-(1 - \text{sgn}(v_c))$$

และการเคลื่อนที่สองทิศทางของยานพาหนะในทางตรงหนึ่งมิติ มีแบบจำลองพลวัตดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{v}_c = & -\left(0.5a^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5a^-(1 - \text{sgn}(v_c))\right)v_c \\ & - \left(0.5b^+(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5b^-(1 - \text{sgn}(v_c))\right)v_c^2 \\ & - 0.5d^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5d^-(1 - \text{sgn}(v_c)) + hu_w\end{aligned}\quad (\text{ผ-2})$$

โดยที่ $\text{sgn}(v_c) \approx \frac{v_c}{|v_c| + \varepsilon}$, $\varepsilon > 0$, $a^+ > 0$, $a^- > 0$, $b^+ > 0$

,

$$b^- > 0 , \quad d^+ > 0 , \quad d^- > 0 , \quad h > 0 , \quad \dot{a}^+ \approx 0 ,$$

$$\dot{a}^- \approx 0 , \quad \dot{b}^+ \approx 0 , \quad \dot{b}^- \approx 0 , \quad \dot{d}^+ \approx 0 , \quad \dot{d}^- \approx 0$$

$$\text{และ } \dot{h} \approx 0$$

ตัวประมาณค่าแบบปรับตัวมีโครงสร้างหลักดังนี้

$$\begin{aligned}\hat{v}_c = & -\left(0.5\hat{a}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\hat{a}^-(1 - \text{sgn}(v_c))\right)\hat{v}_c \\ & - \left(0.5\hat{b}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\hat{b}^-(1 - \text{sgn}(v_c))\right)\hat{v}_c^2 \\ & - 0.5\hat{d}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\hat{d}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) \\ & + \hat{h}u_w + \hat{l}(v_c - \hat{v}_c) + k_l(v_c - \hat{v}_c)\end{aligned}\quad (\text{ผ-3})$$

โดยที่

$$\begin{aligned}\hat{l} = & -\gamma\left(0.5\hat{a}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\hat{a}^-(1 - \text{sgn}(v_c))\right) \\ & - \left(0.5\hat{b}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\hat{b}^-(1 - \text{sgn}(v_c))\right)(v_c + \hat{v}_c)\end{aligned}\quad (\text{ผ-4})$$

$\hat{v}_c$, $\hat{a}^+$, $\hat{a}^-$, $\hat{b}^+$, $\hat{b}^-$, $\hat{d}^+$, $\hat{d}^-$ และ $\hat{h}$ คืออัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่าของ v_c , a^+ , a^- , b^+ , b^- , d^+ , d^- และ h ตามลำดับ $\hat{l}$ คือค่าเกนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา γ คือค่าคงที่ที่มีค่าน้อยกว่า 1 และ k_l คือค่าเกนคงที่ที่มีค่าบวก นั่นคือตัวประมาณค่าแบบปรับตัวมีค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่าที่สัมพันธ์กับทิศทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะดังนี้

$$\hat{a} = 0.5\hat{a}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\hat{a}^-(1 - \text{sgn}(v_c))$$

$$\hat{b} = 0.5\hat{b}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\hat{b}^-(1 - \text{sgn}(v_c))$$

$$\text{และ } \hat{d} = 0.5\hat{d}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\hat{d}^-(1 - \text{sgn}(v_c))$$

การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองพลวัตการเคลื่อนที่ของยานพาหนะและตัวประมาณค่าแบบปรับตัว มีความผิดพลาดดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{v}_c - \dot{\hat{v}}_c = & -\left(0.5a^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5a^-(1 - \text{sgn}(v_c))\right)v_c \\ & + \left(0.5\hat{a}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\hat{a}^-(1 - \text{sgn}(v_c))\right)\hat{v}_c \\ & - \left(0.5b^+(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5b^-(1 - \text{sgn}(v_c))\right)v_c^2 \\ & + \left(0.5\hat{b}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\hat{b}^-(1 - \text{sgn}(v_c))\right)\hat{v}_c^2 \\ & - 0.5d^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5d^-(1 - \text{sgn}(v_c)) \\ & + 0.5\hat{d}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\hat{d}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) \\ & + hu_w - \hat{h}u_w - \hat{l}(v_c - \hat{v}_c) - k_l(v_c - \hat{v}_c) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{v}_c = & -0.5a^+(1 + \text{sgn}(v_c))v_c - 0.5a^-(1 - \text{sgn}(v_c))v_c \\ & + 0.5\hat{a}^+(1 + \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c + 0.5\hat{a}^-(1 - \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c \\ & - 0.5b^+(1 + \text{sgn}(v_c))v_c^2 + 0.5b^-(1 - \text{sgn}(v_c))v_c^2 \\ & + 0.5\hat{b}^+(1 + \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c^2 - 0.5\hat{b}^-(1 - \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c^2 \\ & - 0.5d^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\hat{d}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) \\ & + 0.5d^-(1 - \text{sgn}(v_c)) - 0.5\hat{d}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) \\ & + (h - \hat{h})u_w - \hat{l}\ddot{v}_c - k_l\ddot{v}_c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{\hat{v}}_c = & -0.5a^+(1 + \text{sgn}(v_c))v_c + 0.5\hat{a}^+(1 + \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c \\ & - 0.5a^-(1 - \text{sgn}(v_c))v_c + 0.5\hat{a}^-(1 - \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c \\ & - 0.5b^+(1 + \text{sgn}(v_c))v_c^2 + 0.5\hat{b}^+(1 + \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c^2 \\ & + 0.5b^-(1 - \text{sgn}(v_c))v_c^2 - 0.5\hat{b}^-(1 - \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c^2 \\ & - 0.5(d^+ - \hat{d}^+)(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5(d^- - \hat{d}^-)(1 - \text{sgn}(v_c)) \\ & + \tilde{h}u_w - \hat{l}\ddot{\hat{v}}_c - k_l\ddot{\hat{v}}_c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{v}}_c &= -0.5a^+(1 + \text{sgn}(v_c))v_c + 0.5a^+(1 + \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c \\
&\quad - 0.5a^+(1 + \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c + 0.5\hat{a}^+(1 + \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c \\
&\quad - 0.5a^-(1 - \text{sgn}(v_c))v_c + 0.5a^-(1 - \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c \\
&\quad - 0.5a^-(1 - \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c + 0.5\hat{a}^-(1 - \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c \\
&\quad - 0.5b^+(1 + \text{sgn}(v_c))v_c^2 + 0.5b^+(1 + \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c^2 \\
&\quad - 0.5b^+(1 + \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c^2 + 0.5\hat{b}^+(1 + \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c^2 \\
&\quad + 0.5b^-(1 - \text{sgn}(v_c))v_c^2 - 0.5b^-(1 - \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c^2 \\
&\quad + 0.5b^-(1 - \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c^2 - 0.5\hat{b}^-(1 - \text{sgn}(v_c))\hat{v}_c^2 \\
&\quad - 0.5\tilde{d}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{d}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad + \tilde{h}u_w - \hat{l}\tilde{v}_c - k_l\tilde{v}_c \\
\\
\dot{\tilde{v}}_c &= -0.5a^+(v_c - \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5(a^+ - \hat{a}^+)\hat{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5a^-(v_c - \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c)) - 0.5(a^- - \hat{a}^-)\hat{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5b^+(v_c^2 - \hat{v}_c^2)(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5(b^+ - \hat{b}^+)\hat{v}_c^2(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad + 0.5b^-(v_c^2 - \hat{v}_c^2)(1 - \text{sgn}(v_c)) + 0.5(b^- - \hat{b}^-)\hat{v}_c^2(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5\tilde{d}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{d}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) + \tilde{h}u_w - \hat{l}\tilde{v}_c - k_l\tilde{v}_c \\
\\
\dot{\tilde{v}}_c &= -0.5a^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{a}^+\hat{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5a^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{a}^-\hat{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5b^+(v_c - \hat{v}_c)(v_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{b}^+\hat{v}_c^2(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad + 0.5b^-(v_c - \hat{v}_c)(v_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{b}^-\hat{v}_c^2(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5\tilde{d}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{d}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) + \tilde{h}u_w - \hat{l}\tilde{v}_c - k_l\tilde{v}_c \\
\\
\dot{\tilde{v}}_c &= -0.5a^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{a}^+\hat{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5a^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{a}^-\hat{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5b^+\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{b}^+\hat{v}_c^2(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad + 0.5b^-\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{b}^-\hat{v}_c^2(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5\tilde{d}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{d}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad + \tilde{h}u_w - \hat{l}\tilde{v}_c - k_l\tilde{v}_c
\end{aligned} \tag{W-5}$$

พจน์ $-\hat{l}\tilde{v}_c$ มีรายละเอียดดังนี้

$$\begin{aligned}
-\hat{l}\tilde{v}_c &= \gamma\tilde{v}_c \left(0.5\hat{a}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\hat{a}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) \right) \\
&\quad + \tilde{v}_c \left(0.5\hat{b}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\hat{b}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) \right) (v_c + \hat{v}_c) \\
-\hat{l}\tilde{v}_c &= 0.5\gamma\hat{a}^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\gamma\hat{a}^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad + 0.5\hat{b}^+\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5\hat{b}^-\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c))
\end{aligned} \tag{ผ-6}$$

แทนค่าพจน์ $-\hat{l}\tilde{v}_c$ จากสมการที่ (ผ-6) ลงในสมการที่ (ผ-5) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{v}}_c &= -0.5a^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{a}^+\hat{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5a^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{a}^-\hat{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5b^+\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{b}^+\hat{v}_c^2(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad + 0.5b^-\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{b}^-\hat{v}_c^2(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5\tilde{d}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{d}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) + \tilde{h}u_w - k_l\tilde{v}_c \\
&\quad + 0.5\gamma\hat{a}^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\gamma\hat{a}^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad + 0.5\hat{b}^+\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\hat{b}^-\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{v}}_c &= -0.5a^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\gamma\hat{a}^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5a^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) + 0.5\gamma\hat{a}^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5\tilde{a}^+\hat{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{a}^-\hat{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5b^+\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\hat{b}^+\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad + 0.5b^-\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c)) - 0.5\hat{b}^-\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5\tilde{b}^+\hat{v}_c^2(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{b}^-\hat{v}_c^2(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5\tilde{d}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{d}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) + \tilde{h}u_w - k_l\tilde{v}_c
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{v}}_c &= -0.5a^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\gamma a^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5\gamma a^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\gamma\hat{a}^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5a^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) + 0.5\gamma a^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5\gamma a^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) + 0.5\gamma\hat{a}^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
&\quad - 0.5\tilde{a}^+\hat{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{a}^-\hat{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -0.5(b^+ - \hat{b}^+)\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
& + 0.5(b^- - \hat{b}^-)\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{b}^+\hat{v}_c^2(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{b}^-\hat{v}_c^2(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{d}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{d}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& + \tilde{h}u_w - k_l\tilde{v}_c
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{v}}_c = & -0.5(1 - \gamma)a^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\gamma(a^+ - \hat{a}^+)\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5(1 - \gamma)a^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) - 0.5\gamma(a^- - \hat{a}^-)\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{a}^+\hat{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{a}^-\hat{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{b}^+\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{b}^-\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{b}^+\hat{v}_c^2(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{b}^-\hat{v}_c^2(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{d}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{d}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) + \tilde{h}u_w - k_l\tilde{v}_c
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{v}}_c = & -0.5(1 - \gamma)a^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\gamma\tilde{a}^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5(1 - \gamma)a^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) - 0.5\gamma\tilde{a}^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{a}^+\hat{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{a}^-\hat{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{b}^+\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{b}^+\hat{v}_c^2(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
& + 0.5\tilde{b}^-\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{b}^-\hat{v}_c^2(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{d}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{d}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) + \tilde{h}u_w - k_l\tilde{v}_c
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{v}}_c = & -0.5(1 - \gamma)a^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5(1 - \gamma)a^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\gamma\tilde{a}^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\gamma\tilde{a}^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{a}^+\hat{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{a}^-\hat{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{b}^+(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
& + 0.5\tilde{b}^-(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{d}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{d}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& + \tilde{h}u_w - k_l\tilde{v}_c
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{v}}_c = & -0.5(1 - \gamma)a^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5(1 - \gamma)a^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\gamma\tilde{a}^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{a}^+\hat{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\gamma\tilde{a}^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{a}^-\hat{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -0.5\tilde{b}^+(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
& + 0.5\tilde{b}^-(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{d}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{d}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& + \tilde{h}u_w - k_l\tilde{v}_c
\end{aligned}$$

หลังจากการจัดรูปสมการใหม่และจัดกลุ่มพจน์ที่เหมาะสมเข้าด้วยกัน จะได้รับสมการความผิดพลาดระหว่างการเคลื่อนที่ของยานพาหนะและตัวประมาณค่าแบบปรับตัวในสมการที่ (ผ-7)

$$\begin{aligned}
\dot{\tilde{v}}_c = & -0.5(1 - \gamma)a^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5(1 - \gamma)a^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{a}^+(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{a}^-(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{b}^+(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
& + 0.5\tilde{b}^-(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{d}^+(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{d}^-(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& + \tilde{h}u_w - k_l\tilde{v}_c
\end{aligned} \tag{ผ-7}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
\tilde{v}_c &= v_c - \hat{v}_c, \quad \tilde{a}^+ = a^+ - \hat{a}^+, \quad \tilde{a}^- = a^- - \hat{a}^-, \\
\tilde{b}^+ &= b^+ - \hat{b}^+, \quad \tilde{b}^- = b^- - \hat{b}^-, \quad \tilde{d}^+ = d^+ - \hat{d}^+, \\
\tilde{d}^- &= d^- - \hat{d}^- \quad \text{และ} \quad \tilde{h} = h - \hat{h}
\end{aligned}$$

$\tilde{v}_c, \tilde{a}^+, \tilde{a}^-, \tilde{b}^+, \tilde{b}^-, \tilde{d}^+, \tilde{d}^-$ และ $\tilde{h}$ คือความผิดพลาดของการประมาณค่าอัตราเร็วและความผิดพลาดของการประมาณค่าพารามิเตอร์ตามลำดับ สมการความผิดพลาดในสมการที่ (ผ-7) คือระบบไม่เชิงเส้นอันดับหนึ่งที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ตัวประมาณค่าแบบปรับตัวจะต้องมีการทำงานที่ทำให้สมการความผิดพลาดระหว่างการเคลื่อนที่ของยานพาหนะและตัวประมาณค่าแบบปรับตัวเกิดเสถียรภาพ นั่นคือกลไกที่เหมาะสมที่ทำหน้าที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ทุกตัวพร้อมกันแบบออนไลน์ จะรักษาเสถียรภาพของสมการความผิดพลาดดังกล่าว การเกิดเสถียรภาพจึงเป็นเงื่อนไขที่ใช้หากกลไกการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ชัดเจน ต่อมานำ $\tilde{v}_c$ คูณเข้าทั้งสองข้างของสมการที่ (ผ-7) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
\tilde{v}_c\dot{\tilde{v}}_c = & -0.5(1 - \gamma)a^+\tilde{v}_c^2(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5(1 - \gamma)a^-\tilde{v}_c^2(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{a}^+\tilde{v}_c(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5\tilde{a}^-\tilde{v}_c(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -0.5\tilde{b}^+\tilde{v}_c(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
& + 0.5\tilde{b}^-\tilde{v}_c(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& - 0.5\tilde{d}^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) + 0.5\tilde{d}^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& + \tilde{h}\tilde{v}_cu_w - k_l\tilde{v}_c^2
\end{aligned} \tag{ผ-8}$$

จากนั้นนำพจน์ $\frac{\tilde{a}^+\dot{\tilde{a}}^+}{k_{ia}^+}$, $\frac{\tilde{a}^-\dot{\tilde{a}}^-}{k_{ia}^-}$, $\frac{\tilde{b}^+\dot{\tilde{b}}^+}{k_{ib}^+}$, $\frac{\tilde{b}^-\dot{\tilde{b}}^-}{k_{ib}^-}$, $\frac{\tilde{d}^+\dot{\tilde{d}}^+}{k_{id}^+}$, $\frac{\tilde{d}^-\dot{\tilde{d}}^-}{k_{id}^-}$ และ $\frac{\tilde{h}\dot{\tilde{h}}}{k_{ih}}$ บวกเข้าทั้งสองข้างของสมการที่ (ผ-8) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
& \tilde{v}_c\dot{\tilde{v}}_c + \frac{\tilde{a}^+\dot{\tilde{a}}^+}{k_{ia}^+} + \frac{\tilde{a}^-\dot{\tilde{a}}^-}{k_{ia}^-} + \frac{\tilde{b}^+\dot{\tilde{b}}^+}{k_{ib}^+} + \frac{\tilde{b}^-\dot{\tilde{b}}^-}{k_{ib}^-} + \frac{\tilde{d}^+\dot{\tilde{d}}^+}{k_{id}^+} + \frac{\tilde{d}^-\dot{\tilde{d}}^-}{k_{id}^-} + \frac{\tilde{h}\dot{\tilde{h}}}{k_{ih}} \\
& = -k_l\tilde{v}_c^2 - 0.5(1 - \gamma)a^+\tilde{v}_c^2(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5(1 - \gamma)a^-\tilde{v}_c^2(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& \quad + \frac{\tilde{a}^+\dot{\tilde{a}}^+}{k_{ia}^+} - 0.5\tilde{a}^+\tilde{v}_c(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
& \quad + \frac{\tilde{a}^-\dot{\tilde{a}}^-}{k_{ia}^-} - 0.5\tilde{a}^-\tilde{v}_c(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& \quad + \frac{\tilde{b}^+\dot{\tilde{b}}^+}{k_{ib}^+} - 0.5\tilde{b}^+\tilde{v}_c(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
& \quad + \frac{\tilde{b}^-\dot{\tilde{b}}^-}{k_{ib}^-} + 0.5\tilde{b}^-\tilde{v}_c(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& \quad + \frac{\tilde{d}^+\dot{\tilde{d}}^+}{k_{id}^+} - 0.5\tilde{d}^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) \\
& \quad + \frac{\tilde{d}^-\dot{\tilde{d}}^-}{k_{id}^-} + 0.5\tilde{d}^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) + \frac{\tilde{h}\dot{\tilde{h}}}{k_{ih}} + \tilde{h}\tilde{v}_cu_w \\
& \tilde{v}_c\dot{\tilde{v}}_c + \frac{\tilde{a}^+\dot{\tilde{a}}^+}{k_{ia}^+} + \frac{\tilde{a}^-\dot{\tilde{a}}^-}{k_{ia}^-} + \frac{\tilde{b}^+\dot{\tilde{b}}^+}{k_{ib}^+} + \frac{\tilde{b}^-\dot{\tilde{b}}^-}{k_{ib}^-} + \frac{\tilde{d}^+\dot{\tilde{d}}^+}{k_{id}^+} + \frac{\tilde{d}^-\dot{\tilde{d}}^-}{k_{id}^-} + \frac{\tilde{h}\dot{\tilde{h}}}{k_{ih}} \\
& = -k_l\tilde{v}_c^2 - 0.5(1 - \gamma)a^+\tilde{v}_c^2(1 + \text{sgn}(v_c)) - 0.5(1 - \gamma)a^-\tilde{v}_c^2(1 - \text{sgn}(v_c)) \\
& \quad + \tilde{a}^+\left(\frac{\dot{\tilde{a}}^+}{k_{ia}^+} - 0.5\tilde{v}_c(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c))\right) \\
& \quad + \tilde{a}^-\left(\frac{\dot{\tilde{a}}^-}{k_{ia}^-} - 0.5\tilde{v}_c(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c))\right) \\
& \quad + \tilde{b}^+\left(\frac{\dot{\tilde{b}}^+}{k_{ib}^+} - 0.5\tilde{v}_c(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 + \text{sgn}(v_c))\right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \tilde{b}^- \left(\frac{\dot{b}^-}{k_{ib}^-} + 0.5\tilde{v}_c(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 - \text{sgn}(v_c)) \right) \\
& + \tilde{d}^+ \left(\frac{\dot{d}^+}{k_{id}^+} - 0.5\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) \right) + \tilde{d}^- \left(\frac{\dot{d}^-}{k_{id}^-} + 0.5\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \right) \\
& + \tilde{h} \left(\frac{\dot{h}}{k_{ih}} + \tilde{v}_c u_w \right)
\end{aligned} \tag{W-9}$$

กำหนดให้

$$\begin{aligned}
\tilde{a}^+ \left(\frac{\dot{a}^+}{k_{ia}^+} - 0.5\tilde{v}_c(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) \right) &= 0 , \\
\tilde{a}^- \left(\frac{\dot{a}^-}{k_{ia}^-} - 0.5\tilde{v}_c(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c)) \right) &= 0 , \\
\tilde{b}^+ \left(\frac{\dot{b}^+}{k_{ib}^+} - 0.5\tilde{v}_c(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 + \text{sgn}(v_c)) \right) &= 0 , \\
\tilde{b}^- \left(\frac{\dot{b}^-}{k_{ib}^-} + 0.5\tilde{v}_c(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 - \text{sgn}(v_c)) \right) &= 0 , \\
\tilde{d}^+ \left(\frac{\dot{d}^+}{k_{id}^+} - 0.5\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) \right) &= 0 , \\
\tilde{d}^- \left(\frac{\dot{d}^-}{k_{id}^-} + 0.5\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) \right) &= 0 \text{ และ } \tilde{h} \left(\frac{\dot{h}}{k_{ih}} + \tilde{v}_c u_w \right) = 0
\end{aligned}$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
\tilde{a}^+ \neq 0 , \quad \tilde{a}^- \neq 0 , \quad \tilde{b}^+ \neq 0 , \quad \tilde{b}^- \neq 0 , \quad \tilde{d}^+ \neq 0 , \\
\tilde{d}^- \neq 0 \text{ และ } \tilde{h} \neq 0
\end{aligned}$$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
\frac{\dot{a}^+}{k_{ia}^+} - 0.5\tilde{v}_c(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) &= 0 , \\
\frac{\dot{a}^-}{k_{ia}^-} - 0.5\tilde{v}_c(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c)) &= 0 , \\
\frac{\dot{b}^+}{k_{ib}^+} - 0.5\tilde{v}_c(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 + \text{sgn}(v_c)) &= 0 , \\
\frac{\dot{b}^-}{k_{ib}^-} + 0.5\tilde{v}_c(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 - \text{sgn}(v_c)) &= 0 , \\
\frac{\dot{d}^+}{k_{id}^+} - 0.5\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c)) &= 0 , \quad \frac{\dot{d}^-}{k_{id}^-} + 0.5\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c)) = 0
\end{aligned}$$

และ $\frac{\dot{h}}{k_{ih}} + \tilde{v}_c u_w = 0$

จะได้ว่า $\frac{\dot{a}^+}{k_{ia}^+} = 0.5\tilde{v}_c(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c))$,

$$\frac{\dot{a}^-}{k_{ia}^-} = 0.5\tilde{v}_c(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c))$$
 ,

$$\frac{\dot{b}^+}{k_{ib}^+} = 0.5\tilde{v}_c(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 + \text{sgn}(v_c))$$
 ,

$$\frac{\dot{b}^-}{k_{ib}^-} = -0.5\tilde{v}_c(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 - \text{sgn}(v_c))$$
 ,

$$\frac{\dot{d}^+}{k_{id}^+} = 0.5\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c))$$
 , $\frac{\dot{d}^-}{k_{id}^-} = -0.5\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c))$

และ $\frac{\dot{h}}{k_{ih}} = -\tilde{v}_c u_w$

นั่นคือ $\dot{\hat{a}}^+ = \dot{a}^+ - \dot{\hat{a}}^+ \approx -\dot{\hat{a}}^+ = 0.5k_{ia}^+\tilde{v}_c(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c))$,

$$\dot{\hat{a}}^- = \dot{a}^- - \dot{\hat{a}}^- \approx -\dot{\hat{a}}^- = 0.5k_{ia}^-\tilde{v}_c(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c))$$
 ,

$$\dot{\hat{b}}^+ = \dot{b}^+ - \dot{\hat{b}}^+ \approx -\dot{\hat{b}}^+ = 0.5k_{ib}^+\tilde{v}_c(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 + \text{sgn}(v_c))$$
 ,

$$\dot{\hat{b}}^- = \dot{b}^- - \dot{\hat{b}}^- \approx -\dot{\hat{b}}^- = -0.5k_{ib}^-\tilde{v}_c(\tilde{v}_c(v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2)(1 - \text{sgn}(v_c))$$
 ,

$$\dot{\hat{d}}^+ = \dot{d}^+ - \dot{\hat{d}}^+ \approx -\dot{\hat{d}}^+ = 0.5k_{id}^+\tilde{v}_c(1 + \text{sgn}(v_c))$$
 ,

$$\dot{\hat{d}}^- = \dot{d}^- - \dot{\hat{d}}^- \approx -\dot{\hat{d}}^- = -0.5k_{id}^-\tilde{v}_c(1 - \text{sgn}(v_c))$$

และ $\dot{\hat{h}} = \dot{h} - \dot{\hat{h}} \approx -\dot{\hat{h}} = -k_{ih}\tilde{v}_c u_w$

ดังนั้นกลไกที่ทำหน้าที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ทุกค่าพร้อมกันแบบออนไลน์และรักษาเสถียรภาพของสมการความผิดพลาด คือกฎการปรับตัว (adaptive laws) ดังนี้

$$\dot{\hat{a}}^+ = -0.5k_{ia}^+\tilde{v}_c(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 + \text{sgn}(v_c)) \quad (\text{ผ-10})$$

$$\dot{\hat{a}}^- = -0.5k_{ia}^-\tilde{v}_c(\gamma\tilde{v}_c + \hat{v}_c)(1 - \text{sgn}(v_c)) \quad (\text{ผ-11})$$

$$\dot{\hat{b}}^+ = -0.5k_{ib}^+ \tilde{v}_c (\tilde{v}_c (v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2) (1 + \text{sgn}(v_c)) \quad (\text{ผ-12})$$

$$\dot{\hat{b}}^- = 0.5k_{ib}^- \tilde{v}_c (\tilde{v}_c (v_c + \hat{v}_c) + \hat{v}_c^2) (1 - \text{sgn}(v_c)) \quad (\text{ผ-13})$$

$$\dot{\hat{d}}^+ = -0.5k_{id}^+ \tilde{v}_c (1 + \text{sgn}(v_c)) \quad (\text{ผ-14})$$

$$\dot{\hat{d}}^- = 0.5k_{id}^- \tilde{v}_c (1 - \text{sgn}(v_c)) \quad (\text{ผ-15})$$

$$\dot{\hat{h}} = k_{ih} \tilde{v}_c u_w \quad (\text{ผ-16})$$

โดยที่ $k_{ia}^+ > 0$, $k_{ia}^- > 0$, $k_{ib}^+ > 0$, $k_{ib}^- > 0$, $k_{id}^+ > 0$, $k_{id}^- > 0$ และ $k_{ih} > 0$ คือค่าเกนปรับตัว (adaptive gains) ที่มีค่าคงที่บวก สมการที่ (ผ-9) จะลดรูปลงเหลือ

$$\begin{aligned} & \tilde{v}_c \dot{\tilde{v}}_c + \frac{\tilde{a}^+ \dot{\tilde{a}}^+}{k_{ia}^+} + \frac{\tilde{a}^- \dot{\tilde{a}}^-}{k_{ia}^-} + \frac{\tilde{b}^+ \dot{\tilde{b}}^+}{k_{ib}^+} + \frac{\tilde{b}^- \dot{\tilde{b}}^-}{k_{ib}^-} + \frac{\tilde{d}^+ \dot{\tilde{d}}^+}{k_{id}^+} + \frac{\tilde{d}^- \dot{\tilde{d}}^-}{k_{id}^-} + \frac{\tilde{h} \dot{\tilde{h}}}{k_{ih}} \\ &= -k_l \tilde{v}_c^2 - 0.5(1 - \gamma) a^+ \tilde{v}_c^2 (1 + \text{sgn}(v_c)) \\ & \quad - 0.5(1 - \gamma) a^- \tilde{v}_c^2 (1 - \text{sgn}(v_c)) \end{aligned} \quad (\text{ผ-17})$$

การพิจารณาสมการที่ (ผ-17) จะนำมาใช้เลือกฟังก์ชันเลียปูนอฟที่วิเคราะห์เสถียรภาพของสมการความผิดพลาด ได้ดังนี้

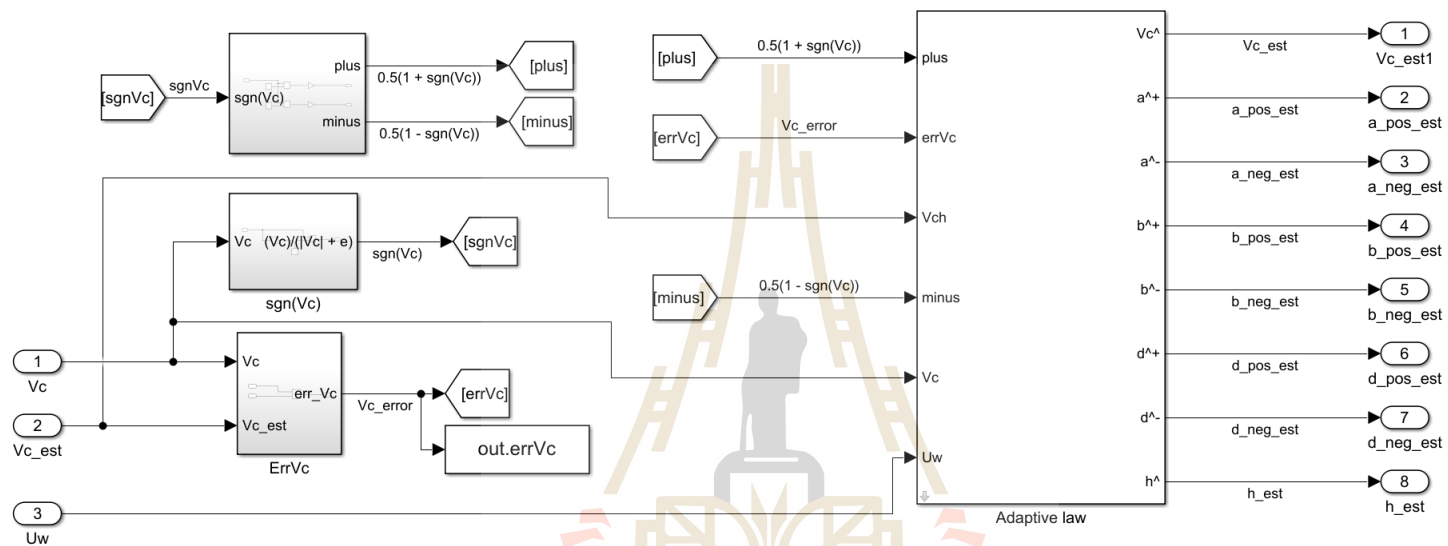
$$V = \frac{\tilde{v}_c^2}{2} + \frac{(\tilde{a}^+)^2}{2k_{ia}^+} + \frac{(\tilde{a}^-)^2}{2k_{ia}^-} + \frac{(\tilde{b}^+)^2}{2k_{ib}^+} + \frac{(\tilde{b}^-)^2}{2k_{ib}^-} + \frac{(\tilde{d}^+)^2}{2k_{id}^+} + \frac{(\tilde{d}^-)^2}{2k_{id}^-} + \frac{\tilde{h}^2}{2k_{ih}} \geq 0 \quad (\text{ผ-18})$$

และฟังก์ชันเลียปูนอฟในสมการที่ (ผ-18) มีอนุพันธ์เทียบกับเวลาดังนี้

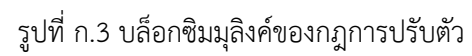
$$\begin{aligned} \dot{V} &= -k_l \tilde{v}_c^2 - 0.5(1 - \gamma) a^+ \tilde{v}_c^2 (1 + \text{sgn}(v_c)) \\ & \quad - 0.5(1 - \gamma) a^- \tilde{v}_c^2 (1 - \text{sgn}(v_c)) \leq 0 \end{aligned} \quad (\text{ผ-19})$$

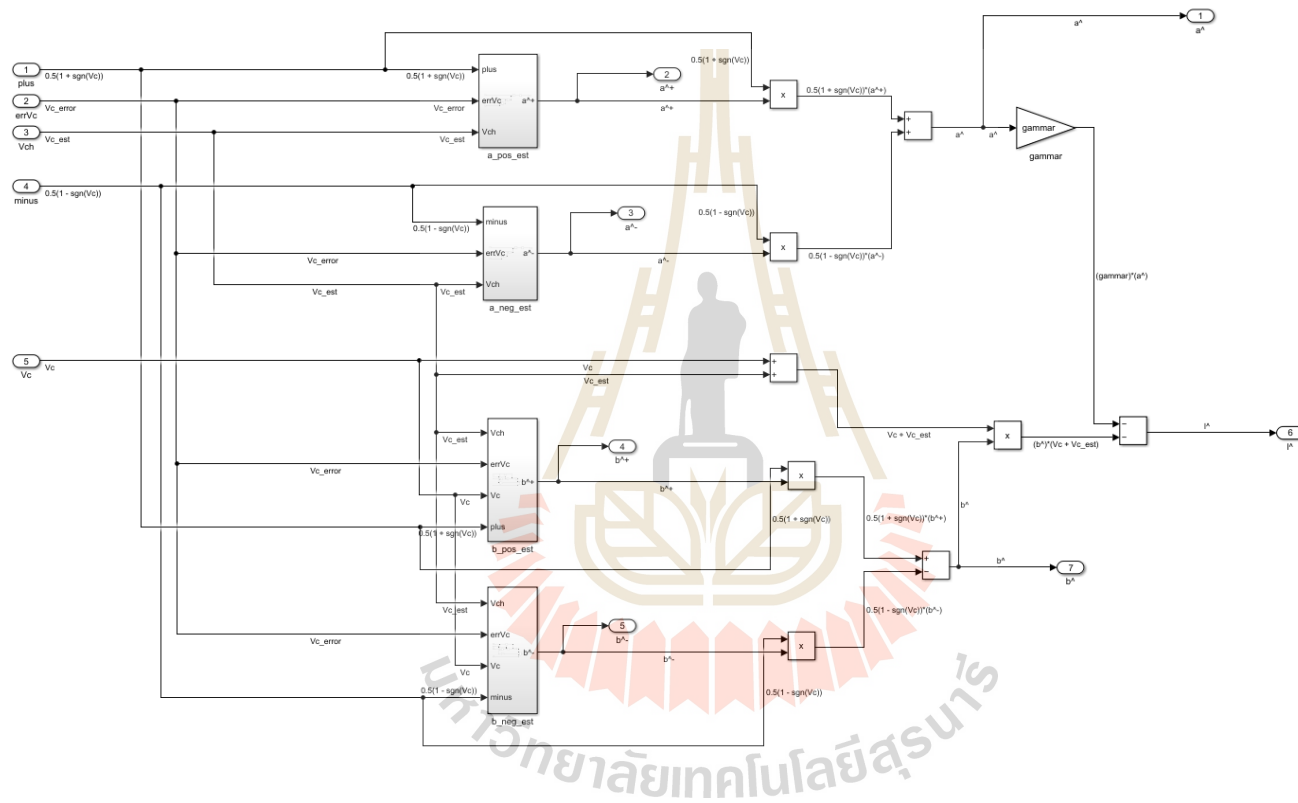
ฟังก์ชันเลียปูนอฟในสมการที่ (ผ-18) มีค่าบวกหรือเท่ากับศูนย์ (ไม่มีค่าลบ) และอนุพันธ์ของฟังก์ชันเลียปูนอฟเทียบกับเวลาในสมการที่ (ผ-19) มีค่าลบหรือเท่ากับศูนย์ (ไม่มีค่าบวก) เมื่อ $\dot{v}_c \neq 0$ จะได้ว่า $\dot{V} < 0$ และ V มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง $\dot{v}_c$ มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อ $\dot{v}_c \rightarrow 0$ จะได้ว่า $\dot{V} \rightarrow 0$ และ V มีค่าลดลงและลู่เข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่ง $\dot{v}_c$ มีค่าลดลงและลู่เข้าหาศูนย์ แต่ความผิดพลาดของการประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{a}^+, \hat{a}^-, \hat{b}^+, \hat{b}^-, \hat{d}^+, \hat{d}^-$ และ $\hat{h}$ อาจจะลู่เข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่งหรืออาจจะไม่ลู่เข้าหาค่าคงที่ และเมื่อ $\dot{v}_c = 0$ จะได้ว่า $\dot{V} = 0$ และ V มีค่าคงที่ค่าหนึ่งในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นสมการความผิดพลาดมีเสถียรภาพ ถ้าแรงขับเคลื่อนและแรงเบรก (อินพุตของยานพาหนะ) u_w มีคุณสมบัติของการกระตุ้นอย่างต่อเนื่อง (persistent excitation) ความผิดพลาดของการประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{a}^+, \hat{a}^-, \hat{b}^+, \hat{b}^-, \hat{d}^+, \hat{d}^-$ และ $\hat{h}$ จะลู่เข้าหาศูนย์ในสถานะอยู่ตัว นั่นคือค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่าจะลู่เข้าหาค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะ หรือ $\hat{a}^+ \rightarrow a^+, \hat{a}^- \rightarrow a^-, \hat{b}^+ \rightarrow b^+, \hat{b}^- \rightarrow b^-, \hat{d}^+ \rightarrow d^+, \hat{d}^- \rightarrow d^-$ และ $\hat{h} \rightarrow h$ สมการความผิดพลาดจึงมีเสถียรภาพแบบเลียปูนอฟ (Lyapunov stability) (H. K. Khalil, 2002) ถ้า $a^+ > 0$ และ $a^- > 0$ อาจจะกำหนดให้ $k_l = 0$ แต่ถ้า $a^+ = 0$ และ $a^- = 0$ จะต้องกำหนดให้ $k_l > 0$





รูปที่ ก.2 บล็อกซิmulinkของตัวประมาณค่าแบบปรับตัว





รูปที่ ก.4 บล็อกซิมมูลิงค์ที่ใช้คำนวณค่าเกณฑ์เปลี่ยนแปลงตามเวลาของตัวประมาณค่าแบบปรับตัว

ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้าและตัวประมาณค่าอัตราเร็วแบบปรับตัวที่ประกอบด้วยบล็อกซิมมูลิงค์ บล็อกซิมสเคป และระบบย่อยที่แสดงในรูปที่ ก.1 จะนำมาใช้ในการจำลองสถานการณ์ ค่าพารามิเตอร์และค่าเกณฑ์ค่าที่ใช้งานแสดงในตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะไฟฟ้าและค่าเกณฑ์ของตัวประมาณค่าแบบปรับตัว

บล็อกควบคุมแรงดัน ฟีดแบ็คเบิลยูเอเอ็ม	ความถี่ฟีดแบ็คเบิลยูเอเอ็ม	4000 Hz
	แรงดันอินพุตที่ 0% ดิวตีไซเคิล	0 V
	แรงดันอินพุตที่ 100% ดิวตีไซเคิล	5 V
	แรงดันเอาต์พุต	5 V
บล็อกเฮชบริดจ์	ความถี่ฟีดแบ็คเบิลยูเอเอ็ม	4000 Hz
	แอมพลิจูดสัญญาณฟีดแบ็คเบิลยูเอเอ็ม	5 V
	แรงดันดีซีภายใน	400 V
มอเตอร์ดีซีชนิดแม่เหล็ก ถาวร	ค่าความต้านทานของขดลวดอาร์เมเจอร์	0.1 Ω
	ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดอาร์เมเจอร์	0.01 H
	ค่าคงที่ของการสร้างทอร์ก	1.5 N · m/A
	โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์	0.0002 kg · m ²
ยานพาหนะและล้อ	มวล	1200 kg
	อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	9.81 m/s ²
	พื้นที่ด้านหน้าของยานพาหนะ	3 m ²
	สัมประสิทธิ์ของแรงต้านจากอากาศ	0.4
	ความหนาแน่นของอากาศ	1.18 kg/m ³
	รัศมีของล้อ	0.3 m
	สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานระหว่างล้อ ยางและผิวถนนที่เกิดจากน้ำหนักรถของ ยานพาหนะ (μ ₁)	0.015
	สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืด (μ ₂)	0 s/m

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะไฟฟ้าและค่าเกณฑ์ของตัวประมาณค่าแบบปรับตัว

ตัวควบคุมพีไอแบบดิสครีต	ค่าเกณฑ์สัดส่วนหรือค่าเกณฑ์	2
	ค่าเกณฑ์อินทิกรัลหรือค่าเกณฑ์ไอ	0.2
ตัวประมาณค่าแบบปรับตัว	ค่าเกณฑ์ปรับตัว k_{ia}^+, k_{ia}^-	0
	ค่าเกณฑ์ปรับตัว k_{ib}^+, k_{ib}^-	1×10^{-5}
	ค่าเกณฑ์ปรับตัว k_{id}^+, k_{id}^-	1
	ค่าเกณฑ์ปรับตัว k_{ih}	1×10^{-6}
	ค่าเกณฑ์ k_l	100
	ค่าเกณฑ์ γ	-50
	ε	0.01 m/s
ขนาดขั้นคงที่ (fixed stepsize) ที่ใช้จำลองสถานการณ์		0.01 s

สมการที่ (ผ-3), (ผ-4), (ผ-10), (ผ-11), (ผ-12), (ผ-13), (ผ-14), (ผ-15) และ (ผ-16) จะนำมาใช้สร้างตัวประมาณค่าแบบปรับตัวที่แสดงในรูปที่ ก.1 รูปที่ ก.2 รูปที่ ก.3 และ รูปที่ ก.4 ตัวประมาณค่าแบบปรับตัวมีโครงสร้างหลักที่ได้รับปริมาณอินพุตคือ อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ และแรงขับเคลื่อนและแรงเบรก และให้ปริมาณเอาต์พุตคือ อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า โครงสร้างหลักมีการป้อนกลับของอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าที่เปรียบเทียบกับอัตราเร็วของยานพาหนะ โครงสร้างหลักมีการปรับตัวเพราะกฎการปรับตัวประมาณค่าและปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ ตัวประมาณค่าแบบปรับตัวจึงมีค่าพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา กฎการปรับตัวใช้ปริมาณอินพุต ปริมาณเอาต์พุต ความผิดพลาดของการประมาณค่าอัตราเร็ว และทิศทางการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ นำมาประมวลผลและประมาณค่าพารามิเตอร์ทุกค่าพร้อมกันแบบออนไลน์ ยานพาหนะไฟฟ้ามีมอเตอร์ดีซีที่สร้างแรงขับเคลื่อนและแรงเบรก กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์จะสร้างทอร์กทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นทอร์กขับเคลื่อนล้อและทอร์กเบรก ล้อของยานพาหนะเปลี่ยนทอร์กขับเคลื่อนล้อและทอร์กเบรก ไปเป็นแรงขับเคลื่อนและแรงเบรกที่กระทำกับยานพาหนะให้เกิดการเคลื่อนที่และหยุดการเคลื่อนที่ หลังจากการนำสัญญาณวัดกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (i_a) มาคูณกับค่าเกณฑ์ $\frac{K_t}{r_{wheel}}$ ผลคูณที่ได้รับคือแรงขับเคลื่อนและแรงเบรก (u_w) กล่าวคือ
$$u_w = \frac{K_t}{r_{wheel}} i_a$$
 เนื่องจากบล็อกซิมสเคปแบบจำลองเชิงกลการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่อง มีค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืด (μ_2) เท่ากับศูนย์ แบบจำลองเชิงกลของยานพาหนะจึงมีค่าพารามิเตอร์ $a^+ = 0$ และ $a^- = 0$ และตัวประมาณค่าแบบปรับตัวมีค่าเกณฑ์ปรับตัว

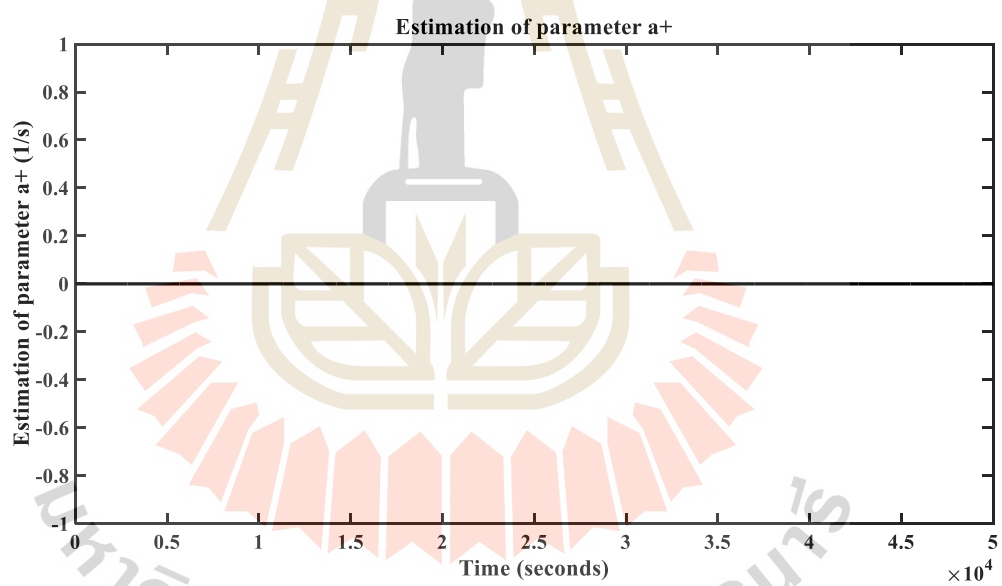
$k_{ia}^+ = 0$ และ $k_{ia}^- = 0$ และมีการประมาณค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น $\hat{a}^+(0) = 0$ และ $\hat{a}^-(0) = 0$ กฎการปรับตัวจะประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{a}^+ = 0$ และ $\hat{a}^- = 0$ ที่แสดงในรูปที่ ก.5 รูปที่ ก.6 และ ตารางที่ ก.2 ตลอดเวลา

ในการจำลองสถานการณ์ ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดของยานพาหนะไฟฟ้า ได้รับอัตราเร็วอ้างอิง $v_r = 14\sin(2\pi(\frac{1}{120})t)$ m/s และบังคับให้ผลตอบสนองอัตราเร็วติดตามอัตราเร็วอ้างอิง นั่นคือยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นจาก 0 จนถึง 14 m/s ภายในช่วงเวลา 30 วินาที (ยานพาหนะเคลื่อนที่เร็วขึ้น) ต่อมายานพาหนะยังคงเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยอัตราเร็วที่ลดลงจาก 14 m/s จนถึง 0 ภายในช่วงเวลา 30 วินาที (ยานพาหนะเคลื่อนที่ช้าลง) จากนั้นยานพาหนะเคลื่อนที่ถอยหลังด้วยอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นจาก 0 จนถึง 14 m/s ภายในช่วงเวลา 30 วินาที (ยานพาหนะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามและเคลื่อนที่เร็วขึ้น) และต่อมายานพาหนะยังคงเคลื่อนที่ถอยหลังด้วยอัตราเร็วที่ลดลงจาก 14 m/s จนถึง 0 ภายในช่วงเวลา 30 วินาที (ยานพาหนะเคลื่อนที่ในทิศทางเดิมแต่เคลื่อนที่ช้าลง) ยานพาหนะมีการเคลื่อนที่ครบหนึ่งวงรอบใช้เวลา 120 วินาที และมีการเคลื่อนที่เข้าไปข้างหน้าหลายรอบ กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่มีค่าบวกและค่าลบสลับกัน จะสร้างแรงขับเคลื่อนและแรงเบรกที่มีค่าบวกและค่าลบสลับกัน ตัวประมาณค่าแบบปรับตัวจึงได้รับผลตอบสนองอัตราเร็วที่ติดตามอัตราเร็วอ้างอิง และได้รับกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ที่มีค่าบวกและค่าลบสลับกัน กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ดังกล่าวมีโอกาสที่ทำให้เกิดคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับการกระตุ้นอย่างต่อเนื่อง ตัวประมาณค่าแบบปรับตัวมีค่าเกินทุกค่าที่แสดงในตารางที่ ก.1 และมีการประมาณค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นทุกค่าเท่ากับศูนย์

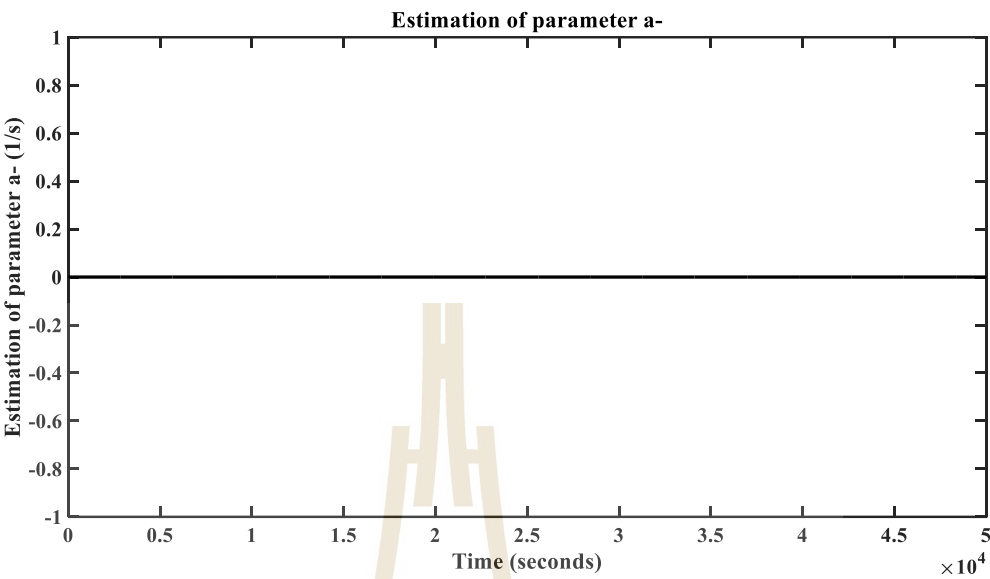
เมื่อพิจารณาผลการจำลองสถานการณ์ที่แสดงในรูปที่ ก.7 รูปที่ ก.8 รูปที่ ก.9 รูปที่ ก.10 รูปที่ ก.11 และ ตารางที่ ก.2 ตัวประมาณค่าแบบปรับตัวต้องใช้ช่วงระยะเวลาช่วงหนึ่งในการประมาณค่าพารามิเตอร์ $\hat{b}^+$, $\hat{b}^-$, $\hat{d}^+$, $\hat{d}^-$ และ $\hat{h}$ ทุกค่าพร้อมกันที่มีค่าใกล้เคียงกับหรือเกือบเท่ากับค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะ b^+ , b^- , d^+ , d^- และ h ที่ตรงกันตามลำดับ และค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่าทุกค่าจะลู่เข้าหาค่าคงที่ในสถานะอยู่ตัว นั่นคือกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับการกระตุ้นอย่างต่อเนื่อง ถ้าแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง แบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ มีค่าพารามิเตอร์ที่ใกล้เคียงกับหรือเกือบเท่ากับค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะ แผนการเชิงตัวเลข 3 แผนการดังกล่าวจะประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะที่มีสมรรถนะใกล้เคียงกับอัตราเร็วของยานพาหนะ

ตารางที่ ก.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่าเปรียบเทียบกับค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะ

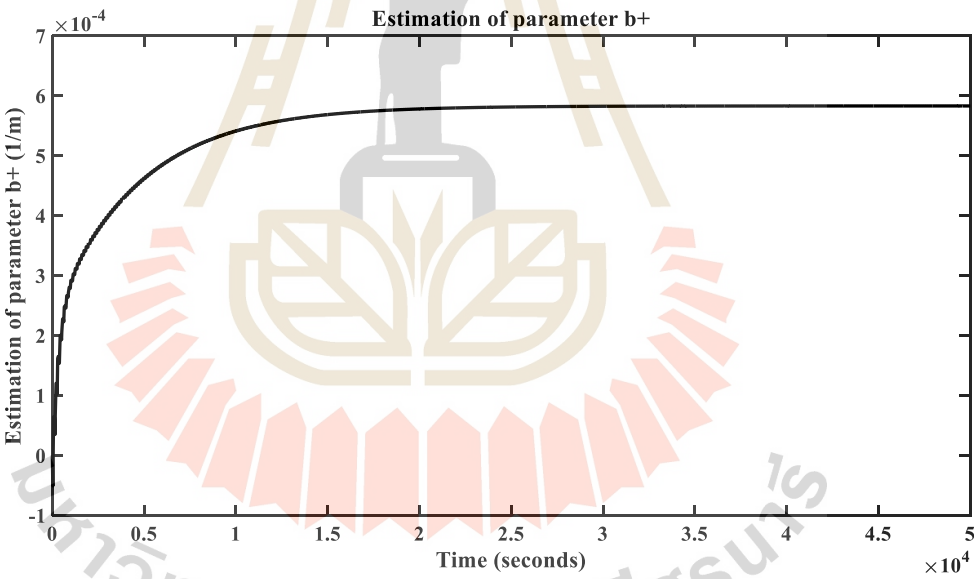
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์ของยานพาหนะ	ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการประมาณค่า ในสถานะอยู่ตัว	
a^+ , a^-	$a^\pm = \mu_2 g = (0)(9.81) = 0$	$\hat{a}^+ = 0$	$\hat{a}^- = 0$
b^+ , b^-	$b^\pm = \frac{0.5\rho_{air}AC_d}{m}$ $= \frac{0.5(1.18)(3)(0.4)}{(1200)}$ $= 0.00059$	$\hat{b}^+ = 0.0005831$	$\hat{b}^- = 0.0005833$
d^+ , d^-	$d^\pm = \mu_1 g = (0.015)(9.81)$ $= 0.14715$	$\hat{d}^+ = 0.1484$	$\hat{d}^- = 0.1484$
h	$h = \frac{1}{m} = \frac{1}{1200} = 0.00083$	$\hat{h} = 0.0008334$	



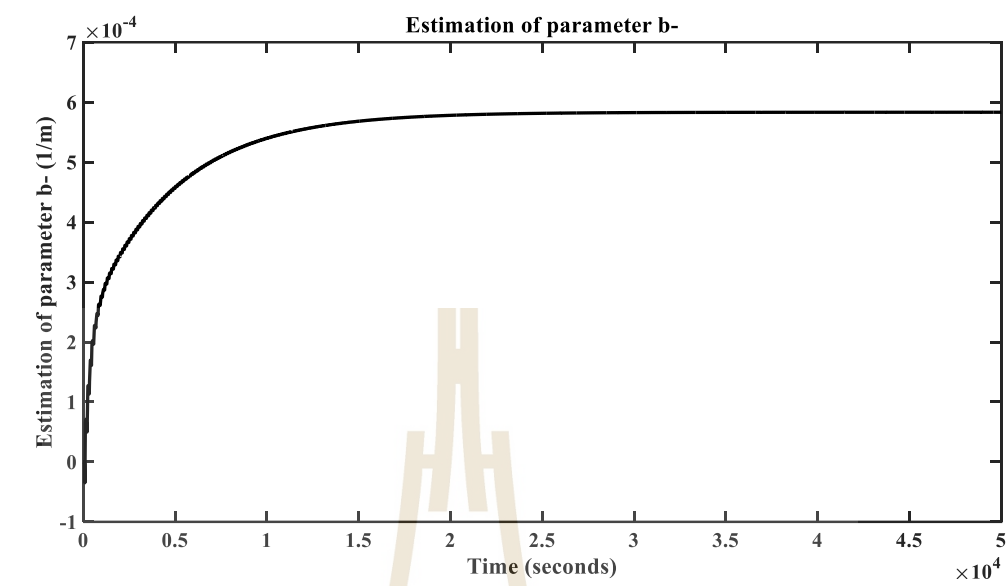
รูปที่ ก.5 การประมาณค่าพารามิเตอร์ a^+



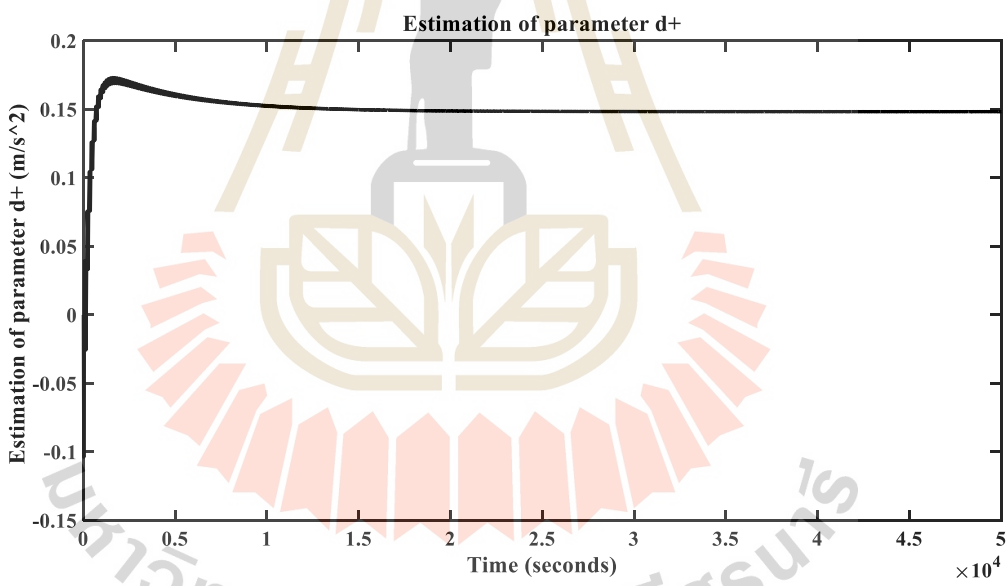
รูปที่ ก.6 การประมาณค่าพารามิเตอร์ a^-



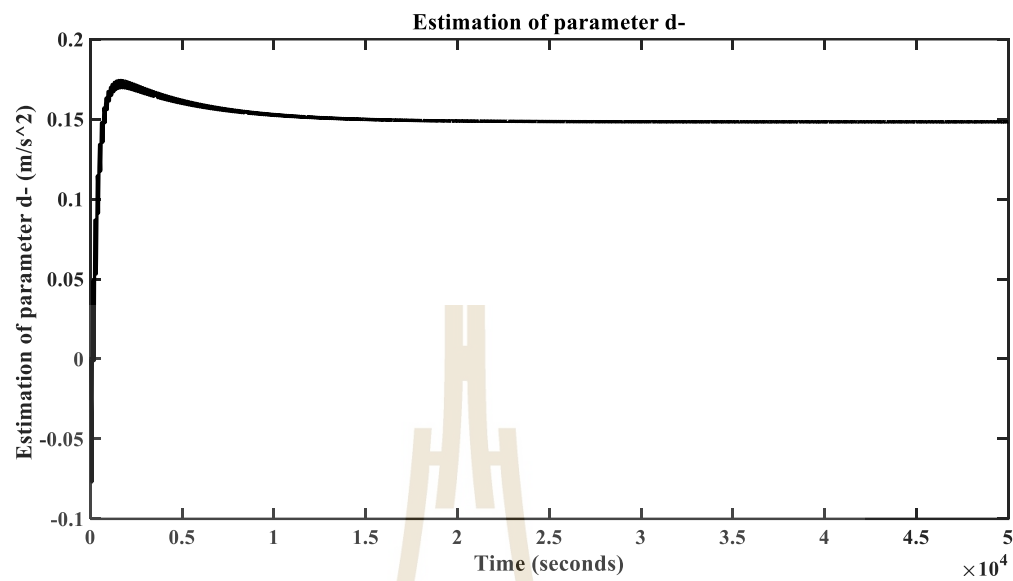
รูปที่ ก.7 การประมาณค่าพารามิเตอร์ b^+



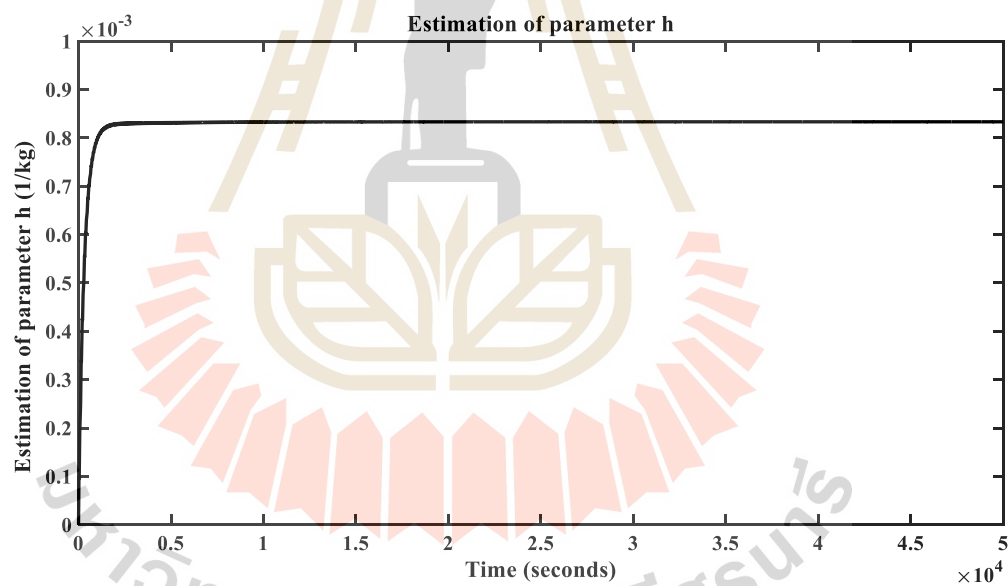
รูปที่ ก.8 การประมาณค่าพารามิเตอร์ b^-



รูปที่ ก.9 การประมาณค่าพารามิเตอร์ d^+



รูปที่ ก.10 การประมาณค่าพารามิเตอร์ d^-



รูปที่ ก.11 การประมาณค่าพารามิเตอร์ h



ภาคผนวก ข

รหัสเทียมของแบบจำลองเชิงตัวเลข 3 แผนการ

ในการจำลองสถานการณ์ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ในรูป ชุดคำสั่ง (โปรแกรม) ภาษาซีจะกำหนดให้การ์ดคอนโทรล (control card) F28335 (TMDSCNCD28335 R2.2) ทำหน้าที่เป็นแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง หรือแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู หรือแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์ (แผนการหนึ่งเท่านั้น) ที่ประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ โปรแกรมภาษาดังกล่าวได้รับกระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์และให้อัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า รหัสเทียม (pseudocode) จะนำมาใช้อธิบายการทำงานของโปรแกรมภาษาดังนี้

รหัสเทียมของแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง

Algorithm for computations in the backward Euler model

Contain some libraries involving numerical computation, JTAG-based USB data-communication, and the microcontroller-card target.

Assign numeral values to its own parameters covering $m, g, \mu_1, \mu_2, \rho_{air}, A, C_d, r_{wheel}, K_p$, and T .

Declare each of lumped parameters comprising: $a \leftarrow \mu_2 g, b' \leftarrow (0.5 \rho_{air} A C_d) / m$,
,
 $d' \leftarrow \mu_1 g, h \leftarrow 1/m$.

Allocate data buffer into a portion of memory for input and output channels over data transmission.

Dispense a fragment of memory as the global variable of $v_c(k)$ and initialize $v_c(k)$ to zero value.

Subroutine for the backward Euler model with argument of $i_a(k)$

BEGIN-----

Acquire $i_a(k)$.

Set aside a fraction of memory onto local variables that are composed of $b, d, \Phi, \Psi, \Delta(k), \Theta(k), \Xi(k), v_c(k+1)$, and $u_w(k)$.

Determine conditionally a few of the parameters and compute terms and expressions as follows.

If $v_c(k) > 0$ then $d \leftarrow d'$ else if $v_c(k) < 0$ then $d \leftarrow 0 - d'$ else $d \leftarrow 0$

if $v_c(k) = 0$ then $b \leftarrow b'$ else if $v_c(k) < 0$ then $b \leftarrow 0 - b'$ else $b \leftarrow b'$

$u_w(k) \leftarrow (K_t/r_{wheel})i_a(k)$

$\Phi \leftarrow 0 - (1 + aT)$

$\Delta(k) \leftarrow T(d - hu_w(k)) - v_c(k)$

$\Theta(k) \leftarrow (1 + aT)^2 - 4bT\Delta(k)$

if $\Theta(k) < 0$ then $\Theta(k) \leftarrow 0$

$\Xi(k) \leftarrow (\Theta(k))^{0.5}$

$\Psi \leftarrow 2bT$

$v_c(k+1) \leftarrow (\Phi + \Xi(k))/\Psi$

$v_c(k) \leftarrow v_c(k+1)$

return $v_c(k+1)$

END-----

Main program

BEGIN-----

Prescribe a tiny part of memory toward local variables incorporating $i_a(k)$ and $v_c(k + 1)$.

Initiate operation and running within the microcontroller-card target.

Allow the input and output channels for data transmission through USB port.

Enter execution into the iterative loop that carries out receiving $i_a(k)$ from the USB port, launching *subprogram for the backward Euler model with argument of $i_a(k)$* , releasing $v_c(k + 1)$ outside such a *subprogram*, and dispatching $v_c(k + 1)$ to the same USB port whenever the data-transfer channel becomes ready, respectively.

END-----

รหัสเทียมของแบบจำลองกฎสี่เหลี่ยมคางหมู

Algorithm for computations in the trapezoidal rule model

Contain some libraries involving numerical computation, JTAG-based USB data-communication, and the microcontroller-card target.

Assign numeral values to its own parameters covering $m, g, \mu_1, \mu_2, \rho_{air}, A, C_d, r_{wheel}, K_r$, and T .

Declare each of lumped parameters comprising: $a \leftarrow \mu_2 g$, $b' \leftarrow (0.5 \rho_{air} A C_d)/m$,
,
 $d' \leftarrow \mu_1 g$, $h \leftarrow 1/m$.

Allocate data buffer into a portion of memory for input and output channels over data transmission.

Dispense a fragment of memory as the global variable of $v_c(k)$ and initialize $v_c(k)$ to zero value.

Subroutine for the trapezoidal rule model with argument of $i_a(k)$

BEGIN-----

Acquire $i_a(k)$.

Set aside a fraction of memory onto local variables that are composed of $b, d, \Phi, \Psi, \Lambda, \Delta(k), \Theta(k), \Xi(k), v_c(k+1)$, and $u_w(k)$.

Determine conditionally a few of the parameters and compute terms and expressions as follows.

If $v_c(k) > 0$ then $d \leftarrow d'$ else if $v_c(k) < 0$ then $d \leftarrow 0 - d'$ else $d \leftarrow 0$

if $v_c(k) = 0$ then $b \leftarrow b'$ else if $v_c(k) < 0$ then $b \leftarrow 0 - b'$ else $b \leftarrow b'$

$u_w(k) \leftarrow (K_t/r_{wheel})i_a(k)$

$\Phi \leftarrow 0 - (1 + 0.5aT)$

$\Lambda \leftarrow (1 + 0.5aT)^2$

$\Delta(k) \leftarrow T(0.5b(v_c(k))^2 + d - hu_w(k)) - (1 - 0.5aT)v_c(k)$

$\Theta(k) \leftarrow \Lambda - 2bT\Delta(k)$

if $\Theta(k) < 0$ then $\Theta(k) \leftarrow 0$

$\Xi(k) \leftarrow (\Theta(k))^{0.5}$

$\Psi \leftarrow bT$

$v_c(k+1) \leftarrow (\Phi + \Xi(k))/\Psi$

$v_c(k) \leftarrow v_c(k+1)$

return $v_c(k+1)$

END-----

Main program

BEGIN-----

Prescribe a tiny part of memory toward local variables incorporating $i_a(k)$ and $v_c(k + 1)$.

Initiate operation and running within the microcontroller-card target.

Allow the input and output channels for data transmission through USB port.

Enter execution into the iterative loop that carries out receiving $i_a(k)$ from the USB port, launching *subprogram for the trapezoidal rule model with argument of $i_a(k)$* , releasing $v_c(k + 1)$ outside such a *subprogram*, and dispatching $v_c(k + 1)$ to the same USB port whenever the data-transfer channel becomes ready, respectively.

END-----

รหัสเทียมของแบบจำลองอนุกรมเทย์เลอร์

Algorithm for computations in the Taylor expansion model

Contain some libraries involving numerical computation, JTAG-based USB data-communication, and the microcontroller-card target.

Assign numeral values to its own parameters covering $m, g, \mu_1, \mu_2, \rho_{air}, A, C_d, r_{wheel}, K, \varepsilon$, and T .

Declare each of lumped parameters comprising: $a \leftarrow \mu_2 g$, $b' \leftarrow (0.5\rho_{air}AC_d)/m$,
 $d' \leftarrow \mu_1 g$, $h \leftarrow 1/m$.

Allocate data buffer into a portion of memory for input and output channels over data transmission.

Dispense a fragment of memory as the global variable of $v_c(k)$ as well as $u_w(k-1)$ and initialize $v_c(k)$ as well as $u_w(k-1)$ to zero values.

Subroutine for the Taylor expansion model with argument of $i_a(k)$

BEGIN-----

Acquire $i_a(k)$.

Set aside a fraction of memory onto local variables that are composed of b , d , $\Phi(k)$, $\Psi(k)$, $\Lambda(k)$, $\Delta(k)$, $\Theta(k)$, $\Xi(k)$, $\mathfrak{Y}(k)$, $v_c(k+1)$, and $u_w(k)$.

Determine conditionally a few of the parameters and compute terms and expressions as follows.

If $v_c(k) > 0$ then $d \leftarrow d'$ else if $v_c(k) < 0$ then $d \leftarrow 0 - d'$ else $d \leftarrow 0$

if $v_c(k) = 0$ then $b \leftarrow b'$ else if $v_c(k) < 0$ then $b \leftarrow 0 - b'$ else $b \leftarrow b'$

$u_w(k) \leftarrow (K_t/r_{wheel})i_a(k)$

$\Delta(k) \leftarrow -av_c(k) - b(v_c(k))^2 - d + hu_w(k)$

$\Lambda(k) \leftarrow (|v_c(k)| + \varepsilon)^2$

$\Phi(k) \leftarrow (b'\varepsilon(v_c(k))^2)/\Lambda(k)$

$\Theta(k) \leftarrow (d'\varepsilon)/\Lambda(k)$

$\Xi(k) \leftarrow a + 2bv_c(k)$

$\Psi(k) \leftarrow (u_w(k) - u_w(k-1))/T$

$$\vartheta(k) \leftarrow 0 - (\Xi(k) + \Phi(k) + \Theta(k))\Delta(k) + h\Psi(k)$$

$$v_c(k+1) \leftarrow v_c(k) + T\Delta(k) + 0.5T^2\vartheta(k)$$

$$u_w(k-1) \leftarrow u_w(k)$$

$$v_c(k) \leftarrow v_c(k+1)$$

return $v_c(k+1)$

END-----

Main program

BEGIN-----

Prescribe a tiny part of memory toward local variables incorporating $i_a(k)$ and $v_c(k+1)$.

Initiate operation and running within the microcontroller-card target.

Allow the input and output channels for data transmission through USB port.

Enter execution into the iterative loop that carries out receiving $i_a(k)$ from the USB port,

launching *subprogram for the Taylor expansion model with argument of $i_a(k)$* , releasing $v_c(k+1)$ outside such a *subprogram*,

and dispatching $v_c(k+1)$ to the same USB port whenever the data-transfer channel becomes ready, respectively.

END-----

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a golden-yellow bell-shaped structure with a silhouette of a person standing inside. Below the bell is a circular emblem with a book and a sunburst. The university's name is written in Thai script at the bottom.

ภาคผนวก ค

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

P. Laseaw and W. Sangtungton, "Vehicle Velocity Estimation by Using Numerical Models," 2024 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI 2024), Nakhon Ratchasima, Thailand, 2024, pp. 129-132.

พงศธร ลาเสียว, วิโรจน์ แสงธงทอง. “การประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะด้วยแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง”. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47 (EECON-47) บทความวิจัย สาขาระบบควบคุมและการวัดคุม (CT) หน้าที่ 319-323.



Vehicle Velocity Estimation by using Numerical Models

Phongsathon Laseaw

*school of electrical engineering, institute of engineering
suranaree university of technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
e-mail: Laseawp@gmail.com*

Wirote Sangtungtong*

*school of electrical engineering, institute of engineering
suranaree university of technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
e-mail: cewirote@sut.ac.th*

Abstract—This paper reports the backward Euler, trapezoidal rule, and Taylor expansion models which all estimate vehicle velocity. First-order nonlinear vehicle model of motion is underlying of these three numerical models. They leave out chassis velocity signal from estimations whereas the dedicated state-observer wants such a velocity signal for single state-variable observation. Hence, the observer acquires the force input as well as the velocity output to evaluate merely velocity while the three models obtain only the force input to estimate the same velocity. Thus, the observer proves superfluous and inoperative when the velocity signal turns up missing. Some numerical methods that find solutions of ordinary differential equations (ODEs) are adopted to build the three models. Their fine performance of velocity estimations comparable to the velocity response arising from cruise control system is confirmed by simulation results. Equivalence between speedometer and the three models is feasible and the trapezoidal rule model tends to be more precise.

Keywords—backward Euler model, Taylor expansion model, trapezoidal rule model, vehicle velocity, velocity estimation

I. INTRODUCTION

Safety in driving car and cruise control benefit from vehicle velocity measurement. A car driver must monitor instrument cluster at dashboard, watch velocity indicator and circumscribe his/her vehicle velocity within a speed limit under law enforcement [1]. The velocity control methodology of a vehicle relies upon firm feedback of velocity signal [2]. The anti-lock brake controller detects wheel rotation as well as vehicle speed and decides to increase or decrease hydraulic pressure exerted on the affected wheel so that there is not any wheel locked during braking [3].

Whenever the velocity signal is lost, the cruise control will fail, and the anti-lock brake system becomes defective. And if a speedometer [4] malfunctions, the car driver could commence a risk or even encounter harm. To avoid difficulties and continually maintain the functionality of the vehicle maneuver, a manner of velocity estimation was developed and originated from the two-dimensional complex nonlinear model of vehicle motion on the horizontal plane [5]. Such a development imparted the third-order nonlinear observer associated with computational complexity and various sensors.

The nonlinear observer was validated and estimated the velocity that tracked chassis one.

When the velocity signal disappears or the speedometer is damaged, the estimated velocity may be delivered into feedback signal and as a reading to a driver. It is worth to estimate velocity of a vehicle while the velocity signal vanishes. Besides, the backward Euler method could solve the vehicle dynamic model explained by the system of the first-order coupled ordinary differential equations with stiffness [6]. It afforded a stable solution. This paper proposes the backward Euler model, the trapezoidal rule model, and the Taylor expansion model which all online evaluate velocity. They are provided by the first-order nonlinear model of vehicle motion and some numerical methods that each name backward Euler method, trapezoidal rule, and Taylor expansion. The force input is only issued onto them whereas any velocity and wheel speed signals [7] are unnecessary.

II. DYNAMIC MODEL FOR TRANSLATIONAL MOTION OF VEHICLE

According to the Newton's second law of motion, a ground vehicle travelling on the dry flat hard straight road is modeled as the continuous-time single-input single-output first-order nonlinear system with its single state-variable becoming the output. It is expressed as the first-order nonlinear ordinary differential equation (ODE) with constant coefficients below [8].

$$m\dot{v}_c + \mu m v_c + 0.5\rho_{air}AC_d v_c + \mu_1 m = \frac{\tau_{wheel} - \tau_{brake}}{\tau_{wheel}} \quad (1)$$

where $v_c = v_c(t)$ denotes the chassis velocity (m/s) being the state variable and output of the vehicle or the velocity output.

m stands for the vehicle mass (kg).

g represents the gravitational acceleration (9.81 m/s^2).

ρ_{air} denotes the air density (kg/m^3).

A stands for the frontal area of the vehicle (m^2).

C_d represents the aerodynamic-drag coefficient.

μ_1 denotes the rolling-resistance coefficient due to the normal force as well as the road-surface condition.

*Corresponding author

μ_2 stands for the coefficient of viscous friction or damping (s/m).
 τ_{wheel} represents the tractive torque or the torque driving wheels (N-m).
 τ_{brake} denotes the braking torque (N-m).
 r_{wheel} stands for the wheel radius (m).
 And then define $u_w = \frac{\tau_{wheel} + \tau_{brake}}{r_{wheel}}$ as the vehicle input or the force input equivalent to tractive effort plus braking force (N).
 $\mu_1 mg$ represents the rolling resistance (N).
 $\mu_2 m v_c$ denotes the viscous friction or damping (N).
 $0.5 \rho_{air} A C_d v_c^2$ stands for the aerodynamic drag (N).
 And $m \dot{v}_c$ represents the resultant force or the net force applied to the vehicle (N).

When both sides of (1) are divided by m , it is written as follows.

$$\dot{v}_c + \mu_2 g v_c + \frac{0.5 \rho_{air} A C_d}{m} v_c^2 + \mu_1 g = \frac{1}{m} u_w \quad (2)$$

Later on, declare $a = \mu_2 g$ in unit s^{-1} ,
 $b = \frac{0.5 \rho_{air} A C_d}{m}$ in unit m^{-1} , $d = \mu_1 g$ in unit m/s^2 ,
 and $h = \frac{1}{m}$ in unit kg^{-1} . This brings (2) to the continuous-time vehicle model of longitudinal motion including all the terms that mean accelerations below.

$$\dot{v}_c = -a v_c - b v_c^2 - d + h u_w \quad (3)$$

When the vehicle moves forward ($v_c > 0$) and reverses in direction ($v_c < 0$), this leads to $b = b \operatorname{sgn} v_c$ as well as $d = d \operatorname{sgn} v_c$ where if $v_c > 0$ then $\operatorname{sgn} v_c = 1$, if $v_c < 0$ then $\operatorname{sgn} v_c = -1$, and if $v_c = 0$ then $\operatorname{sgn} v_c = 0$. Whenever v_c is changing its direction, $\operatorname{sgn}(v_c)$ discontinues strongly and is unlike real situation. Thereby it is approximated to $\operatorname{sgn}(v_c) \approx \frac{v_c}{|v_c| + \epsilon}$ where ϵ is a small positive value. Next assign $\epsilon = 0.01$, whereupon $\frac{v_c}{|v_c| + \epsilon}$ will keep smooth variation and imitate better a direction reversal. Once the vehicle is propelled by a consistent effort (u_w), it will run at a constant velocity in steady state ($\dot{v}_c(\infty) = 0$). Thus, (3) turns into the quadratic polynomial equation. After reforming it, its solution is found as follows.

$$v_c(\infty) = \frac{-a + \sqrt{a^2 - 4b(d - h u_w(\infty))}}{2b} \quad (4)$$

The relationship between $v_c(\infty)$ and $u_w(\infty)$ draws nonlinear curve and signifies that vehicle motion is classified into nonlinear model.

III. DISCRETE PI CONTROLLER

Governing vehicle velocity under a conscious driver performs as and conducts like the continuous-time PI (proportional-integral) controller that

constitutes cruise control in modern automobile [8]. Such a controller is pointed out in the following.

$$u_w = u_w(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (5)$$

where u_w denotes the PI-controller output commensurate with the tractive effort plus braking force (N).

$e(t) = v_r(t) - v_c(t)$ stands for the error between the velocity reference and the chassis velocity (m/s).

$v_r = v_r(t)$ represents the velocity reference (m/s).

K_p denotes the proportional gain (kg/s).

K_i stands for the integral gain (kg/s^2).

And t represents the time elapsing (s).

An alternative form of the rudimentary PI controller is often utilized digitally through discretization. It manifests the discrete PI controller below.

$$u_w(k) = K_p e(k) + K_i T \sum_{n=0}^k e(n) \quad (6)$$

where T denotes the stepsize or the sampling period (s).

$e(k) = v_r(k) - v_c(k)$, $k = \frac{t}{T}$.

$k = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$, and k stands for the number of iterations or the sample index from functioning at beginning up to the current time.

IV. BACKWARD EULER MODEL

State observers have been exploited regularly in order to online estimate internal or inaccessible state-variables of many second-order or higher-order dynamic systems [9]. They also reconstructed the velocity or speed of vehicle systems that contain several state-variables. However, the pondered first-order motion model of vehicle holds only a solitary state-variable which matches its velocity being the same as the system output. Therefore, velocity estimation by employing a state observer for the first-order vehicle system gets redundant and useless because velocity observation needs information from measuring the identical velocity. Thereupon exclusively simultaneous velocity estimation and measurement go wasteful. A potential way over the velocity estimation will disclose the backward Euler method [10], [11] deployed by the continuous-time vehicle model of motion. This arrangement releases the backward Euler model which belongs to an uncomplicated scheme and disregards chassis velocity.

When the continuous-time motion model is disposed into approximation under assumptions of $u_w(k+1) \approx u_w(k)$ and very short stepsize T , the backward Euler model below will proceed from the backward Euler method.

$$b T v_c^2(k+1) + (1 + a T) v_c(k+1) + d T - h T u_w(k) - v_c(k) = 0$$

The above quadratic algebraic equation boasts the unknown $v_c(k+1)$ and afterwards it is solved into the

closed form expression that suggests an explicit formula as follows.

$$v_c(k+1) = \frac{-(-1+aT) + \sqrt{(1+aT)^2 - 4bT(T(d-hu_w(k)) - v_c(k))}}{2bT} \quad (7)$$

Since the quadratic equation yields two distinct roots, there will be just one root allowable while the other appears insignificant and invalid. The root which conveys plus sign before the radical symbol establishes a certain solution because the numerator of the fraction alters between positive and negative values at zero crossing of velocity estimation. Another which carries minus sign in front of the same radical symbol acts undetermined because the numerator stays always negative. Consequently, the proper root of the former is designated as the backward Euler model whereas the latter is ignored. During the zero crossing, the denominator of the fraction remains nonzero, and it is equal to either a positive or negative constant value that involves the direction of estimated velocity. The backward Euler model posterior to verification will continue computing without interruption. For the purpose of a study concerning performance on estimation, whole parameters of the continuous-time motion model, the backward Euler model, and the PI controller are nominated by their corresponding simple numeric-values below.

$$\begin{aligned} a &= 1 \text{ s}^{-1}, b' = 0.1 \text{ m}^{-1}, d' = 0.1 \text{ m/s}^2, \\ h &= 2 \text{ kg}^{-1}, T = 0.001 \text{ s}, K_p = 2 \text{ kg/s}, \\ K_i &= 2 \text{ kg/s}^2, \text{ and } v_r = 3 \text{ m/s}. \end{aligned}$$

V. TRAPEZOIDAL RULE MODEL

In numerical analysis, the trapezoidal rule is served for evaluating numerical integral [12]. After the trapezoidal rule is leveraged with the continuous-time motion model, the trapezoidal rule model which online estimates vehicle velocity is derived from mathematical term manipulation as follows. It is modified from the backward Euler model and looks slightly more complicated than the one. The instruction for usage of it is also the same.

$$0.5Tbv_c^2(k+1) + (1+0.5aT)v_c(k+1) + \Delta(k) = 0$$

$$\text{where } \Delta(k) = T(0.5bv_c^2(k) + d - hu_w(k)) - (1-0.5aT)v_c(k)$$

The reasonable solution is traced further by the same procedure as that of the backward Euler model.

$$v_c(k+1) = \frac{1}{bT} \frac{-(-1+0.5aT) + \sqrt{(1+0.5aT)^2 - 2bT\Delta(k)}}{(1+0.5aT)^2 - 2bT\Delta(k)} \quad (8)$$

VI. TAYLOR EXPANSION MODEL

There are still some other numerical methods that can support vehicle velocity estimation without velocity signal accessibility. A part of Taylor series [13] that solely comprises zero, first, and second order terms is able to pertain to velocity evaluation based on the continuous-time motion model. The Taylor expansion model below is formulated through vehicle-model differentiation with respect to time, substitution into the first and second order terms, and compact configuration across the entire equation for velocity computation.

$$v_c(k+1) = v_c(k) + Tv_c(k) + 0.5T^2\ddot{v}_c(k) \quad (9)$$

$$\text{where } \dot{v}_c(k) = -av_c(k) - b(k)v_c^2(k) - d(k) + hu_w(k)$$

$$\begin{aligned} \ddot{v}_c(k) &= -(a + 2b(k)v_c(k))\dot{v}_c(k) \\ &\quad - \frac{b'kv_c^2(k)}{(|v_c(k)| + \varepsilon)^2} \dot{v}_c(k) \\ &\quad - \frac{d'k}{(|v_c(k)| + \varepsilon)^2} \dot{v}_c(k) + h\dot{u}_w(k) \end{aligned}$$

$$\dot{u}_w(t) = \dot{u}_w(k) \approx \frac{u_w(k) - u_w(k-1)}{T}$$

$$b = b(k) = \frac{b'kv_c(k)}{|v_c(k)| + \varepsilon}$$

$$\text{and } d = d(k) = \frac{d'kv_c(k)}{|v_c(k)| + \varepsilon}$$

VII. SIMULATION RESULTS

The backward Euler, trapezoidal rule, and Taylor expansion models are specified by the same relevant parameters. They all receive an identical control input from the PI controller incorporated in the closed-loop velocity (cruise) control system illustrated in Fig. 1. When each stepsize falls even and equal to the fixed stepsize in simulation environment at 0.001 s, every estimated velocity agrees exactly with the closed-loop response (continuous-time model) displayed in Fig. 2. Thereafter the PI controller and the three models take their stepsizes at 0.01 s and 0.2 s, respectively whereas the fixed stepsize of simulation is preserved. The three models all estimate more sluggish velocities than the closed-loop response (continuous-time model) shown in Fig. 3 because each occurrence of iteration touching estimation is retarded by their much longer stepsize. The backward Euler model produces the velocity estimation prone to be slower during transient state since it gives larger integration of absolute error (deviation) between the closed-loop response and its velocity estimation with respect to time displayed in Fig. 4.

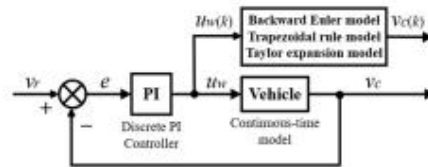


Fig. 1. Closed-loop velocity (cruise) control system.

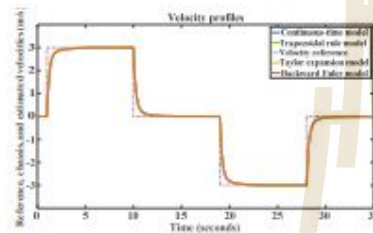


Fig. 2. Chassis and estimated velocities at a single stepsize of 1 ms.

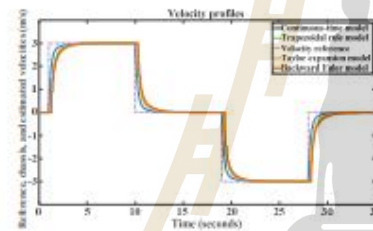


Fig. 3. Chassis and estimated velocities under multi-stepsizes.

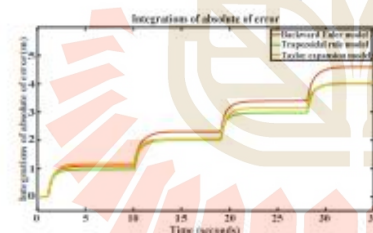


Fig. 4. Integrations of absolute error.

VIII. CONCLUSION

Owing to lack of effectiveness against the applicability of the first-order state observer that estimates vehicle velocity, a few of numerical methods solving ODEs is offered to create the backward Euler, trapezoidal rule, and Taylor expansion models for online velocity estimation without sensing chassis

velocity. The Taylor expansion model grows more sophisticated than the others remaining. Once a vehicle moves forward, then is parked, and subsequently reverses toward the starting place, these three models evaluate accurately their velocities throughout transient and steady states under their minute stepsizes. Nevertheless, there is a retardation in velocity computations compared to chassis velocity during transient state under their moderate stepsizes. Whenever a time lag between adjacent iterations of estimation is reduced substantially, the individual models will reach the possibility for the replacement of speedometer or wheel speed sensor by one of them. The trapezoidal rule model tends to be more accurate.

REFERENCES

- [1] G. Greatrix, "Vehicle speed measurement and law enforcement," *Measurement and Control*, vol. 44, no. 8, pp. 249–251, October, 2011, doi:10.1177/002029401104400804.
- [2] Wikipedia Contributors, "Cruise control," *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Date Accessed: July 7, 2024. [Online.] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Cruise_control
- [3] Wikipedia Contributors, "Anti-lock braking system," *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Date Accessed: July 7, 2024. [Online.] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Anti-lock_braking_system
- [4] Wikipedia Contributors, "Speedometer," *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Date Accessed: July 7, 2024. [Online.] Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Speedometer>
- [5] L. Irnsland, T. A. Johansen, T. I. Fossen, H. F. Grip, J. C. Kalkkuhl, and A. Suissa, "Vehicle velocity estimation using nonlinear observers," *Automatica*, vol. 42, no. 12, pp. 2091–2103, December, 2006, doi:10.1016/j.automatica.2006.06.025.
- [6] G. Rill, "A modified implicit Euler algorithm for solving vehicle dynamic equations," *Multibody System Dynamics*, vol. 15, pp. 1–24, February, 2006, doi:10.1007/s11044-006-2359-z.
- [7] Wikipedia Contributors, "Wheel speed sensor," *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Date Accessed: July 7, 2024. [Online.] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Wheel_speed_sensor
- [8] M. H. Mobarak, R. N. Kleiman and J. Bauman, "Solar-charged electric vehicles: A comprehensive analysis of grid, driver, and environmental benefits," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 2, pp. 579–603, June 2021, doi:10.1109/TTE.2020.2996363.
- [9] R. L. Williams II and D. A. Lawrence, *Linear State-Space Control Systems*. NJ, USA: John Wiley & Sons, 2007.
- [10] S. C. Chapra and R. P. Canale, *Numerical Methods for Engineers*. 7th ed. NY, USA: McGraw-Hill, 2015.
- [11] Wikipedia Contributors, "Backward Euler method," *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Date Accessed: July 7, 2024. [Online.] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Backward_Euler_method
- [12] Wikipedia Contributors, "Trapezoidal rule (differential equations)," *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Date Accessed: July 7, 2024. [Online.] Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Trapezoidal_rule_\(differential_equations\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Trapezoidal_rule_(differential_equations))
- [13] Wikipedia Contributors, "Euler method," *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Date Accessed: July 7, 2024. [Online.] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Euler_method



การประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะด้วยแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง Vehicle Velocity Estimation by Using Backward Euler Model

พงศธร ลาเสียว และ วิโรจน์ แสงธอง*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี Laseawp@gmail.com

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี cewirote@sut.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ วิธีย่อยจะแปลงหรือดิสครีไทซ์แบบจำลองไม่เชิงเส้นอันดับหนึ่งของการเคลื่อนที่บนถนนผิวแข็งเรียบหนึ่งเวลาต่อเนื่องไปเป็นสมการผลต่างพีชคณิตกำลังสองที่มีผลเฉลยคือแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง ระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดที่มีการป้อนกลับอัตราเร็วของยานพาหนะจะนำมาใช้ตรวจสอบสมรรถนะในการประมาณค่าอัตราเร็วของแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง การเปรียบเทียบระหว่างผลตอบสนองของระบบควบคุมวงปิด และอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าจะยืนยันว่า ถ้าแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังมีขนาดขั้นของเวลาหรือคาบสุ่มที่เล็กเพียงพอ การประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังมีความถูกต้องในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว และอาจจะนำมาใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับแทนที่อัตราเร็วของยานพาหนะที่ได้จากการวัด

คำสำคัญ: การประมาณค่าอัตราเร็ว แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง ระบบควบคุมอัตราเร็ว

Abstract

This paper aims at the formation of backward Euler model to estimate vehicle velocity in motion. The backward Euler method is used to convert or discretize a first-order nonlinear model of vehicle's translational motion on the dry hard flat road in continuous time into the quadratic algebraic difference equation with its solution as the backward Euler model. The closed-loop control system including velocity feedback will be used to evaluate the performance of velocity estimations obtained from the backward Euler model. Comparison between the closed-loop response and the estimated velocity asserts that when the backward Euler model holds sufficiently small time stepsize or sampling period, the velocity estimation for onward maneuver and reversal becomes accurate and precise during transient state and in steady state and may be possibly employed as feedback signal rather than the sensed velocity.

Keywords: Velocity Estimation, Backward Euler Model, Velocity Control System

1. บทนำ

การวัดอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของรถยนต์หรือยานพาหนะมีจุดประสงค์หลายประการที่สำคัญ คือการแสดงผลข้อมูลอัตราเร็วบนแผงหน้าปัดควบคุมรถยนต์ที่อยู่ด้านหน้าผู้ขับขี่ ข้อมูลอัตราเร็วจะช่วยให้รถยนต์กำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเกินกว่าอัตราเร็วที่กำหนดหรือไม่ ผู้ขับขี่จะมีหน้าที่ควบคุมรถยนต์ไม่ให้เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเกินกว่าอัตราเร็วที่กฎหมายบังคับใช้ และขับรถยนต์ด้วยความปลอดภัย การควบคุมอัตราเร็วของรถยนต์ (cruise control) ต้องการการป้อนกลับอัตราเร็วที่วัดได้ตลอดเวลา [1] ระบบควบคุมอัตราเร็วจะบังคับรถยนต์เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วที่ต้องการ รถยนต์สมัยใหม่มีระบบห้ามล้อหรือระบบเบรกที่ป้องกันการลื่นไถลระหว่างการหยุดการเคลื่อนที่หรือการชะลออัตราเร็วอย่างกะทันหันภายในช่วงระยะเวลาที่สั้นมาก

แผนการป้องกันการลื่นไถลระหว่างการเบรก (anti-lock braking system: ABS) ต้องการการวัดอัตราเร็วของรถยนต์และอัตราเร็วในการหมุนของล้อรถยนต์ [2] เพราะการหมุนของล้อระหว่างการเบรกจะช่วยให้ผู้ขับขี่ควบคุมทิศทางและการเคลื่อนที่ของรถยนต์ได้ รถยนต์หรือยานพาหนะทางบกมีมาตรวัดอัตราเร็ว (speedometer) ที่ทำหน้าที่วัดและแสดงอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ [3] และป้อนกลับอัตราเร็วที่เปรียบเทียบกับอัตราเร็วที่ต้องการในระบบควบคุมวงปิด มาตรวัดอัตราเร็วจะให้ข้อมูลอัตราเร็วถึงระบบเบรกและมาตรวัดระยะทางเคลื่อนที่ของรถยนต์ (odometer) แต่ถ้ามมาตรวัดอัตราเร็วเกิดชำรุดหรือเสียหาย และถ้าสายสัญญาณวัดเกิดการขาดแยกออกจากกัน ค่าที่อ่านได้ของอัตราเร็วจะมีความผิดพลาดและมีผลกระทบถึงความปลอดภัยในการขับขี่ที่ลดลงหรือไม่มีความปลอดภัย ถ้าสัญญาณป้อนกลับอัตราเร็วขาดหาย ระบบควบคุมอัตราเร็วจะไม่เสถียรภาพ ระบบเบรกทำงานผิดพลาด และการวัดระยะทางจะไม่มีประโยชน์ การประมาณค่าอัตราเร็วแทนที่การใช้งานมาตรวัดอัตราเร็วที่มีสภาพไม่สมบูรณ์ คือวิธีหนึ่งที่จะให้ข้อมูลอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของรถยนต์ และให้สัญญาณป้อนกลับอัตราเร็วได้อย่างต่อเนื่องภายหลังการตรวจพบความผิดปกติของสัญญาณวัด งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ใช้งานตัวเร่งเชิงสถานะไม่เชิงเส้นที่มีโครงสร้างซับซ้อนประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ [4] และใช้ตัวกรองคาลมานที่มีอัลกอริทึมซับซ้อนสูงและต้องการทรัพยากรมากในการคำนวณ ประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ [5] และงานวิจัยอื่นใช้วิธีออยเลอร์ย้อนหลัง (Backward Euler method) หาผลเฉลยเชิงเลขที่เสถียรของแบบจำลองพลวัตของยานพาหนะที่ซับซ้อนและมีความแข็ง (stiffness) [6]

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47

The 47th Electrical Engineering Conference (EECON-47)

วันที่ 13-15 พฤศจิกายน 2567 ณ โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี



บทความนี้จึงนำเสนอการใช้วิธีออยเลอร์ย้อนหลังและแบบจำลองพลวัตการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่ไม่ซับซ้อน สร้างแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังที่ประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะและไม่ต้องการทรัพยากรมากในการคำนวณ เมื่อระบบควบคุมอัตราเร็วบังคับให้ยานพาหนะมีการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า หยุดการเคลื่อนที่ และถอยหลัง แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังที่มีความถูกต้องจะประมาณค่าอัตราเร็วที่เสถียร ถ้าขนาดขั้น (step size) ที่ใช้ในการอินทิเกรตมีค่าที่เล็กเพียงพอ การประมาณค่าอัตราเร็วจะมีความถูกต้องในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว และแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังอาจจะมีโอกาสแทนที่มาตรวัดอัตราเร็วที่มีการทำงานผิดปกติได้ชั่วคราวก่อนการซ่อมหรือเปลี่ยนไปใช้งานมาตรวัดอัตราเร็วที่มีสภาพสมบูรณ์

2. แบบจำลองพลวัตการเคลื่อนที่ของยานพาหนะอย่างง่าย

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน ยานพาหนะที่เคลื่อนที่บนถนนที่มีพื้นผิวเรียบ แห้ง แข็ง และทางตรง คือระบบไม่เชิงเส้นอันดับหนึ่งในเวลาต่อเนื่องที่มีอินพุตเดียวเอาต์พุตเดียว และมีตัวแปรสถานะตัวเดียวที่เป็นตัวแปรเอาต์พุต และเขียนเป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญไม่เชิงเส้นอันดับหนึ่งที่มีสัมประสิทธิ์คงที่ ดังนี้ [7]

$$m\dot{v}_c + \mu_2 mg v_c + 0.5\rho_{air} A C_d v_c^2 + \mu_1 mg = \frac{\tau_{wheel} + \tau_{brake}}{\tau_{wheel}} \quad (1)$$

โดยที่ v_c คือ อัตราเร็วของยานพาหนะ (chassis velocity) (m/s) และเป็นตัวแปรสถานะและตัวแปรเอาต์พุตของยานพาหนะ (ค่าตอบหรือผลเฉลยของระบบ)

m คือ มวลของยานพาหนะ (kg)

g คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s^2)

ρ_{air} คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A คือ พื้นที่ด้านหน้าของยานพาหนะ (m^2)

C_d คือ สัมประสิทธิ์ของแรงต้านจากอากาศ

μ_1 คือ สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานที่เกิดจากน้ำหนักของยานพาหนะ

μ_2 คือ สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานหนืดหรือการหน่วงหนืด (s/m)

τ_{wheel} คือ แรงบิด (ทอร์ค) ขับเคลื่อนล้อ (N-m)

τ_{brake} คือ แรงบิด (ทอร์ค) ที่ผลิตจากการเบรก (N-m)

τ_{wheel} คือ วิธีมีของล้อยานพาหนะ (mm)

และกำหนดให้ $\frac{\tau_{wheel} + \tau_{brake}}{\tau_{wheel}} = u_w$ คือ อินพุตของยานพาหนะที่เป็นแรงพยายามผลักดันให้เกิดการเคลื่อนที่และแรงเบรกหยุดการเคลื่อนที่ (N)

ต่อมาสมการที่ 1 หาดด้วย m ทั้งสองข้างของสมการ และกำหนดให้ $a = \mu_2 g$ มีหน่วย s^{-1} , $b = \frac{0.5\rho_{air} A C_d}{m}$ มีหน่วย m^{-1} , $d = \mu_1 g$ มีหน่วย m/s^2 และ $h = \frac{1}{m}$ มีหน่วย kg^{-1} จะได้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่มีพารามิเตอร์เป็นอัตราเร่ง

$$\dot{v}_c = -av_c - bv_c^2 - d + hu_w \quad (2)$$

เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ($v_c > 0$) และเคลื่อนที่ถอยหลัง ($v_c < 0$) จะได้ว่า $b = b' \text{sgn}(v_c)$ และ $d = d' \text{sgn}(v_c)$ โดยที่ ถ้า $v_c > 0$ จะได้ว่า $\text{sgn}(v_c) = 1$ ถ้า $v_c < 0$ จะได้ว่า $\text{sgn}(v_c) = -1$ และถ้า $v_c = 0$ จะได้ว่า $\text{sgn}(v_c) = 0$ แต่เมื่อ v_c มีค่าที่กำลังเปลี่ยนแปลงเครื่องหมาย $\text{sgn}(v_c)$ จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไม่ต่อเนื่อง จึงกำหนดให้ $\text{sgn}(v_c) \approx \frac{v_c}{|v_c| + \epsilon}$ โดยที่ ϵ คือค่าบวกที่มีค่าน้อยมาก และกำหนดให้ $\epsilon = 0.01$ เพราะเมื่อ v_c มีค่าที่กำลังเปลี่ยนแปลงเครื่องหมาย $\frac{v_c}{|v_c| + \epsilon}$ จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

3. ตัวควบคุมฟีด

ผู้ขับยานพาหนะในสภาพปกติมีพฤติกรรมในการขับที่คล้ายกับตัวควบคุมฟีด (ตัวควบคุมสัดส่วนอินทิกรัล) ในเวลาต่อเนื่อง [7] ที่มีสมการดังนี้

$$u_w = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3)$$

โดยที่ u_w คือ เอาต์พุตของตัวควบคุมฟีด (PI controller output) (N) $e(t) = v_r(t) - v_c(t)$ คือ ความผิดพลาดระหว่างอัตราเร็วอ้างอิงและอัตราเร็วของยานพาหนะ

v_r คือ อัตราเร็วอ้างอิงของยานพาหนะ (m/s), K_p คือ ค่าเกนสัดส่วน (kg/s), K_i คือ ค่าเกนอินทิกรัล (kg/s^2) และ t คือ เวลา (s)

ตัวควบคุมฟีดที่ใช้งานคือตัวควบคุมฟีดแบบดิสครีต (discrete PI controller) ที่มีสมการดังนี้

$$u_w(k) = K_p e(k) + K_i T \sum_{n=0}^k e(n) \quad (4)$$

โดยที่ T คือ ขนาดขั้น (step size) หรือคาบระยะเวลาในการคำนวณซ้ำหนึ่งรอบ, $e(k) = v_r(k) - v_c(k)$, $k = \frac{t}{T}$,

$k = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$ และ k คือ จำนวนครั้งในการวนซ้ำจากเวลาที่เริ่มต้นการทำงานถึงเวลาปัจจุบัน

4. วิธีออยเลอร์ย้อนหลัง

วิธีออยเลอร์ย้อนหลัง (backward Euler method) [8] เป็นวิธีที่ใช้ในการประมาณค่าตอบหรือผลเฉลยเชิงเลขของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ $\dot{y} = f(t, y)$ และมีความเสถียรมากกว่าวิธีออยเลอร์ไปหน้า (forward Euler method) กล่าวคือวิธีออยเลอร์ย้อนหลังจะคำนวณค่าตอบ (solution) ได้ถูกต้องและสู้เข้ามามากกว่าค่าตอบที่คำนวณได้จากวิธีออยเลอร์ไปหน้า แต่จะมีความซับซ้อนในการหาค่าตอบมากกว่า เพราะวิธีออยเลอร์ย้อนหลังให้สมการที่มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (unknown) ทั้ง 2 ข้างของสมการ จึงต้องจัดสมการให้เป็นรูปแบบปิด (closed-form solution) ที่มีคำตอบชัดเจน ถ้าไม่สามารถจัดสมการที่มีรูปแบบปิดได้จำเป็นต้องใช้วิธีการหาค่าตอบซ้ำเชิงเลข วิธีออยเลอร์ย้อนหลังมีสมการดังนี้

$$y_{k+1} = y_k + T f(t_{k+1}, y_{k+1}) \quad (5)$$

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47
The 47th Electrical Engineering Conference (EECON-47)
วันที่ 13-15 พฤศจิกายน 2567 ณ โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี



โดยที่ y_k คือ ค่าตอบหรือตัวแปรสถานะที่เวลาปัจจุบัน, y_{k+1} คือ ค่าตอบหรือตัวแปรสถานะที่เวลาอนาคตถัดจากเวลาปัจจุบันหนึ่งขนาดขั้น, t_{k+1} คือ เวลาอนาคตถัดจากเวลาปัจจุบันหนึ่งขนาดขั้น, และ $f(t_{k+1}, y_{k+1})$ คือ ฟังก์ชันต่อเนื่องที่เวลาอนาคตถัดจากเวลาปัจจุบันหนึ่งขนาดขั้น ตัวแปร y_k และ t_{k+1} คือตัวแปรที่ทราบค่า (known) และ y_{k+1} คือตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

5. แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังของยานพาหนะ

วิธีหนึ่งที่มีนิยามใช้ในการประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ คือการใช้ตัวสังเกตสถานะประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะที่เป็นตัวแปรสถานะแบบออนไลน์ แต่แบบจำลองการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่พิจารณาคือ ระบบไม่เชิงเส้นอันดับหนึ่งที่มีอัตราเร็วของยานพาหนะเป็นตัวแปรสถานะตัวเดียว และเป็นเอาต์พุตของยานพาหนะ และระบบพลวัตที่ใช้สร้างตัวสังเกตสถานะประมาณค่าตัวแปรสถานะ ต้องมีตัวแปรสถานะตั้งแต่สองตัวขึ้นไป กล่าวคือระบบพลวัตที่มีตัวสังเกตสถานะต้องเป็นระบบอันดับสองหรือระบบที่มีอันดับสูงกว่าสอง ดังนั้นการใช้แกนตัวสังเกตสถานะประมาณค่าตัวแปรสถานะที่เป็นเอาต์พุตของระบบพลวัตอันดับหนึ่ง จึงไม่มีประโยชน์ทางวิศวกรรม เพราะการประมาณค่าเอาต์พุตของระบบต้องการข้อมูลที่ได้จากการวัดเอาต์พุตของระบบ การประมาณค่าจึงเข้าช้อนกับการวัด วิธีหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ในการประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะและไม่ซับซ้อนและไม่ต้องการข้อมูลจากการวัดอัตราเร็ว คือการใช้วิธีออยเลอร์ย้อนหลังแปลงแบบจำลองการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่องไปเป็นแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาแบบจำลองการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในสมการที่ (2) และวิธีออยเลอร์ย้อนหลังในสมการที่ (5) และสมมติว่า $u_w(k+1) \approx u_w(k)$ เพราะ T มีค่าน้อยมาก จะเขียนได้ดังนี้

$$bTv_c^2(k+1) + (1+aT)v_c(k+1) + dT - bTu_w(k) - v_c(k) = 0$$

สมการกำลังสองที่ได้จะมี $v_c(k+1)$ เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า และมีคำตอบที่ชัดเจนหรือมีรูปแบบปิดที่ประมาณค่าอัตราเร็วดังนี้

$$v_c(k+1) = \frac{-(1+aT) + \sqrt{(1+aT)^2 - 4bT(d - bu_w(k)) - v_c(k)}}{2bT} \quad (6)$$

เนื่องจากสมการที่ (6) มีเครื่องหมายที่อยู่ข้างหน้ารากที่สองเป็นเครื่องหมาย ‘+’ สมการกำลังสองจะให้คำตอบ $v_c(k+1)$ สองค่าในเวลาเดียวกัน ถ้าเปลี่ยนเครื่องหมาย ‘+’ เป็นเครื่องหมาย ‘-’ คำตอบ $v_c(k+1)$ จะมีค่าไม่แน่นอน แต่ถ้าเปลี่ยนเครื่องหมาย ‘+’ เป็นเครื่องหมาย ‘-’ คำตอบ $v_c(k+1)$ จะมีค่าที่แน่นอน ดังนั้นจึงเลือกเครื่องหมาย ‘+’ แทนเครื่องหมาย ‘+’ และ $b \neq 0$ เพราะตัวหารต้องไม่เท่ากับศูนย์ สมการที่ (6) คือแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังและจะนำมาใช้ในการประมาณค่าอัตราเร็วของยานพาหนะ ต่อมากำหนดให้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังตัวควบคุมฟีด มีค่าพารามิเตอร์และค่าเกณฑ์ดังนี้ $a = 1 \text{ s}^{-1}$, $b' =$

0.1 m^{-1} , $d' = 0.1 \text{ m/s}^2$, $h = 2 \text{ kg}^{-1}$, $T = 0.001 \text{ s}$, $K_p = 2 \text{ kg/s}$, $K_i = 2 \text{ kg/s}^2$, และ $v_r = 3 \text{ m/s}$ เนื่องจากต้องการตรวจสอบสมรรถนะในการประมาณค่าอัตราเร็วของแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลัง ค่าพารามิเตอร์และค่าเกณฑ์กำหนดให้เป็นตัวเลขที่ง่าย

6. ผลการจำลองสถานการณ์ในการที่จักรยานคันคันเดียว

การตรวจสอบสมรรถนะในการประมาณค่าอัตราเร็วของแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังที่สะดวกวิธีหนึ่งคือการจำลองสถานการณ์แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังและระบบควบคุมอัตราเร็ววงปิดที่ประกอบด้วยแบบจำลองพลวัตการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่อง และตัวควบคุมฟีดแบ็คแบบดิสครีต แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังและแบบจำลองยานพาหนะได้รับเอาต์พุตของตัวควบคุมฟีดแบ็ค แต่สัญญาณป้อนกลับคืออัตราเร็วของแบบจำลองยานพาหนะในเวลาต่อเนื่องที่แสดงในรูปที่ 1 ตัวควบคุมฟีดแบ็คแบบดิสครีตจะแสดงในรูปที่ 2 แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังจะแสดงในรูปที่ 3 และระบบควบคุมวงปิดทั้งหมดจะแสดงในรูปที่ 4

การจำลองสถานการณ์มีขนาดขั้นคงที่ (fixed step size) 0.001 s ค่าเดียว และมีลำดับเหตุการณ์ดังนี้ ยานพาหนะหยุดอยู่กับที่ในช่วงเวลาเริ่มต้น 1 s ($v_r = 0$) ต่อมากำหนดให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยอัตราเร็วคงที่ ($v_r = 3 \text{ m/s}$) ในช่วงเวลา 9 s จากนั้นบังคับให้ยานพาหนะหยุดอยู่กับที่ ($v_r = 0$) ในช่วงเวลา 9 s ต่อมากำหนดให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ถอยหลังด้วยอัตราเร็วคงที่ ($v_r = -3 \text{ m/s}$) ในช่วงเวลา 9 s และจากนั้นยานพาหนะหยุดอยู่กับที่ ระบบควบคุมวงปิดมีผลตอบสนองอัตราเร็ว (v_c) ที่ไม่มีการพุ่งเกิน (no overshoot) ในสถานะชั่วคราว และมีผลตอบสนองในสถานะอยู่ตัว (เส้นกราฟ continuous-time model หรือกราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) เท่ากับอัตราเร็วอ้างอิง (เส้นกราฟ velocity reference หรือกราฟเส้นประสีม่วง) ที่แสดงในรูปที่ 5 ซึ่งสอดคล้องกับการขับจักรยานพาหนะในสภาพปกติ แต่แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังประมาณค่าอัตราเร็ว $v_c(k)$ ที่ถูกต้องในช่วงเวลา 0 ถึง 19 s (เส้นกราฟ backward Euler model หรือกราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) แต่ต่อมาการประมาณค่ามีความผิดพลาดและถู้ออกจากอัตราเร็วที่ถูกต้อง เพราะ $b = b'$ นั่นคือเมื่อ $v_c(k)$ ที่ได้จากการประมาณค่ามีค่าที่เปลี่ยนเครื่องหมาย a จะมีค่าบวกเหมือนเดิมและไม่เปลี่ยนเครื่องหมาย ดังนั้นต้องการแก้ไขค่า b ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงเครื่องหมายของ $v_c(k)$ และเมื่อ $v_c(k) = 0$ ค่า b ต้องไม่เท่ากับศูนย์

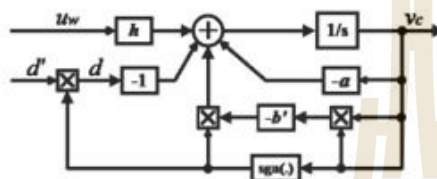
วิธีการแก้ไขคือการป้อน $v_c(k)$ ถึงรีเลย์ (relay) ที่แสดงในรูปที่ 3 และนำเอาต์พุตของรีเลย์คูณกับค่า b' ผลคูณที่ได้รับคือค่า b ที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบฮิสเทรีซิส (hysteresis) ดังนี้ ถ้า $v_c(k) \geq 0$ จะได้ $b = b'$ แต่ถ้า $v_c(k) \leq -0.001 \text{ m/s}$ จะได้ $b = -b'$ เมื่อยานพาหนะมีการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลัง แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังจะประมาณค่าอัตราเร็วที่ถูกต้องที่แสดงในรูปที่ 6 (เส้นกราฟ backward Euler model หักเส้นกราฟ continuous-time model) ดังนั้นแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังในสมการที่ (6) มีความถูกต้อง

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47
The 47th Electrical Engineering Conference (EECON-47)
วันที่ 13-15 พฤศจิกายน 2567 ณ โรงแรมเซ็นทาราแอคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี



7. ผลการจำลองสถานการณ์ในการหนีที่ใช้ขนาดขั้นหลายค่า

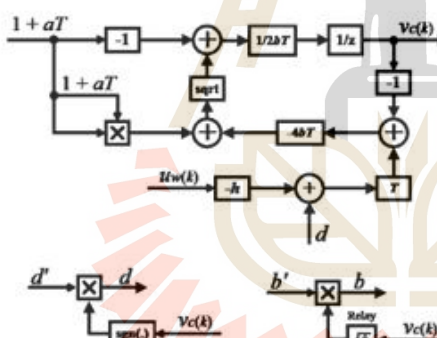
ในการจำลองสถานการณ์ที่ผ่านมา แบบจำลองยานพาหนะในเวลาต่อเนื่อง และแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังมีขนาดขั้น 0.001 s เท่ากัน การประมาณค่าอัตราเร็วจึงมีความถูกต้องในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว เมื่อแบบจำลองยานพาหนะมีขนาดขั้น 0.001 s ตัวควบคุมที่ออกแบบ



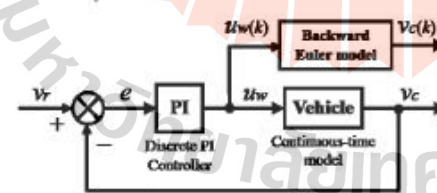
รูปที่ 1 แบบจำลองพลวัตการเคลื่อนที่ของยานพาหนะในเวลาต่อเนื่อง



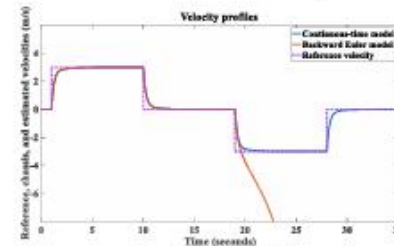
รูปที่ 2 ตัวควบคุมแบบดิสครีตที่ใช้ทำงาน



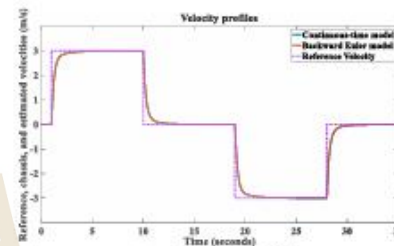
รูปที่ 3 แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังที่ใช้ทำงาน



รูปที่ 4 ระบบควบคุมวงปิดทั้งหมด



รูปที่ 5 ผลตอบสนองอัตราเร็วและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า



รูปที่ 6 ผลตอบสนองอัตราเร็วและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่าที่เกิดจากการใช้งานบล็อกรีเลย์

ดิสครีตมีขนาดขั้น 0.01 s และแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังมีขนาดขั้น 0.1 s อัตราเร็ว $v_c(k)$ ที่ได้จากการประมาณค่า (เส้นกราฟ backward Euler model) จะช้ากว่าผลตอบสนองอัตราเร็ว v_c (เส้นกราฟ continuous-time model) ในสถานะชั่วคราวที่แสดงในรูปที่ 7 เพราะแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังมีการประวิงเวลา (time delay) ของการประมาณค่าอัตราเร็วในแต่ละการวนซ้ำเชิงเลข ดังนั้นถ้าแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังมีขนาดขั้นที่เล็กเพียงพอ แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังจะมีการประมาณค่าอัตราเร็วที่ผิดพลาดน้อยมากในสถานะชั่วคราว และผลการจำลองสถานการณ์จะยืนยันว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้งานแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังแทนที่เซนเซอร์วัดอัตราเร็วของยานพาหนะ และการประมาณค่าอัตราเร็วจะใช้เป็นสัญญาณป้อนกลับในระบบควบคุมวงปิด

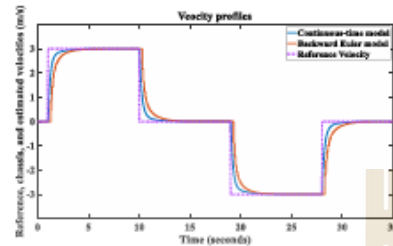
8. สรุป

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของยานพาหนะที่พิจารณาคือระบบไม่เชิงเส้นที่มีอัตราเร็วเป็นตัวแปรสถานะเพียงตัวเดียวและเป็นเอาต์พุตของระบบ การออกแบบตัวสังเกตสถานะที่ประมาณค่าอัตราเร็วจึงไม่สามารถดำเนินการได้ วิธีหนึ่งที่เป็นไปได้และไม่ซับซ้อนคือการสร้างแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังที่ให้ค่าตอบแบบปัดและประมาณค่าอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังไม่ต้องการข้อมูล

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 47

The 47th Electrical Engineering Conference (EECON-47)

วันที่ 13-15 พฤศจิกายน 2567 ณ โรงแรมเซ็นทาราและคอนเวนชันเซ็นเตอร์ จังหวัดอุดรธานี



รูปที่ 7 ผลตอบสนองอัตราเร็วและอัตราเร็วที่ได้จากการประมาณค่า
ในการมีที่มีขนาดขั้นหลายค่า

ได้จากการวัดอัตราเร็ว ผลการจำลองสถานการณ์ยืนยันว่า เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า หยุดการเคลื่อนที่ และเคลื่อนที่ถอยหลัง แบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังที่มีขนาดขั้นเล็กเพียงพอจะประมาณค่าอัตราเร็วได้ถูกต้องในสถานะชั่วคราวและในสถานะอยู่ตัว ดังนั้นการใช้งานแบบจำลองออยเลอร์ย้อนหลังที่หาหน้าที่ป้องกันกลับอัตราเร็วและแทนที่เซนเซอร์วัดอัตราเร็วจึงมีความเป็นไปได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wikipedia Contributors. "Cruise Control." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Date Accessed: June 14, 2024. [Online.] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Cruise_control
- [2] Wikipedia Contributors. "Anti-Lock Braking System." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Date Accessed: June 14, 2024. [Online.] Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Anti-lock_braking_system
- [3] Wikipedia Contributors. "Speedometer." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Date Accessed: June 14, 2024. [Online.] Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Speedometer>
- [4] L. Imstrand, T. A. Johansen, T. I. Fossen, H. F. Grip, J. C. Kalkkuhl, and A. Sülissa, "Vehicle velocity estimation using nonlinear observers," *Automatica*, vol.42, no.12, pp.2091–2103, December, 2006, doi:10.1016/j.automatica.2006.06.025.
- [5] Z. Zhao, H. Chen, J. Yang, X. Wu, and Z. Yu, "Estimation of the vehicle speed in the driving mode for a hybrid electric car Based on an unscented Kalman filter," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol.229, no.4, pp.437–456, 2015, doi:10.1177/0954407014546918.
- [6] G. Rill, "A modified implicit Euler algorithm for solving vehicle dynamic equations," *Multibody System Dynamics*, vol.15, pp.1–24, 2006, doi:10.1007/s11044-006-2359-z.
- [7] M. H. Mobarak, R. N. Kleiman and J. Bauman, "Solar-charged electric vehicles: A comprehensive analysis of grid, driver,

and environmental benefits," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 2, pp. 579–603, June 2021, doi:10.1109/TTE.2020.2996363.

- [8] S. C. Chapra and R. P. Canale, *Numerical Methods for Engineers*. 7th ed. NY, USA: McGraw-Hill, 2015.

ประวัติผู้เขียน

นายพงศธร ลาเสียว เกิดเมื่อวันที่ 17 มีนาคม พ.ศ. 2544 เกิดที่อำเภอกบินทร์บุรี จังหวัดปราจีนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้ากบินทร์บุรี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2566 และในปีเดียวกันได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

