ระบบการสื่อสารแบบดีซิงโครไนเซชั่นสาหรับขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ

นายวิศทัศน์ ดียิ่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESYNCHRONIZATION COMMUNICATION SYSTEM FOR AUTOMATIC VEHICLE PLATOONING

Mr. Visatouch Deeying

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Computer Engineering
Department of Computer Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบการสื่อสารแบบดีซิงโครไนเซชั่นสาหรับขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ
โดย	นายวิศทัศน์ ดียิ่ง
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ หนูไพโรจน์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกริก ภิรมย์โสภา)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ ผลเพิ่ม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิศทัศน์ ดียิ่ง : ระบบการสื่อสารแบบดีซิงโครไนเซชั่นสาหรับขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ. (DESYNCHRONIZATION COMMUNICATION SYSTEM FOR AUTOMATIC VEHICLE PLATOONING) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย

ขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัตินั้นมีความท้าทายในการสร้างสูงอันเนื่องมาจากมีความต้องการในการประกาศข้อมูลที่มีความถี่ในการประกาศสูง ประสิทธิภาพของโพรโทคอลซีเอสเอ็มเอ/ซีเอบนมาตรฐานการสื่อสาร IEEE 802.11p นั้นไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติได้เนื่องจากความล่าช้าที่ไม่มีขอบเขตโดยเฉพาะกรณีที่มีการใช้งานช่องสัญญาณมาก มีงานวิจัยหลากหลายงานที่นั้นมีการเกี่ยวพันกับชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อกลางและ/หรือไม่รองรับจำนวนยานพาหนะที่มีการเปลี่ยนแปลงและ/หรือมีจุดเดียวของความล้มเหลว เราเสนอให้ใช้งานการดีซิงโครไนเซชั่นสำหรับยานพาหนะที่มีพื้นฐานมาจากโพรโทคอลทีดีเอ็มเอบนมาตรฐานการสื่อสาร IEEE 802.11p ที่มีอยู่ทั่วไปแล้ว โดยยังสามารถรองรับจำนวนยานพาหนะที่มีการเปลี่ยนแปลงและไม่มีจุดเดียวของความล้มเหลว เราได้เสนอช่วงการตั้งค่าที่เหมาะสมกับการใช้งานขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ จากผลการทดลองได้แสดงว่าเมื่อใช้งานช่วงการตั้งค่าที่เราเสนอ การดีซิงโครไนเซชั่นสามารถรองรับการประกาศข้อมูลที่มีความถี่สูงในสถานการณ์ที่มียานพาหนะสูงสุดถึง 16 คัน ที่การประกาศข้อมูล 100 รอบต่อวินาที และมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าโพรโทคอลซีเอสเอ็มเอ/ซีเอ ในกรณีที่เกิดความล้มเหลว จากผลการทดลองได้แสดงว่าการดีซิงโครไนเซชั่นสำหรับยานพาหนะนั้นไม่ได้มีผลกระทบที่ร้ายแรงอันเนื่องมาจากความล้มเหลวเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์	ลายมือชื่อนิสิต	....
ปีการศึกษา	2561	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....

6070314221 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORD: platooning, Vehicular Ad Hoc Network (VANET), IEEE 802.11p, medium access control, performance evaluation, desynchronization, beaconing, network simulation

Visatouch Deeying : DESYNCHRONIZATION COMMUNICATION SYSTEM FOR AUTOMATIC VEHICLE PLATOONING. Advisor: Assoc. Prof. Kultida Rojviboonchai, Ph.D.

Platooning is a challenging application because it requires a frequent rate of beaconing. Performance of traditional Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance method (CSMA/CA) on IEEE 802.11p is unable to satisfy for platooning needs due to unbounded delay especially under high channel load. Several researches about platooning are involved with medium access control (MAC) layer modification in a protocol stack and/or does not support variable number of vehicles and/or have a single point of failure. We propose to use a vehicular desynchronization TDMA-based protocol over off-the-shelf IEEE 802.11p, while supporting vehicles joining and leaving a platoon and having no single point of failure. We recommend a range of parameters that are suitable for the platooning application. Our evaluation shows that using our suggested parameters, the vehicular desynchronization protocol could support a high-frequency beaconing with up to 16 vehicles at 100 Hz beaconing. It is also has a better performance compared to traditional CSMA/CA. In case of failure, our evaluation shows that the vehicular desynchronization does not have a severe consequence due to the failure compared to other publications.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Field of Study:	Computer Engineering	Student's Signature ....
Academic Year:	2018	Advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร.กุลธิดา โรจน์วิบูลย์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ได้ให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็นต่างๆสำหรับพัฒนางานวิจัย และยังได้ให้คำแนะนำเพื่อช่วยให้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินการวิจัยอีกด้วย

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ หนูไพโรจน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกริก ภิรมย์โสภา และรองศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ ผลเพิ่ม ที่ได้ให้คำแนะนำซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยและการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาสำหรับนิสิตเก่าวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ ดร.กุลิสร์ ณ นคร นายเกียรติคุณ กาวิละ นายอัษฎาวุธ ชนะกิจการโชค นายธีรภัทร์ วงศ์สุธีรา นายฉันทวัฒน์ รัตนพงศ์พันธ์ นายสัญชัย จักรธีรังกูร นายณัฐธัญ วิโรจน์บุญเกียรติ และสมาชิกคนอื่นในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมระบบสารสนเทศ (ISEL) ที่ได้ให้ความคิดเห็นและข้อเสนอแนะสำหรับการทำวิจัยตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

สุดท้ายที่ขอขอบคุณคุณพ่อ คุณแม่และครอบครัวที่เปิดโอกาสให้ศึกษาต่อและให้คำปรึกษาในด้านอื่น ๆ รวมถึงเพื่อนทุกคนที่เป็นกำลังใจให้ตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัยจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

วิศทัศน์ ดียิ่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

.... ค

บทคัดย่อภาษาไทย... ค

.... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.. ง

กิตติกรรมประกาศ... จ

สารบัญ... ฉ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา... 1

1.2 วัตถุประสงค์ 3

1.3 ขอบเขตการวิจัย 3

1.4 คุณค่าทางวิชาการ 3

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.. 4

1.6 ผลงานตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์.. 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 5

2.1.1 การควบคุมการเข้าถึงสื่อกลาง (MAC : Medium Access Control) 5

2.1.2 เครือข่ายแอดฮอกสำหรับยานพาหนะ 5

2.1.3 มาตรฐานการสื่อสาร IEEE 802.11p 6

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง... 6

บทที่ 3 แนวคิดและหลักการในงานวิจัย 7

3.1 อัลกอริทึมการดีซิงโครไนเซชั่น.. 7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2 กรอบงานสำหรับขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ 10
บทที่ 4 การวัดประเมินและผลการทดลอง 13
4.1 การวัดประเมินผล 13
4.2 ผลการทดลอง 15
4.2.1 การหาการตั้งค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานดีซิงโครไนเซชั่นกับขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ 15
4.2.2 การเปรียบเทียบดีซิงโครไนเซชั่นกับระบบอื่นโดยใช้การตั้งค่าที่เหมาะสม 27
4.2.2.1 สถานการณ์ที่จำนวนยานพาหนะคงที่ 27
4.2.2.2 สถานการณ์ที่มีการเข้าและออกของยานพาหนะ 32
4.2.2.3 สถานการณ์ที่มียานพาหนะหยุดทำงานหนึ่งคัน 33
บทที่ 5 บทสรุปของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ 36
5.1 บทสรุปของงานวิจัย 36
5.2 การอภิปราย 36
5.2.1 กรณีที่ระยะห่างระหว่างยานพาหนะเปลี่ยนแปลง 36
5.2.2 กรณีที่ยานพาหนะมีลักษณะที่แตกต่างกัน 40
5.3 ข้อเสนอแนะ 43
บรรณานุกรม 44
ประวัติผู้เขียน 47

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การขับขี่ยานพาหนะโดยมนุษย์นั้นเป็นปัจจัยส่วนหนึ่งของปัญหาต่าง ๆ บนท้องถนนเช่น การจราจรติดขัดและอุบัติเหตุต่าง ๆ การจราจรติดขัดนั้นเป็นปัญหาที่สำคัญสำหรับระบบขนส่ง ซึ่งนำไปสู่การเดินทางที่ยาวนานขึ้น สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้น และลดทอนคุณภาพในการใช้ชีวิต [1] ปฏิกิริยาตอบสนองที่ช้าของมนุษย์นั้นก็เป็นหนึ่งในปัจจัยของการจราจรติดขัด [2] ยกตัวอย่างเช่น เมื่อขบวนรถยนต์กำลังจอดอยู่ที่สี่แยกไฟแดง เมื่อไฟจราจรเปลี่ยนเป็นสีเขียว ซึ่งเป็นสัญญาณบอกให้เคลื่อนตัวออกไปได้ รถยนต์คันแรกในขบวนก็เริ่มเร่งเครื่องยนต์และเคลื่อนตัวออกไป รถยนต์คันที่ตามหลังคันแรกก็เคลื่อนตัวหลังจากที่เห็นรถยนต์คันแรกเคลื่อนตัวออกไป ซึ่งทำให้เกิดเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ส่งต่อความหน่วงไปจนถึงท้ายขบวน ขบวนรถยนต์นี่สามารถทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้โดยการทำให้รถยนต์ในทั้งขบวนเร่งเครื่องยนต์และเคลื่อนตัวออกไปพร้อมกัน ซึ่งวิธีนี้จะช่วยบรรเทาปัญหาการจราจรติดขัดได้ [3] เพราะระยะเวลาในการตอบสนองลดลงส่งผลให้รถยนต์แต่ละคันไม่ต้องเสียเวลารอให้เห็นรถยนต์คันหน้าเคลื่อนตัวก่อน นอกเหนือจากเรื่องของการจราจรติดขัดที่เป็นปัญหาแล้ว ยังมีเรื่องของอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นได้จากทั้งความประมาทหรือความเหนื่อยล้าของมนุษย์ การนำระบบอัตโนมัติเข้ามาช่วยแทนการขับขี่ยานพาหนะโดยมนุษย์จะสามารถลดปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นได้

การสร้างขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติเป็นหนึ่งในระบบอัตโนมัติที่ทำให้รถยนต์สามารถเคลื่อนตัวออกไปได้พร้อมกัน รถยนต์แต่ละคันนั้นจะสื่อสารระหว่างกันเพื่อประสานงานว่ารถยนต์แต่ละคันจะเริ่มเคลื่อนตัวหรือชะลอที่เวลาใด โดยไม่จำเป็นต้องรอดูปฏิกิริยาของรถยนต์คันหน้า ภายในขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติจะมีรถยนต์นำขบวนซึ่งอาจจะขับเคลื่อนโดยมนุษย์หรือขับเคลื่อนโดยระบบอัตโนมัติก็ได้ นอกจากนี้ขบวนยานพาหนะขบเคลื่อนอัตโนมัติเริ่มมีการทดสอบจริงในด้านการขนส่งแล้ว เพื่อเพิ่มการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพโดยการลดแรงต้านลม

ขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัตินั้นประกอบด้วยหลายส่วน เช่น ส่วนอุปกรณ์รับรู้สภาพแวดล้อม ส่วนการควบคุมยานพาหนะ และส่วนการสื่อสารระหว่างยานพาหนะ การสื่อสารนั้นเป็นหัวใจสำคัญของการทำขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ เพราะถ้าหากขาดการสื่อสารระหว่างยานพาหนะไป ก็จะไม่สามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างยานพาหนะแต่ละคันเพื่อประสานงานระหว่างกันได้ ข้อมูลที่แลกเปลี่ยนระหว่างยานพาหนะนั้นเป็นประโยชน์ต่อการตัดสินใจควบคุมยานพาหนะ เช่น ตำแหน่งของยานพาหนะ ความเร็วของยานพาหนะ ทิศทางการเคลื่อนตัวของยานพาหนะ และข้อมูลเร่งด่วนอื่น ๆ เช่น ข้อมูลอุบัติเหตุและสิ่งกีดขวาง ความถี่ของการแลกเปลี่ยน

ข้อมูลเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความแม่นยำของข้อมูล และระยะเวลาในการตัดสินใจ โดยมีเครือข่ายแอดฮอคสำหรับยานพาหนะ (Vehicular Ad Hoc Networks) บนเครือข่ายไร้สายมาตรฐาน (Wireless Network) IEEE 802.11p [4] เป็นเครื่องมือช่วยทำให้การสื่อสารระหว่างยานพาหนะเกิดขึ้นได้ เป้าหมายหลักของการส่งข้อมูลในขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติคือการทำให้ยานพาหนะทุกคันได้รับข้อมูลที่เป็นประโยชน์พร้อมกัน และสามารถตัดสินใจการกระทำต่าง ๆ ได้พร้อมกัน

คลื่นเครือข่ายไร้สายนั้นเป็นทรัพยากรที่มีอยู่จำกัด ไม่สามารถใช้งานได้พร้อมกันในเวลาเดียวกันได้ เนื่องจากจะส่งผลให้สัญญาณชนกัน จึงจำเป็นต้องมีวิธีในการจัดสรรและแบ่งการใช้งานหรือโพรโทคอล (Protocol) ในการควบคุมการเข้าถึงสื่อกลาง (MAC : Medium Access Control) โดยปกติแล้วในมาตรฐาน IEEE 802.11p นั้นจะใช้งานโพรโทคอลซีเอสเอ็มเอ/ซีเอ (CSMA/CA : Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) ในการควบคุมการเข้าถึงสื่อกลาง แต่มีงานวิจัยหลายงาน [5] [6] ที่แสดงให้เห็นแล้วว่าโพรโทคอลซีเอสเอ็มเอ/ซีเอนั้น มีปัญหาเรื่องการหน่วงเวลาของข้อมูลที่ไม่มีขอบเขต โดยเฉพาะในกรณีที่มีการใช้งานหนัก ซึ่งเป็นกรณีปกติสำหรับการทำขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติที่มีการสื่อสารถี่ ๆ ในพื้นที่แคบ จึงสามารถสรุปได้ว่าซีเอสเอ็มเอ/ซีเอนั้นไม่เหมาะสมกับการทำขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ

มีงานวิจัยหลายงานที่พยายามแก้ปัญหาที่มีในซีเอสเอ็มเอ/ซีเอสำหรับการทำขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ เช่นการใช้งานทีดีเอ็มเอ (TDMA : Time Division Multiple Access) แบบกึ่งรวมศูนย์ [7] และการใช้งานโทเค็นในการควบคุมการเข้าถึงสื่อกลาง [8] แต่การใช้งานระบบที่รวมศูนย์ทำให้มีความเสี่ยงเรื่องจุดเดียวของความล้มเหลว (Single point of failure) และไม่ได้คำนึงถึงเรื่องการเข้าออกขบวนยานพาหนะด้วย

เป้าหมายของการแก้ไขโพรโทคอลในการควบคุมการเข้าถึงสื่อกลาง คือการลดการชนของกลุ่มข้อมูล (Packet) และการใช้งานช่องสัญญาณให้เกิดความคุ้มค่ามากที่สุด ดังนั้นงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดสรรคลื่นเครือข่ายไร้สายบนเครือข่ายอุปกรณ์รับรู้ไร้สายจึงสามารถนำมาใช้งานกับการสื่อสารระหว่างขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติได้ หนึ่งในงานวิจัยเหล่านั้นคือการทำดีซิงโครไนเซชั่น (Desynchronization) เช่น โพรโทคอลดีซิงค์ (DESYNC) [9] และเพื่อที่จะนำแนวคิดการดีซิงโครไนเซชั่นมาใช้กับเครือข่ายยานพาหนะ โพรโทคอลวี-ดีซิงค์ (V-DESYNC) [10] ก็ได้ถูกเสนอขึ้นโดยพัฒนาต่อยอดจากโพรโทคอลดีซิงค์ ข้อได้เปรียบของโพรโทคอลนี้เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาคือโพรโทคอลวี-ดีซิงค์ เป็นอัลกอริทึม (Algorithm) ที่มีความกระจายตัวโดยสมบูรณ์แบบ โพรโทคอลนี้สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงจำนวนลูกข่าย (Client) ในระบบ และไม่จำเป็นจะต้องแก้ไขโพรโทคอลในชั้นการควบคุมในการเข้าถึงสื่อกลางปกติของ IEEE 802.11p ด้วย แต่ว่าตัวโพรโทคอลวี-ดีซิงค์ นั้นเป็น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เพียงแค่แนวคิดในเชิงทฤษฎีเท่านั้น ในการนำไปใช้งานจริงจะต้องมีการออกแบบกรอบงานและทดสอบประสิทธิภาพก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง

ด้วยเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งไปที่การเสนอกรอบงานการสื่อสารแบบดีซิงโครไนเซชั่นสำหรับการนำไปใช้งานบนขบวนยานยาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยเสนอองค์ประกอบต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับการใช้งานดีซิงโครไนเซชั่นบนขบวนยานยาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ และวัดประสิทธิภาพในการใช้งานกรอบงานดีซิงโครไนเซชั่นนี้

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อเสนอกรอบงานการสื่อสารแบบดีซิงโครไนเซชั่นในขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ และวัดประสิทธิภาพโดยใช้โปรแกรมจำลอง ns-3 [11] หรือ Plexe/OMNeT++ [12] วัดประสิทธิภาพโดยใช้เกณฑ์ที่กำหนด และหาขีดจำกัดของกรอบงานที่เสนอ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. การจำลองจะทำบนโปรแกรมจำลอง ns-3 หรือ Plexe/OMNeT++ และใช้ผลลัพธ์จากการจำลองบน ns-3 หรือ Plexe/OMNeT++
2. การจำลองจะพิจารณาเฉพาะการสื่อสารแบบยานพาหนะไปยานพาหนะบนมาตรฐานเครือข่ายไร้ข่าย 802.11p เท่านั้น
3. การทดสอบจะพิจารณาเฉพาะกรณีของการบรอดคาสต์ (broadcast) เท่านั้น ไม่คำนึงถึงการยูนิคาสต์ (unicast)
4. ในการจำลอง ลักษณะของยานพาหนะที่ใช้จะเป็นรถบรรทุกความยาวประมาณ 20 เมตร และมีความสามารถของเครื่องยนต์เท่ากันทุกคัน

1.4 คุณค่าทางวิชาการ

1. ได้นำเสนอส่วนประกอบที่จำเป็นสำหรับการใช้งานดีซิงโครไนเซชั่นบนขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ
2. ผลการทดลองที่ได้จะเป็นการพิสูจน์ว่าการดีซิงโครไนเซชั่นนั้นสามารถนำมาใช้ในขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยสามารถแก้ไขปัญหาเรื่องจุดเดียวของความบกพร่อง และการไม่รองรับจำนวนยานพาหนะที่เปลี่ยนไปของงานวิจัยก่อนหน้า
3. สามารถนำกรอบงานที่เสนอไปใช้งานบนอุปกรณ์จริงในภาคอุตสหกรรมได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารระหว่างขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ
2. ศึกษาการใช้งานโปรแกรมจำลองเครือข่ายโดยใช้ ns-3 และ Plexe/OMNeT++
   - 2.1. ศึกษาการสร้างสถานการณ์จำลองขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติภายในโปรแกรม
   - 2.2. ศึกษาการจำลองการสื่อสารในรูปแบบต่าง ๆ
3. ออกแบบกรอบงานสำหรับการสื่อสารระหว่างขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติโดยใช้การดีซิงโครไนเซชั่น
4. เริ่มต้นการทดลองเพื่อเก็บผลลัพธ์
   - 4.1. ทดลองและเก็บผลลัพธ์ของการสื่อสารแบบดีซิงโครไนเซชั่น
   - 4.2. ทดลองและเก็บผลลัพธ์ของการสื่อสารแบบอื่น ๆ เพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบ
5. สรุปผลและอภิปรายประสิทธิภาพของการใช้ดีซิงโครไนเซชั่นเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ

1.6 ผลงานตีพิมพ์จากวิทยานิพนธ์

บทความชื่อ "A study of vehicular desynchronization for platooning application" โดย Visatouch Deeying, Kiattikun Kawila, Kulit Na Nakorn และ Kultida Rojviboonchai ตีพิมพ์และนำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการชื่อ "2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT)" ซึ่งจัดขึ้น ณ เมืองเฉิงตู ประเทศจีน ระหว่างวันที่ 27 – 30 ตุลาคม 2560

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การควบคุมการเข้าถึงสื่อกลาง (MAC : Medium Access Control)

การควบคุมการเข้าถึงสื่อกลาง (MAC : Media Access Control) เป็นชั้นย่อยที่อยู่ในชั้นที่ 2 ของแบบจำลองโอเอสไอ (OSI model) หรือชั้นสื่อกลางการส่งข้อมูล (Data Link Layer) เป็นชั้นที่มีหน้าที่คอยควบคุมการใช้งานสื่อกลางในการรับส่งข้อมูล สายสัญญาณต่ออินเทอร์เน็ตหรือคลื่นความถี่ที่มีการใช้งานร่วมกันระหว่างลูกข่ายหลายเครื่องจะไม่สามารถส่งข้อมูลพร้อมกันหลายเครื่องได้ จึงจำเป็นต้องมีวิธีในการควบคุมการใช้งานสื่อกลางเหล่านั้น ในเครือข่ายไร้สายนั้นจะใช้วิธีซีเอสเอ็มเอ/ซีเอเป็นวิธีควบคุมการใช้งานสื่อกลาง โดยวิธีซีเอสเอ็มเอ/ซีเอมีหลักการทำงานคือโหนดที่จะส่งข้อมูลจะรอช่องสัญญาณว่างก่อน ถ้าช่องสัญญาณว่างก็จะเริ่มต้นส่งข้อมูล แต่ถ้าช่องสัญญาณไม่ว่างก็จะรอเป็นระยะเวลาสุ่มเวลาหนึ่ง แล้วจึงพยายามส่งข้อมูลอีกครั้ง

2.1.2 เครือข่ายแอดฮอกสำหรับยานพาหนะ

เครือข่ายแอดฮอกสำหรับยานพาหนะ (VANET : Vehicular Ad hoc Network) เป็นรูปแบบหนึ่งของเครือข่ายแอดฮอกสำหรับอุปกรณ์เคลื่อนที่ (MANET : Mobile Ad hoc Network) มีจุดประสงค์เพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างยานพาหนะหรือโครงสร้างพื้นฐาน เนื่องจากว่ายานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ทำให้การเชื่อมต่อเครือข่ายสำหรับยานพาหนะนั้นมีความไม่ต่อเนื่อง กล่าวคือมีการเชื่อมต่อและการตัดขาดการเชื่อมต่ออยู่ตลอดเวลา ซึ่งจุดนี้ถือเป็นความท้าทายสำหรับเครือข่ายแอดฮอกสำหรับยานพาหนะ นอกจากนี้รูปแบบการเชื่อมต่อของเครือข่ายแอดฮอกสำหรับยานพาหนะนั้นยังถูกจำกัดด้วยรูปร่างของถนนอีกด้วย ตัวอย่างการใช้งานของเครือข่ายแอดฮอกสำหรับยานพาหนะได้แก่

- การแจ้งเตือนสภาพการจราจร ยานพาหนะแต่ละคันจะสามารถเก็บข้อมูลการจราจร หรืออุบัติเหตุ และส่งต่อข้อมูลเหล่านั้นให้ยานพาหนะอื่นที่สัญจรผ่านมา
- ขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ ยานพาหนะแต่ละคันจะแลกเปลี่ยนข้อมูลตำแหน่งและความเร็ว เพื่อที่จะสามารถสร้างเป็นขบวนยานพาหนะ
- การแนะนำการเดินทาง ผู้ที่ใช้งานสามารถได้รับคำแนะนำเกี่ยวกับเส้นทางที่ดีที่สุด หรือสถานที่สำคัญ เช่น สถานีบริการน้ำมัน และร้านสะดวกซื้อได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.3 มาตรฐานการสื่อสาร IEEE 802.11p

มาตรฐานการสื่อสาร IEEE 802.11p เป็นมาตรฐานการสื่อสารไร้สายแบบหนึ่ง ซึ่งออกแบบมาสำหรับยานพาหนะโดยเฉพาะ มาตรฐานนี้ทำงานบนความถี่ 5.9 กิกะเฮิร์ตซ์ (GHz) มีความกว้างของช่องสัญญาณช่องละ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) มีแบนด์วิดท์ 3 ถึง 27 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) มีระยะการสื่อสารสูงสุดถึง 1,000 เมตร

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเกี่ยวกับการสื่อสารสำหรับยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัตินั้น ส่วนมากจะเสนอการแก้ไขโพรโทคอลในชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อกลาง

มีงานวิจัย [8] ที่เสนอให้ใช้โทเค็น (Token) สำหรับโพรโทคอลในชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อกลางในงานวิจัยนี้จะใช้การส่งโทเค็น เพื่อกำหนดโหนดที่จะส่งข้อมูลถัดไป โหนดที่ถือโทเค็นจะมีสิทธิ์ขาดในการกระจายสัญญาณในช่องสัญญาณนั้น ซึ่งแต่ละโหนดจะมีรายการของโหนดข้างเคียงพร้อมทั้งเวลาที่ได้รับข้อมูลล่าสุดที่ได้รับมาจากโหนดข้างเขียงทั้งหมด โดยโหนดที่ถือโทเค็นจะทำหน้าที่กระจายข้อมูลให้กับโหนดรอบ ๆ และส่งต่อโทเค็นให้กับโหนดที่มีข้อมูลเก่าที่สุดจากข้อมูลเวลาที่ได้รับข้อมูล ระบบจะมีโหนดหนึ่งโหนดที่ทำหน้าที่จัดการโทเค็น ในกรณีที่โทเค็นสูญหาย ไม่ได้รับข้อมูลจากโหนดที่ควรจะส่งโทเค็นถัดไป หรือในกรณีที่มียานพาหนะคันใหม่เข้ามาในระบบ ข้อดีของงานวิจัยนี้คือมีความหน่วงเวลาต่ำ แต่ก็มีข้อจำกัดเรื่องที่ต้องแก้ไขชั้นการควบคุมการเข้าถึงสื่อกลางและมีความเสี่ยงเรื่องจุดเดียวของความล้มเหลว ซึ่งก็คือโหนดที่ไว้จัดการโทเค็น

การใช้ทีดีเอ็มเอสามารถหลีกเลี่ยงเรื่องการถูกหน่วงเวลาแบบสุ่มได้ แต่ก็มีข้อจำกัดเรื่องของช่องเวลาที่ไม่ยืดหยุ่น และจำเป็นจะต้องมีการตกลงกันก่อนล่วงหน้า อัลกอริทึมที่ช่วยแก้ไขข้อจำกัดข้างต้นได้ถูกเสนอใน [7] ซึ่งเสนอให้ใช้โหนดหนึ่งโหนดเป็นผู้นำเพื่อประกาศข้อมูลช่องเวลา แต่ก็ยังไม่สามารถแก้ไขปัญหาจุดเดียวของความล้มเหลวได้

บทที่ 3
แนวคิดและหลักการในงานวิจัย

3.1 อัลกอริทึมการดีซิงโครไนเซชั่น

กระบวนการดีซิงโครไนเซชั่นเป็นกระบวนการแบบแบ่งเวลาใช้งาน โดยมีหลักการคือนำเวลาในการส่งข้อมูลของโหนดอื่น ๆ มาปรับเวลาในการส่งข้อมูลของเรา การทำดีซิงโครไนเซชั่นสามารถแก้ไขข้อจำกัดของระบบแบบทีดีเอ็มเอในงานวิจัยก่อนหน้าได้ เพราะสามารถปรับช่องเวลาด้วยตัวเองได้โดยไม่จำเป็นต้องให้โหนดใดโหนดหนึ่งเป็นผู้จัดการ

การปรับเวลานั้น โหนด ๆ หนึ่งจะปรับเวลาที่จะใช้ส่งข้อมูลในรอบถัดไปโดยใช้เวลาที่ได้รับข้อมูลจากโหนดก่อนและหลังส่งข้อมูล โดยในแต่ละรอบการส่ง โหนดแต่ละโหนดจะพยายามส่งข้อมูลในรอบการส่งถัดไปให้มีเวลาการส่งข้อมูลอยู่กึ่งกลางระหว่างโหนดที่ส่งข้อมูลไปก่อนหน้ากับโหนดที่ส่งข้อมูลภายหลังในรอบการส่งปัจจุบัน ตามสมการ (1) ดังนี้

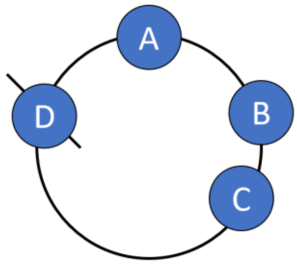
$$\phi_i' = \frac{1}{2}\left(\phi_{\mathrm{i+1}}^k + \phi_{\mathrm{i-1}}^k\right) + \delta \qquad (1)$$

ซึ่ง ϕ_i' แทนเวลาเป้าหมายของการส่งข้อมูลในรอบถัดไปและ ϕ_{i-1}^k กับ ϕ_{i+1}^k แทนเวลาการส่งข้อมูลของโหนดที่ส่งข้อมูลก่อนและหลังในรอบปัจจุบันตามลำดับ δ แทนค่าสุ่มที่ทำให้เวลาเป้าหมายเบี่ยงเบนไปจากเดิม การเพิ่มค่าสุ่มเบี่ยงเบนนี้จะช่วยลดโอกาสที่จะเกิดโหนดสองโหนดส่งข้อมูลพร้อมกันตลอดเวลา แต่ทว่าแต่ละโหนดจะไม่ปรับเวลาการส่งข้อมูลตาม ϕ_i' อย่างทันที แต่จะปรับเวลาการส่งข้อมูลของแต่ละโหนดอย่างค่อยเป็นค่อยไปตามสมการ (2) ดังนี้

$$\phi_i^{k+1} = (1-\alpha)\phi_i^k + \alpha\phi_i' \qquad (2)$$

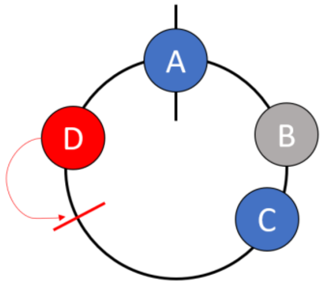
ซึ่ง ϕ_i^{k+1} แทนเวลาในการส่งข้อมูลในรอบถัดไปจริง ๆ α แทนอัตราเร็วในการปรับ ϕ_i^k แทนเวลาการส่งข้อมูลในรอบปัจจุบัน และ ϕ_i' แทนเวลาเป้าหมายในการส่งข้อมูลที่ได้จากสมการข้างต้น อัตราเร็วในการปรับ (α) และช่วงของค่าสุ่ม (δ) จะเป็นค่าที่สามารถปรับได้เองตามความเหมาะสมในการใช้งาน การทำงานของดีซิงค์สามารถแสดงเป็นวงกลมที่แทนรอบการส่งดังในภาพที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 1 วงกลมแทนรอบการส่งในช่วงเริ่มต้น

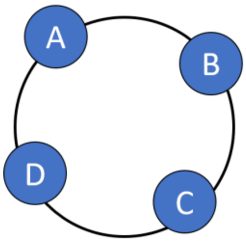
ซึ่งวงกลมแต่ละวงบนวงแหวนจะแทนเวลาการส่งของแต่ละโหนดในรอบนั้น ๆ โดยส่วนของเส้นตรงที่ตัดเส้นวงแหวนจะหมายถึงเฟสเวลาปัจจุบัน ซึ่งถ้าตรงกับวงกลมของโหนด จะหมายถึงเวลาที่โหนดนั้นควรส่งข้อมูล ทุกครั้งที่มีการส่งข้อมูลแต่ละโหนดก็จะปรับเวลาในการส่งให้เข้าใกล้สมดุลมากขึ้นดังในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ตัวอย่างการปรับเวลาการส่งของโหนดหนึ่งโหนด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อทำการส่งไปเรื่อย ๆ สุดท้ายแล้วแต่ละโหนดจะเข้าสู่สมดุลดังภาพที่ 3 ซึ่งแต่ละโหนดสามารถจัดสรรเวลาในการส่งข้อมูลกันเองได้โดยไม่ต้องมีโหนดกลางมาจัดการ



ภาพที่ 3 การแบ่งรอบการส่งที่สมดุล

ข้อดีของการดีซิงโครไนเซชั่น คือ เป็นโพรโทคอลที่มีการกระจายตัวโดยสมบูรณ์ ไม่มีจุดเดียวของความล้มเหลว และสามารถใช้ร่วมกับโพรโทคอลซีเอสเอ็มเอ/ซีเอที่มาตรฐาน IEEE 802.11p รองรับอยู่แล้วได้

กระบวนการของการทำดีซิงโครไนเซชั่นที่ใช้งานนั้นสามารถอธิบายได้ตามอัลกอริทึมที่ 1 กล่าวคือเมื่อถึงเวลาส่งข้อมูลของโหนดนั้นแล้ว โหนดจะบันทึกเวลาที่ได้รับข้อมูลของโหนดอื่นก่อนหน้าที่โหนดได้ส่งข้อมูล โดยบันทึกไว้เป็นโหนดก่อนหน้า เพื่อนำไปใช้คำนวณเวลาในการส่งของรอบถัดไป และเมื่อโหนดได้รับข้อมูลหลังจากที่ตนเองได้ส่งข้อมูลแล้ว โหนดก็จะบันทึกเวลาที่ได้รับข้อมูลโดยบันทึกไว้เป็นโหนดถัดไป แล้วก็คำนวณเวลาที่ควรจะส่งข้อมูลในรอบถัดไปสอดคล้องตามสมการ (1) และ (2)

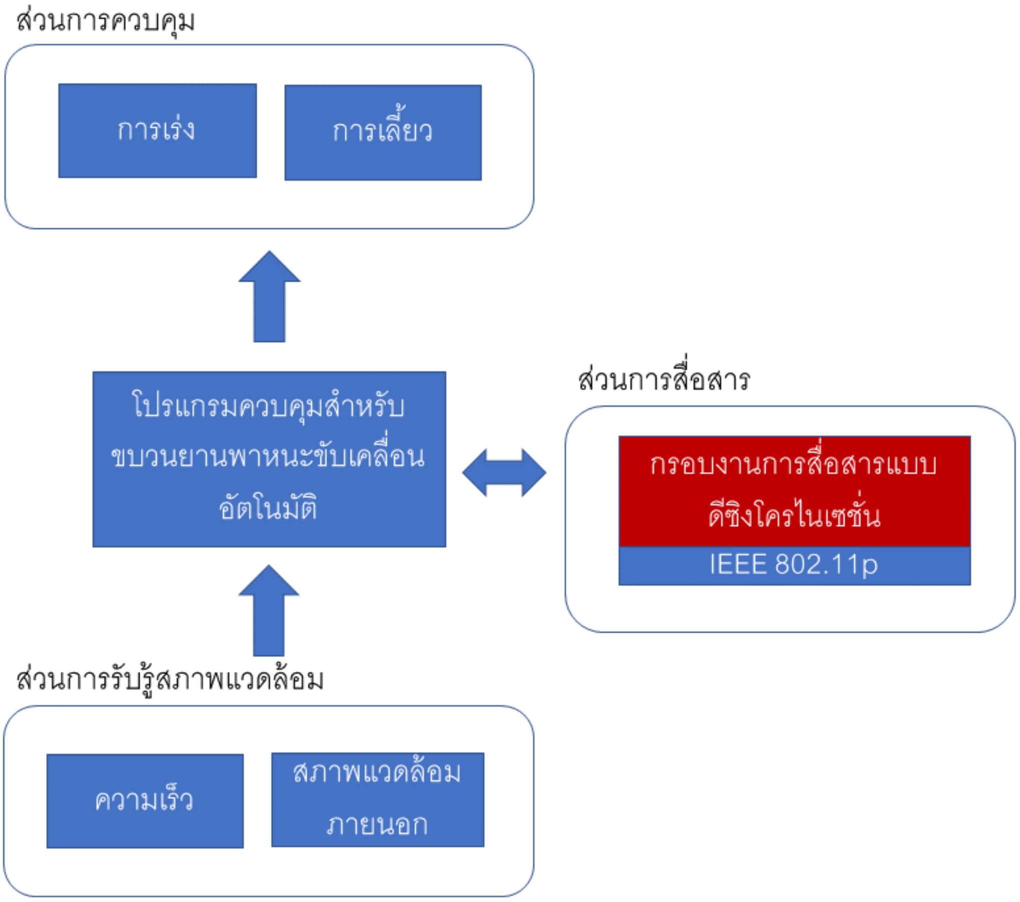
อัลกอริทึมที่ 1 รหัสเทียมสำหรับการทำงานของดีซิงโครไนเซชั่น

```
def send_beacon():
    prevnode_recv_time = recent_recv_time
    my_firing_time = get_current_time()
    i_just_fired = True
    actually_send_beacon()

def on_beacon_received():
    recent_recv_time = get_current_time()
    if i_just_fired is True:
        nextnode_recv_time = recent_recv_time
        offset_percent = random(-random_offset_boundary,
                                random_offset_boundary)
        offset_time = (nextnode_recv_time - prevnode_recv_time) *
                      offset_percent
        next_recv = get_current_time()
        next_firing_time = beaconing_interval +
                           my_firing_time * (1.0 - rate_of_adjustment) +
                           ((prevnode_recv_time + nextnode_recv_time) / 2 +
                           offset_time) * rate_of_adjustment
        i_just_fired = False
        schedule(send_beacon, next_firing_time)
```

3.2 กรอบงานสำหรับขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ

โดยภาพรวมแล้วภายในยานพาหนะหนึ่งคัน ระบบสำหรับขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติจะเป็นไปตามแผนภาพในภาพที่ 4



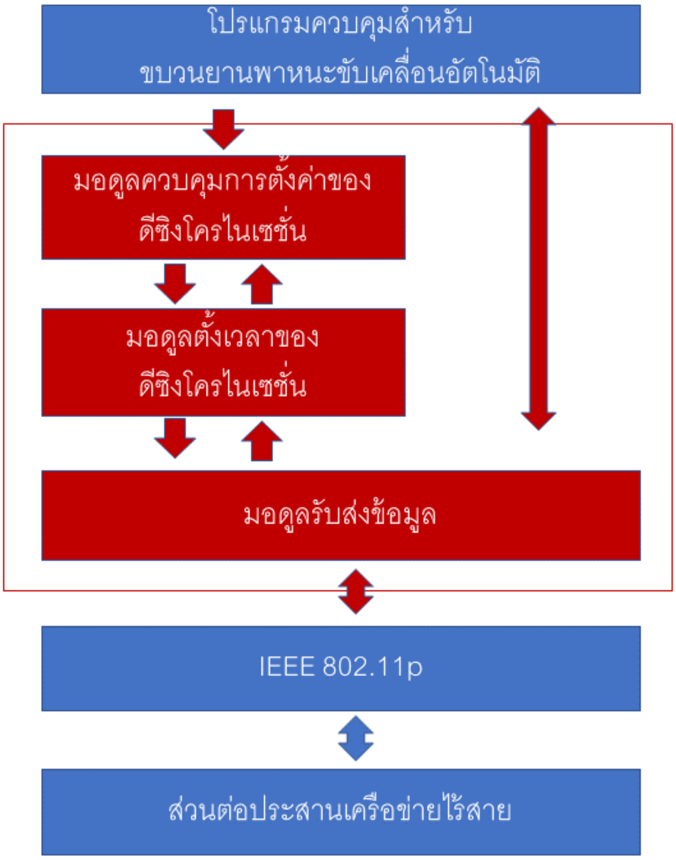
ภาพที่ 4 ภาพรวมทั้งหมดของระบบสำหรับยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ

ซึ่งระบบทั้งหมดจะประกอบด้วย 4 ส่วนคือ

- ส่วนการควบคุม เป็นส่วนที่ใช้ติดต่อกับฮาร์ดแวร์ที่ใช้ขับเคลื่อนภายในยานพาหนะ เช่น การเร่ง การเลี้ยว
- ส่วนการรับรู้สภาพแวดล้อม เป็นส่วนที่ใช้ติดต่อกับฮาร์ดแวร์ที่รับรู้สภาพแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ความเร็วปัจจุบัน สภาพแวดล้อมภายนอก
- ส่วนการสื่อสาร ซึ่งส่วนนี้จะเป็นส่วนที่มีกรอบงานการสื่อสารแบบดีซิงโครไนเซชั่นไปเสริม
- ส่วนโปรแกรมควบคุมสำหรับขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ เป็นแกนกลางคอยตัดสินใจการกระทำต่าง ๆ อัลกอริทึมสำหรับการทำขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติจะอยู่ส่วนนี้

ในการทำงานโดยรวมนั้นส่วนการรับรู้สภาพแวดล้อมจะต้องคอยส่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น ความเร็วของยานพาหนะปัจจุบัน หรือสิ่งกีดขวางต่าง ๆ เข้าสู่ส่วนโปรแกรมควบคุมสำหรับขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งจะต้องทำการตัดสินใจควบคุมยานพาหนะจากข้อมูลที่ได้รับ ทั้งจากส่วนการรับรู้สภาพแวดล้อม และข้อมูลที่ได้รับจากยานพาหนะคันอื่นซึ่งได้จากส่วนการสื่อสาร ส่วนโปรแกรมควบคุมสำหรับขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติจะต้องส่งสัญญาณควบคุมไปยังส่วนการควบคุมเพื่อควบคุมยานพาหนะ นอกจากนี้ส่วนโปรแกรมควบคุมจะต้องคอยส่งข้อมูลของตัวเองผ่านส่วนการสื่อสารไปให้ยานพาหนะคันอื่นด้วย ซึ่งกรอบงานของเราจะอยู่ในส่วนการสื่อสาร ส่วนประกอบภายในกรอบงานจะเป็นไปตามภาพที่ 5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 5 ส่วนประกอบของกรอบงานการสื่อสารแบบดีซิงโครไนเซชั่น

ภายในกรอบงานจะประกอบไปด้วยมอดูลต่าง ๆ ดังนี้

- มอดูลควบคุมการตั้งค่าของดีซิงโครไนเซชั่น เป็นมอดูลที่รับการตั้งค่าจากโปรแกรมควบคุม และส่งต่อการตั้งค่าให้มอดูลตั้งเวลาของดีซิงโครไนเซชั่น
- มอดูลตั้งเวลาของดีซิงโครไนเซชั่น เป็นมอดูลที่คำนวณเวลาในการส่งข้อมูลจากการตั้งค่าที่ได้รับและข้อมูลที่ส่งจากภายนอก แล้วกำกับมอดูลรับส่งข้อมูลให้ส่งข้อมูลตามเวลาที่กำหนด
- มอดูลรับส่งข้อมูล เป็นมอดูลที่รับข้อมูลจากโปรแกรมควบคุม และส่งออกข้อมูลตามเวลาที่ตั้งไว้ตามอัลกอริทึมการดีซิงโครไนเซชั่น และคอยส่งต่อข้อมูลที่ได้รับจะภายนอกกลับไปยังโปรแกรมควบคุม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
การวัดประเมินและผลการทดลอง

4.1 การวัดประเมินผล

การวัดผลจะทำโดยการจำลองการดีซิงโครไนเซชั่นบนโปรแกรมจำลอง ns-3 [11] และ Plexe/OMNeT++ [12] โดยจะสร้างโปรแกรมสำหรับการจำลองการดีซิงโครไนเซชั่น ซึ่งโปรแกรมนี้จะสร้างบันทึกการส่งข้อมูล และเริ่มวัดประสิทธิภาพสำหรับการตั้งค่าต่าง ๆ การตั้งค่าที่ใช้งานในการจำลองจะมีขอบเขตเป็นไปตามตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 การตั้งค่าการจำลองระบบเครือข่าย

การตั้งค่า	ค่าที่ใช้งาน
จำนวนยานพาหนะ	5 – 20 คัน
ระยะเวลาในการจำลอง	20 วินาที
ระยะการส่งข้อมูล	500 เมตร
ความถี่ในการส่งข้อมูล	100 ข้อความต่อวินาที
ระยะห่างระหว่างเสาอากาศของยานพาหนะ	30 เมตร
ความรวดเร็วในการปรับเวลา	10 – 90 % จากเวลาปัจจุบันไปยังเวลาเป้าหมาย
ขอบเขตของค่าสุ่มเบี่ยงเบน	0 – 50 % ของระยะเวลาระหว่างเวลาส่งข้อมูลของโหนดก่อนหน้าและโหนดหลัง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ผลการทดลองจากการจำลองดีซิงโครไนเซชั่นจะถูกนำไปประเมินผลด้วยเกณฑ์เหล่านี้

1. เวลาการส่งข้อมูลสัมพัทธ์ คือเวลาการส่งข้อมูลของโหนด ๆ หนึ่งในแต่ละรอบ เมื่อเทียบกับโหนดที่กำหนดไว้หนึ่งโหนด ซึ่งจากข้อมูลเหล่านี้ ทำให้เราสามารถวัดการเข้าสู่จุดสมดุลได้ โดยวัดระยะเวลาในการส่งข้อมูลของโหนดสองโหนดที่ทำการส่งข้อมูลติดกัน
2. จำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุล คือจำนวนรอบการส่งข้อมูลที่ผ่านไปจนกว่าระบบจะเข้าสู่สมดุล ซึ่งการที่ระบบจะเข้าสู่สมดุลนั้น เวลาการส่งข้อมูลสัมพัทธ์จะต้องแบ่งกันลงตัวตามความถี่ในการส่งข้อมูลและจำนวนยานพาหนะ เช่นถ้าหากในระบบมีรถ 10 คัน และแต่ละคันส่งข้อมูล 100 ข้อความต่อวินาที เวลาการส่งข้อมูลสัมพัทธ์ระหว่างแต่ละโหนดจะต้องอยู่ประมาณ

1 มิลลิวินาที เมื่อทุกโหนดส่งข้อมูลครบ 1 รอบก็จะใช้เวลา 10 มิลลิวินาที ซึ่งเท่ากับคาบของการส่งข้อความหนึ่งรอบพอดี จำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลจะนิยามโดยสมการ (3) จากงานวิจัย [13] ดังนี้

$$\forall k \geq k_{converge} : \left|\phi_i^k - \phi_{i-1}^k - \frac{1}{n}\right| \leq b_{thes} \quad (3)$$

ให้ $k_{converge}$ คือจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุล n คือจำนวนยานพาหนะ และ b_{thes} คือค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้ สมการนี้คือการนิยามว่าทุก ๆ รอบหลังจากรอบที่ $k_{converge}$ เวลาการส่งข้อมูลสัมพัทธ์จะต้องมีค่าตรงตามที่พึงประสงค์โดยมีข้อผิดพลาดไม่เกิน b_{thes}

3. จำนวนยานพาหนะที่สามารถรองรับได้ เนื่องจากว่าการดีซิงโครไนเซชั่นเป็นการทำงานแบบแบ่งช่วงเวลา ถ้าหากว่ามีจำนวนยานพาหนะมากหรือมีความถี่ในการส่งข้อมูลมาก ช่วงเวลาที่ถูกแบ่งก็จะน้อยมากจนไม่สามารถทำงานได้ จึงต้องวัดจำนวนยานพาหนะที่สามารถรองรับได้เพื่อประเมินขีดจำกัดของกรอบงานนี้
4. ระยะเวลาการส่งข้อมูลจากต้นทางไปปลายทาง สามารถบ่งบอกถึงอายุของข้อมูลจากต้นทางซึ่งถ้าหากการส่งนั้นใช้ระยะเวลาสั้นก็จะทำให้ข้อมูลที่ยานพาหนะแต่ละคันได้รับนั้นมีความทันสมัยมากกว่า ส่งผลให้การตัดสินใจต่าง ๆ ของยานพาหนะดีกว่าและรวดเร็วกว่า
5. ระยะเวลาห่างระหว่างการได้รับกลุ่มข้อมูลสองครั้ง (Inter-reception time) ถ้าหากว่าค่าระยะเวลาห่างต่ำ แสดงว่าข้อมูลที่ได้รับมานั้นมีความสดใหม่ตลอดและมีการปรับปรุงบ่อย ค่านี่จะสามารถบ่งบอกได้ถึงความสดใหม่ของข้อมูลที่ยานพาหนะแต่ละคันได้รับ ซึ่งถ้าหากข้อมูลมีความสดใหม่มากกว่าก็จะส่งผลให้การตัดสินใจต่าง ๆ ของยานพาหนะนั้นดีขึ้น
6. จำนวนยานพาหนะที่กำลังส่งข้อมูลอยู่ ณ ขณะนั้น เพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าระบบเมื่อมียานพาหนะคันใดคันหนึ่งหยุดทำงานไปแล้ว ระบบจะยังสามารถกลับมาทำงานต่อได้หรือไม่เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่าระบบนั้นไม่ได้มีจุดเดียวของความล้มเหลว

การทดลองจะแบ่งเป็นสองส่วนใหญ่ ๆ ดังนี้

1. การหาการตั้งค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานดีซิงโครไนเซชั่นกับขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ
2. การเปรียบเทียบดีซิงโครไนเซชั่นกับระบบอื่นโดยใช้การตั้งค่าที่เหมาะสม ซึ่งมีสถานการณ์ที่ใช้ทดสอบอยู่สามสถานการณ์ได้แก่
   2.1. สถานการณ์ที่จำนวนยานพาหนะคงที่
   2.2. สถานการณ์ที่มีการเข้าและออกของยานพาหนะ
   2.3. สถานการณ์ที่มียานพาหนะหยุดทำงานหนึ่งคัน

4.2 ผลการทดลอง

4.2.1 การหาการตั้งค่าที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานดีซิงโครไนเซชั่นกับขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ

ในการทดลองนี้เราใช้จำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลเป็นเกณฑ์ จะเห็นว่าจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับการตั้งค่าต่าง ๆ จะเป็นไปตามภาพที่ 6 - 19 ซึ่งจะแสดงเป็นเฉดสีแดงเข้ม เมื่อความเข้มของสี แสดงถึงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าสู่สมดุลมาก หรืออาจจะไม่สามารถลู่เข้าสู่สมดุลได้ ถ้าหากว่าเป็นสีอ่อนจะใช้จำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าสู่สมดุลน้อย การตั้งค่าที่เหมาะสมที่สุดคือการตั้งค่าที่ให้ผลของจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าสู่สมดุลน้อย (กล่าวคือจากในภาพจะเป็นโซนสีอ่อน) จากภาพที่ 6 - 19 จะเห็นว่าการตั้งค่าที่เหมาะสมจะมีได้หลายการตั้งค่า แต่ช่วงที่เป็นการตั้งค่าที่เหมาะสมจะค่อย ๆ ลดลงตามจำนวนยานพาหนะที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจากการทดลองนั้นช่วงการตั้งค่าที่เหมาะสมจะสามารถสร้างเป็นอสมการได้ดังนี้

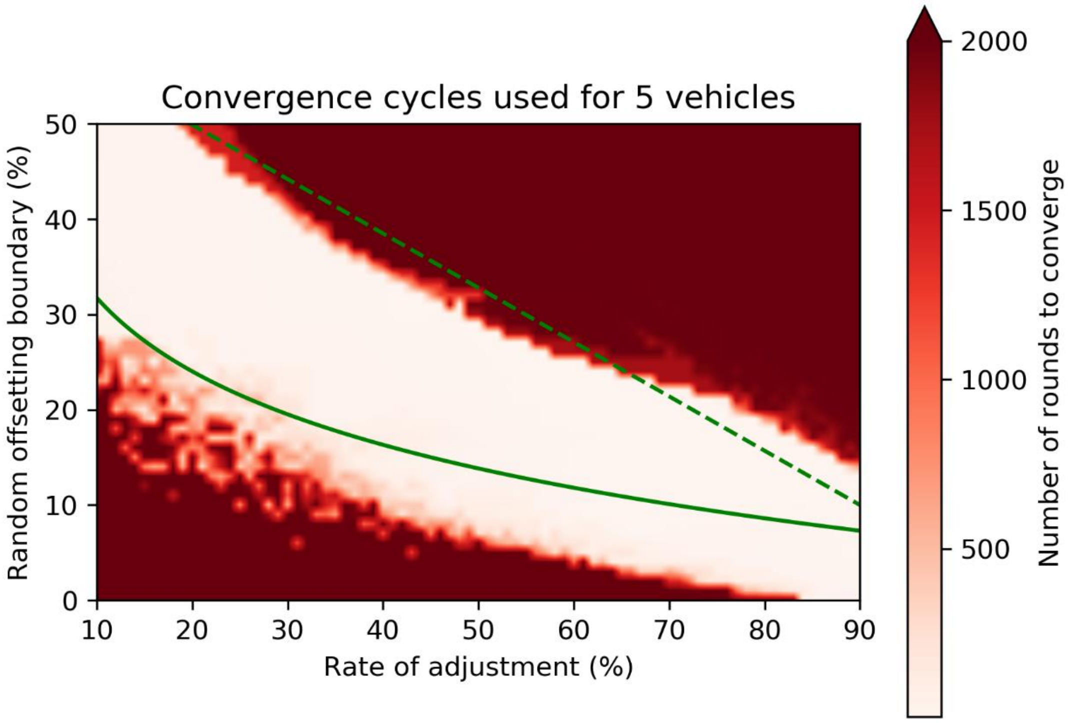
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\begin{aligned}\beta > (0.36n^2 - 8.88n + 24.28)\ln(\alpha) \\ -1.43n^2 + 36.23n - 88.07\end{aligned} \tag{4}$$

$$\beta < (0.02n - 0.67)\alpha - 1.76n + 70.09 \tag{5}$$

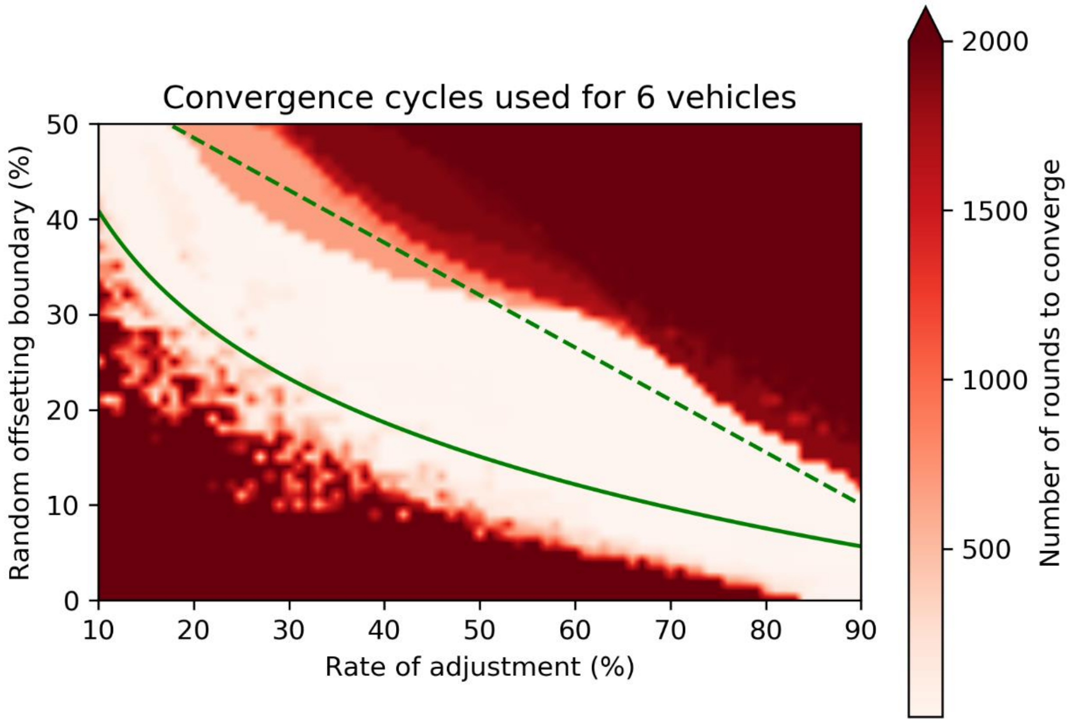
เมื่อ n แทนจำนวนยานพาหนะ α แทนความรวดเร็วในการปรับเวลา และ β แทนขอบเขตของค่าสุ่มเบี่ยงเบนสูงสุด ซึ่งสมการของทั้งเส้นขอบบนและเส้นขอบล่างได้ถูกวาดทับลงไปในรูปแล้ว โดยเส้นขอบล่างจะเป็นเส้นสีเขียวทึบและเส้นขอบบนจะเป็นเส้นประสีเขียว

ขั้นตอนการสร้างอสมการดังกล่าวเริ่มจากการประมาณจากผลการทดลองว่าสมการขอบเขตนั้นควรจะเป็นกราฟประเภทใดเช่น กราฟเส้นตรง (linear graph) หรือกราฟลอการิทึม (logarithmic graph) หลังจากนั้นจะใช้การปรับเส้นโค้ง (curve fitting) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนยานพาหนะกับสัมประสิทธิ์ของกราฟสำหรับสมการขอบเขต

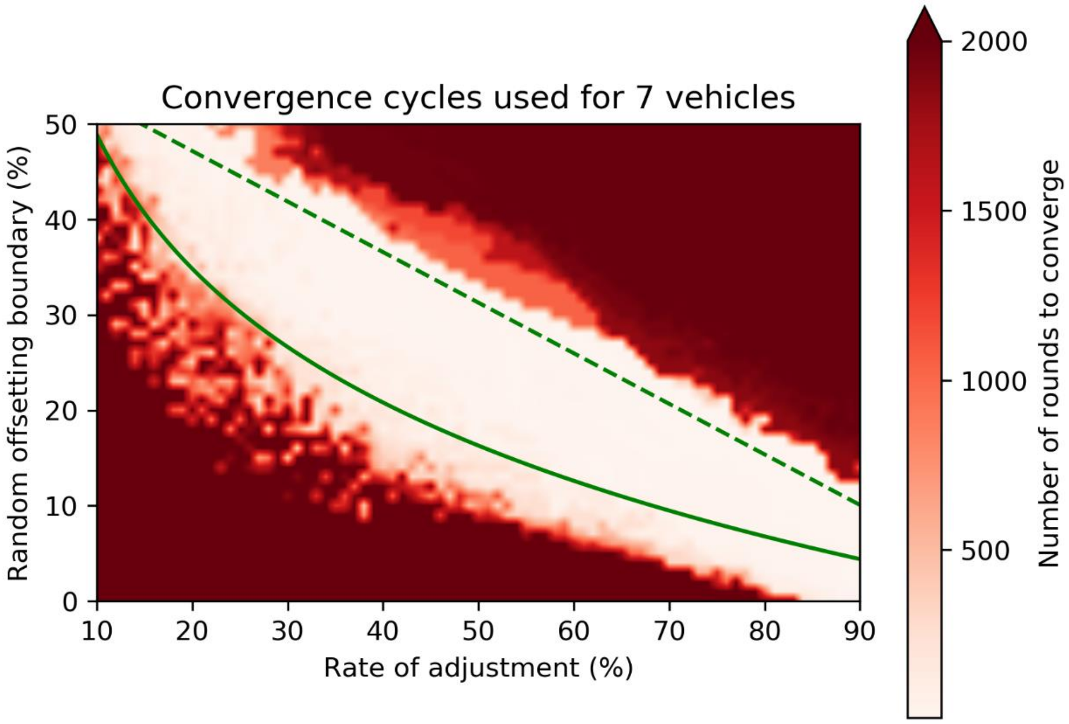


ภาพที่ 6 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 5 คัน

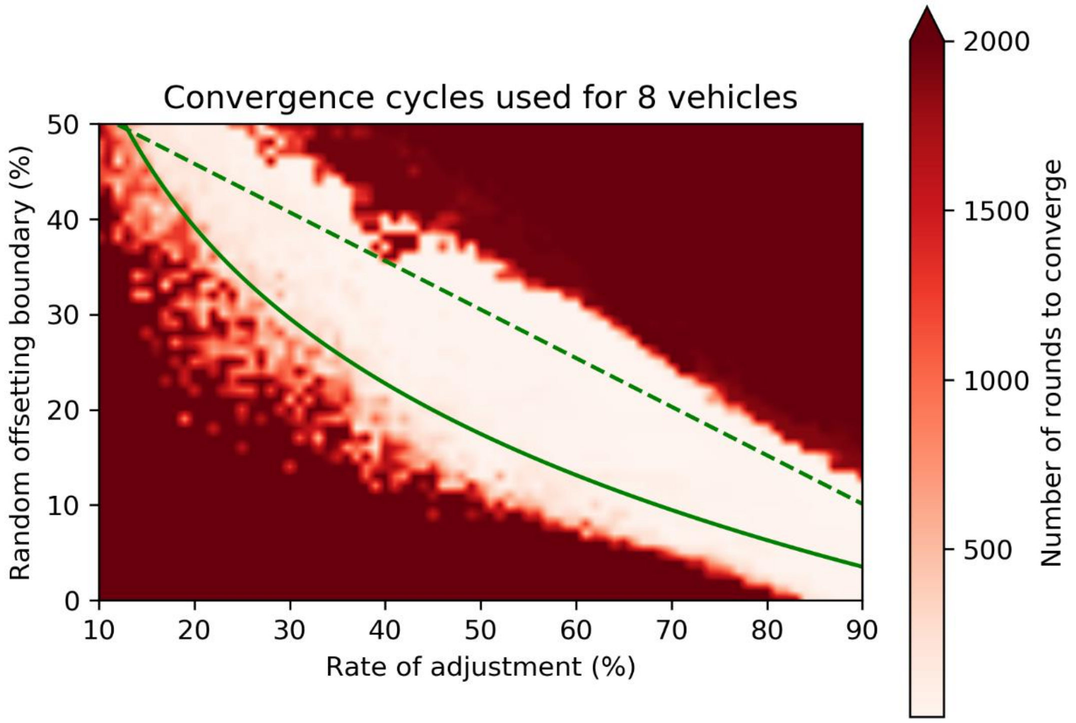
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



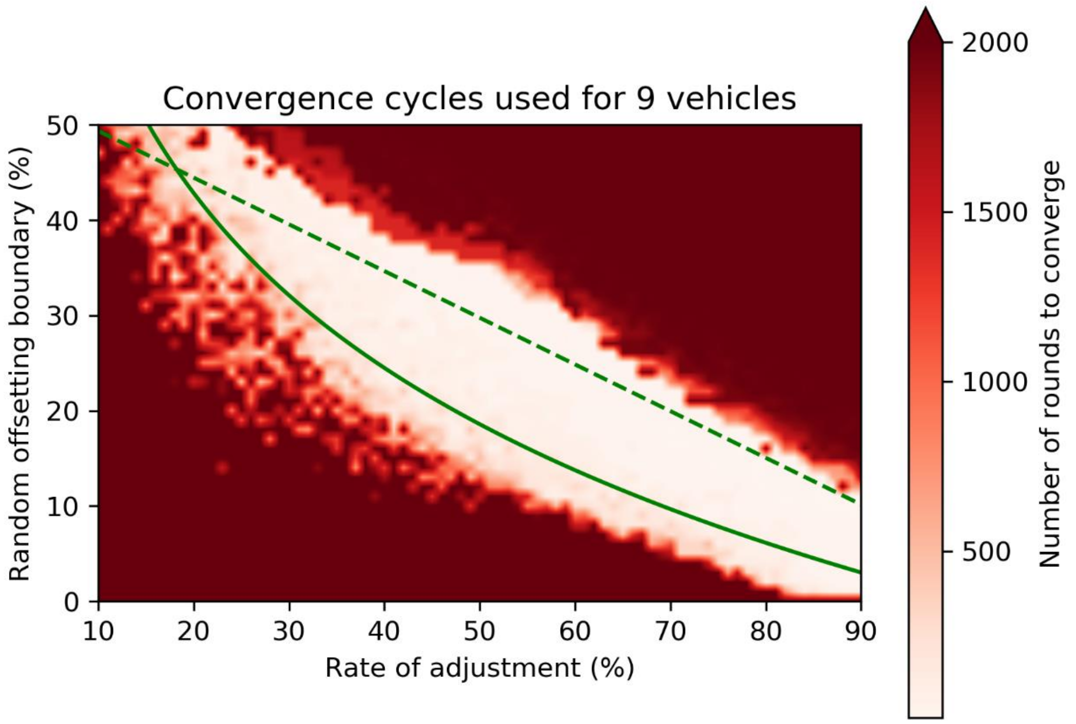
ภาพที่ 7 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 6 คัน



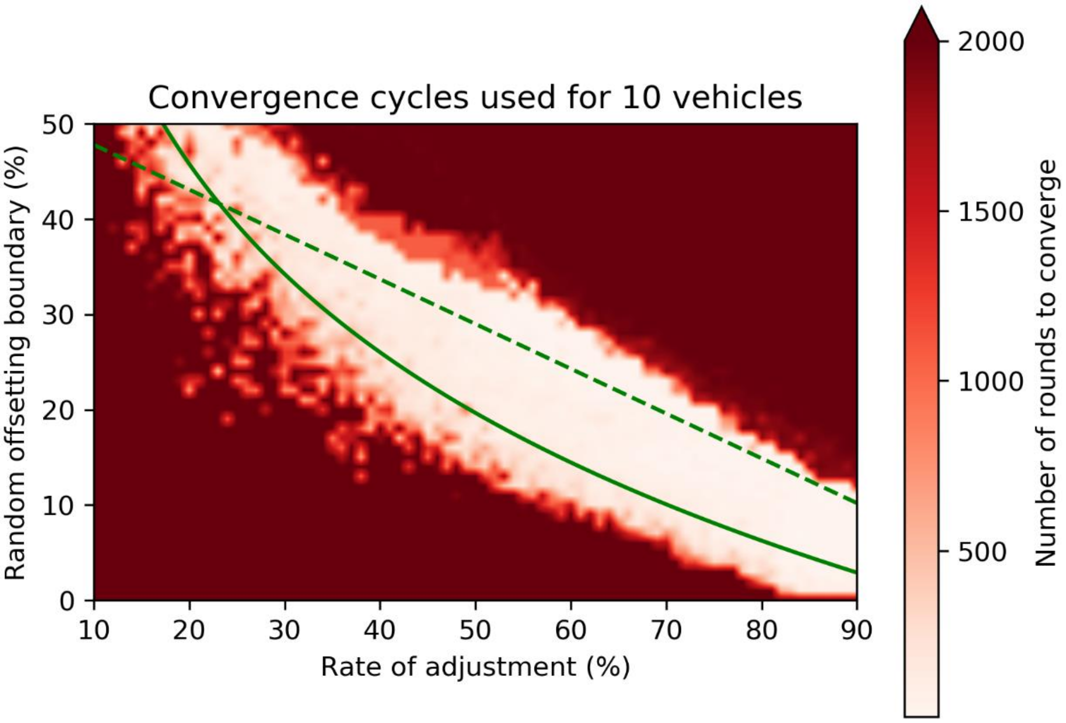
ภาพที่ 8 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 7 คัน



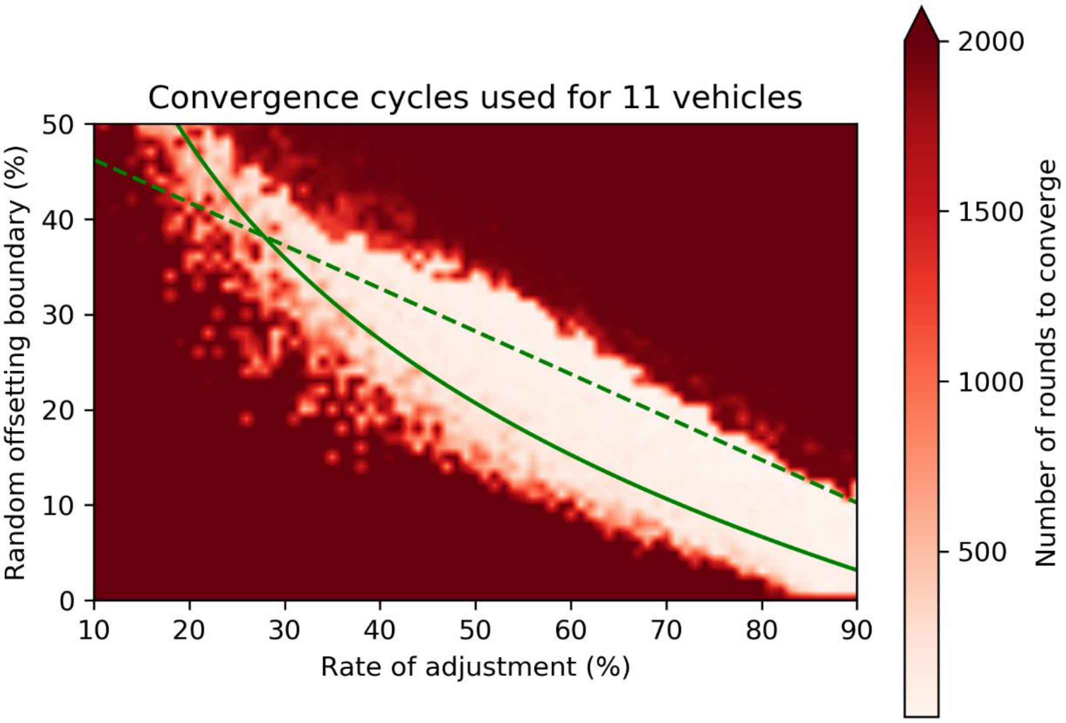
ภาพที่ 9 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 8 คัน



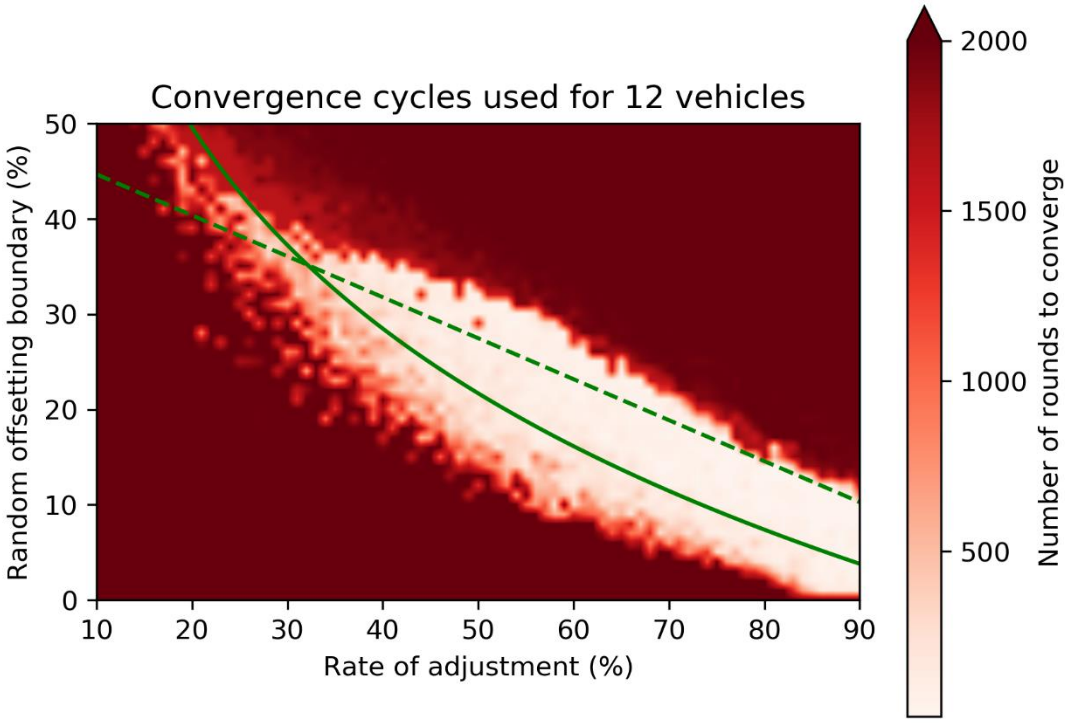
ภาพที่ 10 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 9 คัน



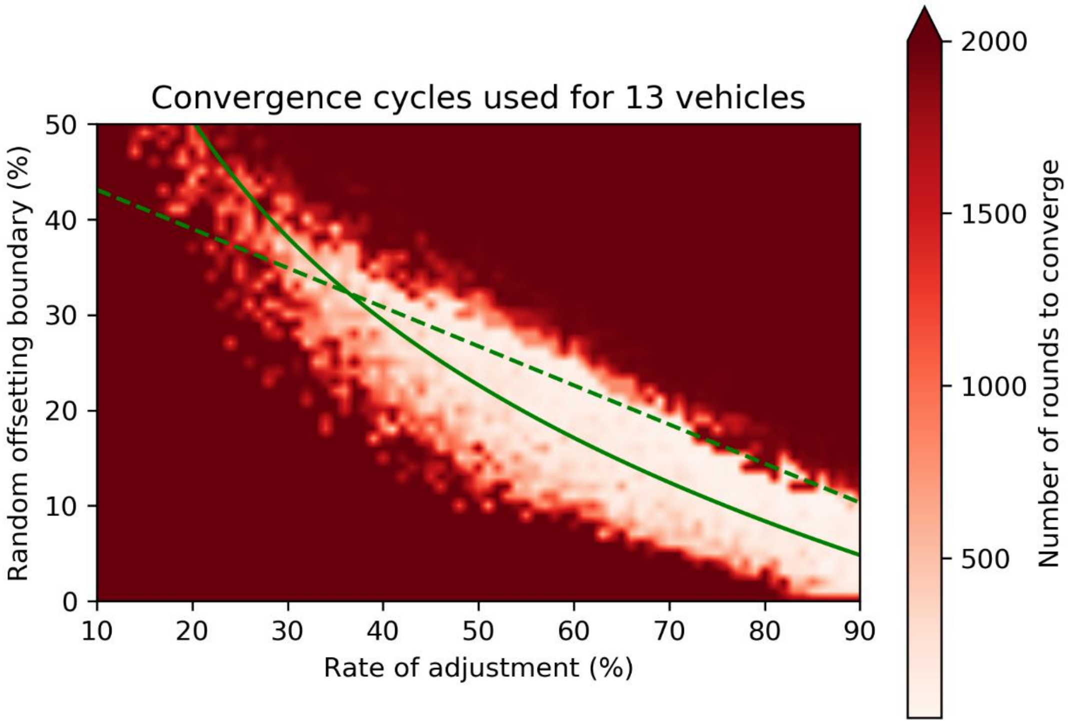
ภาพที่ 11 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 10 คัน



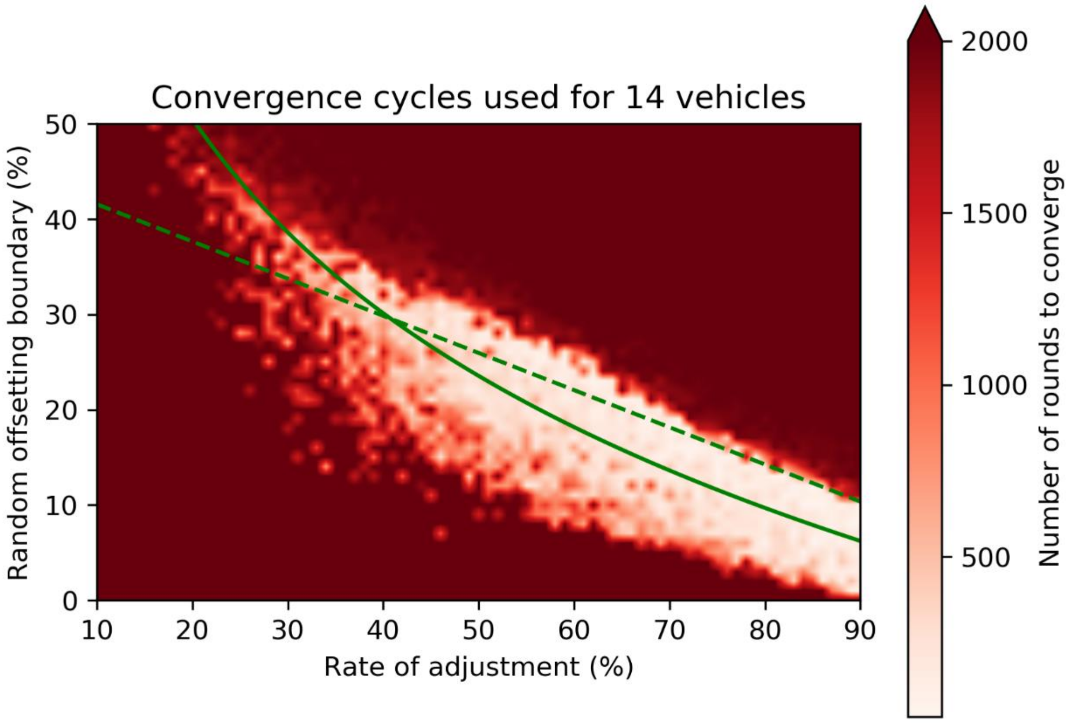
ภาพที่ 12 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 11 คัน



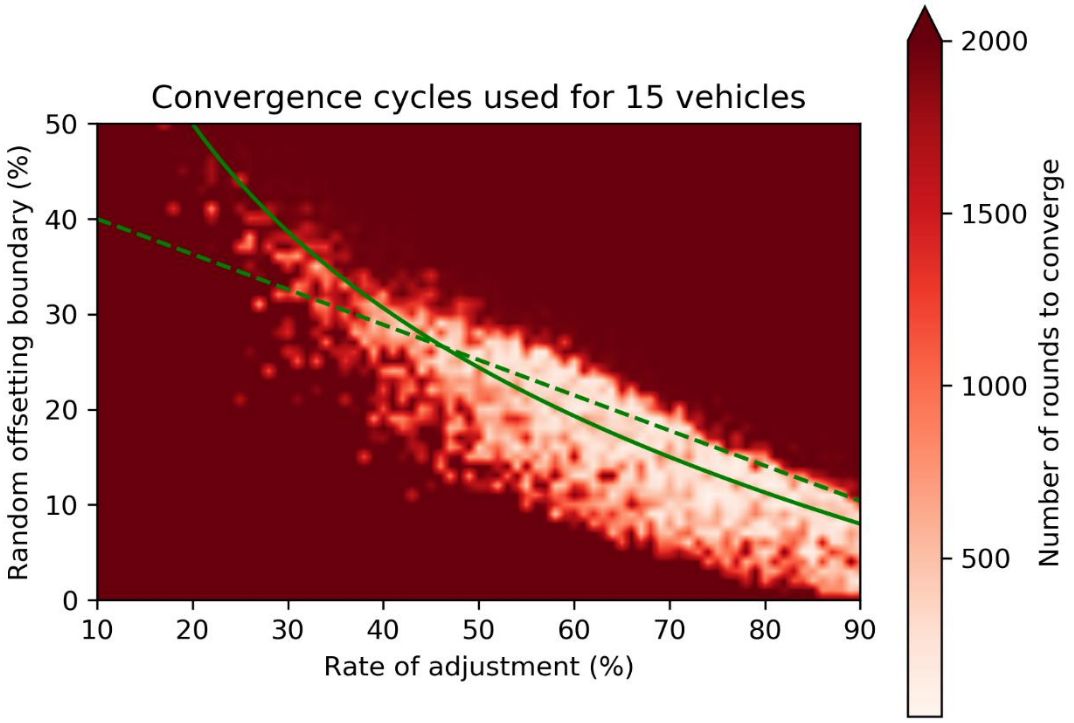
ภาพที่ 13 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 12 คัน



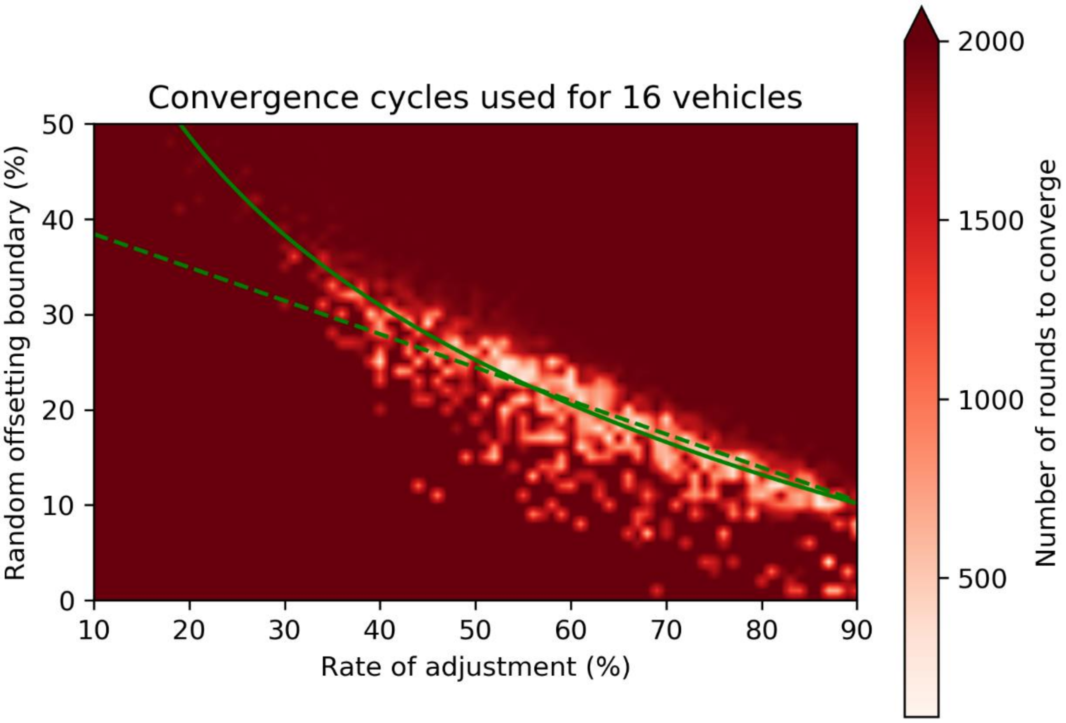
ภาพที่ 14 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 13 คัน



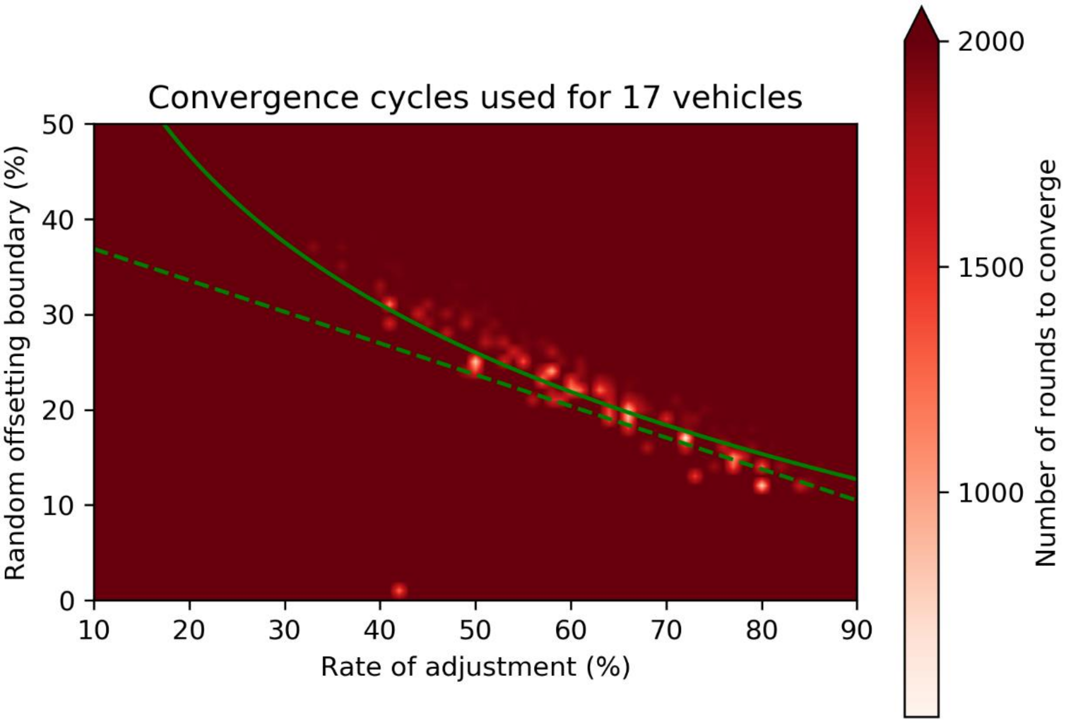
ภาพที่ 15 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 14 คัน



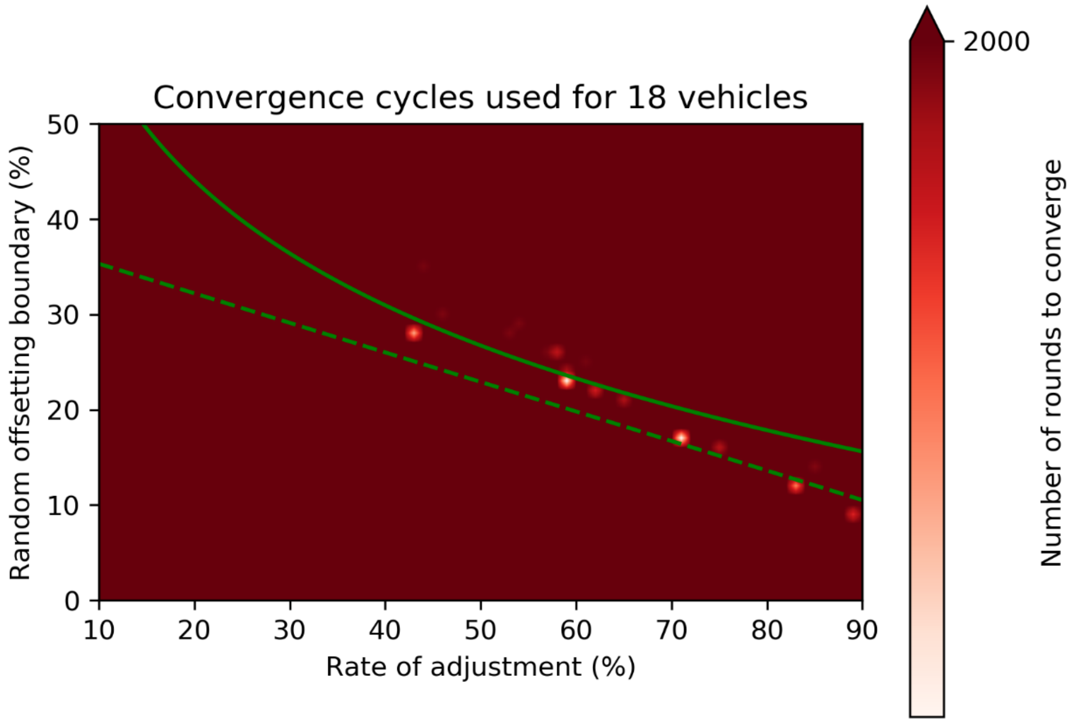
ภาพที่ 16 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 15 คัน



ภาพที่ 17 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 16 คัน



ภาพที่ 18 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 17 คัน

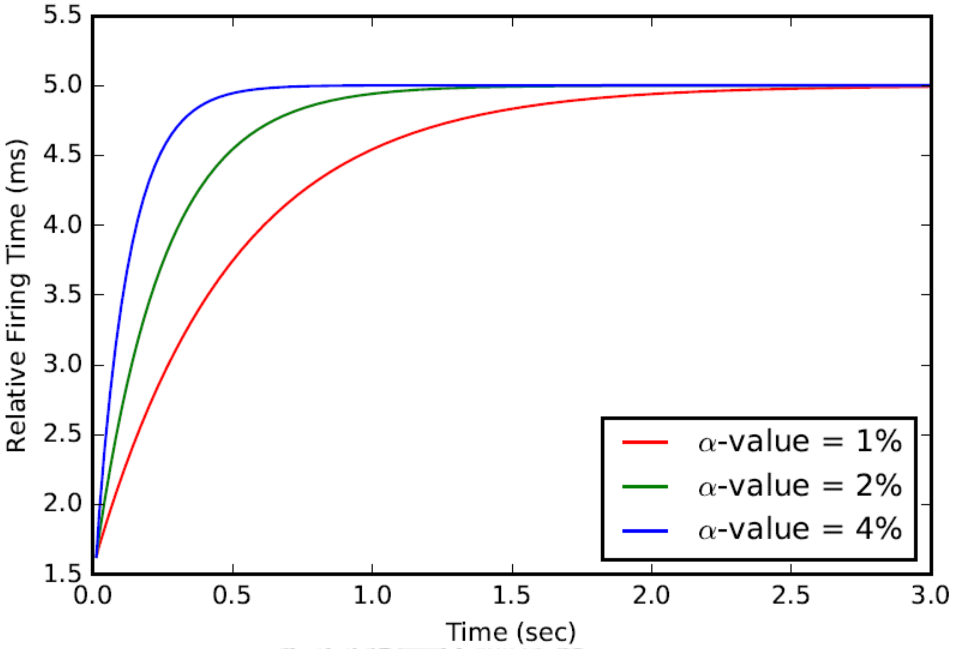


ภาพที่ 19 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 18 คัน

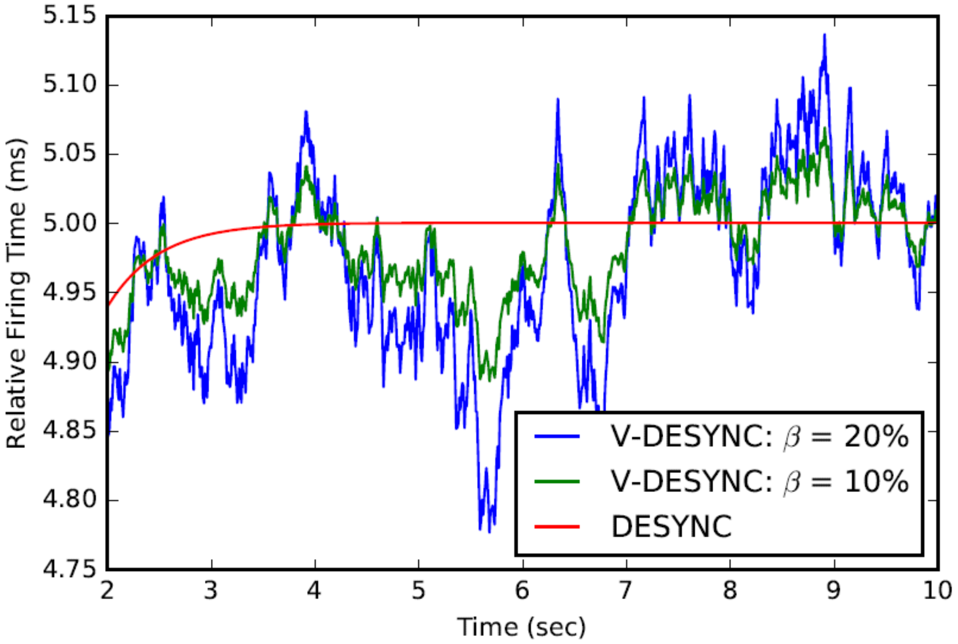
จากสมการ (4) (5) และภาพที่ 6 – 19 จะเห็นว่าระบบนี้จะสามารถรองรับยานพาหนะได้ถึง 16 คัน เมื่อมีการส่งข้อความที่ 100 ข้อความต่อวินาที จากที่แสดงให้เห็นในกราฟจะเห็นว่าเส้นขอบล่างจะเริ่มยกขึ้นสูงกว่าเส้นขอบบนที่จำนวนยานพาหนะ 17 คัน ทำให้ไม่เหลือช่วงการตั้งค่าที่สามารถใช้งานได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อพิจารณากราฟของเวลาการส่งข้อมูลสัมพัทธ์แล้ว การปรับความรวดเร็วในการปรับเวลาและขอบเขตของค่าสุ่มเบี่ยงเบนสูงสุดของการดีซิงโครไนเซชั่นนั้นจะให้ผลที่แตกต่างกันไป โดยการปรับความรวดเร็วการปรับเวลาจะส่งผลให้ระบบลู่เข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นตามภาพที่ 20 แต่การให้มีการปรับเวลาที่เร็วเกินไปก็อาจจะทำให้ระบบนั้นไม่สามารถเข้าสู่สมดุลได้เนื่องจากมีการสลับลำดับตลอดเวลา การปรับขอบเขตค่าสุ่มเบี่ยงเบนจะส่งผลให้เวลาในการส่งข้อมูลจะมีการเบี่ยงเบนออกไปจากจุดสมดุล ขอบเขตยิ่งกว้างมากก็จะยิ่งมีการเบี่ยงเบนมาดังภาพที่ 21 ซึ่งการทำให้มีการสุ่มเบี่ยงเบนนั้นจะป้องกันไม่ให้ยานพาหนะสองคันส่งข้อมูลชนกันตลอดเวลา เนื่องจากไม่รับรู้ซึ่งกันและกัน การมีการสุ่มเบี่ยงเบนนั้นจะทำให้ยานพาหนะสองคันที่ส่งข้อมูลชนกันมีโอกาสรับรู้ซึ่งกันและกันในรอบการส่งถัดไปและพยายามหลีกเลี่ยงกัน แต่การที่มีขอบเขตค่าสุ่มเบี่ยงเบนกว้างเกินไปก็จะทำให้เกิดผลเสียตามมาคือระบบจะไม่สามารถเข้าสู่สมดุลได้เนื่องจากมีการสลับลำดับตลอดเวลา



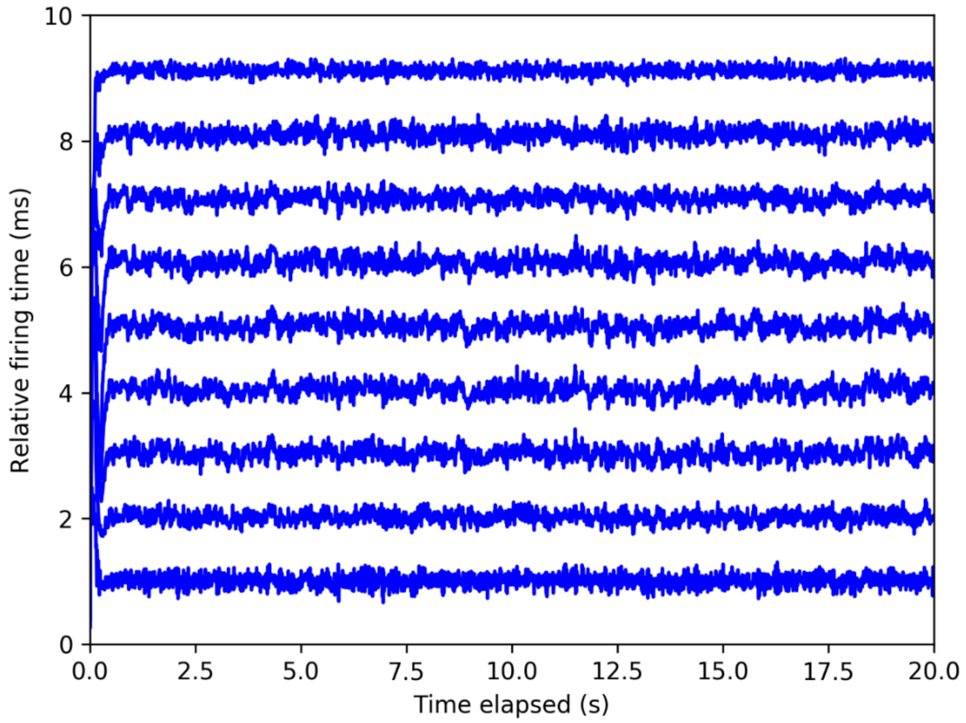
ภาพที่ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลาการส่งข้อมูลสัมพัทธ์ต่อความรวดเร็วในการปรับเวลา



ภาพที่ 21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของเวลาการส่งข้อมูลสัมพัทธ์ต่อขอบเขตค่าสุ่มเบี่ยงเบน

เมื่อลองยกตัวอย่างกราฟของการตั้งค่าที่ใช้งานได้มาจุดหนึ่งดังภาพที่ 22 จะเห็นว่าเวลาในการส่งข้อมูลสัมพัทธ์จะมีความห่างระหว่างแต่ละยานพาหนะเท่า ๆ กัน ซึ่งนั่นแสดงว่าทุก ๆ ยานพาหนะ

มีช่วงเวลาในการส่งข้อมูลเท่ากันคล้ายกันกับแบบทีดีเอ็มเอที่แบ่งช่องเวลาให้เท่ากับจำนวนยานพาหนะอยู่แล้ว

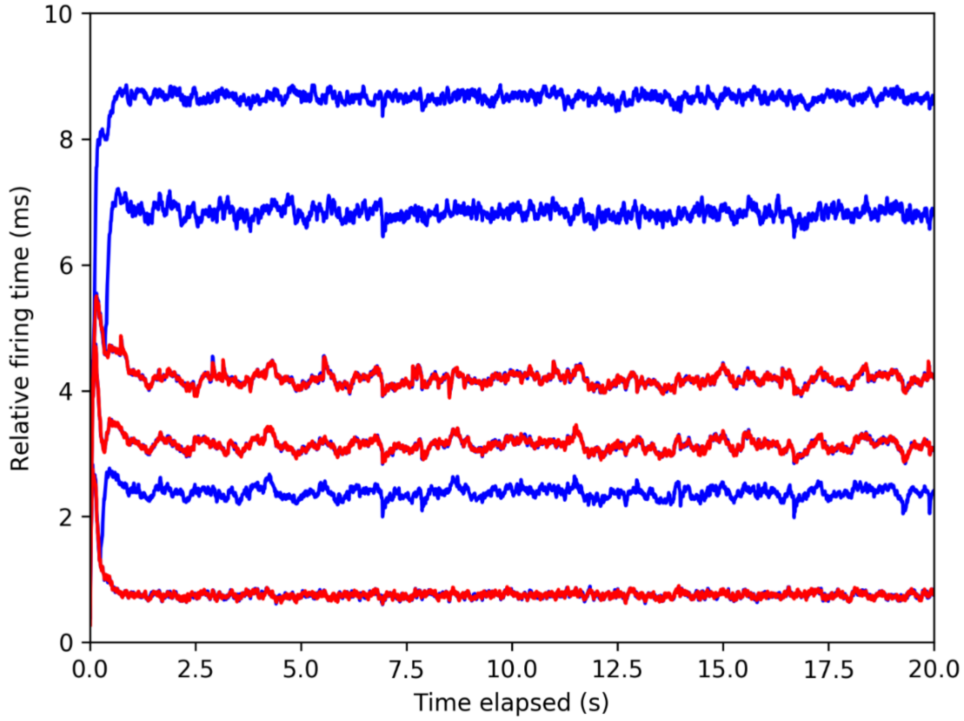


ภาพที่ 22 กราฟแสดงเวลาการส่งข้อมูลสัมพัทธ์สำหรับการตั้งค่าที่สามารถเข้าสู่สมดุลได้

การตั้งค่าที่ใช้งานไม่ได้จะมีสองแบบคือแบบที่มียานพาหนะคู่ใดไม่สามารถแยกเวลาส่งออกจากกันได้ กับแบบที่ยานพาหนะทั้งระบบไม่สามารถจัดสรรลำดับการส่งได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

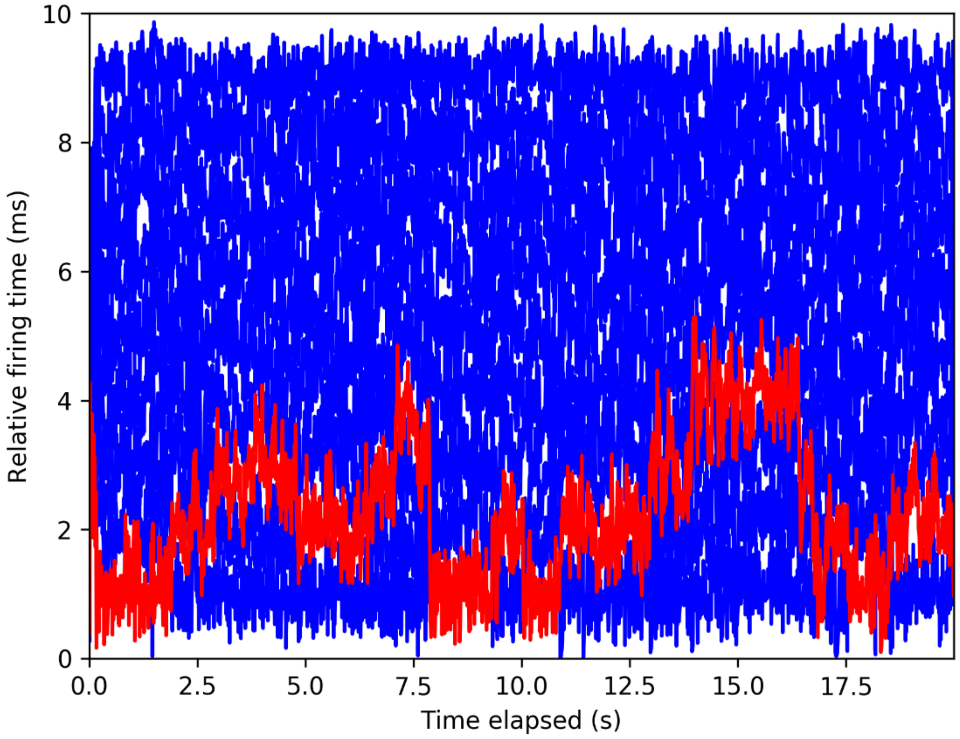
จากกราฟเวลาการส่งข้อมูลสัมพัทธ์ของกรณีที่มียานพาหนะคู่ใดคู่หนึ่งไม่สามารถแยกเวลาส่งออกจากกันได้ในภาพที่ 23 จะเห็นว่าในกราฟจะมีเส้นสองเส้นที่เวลาการส่งทับกันอยู่คือเส้นสีแดงซึ่งทับกับเส้นสีน้ำเงิน ทั้งนี้เกิดจากขอบเขตของค่าสุ่มเบี่ยงเบนน้อยเกินไปทำให้ยานพาหนะทั้งสองที่ส่งชนกันในตอนแรกไม่สามารถมีโอกาสที่จะได้ยินยานพาหนะอีกคันได้ ทำให้ยานพาหนะทั้งสองไม่รับรู้ซึ่งกันละกันและส่งข้อมูลชนกันไปเรื่อย ๆ



ภาพที่ 23 กราฟแสดงเวลาการส่งข้อมูลสัมพัทธ์ของกรณีที่มียานพาหนะคู่ใดคู่หนึ่งไม่สามารถแยกเวลาส่งออกจากกันได้

จากกราฟเวลาการส่งข้อมูลสัมพัทธ์ของกรณีที่ยานพาหนะทั้งระบบไม่สามารถจัดสรรลำดับการส่งได้ในภาพที่ 24 จะเห็นว่ากราฟนั้นมีการสลับลำดับการส่งเป็นจำนวนมากแม้จนกระทั่งเวลาผ่านไปนานแล้ว ทั้งนี้เกิดจาก ความรวดเร็วในการปรับเวลาที่สูงเกินไปหรือขอบเขตของค่าสุ่มเบี่ยงเบนมากเกินไป ทำให้เวลาคำนวณเวลาเป้าหมายในการส่งข้อมูลอาจจะมีการข้ามเลยไปยังเวลาเป้าหมายของยานพาหนะคันอื่น จนเกิดการสลับของลำดับตลอดเวลา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 24 กราฟแสดงเวลาการส่งข้อมูลสัมพัทธ์ของกรณีที่ยานพาหนะทั้งระบบไม่สามารถจัดสรรลำดับการส่งได้

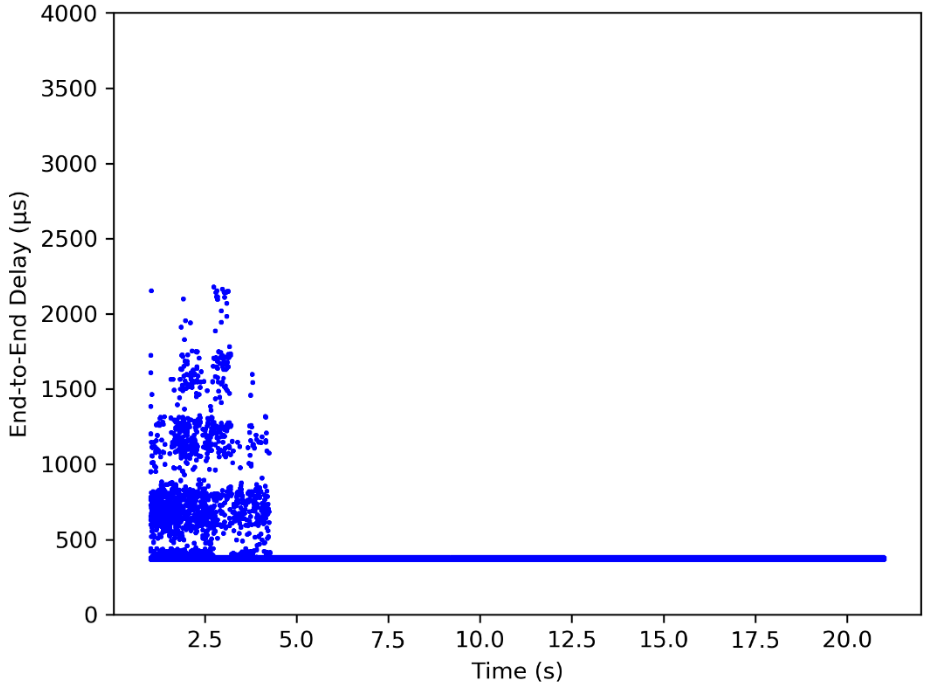
4.2.2 การเปรียบเทียบดีซิงโครไนเซชั่นกับระบบอื่นโดยใช้การตั้งค่าที่เหมาะสม

4.2.2.1 สถานการณ์ที่จำนวนยานพาหนะคงที่

ระยะเวลาการส่งข้อมูลจากต้นทางไปปลายทางของทั้งแบบดีซิงโครไนเซชั่นนั้นและแบบใช้โทเค็นถือว่าไม่มีความแตกต่างกันมากดังตารางที่ 2 และทั้งสองระบบทำงานได้ดีกว่าระบบที่ใช้ CSMA/CA ธรรมดา จากภาพที่ 25 จะเห็นว่าช่วงที่ระยะเวลาการส่งข้อมูลจากต้นทางไปปลายทางขึ้นไปสูงจะอยู่เพียงแค่ช่วงแรก ๆ ในขณะที่ระบบยังไม่ลู่เข้าสู่สมดุล ต่างจากระบบที่ใช้ CSMA/CA ในภาพที่ 26 ที่ระยะเวลาการส่งข้อมูลจากต้นทางไปปลายทางจะขึ้นไปสูงตลอดเวลา ส่วนระบบที่ใช้โทเค็นในภาพที่ 27 ก็จะมีระยะเวลาการส่งข้อมูลจากต้นทางไปปลายทางสูงในช่วงแรกเช่นกัน แต่มีระยะเวลาที่ขึ้นไปสูงน้อยกว่า ทั้งนี้เป็นผลพวงมาจากการที่ใช้โทเค็น

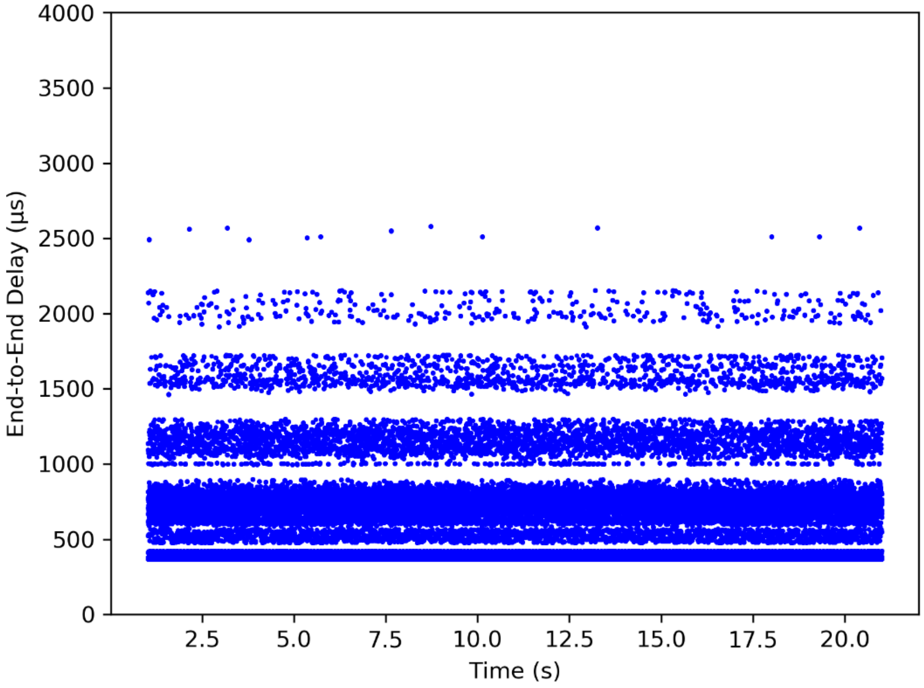
ตารางที่ 2 ระยะเวลาการส่งข้อมูลต้นทางไปปลายทางของทั้งสองระบบ

ระบบ	เวลาเฉลี่ย (ไมโครวินาที)
ใช้ CSMA/CA	607.1701
ใช้โทเค็น	382.1584
ใช้การดีซิงโครไนเซชั่น	387.8743

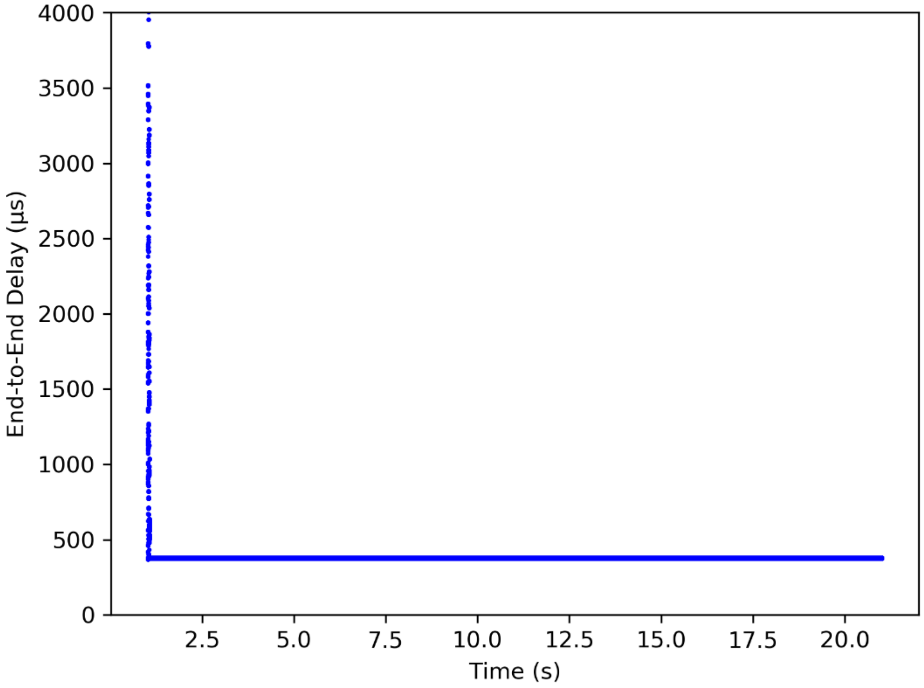


ภาพที่ 25 กราฟแสดงระยะเวลาการส่งข้อมูลจากต้นทางไปปลายทางสำหรับแต่ละข้อความบนระบบที่ใช้ดีซิงโครไนเซชั่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพที่ 26 กราฟแสดงระยะเวลาการส่งข้อมูลจากต้นทางไปปลายทางสำหรับแต่ละข้อความบนระบบที่ใช้ CSMA/CA



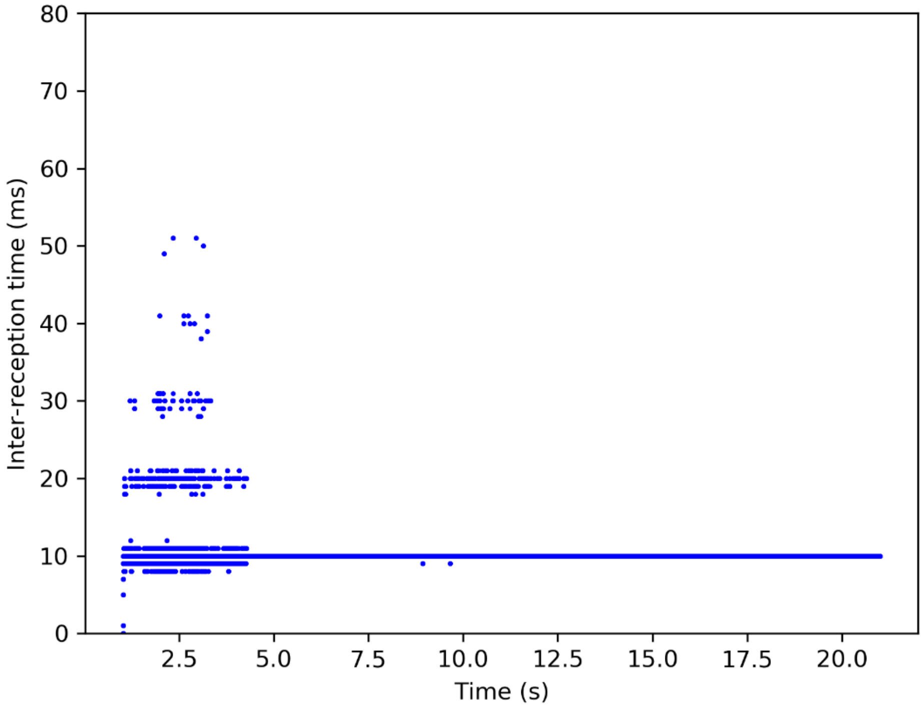
ภาพที่ 27 กราฟแสดงระยะเวลาการส่งข้อมูลจากต้นทางไปปลายทางสำหรับแต่ละข้อความบนระบบที่ใช้โทเค็น

เมื่อมาพิจารณาระยะเวลาห่างระหว่างการได้รับกลุ่มข้อมูลสองครั้งต่อ จะเห็นว่า แม้ว่าระยะเวลาห่างระหว่างการได้รับกลุ่มข้อมูลสองครั้งของแบบดีซิงโครไนเซชั่นจะดูสูงกว่าแบบที่ใช้โทเค็นดังตารางที่ 3 ทั้งนี้เนื่องจากเป็นธรรมชาติของระบบแบบทีดีเอ็มเอที่มีรอบการส่งที่ตายตัว แต่ส่วนมากก็ยังอยู่ในเกณฑ์ภายใต้ความถี่การส่งข้อความที่กำหนดไว้ จากภาพที่ 28 จะเห็นว่าช่วงที่มีระยะเวลาห่างระหว่างการได้รับกลุ่มข้อมูลสองครั้งของระบบที่ใช้ดีซิงโครไนเซชั่นนั้นจะอยู่ในช่วงแรกเช่นกัน ต่างจากระบบที่ใช้ CSMA/CA ในภาพที่ 29 ซึ่งระยะเวลาห่างระหว่างการได้รับกลุ่มข้อมูลสองครั้งสูงอยู่ตลอดเวลา ส่วนระบบที่ใช้โทเค็นภาพที่ 30 ก็จะมีระยะเวลาห่างระหว่างการได้รับกลุ่มข้อมูลสองครั้งสูงขึ้นมาเพียงช่วงแรกเช่นกัน ในเกณฑ์ระยะเวลาห่างระหว่างการได้รับกลุ่มข้อมูลสองครั้งของทั้งสามระบบนั้นจะมีแนมโน้มแบบเดียวกันกับระยะเวลาการส่งข้อมูลจากต้นทางไปปลายทาง

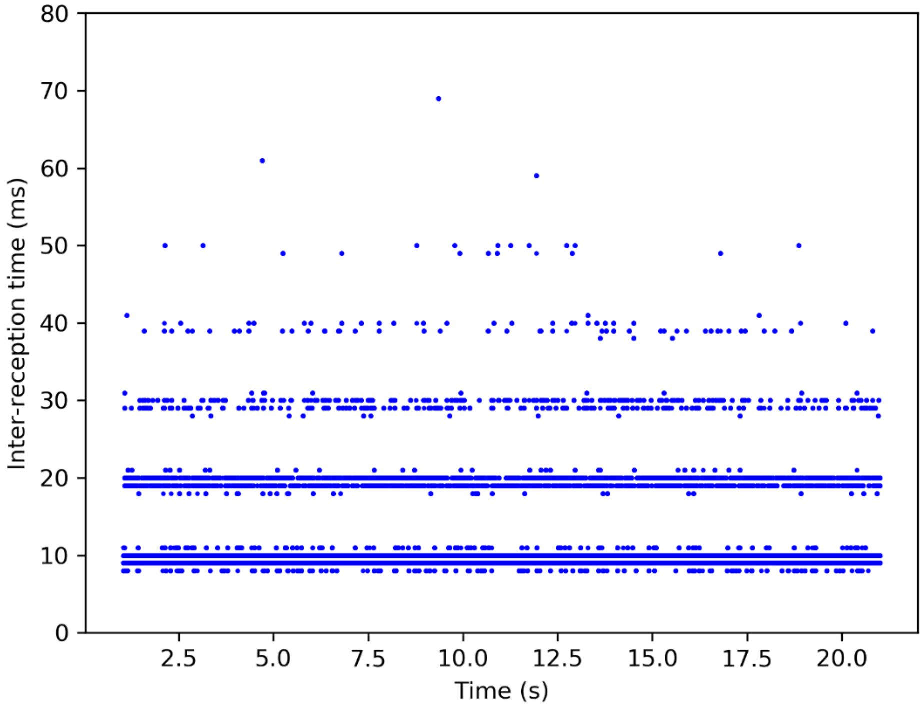
ตารางที่ 3 ระยะเวลาห่างระหว่างการได้รับกลุ่มข้อมูลสองครั้ง

ระบบ	**เวลาเฉลี่ย (มิลลิวินาที)**	**เปอร์เซ็นต์ของระยะเวลาที่ต่ำกว่าคาบเวลาในการส่งข้อมูล**
ใช้ CSMA/CA	10.1151	94.86%
ใช้โทเค็น	7.9944	99.97%
ใช้การดีซิงโครไนเซชั่น	10.0259	99.25%

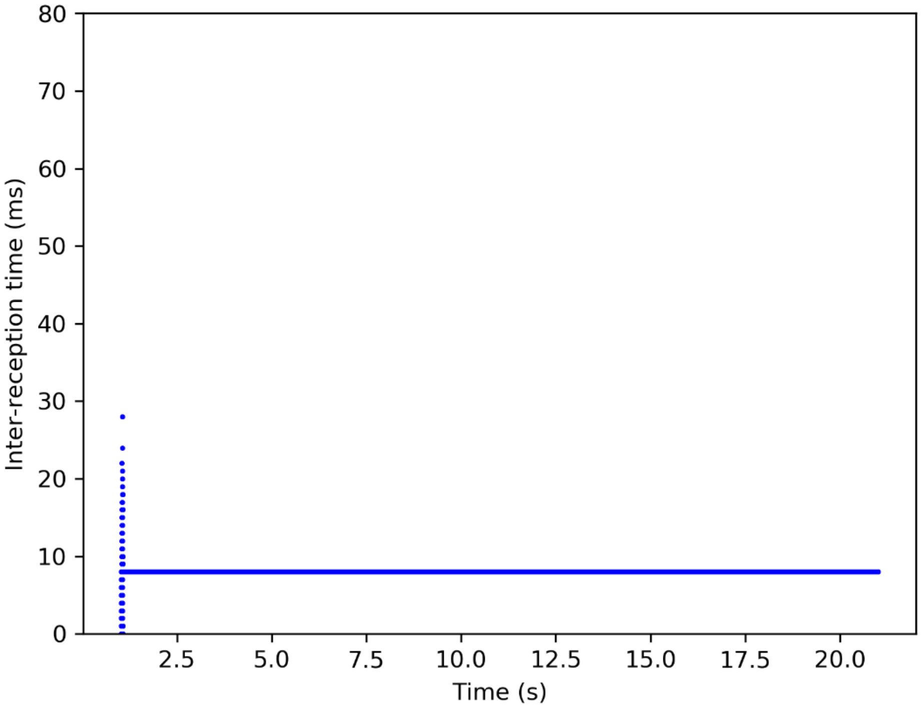
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



ภาพที่ 28 กราฟแสดงระยะเวลาห่างระหว่างการได้รับกลุ่มข้อมูลสองครั้งสำหรับแต่ละข้อความบนระบบที่ใช้ดีซิงโครไนเซชั่น



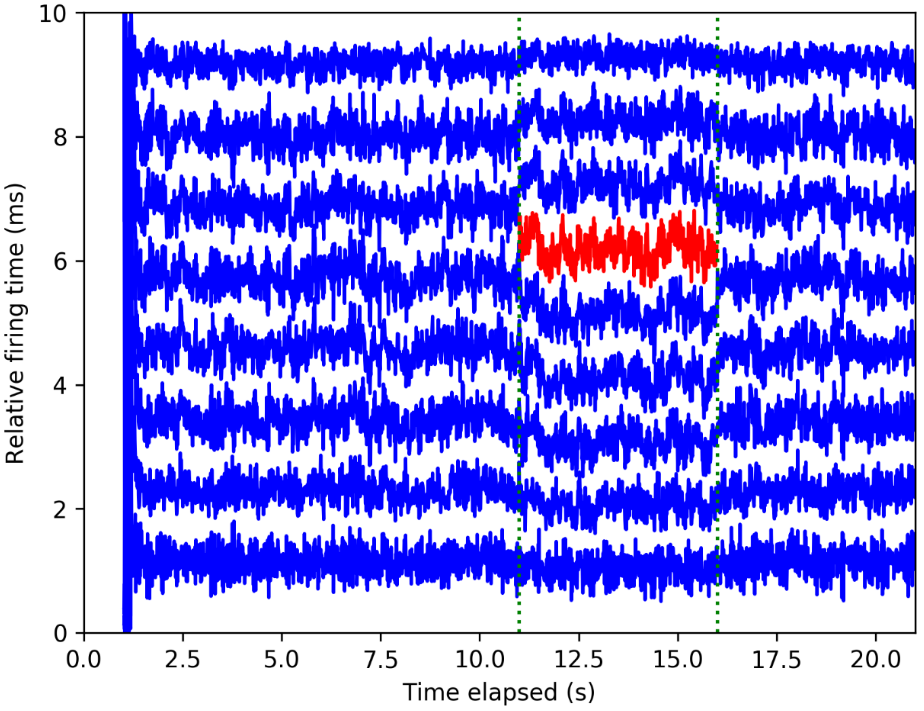
ภาพที่ 29 กราฟแสดงระยะเวลาห่างระหว่างการได้รับกลุ่มข้อมูลสองครั้งสำหรับแต่ละข้อความบนระบบที่ใช้ CSMA/CA



ภาพที่ 30 กราฟแสดงระยะเวลาห่างระหว่างการได้รับกลุ่มข้อมูลสองครั้งสำหรับแต่ละข้อความบนระบบที่ใช้โทเค็น

4.2.2.2 สถานการณ์ที่มีการเข้าและออกของยานพาหนะ

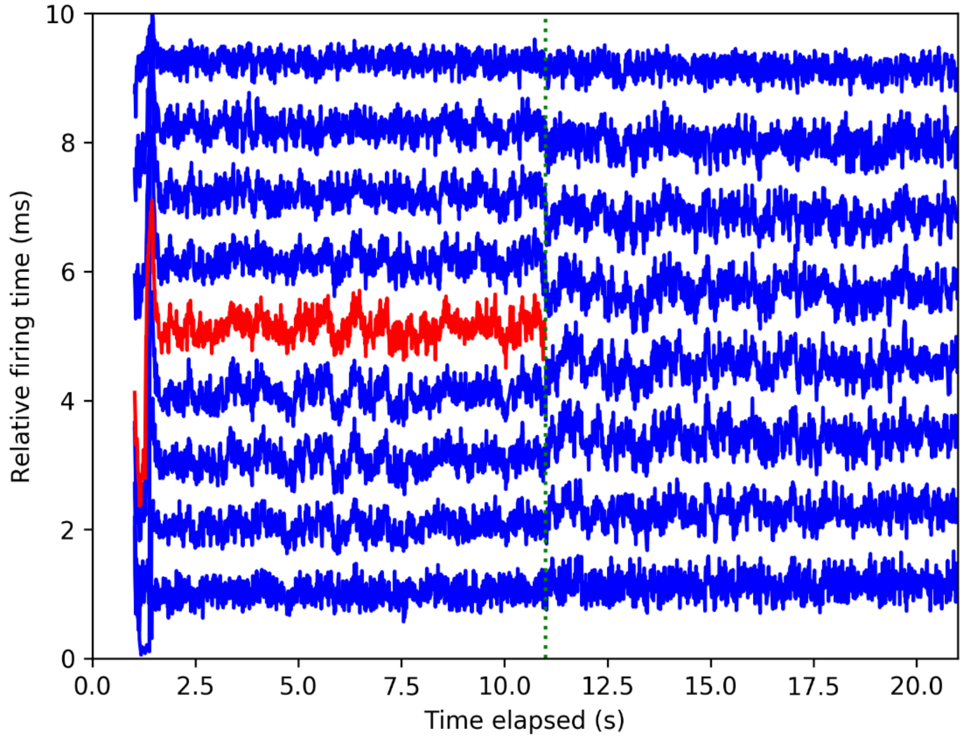
จากที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 31 จะเห็นว่าที่วินาทีที่ 30 จะมีการเพิ่มยานพาหนะขึ้นไปหนึ่งคัน และที่วินาทีที่ 90 จะมีการลดยานพาหนะไปหนึ่งคัน จะเห็นว่าเมื่อใช้งานการตั้งค่าที่เหมาะสม ในช่วงที่เพิ่มยานพาหนะ ยานพาหนะคันที่เหลือก็จะปรับเวลาตามเพื่อรองรับยามพาหนะที่เข้ามาใหม่ ตามที่เห็นในเส้นกราฟสีแดง และเมื่อยานพาหนะออกจากขบวนยานพาหนะ ยานพาหนะคันที่เหลืออยู่ก็จะพยายามปรับเวลาส่งให้มีระยะเหมาะสมกับจำนวนยานพาหนะที่เหลือ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบแบบดีซิงโครไนเซชั่นนั้นสามารถที่จะรองรับจำนวนยานพาหนะที่มีการเปลี่ยนแปลงได้



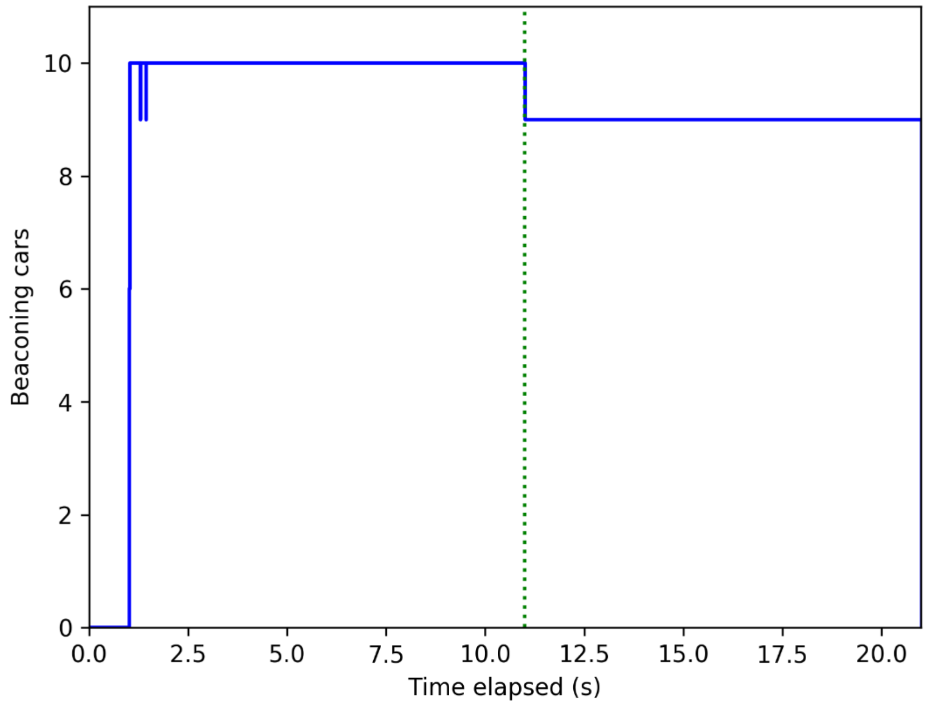
ภาพที่ 31 กราฟแสดงเวลาการส่งข้อมูลสัมพัทธ์ของสถานการณ์ที่มีการเข้าและออกของยานพาหนะ

4.2.2.3 สถานการณ์ที่มียานพาหนะหยุดทำงานหนึ่งคัน

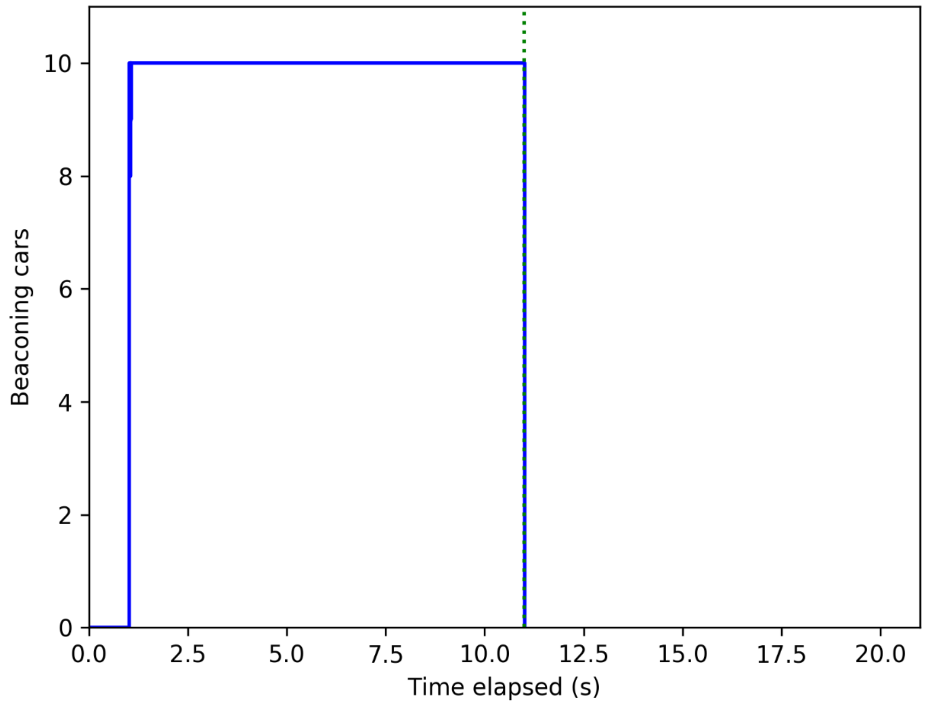
จากภาพที่ 32 และภาพที่ 33 จะเห็นว่าเมื่อระบบที่เป็นดีซิงโครไนเซชั่นมียานพาหนะหยุดทำงานหนึ่งคัน ยานพาหนะคันอื่นก็จะยังสามารถทำงานได้ปกติ เมื่อเทียบกับระบบแบบใช้งานโทเค็นในภาพที่ 34 จะเห็นว่าถ้ายานพาหนะที่หยุดทำงานเป็นตัวจัดการโทเค็นซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดขึ้นยานพาหนะทุกคันก็จะหยุดส่งข้อมูลเนื่องจากรอโทเค็นที่หายไปพร้อมกับตัวจัดการโทเค็นทำให้ไม่มียานพาหนะคันไหนสามารถส่งข้อมูลต่อได้ ความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้นถือว่ารุนแรงกว่าแบบดีซิงโครไนเซชั่น



ภาพที่ 32 กราฟแสดงเวลาการส่งข้อมูลสัมพัทธ์ของสถานการณ์ที่มียานพาหนะหยุดทำงานหนึ่งคัน



ภาพที่ 33 กราฟแสดงจำนวนยานพาหนะที่กำลังส่งข้อมูลอยู่ ณ ขณะนั้นของสถานการณ์ที่มียานพาหนะหยุดทำงานหนึ่งคัน สำหรับระบบที่ใช้ดีซิงโครไนเซชั่น



ภาพที่ 34 กราฟแสดงจำนวนยานพาหนะที่กำลังส่งข้อมูลอยู่ ณ ขณะนั้นของสถานการณ์ที่มียานพาหนะหยุดทำงานหนึ่งคัน สำหรับระบบที่ใช้โทเค็น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5
บทสรุปของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปของงานวิจัย

การส่งข้อมูลที่มีความถี่ในการส่งสูงนั้นมีความจำเป็นสำหรับการทำงานของขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ และการชนกันของข้อมูลนั้นเป็นปัญหาสำคัญ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราได้เสนอกรอบงานสำหรับการทำดีซิงโครไนเซชั่น ซึ่งเป็นระบบที่มีความกระจายตัวและไม่มีจุดเดียวของความล้มเหลว จากผลการทดลอง ระบบดีซิงโครไนเซชั่นนั้นสามารถรองรับจำนวนยานพาหนะได้ถึง 16 คัน เมื่อส่งข้อมูลที่มีความถี่ในการส่ง 100 ข้อความต่อวินาที และยังสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงจำนวนยานพาหนะภายในขบวนด้วย ในแง่ของระยะเวลาการส่งข้อมูลและระยะเวลาห่างของการรับข้อมูลสองครั้งซึ่งส่งผลถึงความสดใหม่ของข้อมูลนั้นสามารถทำได้ดีกว่าระบบที่ใช้ CSMA/CA ปกติ แม้ว่าในแง่ของระยะเวลาห่างของการรับข้อมูลสองครั้งจะแย่กว่าระบบที่ใช้โทเค็นเล็กน้อย ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้รับนั้นอาจจะไม่ถี่เท่าระบบที่ใช้โทเค็น แต่การส่งข้อมูลส่วนมากก็ยังอยู่ภายใต้กรอบเวลาที่กำหนดไว้ เมื่อเกิดข้อผิดพลาดที่ยานพาหนะคันหนึ่ง ความเสียหายที่เกิดขึ้นสำหรับระบบดีซิงโครไนเซชั่นนั้นก็จะไม่ได้ทำให้สูญเสียไปทั้งระบบ ต่างจากระบบอื่น ๆ ที่มีโอกาสทำให้เกิดความเสียหายที่ทำให้สูญเสียไปทั้งระบบได้ ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่ร้ายแรงกว่ามากสำหรับการใช้งานขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ

5.2 การอภิปราย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.2.1 กรณีที่ระยะห่างระหว่างยานพาหนะเปลี่ยนแปลง

ในความเป็นจริงนั้น ความเร็วของยานพาหนะและสภาพของถนนจะมีความแตกต่างกันไปตามแต่ละสถานที่ ซึ่งเป็นผลพวงมาจากกฎหมายจำกัดความเร็ว พื้นผิวของถนน และสภาพอากาศในขณะนั้น เพราะฉะนั้นเพื่อความปลอดภัยในการทำขบวนยานพาหนะ ระยะห่างระหว่างยานพาหนะจึงจำเป็นจะต้องปรับเปลี่ยนไปตามความเร็วของยานพาหนะและสภาพของถนน

ระยะห่างระหว่างยานพาหนะที่ปลอดภัยนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการระยะการเบรกได้ดังนี้

$$D = vt_{p-r} + \frac{v^2}{2\mu g} \tag{6}$$

ซึ่งจากสมการ (6) ข้างต้น D แทนระยะทางที่ต้องใช้เบรก v คืออัตราเร็วของยานพาหนะในขณะนั้น t_{p-r} คือระยะเวลาที่ต้องใช้ตัดสินใจในการสั่งเบรก ซึ่งค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่ต้องตัดสินใจของมนุษย์นั้นเฉลี่ยอยู่ที่ 1 วินาที [14] μ คือสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อรถและถนน ซึ่งค่านี้จะใช้อยู่ที่ 0.7 สำหรับถนนในสภาวะปกติหรือ 0.25 สำหรับถนนที่ลื่น [15] และ g คือแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งอยู่ที่ 9.807 เมตรต่อวินาที^{2} จากสมการ (6) ข้างต้นจะเห็นได้ว่าระยะห่างที่ปลอดภัยนั้นจะแปรผันไปตามความเร็วของยานพาหนะและสภาพของถนนในขณะนั้น

ตามกฎหมายในประเทศไทย ความเร็วของรถบรรทุกที่มีการลากจูงรถพ่วงถูกจำกัดอยู่ที่ 45 กิโลเมตรต่อชั่วโมงภายในเมืองหรือเขตชุมชน และ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมงภายนอกเมืองหรือบนทางหลวง

เมื่อกำหนดให้ระยะเวลาที่ใช้ตัดสินใจเบรกเป็น 1 วินาทีด้วยเหตุผลที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้วนั้น ระยะห่างที่ปลอดภัยสำหรับความเร็วและสภาพถนนต่าง ๆ จะเป็นไปตามตารางด้านล่างนี้

ตารางที่ 4 ระยะห่างที่ปลอดภัยสำหรับสถานการณ์ต่าง ๆ

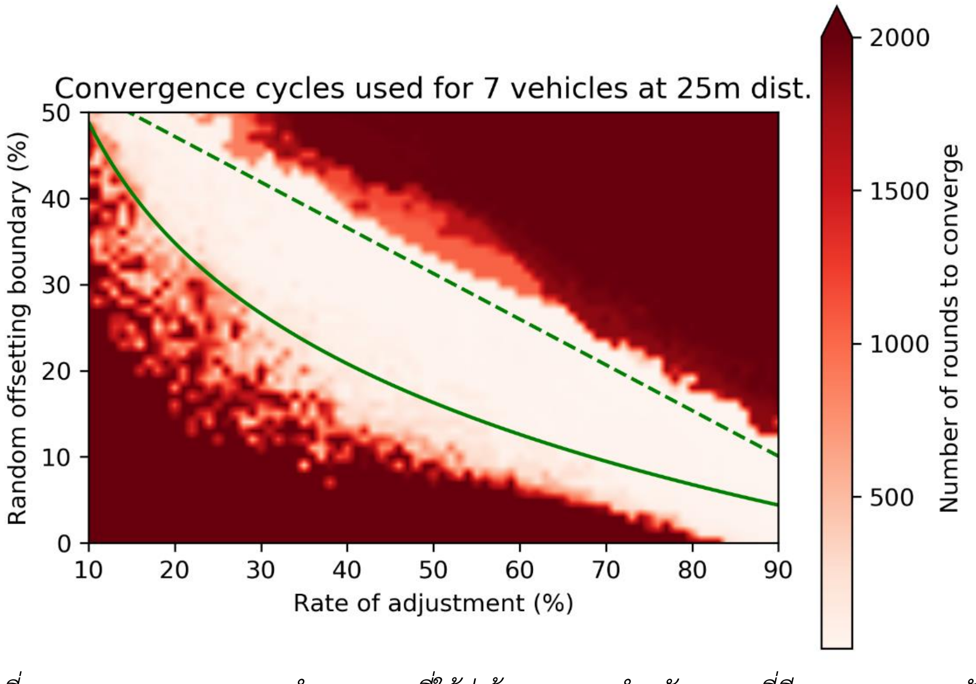
ความเร็ว	สภาพถนน	ระยะห่างที่ปลอดภัย
45 กม./ชม.	แห้งปกติ	23.88 เมตร
45 กม./ชม.	ลื่น	44.36 เมตร
60 กม./ชม.	แห้งปกติ	36.91 เมตร
60 กม./ชม.	ลื่น	73.34 เมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

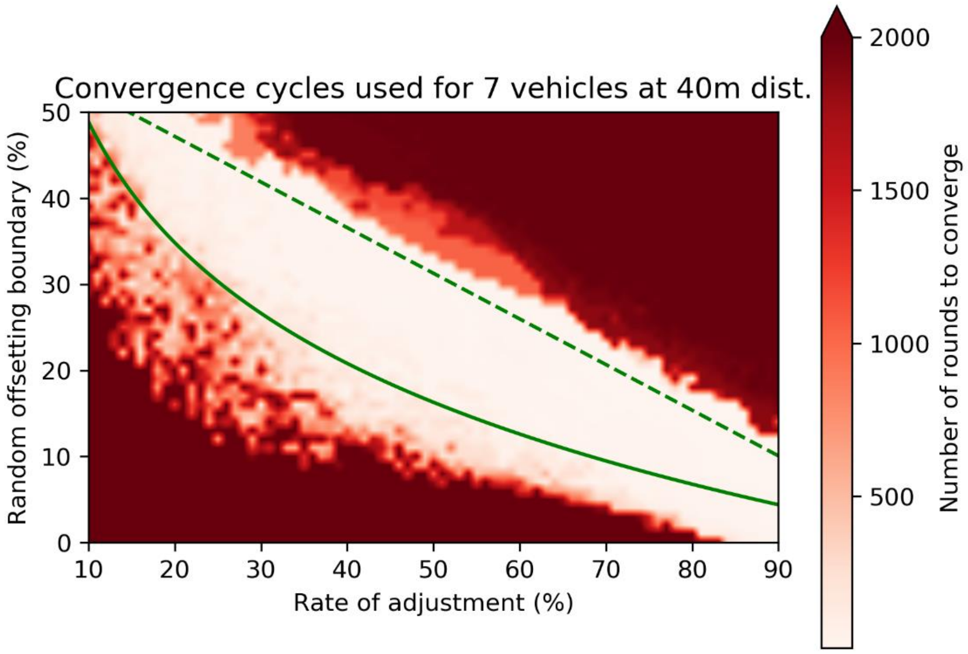
จากตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าระยะห่างที่ปลอดภัยจะเปลี่ยนไปตามสภาพถนนและความเร็วของยานพาหนะ โดยจะใช้ระยะห่างมากขึ้นตามความเร็วที่มากขึ้น และถ้าหากว่าสภาพถนนนั้นลื่นก็จะยิ่งจำเป็นต้องใช้ระยะห่างมากขึ้นไปอีก เพราะฉะนั้นการที่ความเร็วและสภาพถนนแตกต่างกันก็เป็นเงื่อนไขที่ทำให้ต้องมีการปรับระยะห่างที่แตกต่างกัน

เพื่อพิสูจน์ว่าระบบนั้นสามารถรองรับระยะห่างของยานพาหนะที่ต่างจากเดิมได้ การทดลองเพิ่มเติมจะทำโดยการหาการตั้งค่าที่เหมาะสม การทดลองใหม่นี้จะปรับระยะห่างจากเดิม 10 เมตร (ระยะห่างระหว่างเสาอากาศ 30 เมตร) เป็น 25 เมตร และ 40 เมตร ส่วนการตั้งค่าอื่น ๆ นอกจากระยะห่างระหว่างยานพาหนะจะยังคงเดิมดังตารางที่ 3 สิ่งที่จะนำมาใช้เปรียบเทียบคือจำนวนรอบที่ลู่เข้าสู่สมดุลเหมือนกับการทดลองเดิม

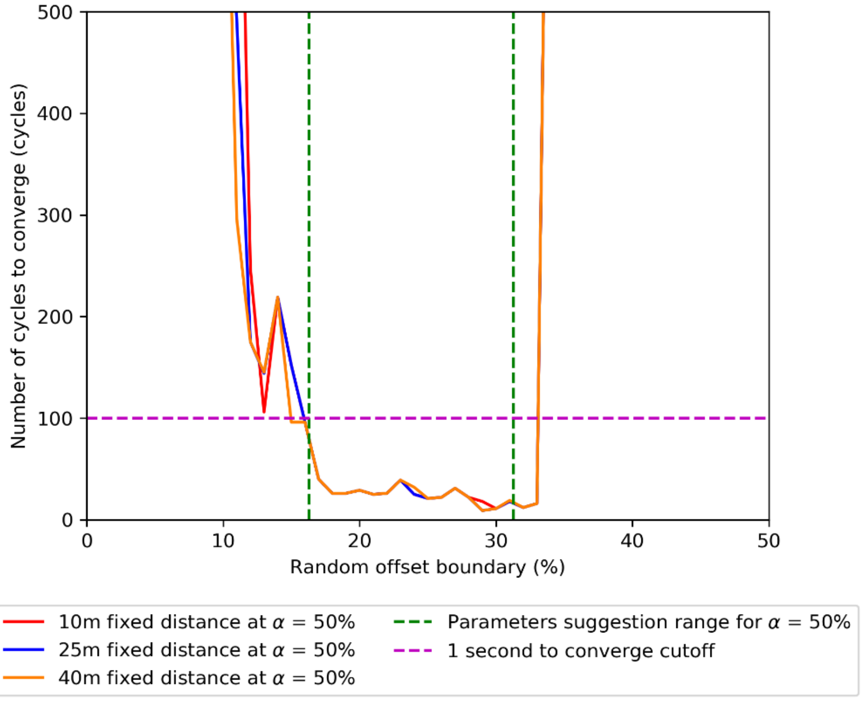
จากการทดลองเพิ่มเติมของเราดังภาพที่ 35 - 38 จะเห็นว่าแม้ว่าระยะห่างจะแตกต่างไปจากที่กำหนดไว้ในการทดลองเดิม ชุดของการตั้งค่าที่เหมาะสมซึ่งถูกอธิบายด้วยสมการ (4) และ (5) จากการทดลองเดิมก็ยังสามารถใช้งานได้อยู่แม้ว่าระยะห่างจะเปลี่ยนไป เพราะว่าผลการทดลองสำหรับระยะห่างใหม่นั้นไม่มีความแตกต่างจากผลการทดลองเดิมอย่างเห็นได้ชัด จากภาพที่ 37 และ 38 ซึ่งตัดมาเฉพาะช่วงที่ความรวดเร็วในการปรับเวลา 50% และ 80% ตามลำดับ ให้ขอบเขตของค่าสุ่มเบี่ยงเบนเป็นแกนนอน และจำนวนรอบที่ลู่เข้าสู่สมดุลเป็นแกนตั้ง จะเห็นว่าส่วนที่อยู่ในช่วงของการตั้งค่าที่แนะนำ (เส้นประสีเขียว) จำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าสู่สมดุลจะยังอยู่ภายใต้เกณฑ์ที่กำหนดไว้ 1 วินาที หรือ 100 รอบ (เส้นประสีชมพู)



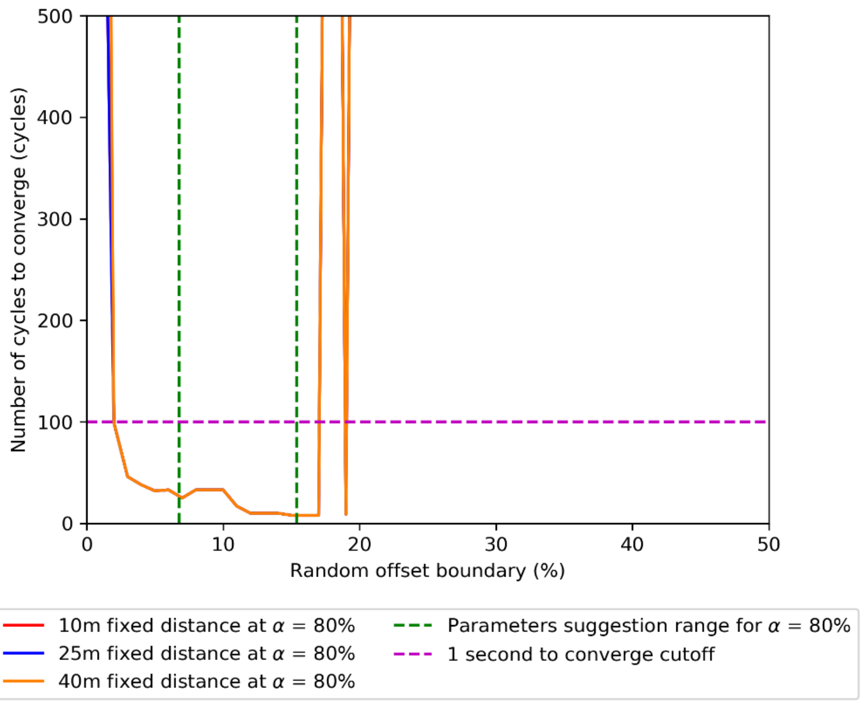
ภาพที่ 35 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 7 คัน ที่ระยะห่าง 25 เมตร



ภาพที่ 36 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 7 คัน ที่ระยะห่าง 40 เมตร



ภาพที่ 37 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 7 คัน เฉพาะช่วงที่ความรวดเร็วในการปรับเวลา 50% ของทั้งจากการทดลองเดิมและการทดลองใหม่นี้



ภาพที่ 38 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้สู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 7 คัน เฉพาะช่วงที่ความรวดเร็วในการปรับเวลา 80% ของทั้งจากการทดลองเดิมและการทดลองใหม่นี้

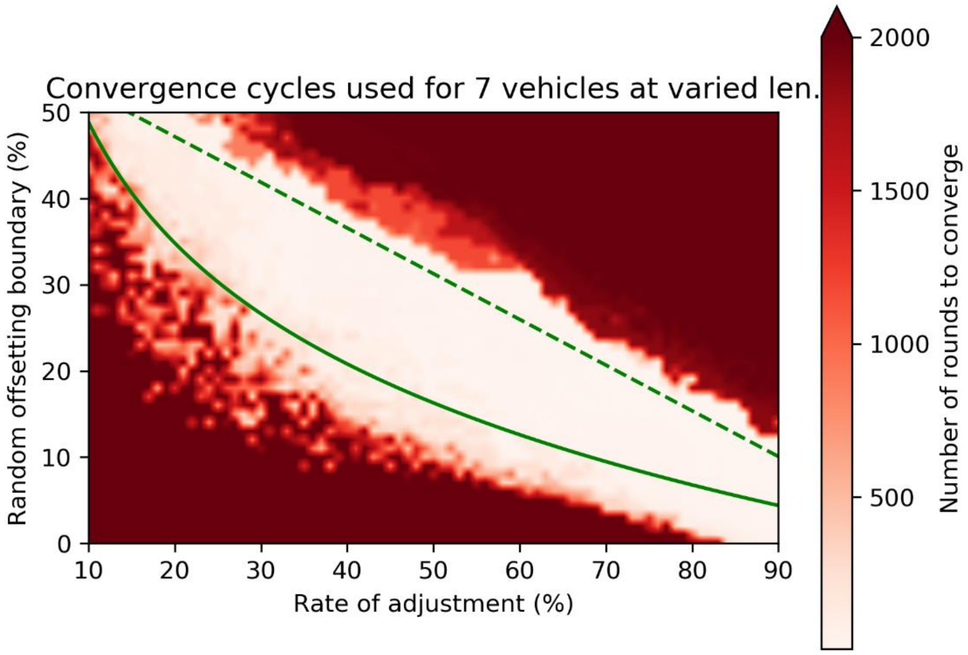
เนื่องจากว่าระยะห่างระหว่างยานพาหนะที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความยาวของขบวนยานพาหนะเพิ่มขึ้น แต่ระยะการส่งข้อมูลยังมีอยู่เท่าเดิม ทำให้จำนวนยานพาหนะที่สามารถรองรับได้จะลดน้อยลง เช่นถ้าหากเรากำหนดระยะห่างอยู่ที่ 25 เมตร ซึ่งเป็นระยะปลอดภัยสำหรับความเร็ว 45 กม./ชม. ในสภาพถนนปกติ เราจะสามารถรองรับยานพาหนะได้จำนวน 11 คัน และถ้าหากเรากำหนดระยะห่างอยู่ที่ 40 เมตร ซึ่งเป็นระยะปลอดภัยสำหรับความเร็ว 60 กม./ชม. ในสภาพถนนปกติ เราจะสามารถรองรับยานพาหนะได้จำนวน 8 คัน ซึ่งก็ถือว่าเป็นข้อจำกัดอันเนื่องมาจากระยะการส่งข้อมูล ดังนั้นความเร็วของยานพาหนะและสภาพของพื้นถนนซึ่งจะส่งผลต่อระยะห่างนั้นมีผลกระทบกับจำนวนยานพาหนะที่รองรับได้เนื่องจากระยะการส่งข้อมูลที่จำกัด

5.2.2 กรณีที่ยานพาหนะมีลักษณะที่แตกต่างกัน

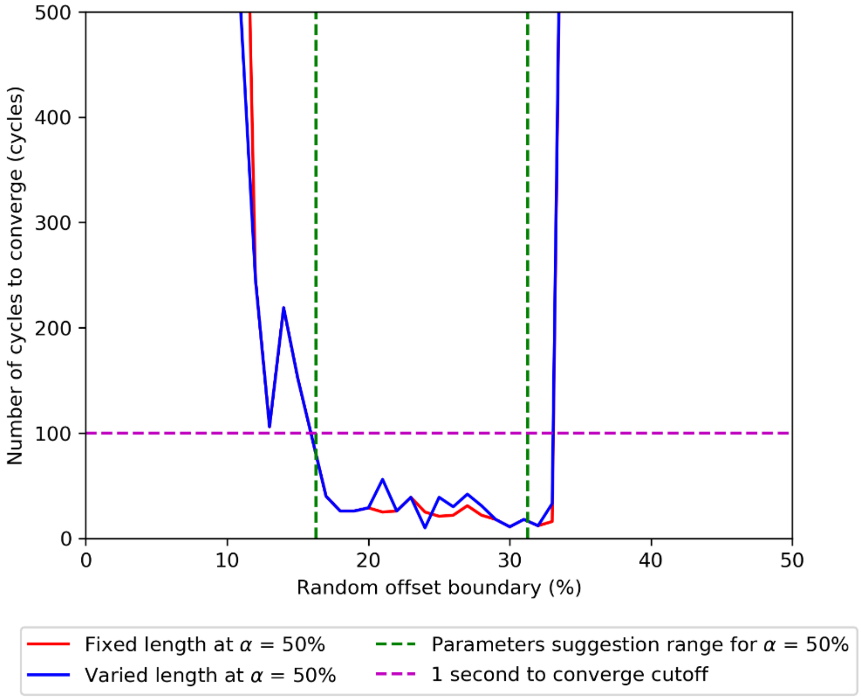
ยานพาหนะที่อยู่ภายในขบวนยานพาหนะอาจจะมีลักษณะที่แตกต่างกันได้ เช่นความยาวของยานพาหนะ ซึ่งก็เป็นประเด็นสำคัญถ้าหากเปิดโอกาสให้ยานพาหนะจากหลากหลายสถานที่หรือองค์กรสามารถเข้าร่วมกลุ่มขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติได้

เนื่องด้วยสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้น จึงทดลองเพิ่มเติมโดยปรับเปลี่ยนความยาวของยานพาหนะให้มีความแตกต่างกันโดยจะมีความยาวในช่วงตั้งแต่ 5 เมตรจนถึง 80 เมตร ส่วนการตั้งค่าอื่น ๆ นอกจากความยาวของยานพาหนะจะยังคงเดิมดังตารางที่ 3 สิ่งที่จะนำมาใช้เปรียบเทียบคือจำนวนรอบที่ลู่เข้าสู่สมดุลเหมือนกับการทดลองเดิม

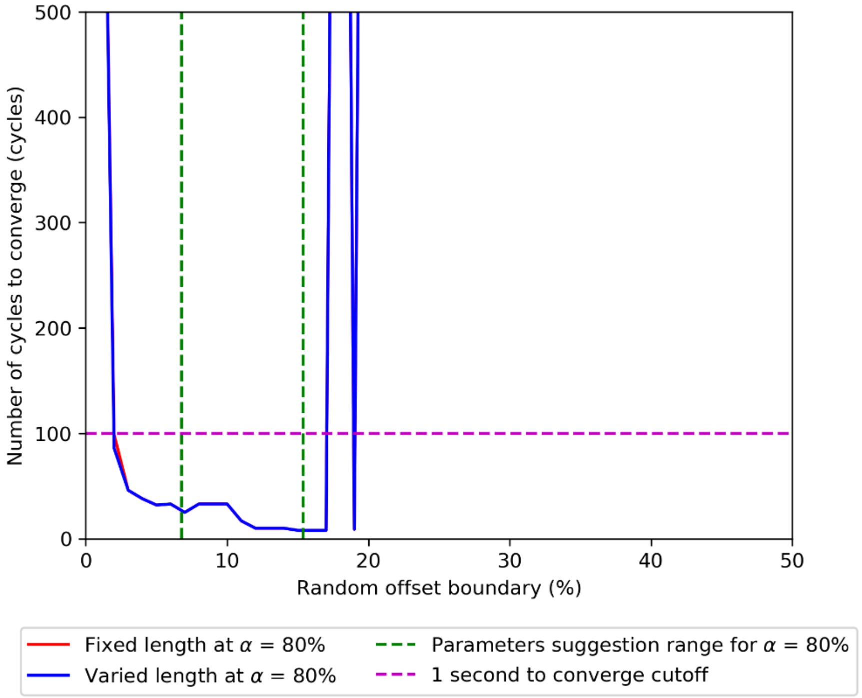
จากการทดลองเพิ่มเติมของเราดังภาพที่ 39 - 41 จะเห็นว่าแม้ว่าขนาดของยานพาหนะจะมีความแตกต่างกัน ชุดของการตั้งค่าที่เหมาะสมซึ่งถูกอธิบายด้วยสมการ (4) และ (5) จากการทดลองเดิมก็ยังสามารถใช้งานได้อยู่แม้ว่าความยาวของยานพาหนะจะมีความแตกต่างกัน เพราะว่าผลการทดลองสำหรับระยะห่างที่มีความแตกต่างกันนั้นไม่มีความแตกต่างจากผลการทดลองเดิมอย่างเห็นได้ชัด จากภาพที่ 40 และ 41 ซึ่งตัดมาเฉพาะช่วงที่ความรวดเร็วในการปรับเวลา 50% และ 80% ตามลำดับ ให้ขอบเขตของค่าสุ่มเบี่ยงเบนเป็นแกนนอน และจำนวนรอบที่ลู่เข้าสู่สมดุลเป็นแกนตั้ง จะเห็นว่าส่วนที่อยู่ในช่วงของการตั้งค่าที่แนะนำ (เส้นประสีเขียว) จำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าสู่สมดุลจะยังอยู่ภายใต้เกณฑ์ที่กำหนดไว้ 1 วินาที หรือ 100 รอบ (เส้นประสีชมพู)



ภาพที่ 39 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 7 คัน ที่ความยาวยานพาหนะแตกต่างกัน



ภาพที่ 40 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 7 คัน เฉพาะช่วงที่ความรวดเร็วในการปรับเวลา 50% ของทั้งจากการทดลองเดิมและการทดลองใหม่นี้



ภาพที่ 41 ผลการทดลองแสดงจำนวนรอบที่ใช้ลู่เข้าจุดสมดุลสำหรับระบบที่มียานพาหนะ 7 คัน เฉพาะช่วงที่ความรวดเร็วในการปรับเวลา 80% ของทั้งจากการทดลองเดิมและการทดลองใหม่นี้

เนื่องจากว่าความยาวของยานพาหนะจะทำให้ความยาวของขบวนยานพาหนะมีการเปลี่ยนแปลง แต่ระยะการส่งข้อมูลยังมีอยู่เท่าเดิม ถ้าหากว่าความยาวของยานพาหนะนั้นยาวจนทำให้ความยาวของขบวนยานพาหนะนั้นยาวกว่าระยะการส่งข้อมูล ก็จะส่งผลให้จำนวนยานพาหนะที่สามารถรองรับได้ลดลง ซึ่งก็ถือว่าเป็นข้อจำกัดอันเนื่องมาจากระยะการส่งข้อมูล แต่ในทางกลับกันถ้าหากว่าความยาวของยานพาหนะแต่ละคันนั้นสั้นจนสามารถมีจำนวนยานพาหนะภายในระยะการส่งข้อมูลมากขึ้นซึ่งอาจจะเกินกว่าขีดจำกัดของการดีซิงโครไนเซชั่นที่เราหามาได้ในการทดลองเดิม ก็จะไม่สามารถรองรับจำนวนยานพาหนะได้มากกว่า 16 คันที่ความถี่ในการส่ง 100 ข้อความต่อวินาทีได้ ซึ่งเป็นข้อจำกัดของระบบแบบดีซิงโครไนเซชั่นและช่องสัญญาณ ถ้าหากมีความต้องการที่จะรองรับยานพาหนะมากกว่า 16 คัน ก็มีความจำเป็นที่จะต้องลดความถี่ในการส่งข้อความให้น้อยลงเพื่อให้ช่องสัญญาณว่างมากขึ้นจนสามารถรองรับยานพาหนะเพิ่มเติมได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากว่านี่เป็นเพียงแค่ขั้นแรกของการนำดีซิงโครไนเซชั่นไปใช้กับขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งทดสอบกับขบวนยานพาหนะเพียงแค่ขบวนเดียว ในการนำไปใช้งานจริง ๆ นั้นอาจจะมีกลุ่มที่ต้องการใช้งานขบวนยานพาหนะหลากหลายขบวนและยังมีแอพพลิเคชั่นอื่น ๆ สำหรับยานพาหนะที่จำเป็นต้องใช้งานช่องสัญญาณการสื่อสารร่วมกันอีกด้วย จึงควรมีการจำลองร่วมกับการใช้งานแอพพลิเคชั่นอื่น ๆ เพิ่มเติม ทั้งในกรณีที่แยกใช้ช่องสัญญาณระหว่างการใช้งานขบวนยานพาหนะขับเคลื่อนอัตโนมัติกับแอพพลิเคชั่นอื่น ๆ และกรณีที่ใช้ช่องสัญญาณร่วมกันหรือมีการสลับการใช้งานช่องสัญญาณสำหรับแต่ละแอพพลิเคชั่นไปมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

[1] D. Schrank, B. Eisele, and T. Lomax, "TTI's 2012 urban mobility report," *Texas A&M Transportation Institute. The Texas A&M University System,* p. 4, 2012.

[2] A. Kesting and M. Treiber, "How reaction time, update time, and adaptation time influence the stability of traffic flow," *Computer ‐ Aided Civil and Infrastructure Engineering,* vol. 23, no. 2, pp. 125-137, 2008.

[3] P. Fernandes and U. Nunes, "Platooning With IVC-Enabled Autonomous Vehicles: Strategies to Mitigate Communication Delays, Improve Safety and Traffic Flow," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,* vol. 13, no. 1, pp. 91-106, 2012.

[4] D. Jiang and L. Delgrossi, "IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments," in *VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference*, 2008, pp. 2036-2040.

[5] K. Bilstrup, E. Uhlemann, E. G. Strom, and U. Bilstrup, "Evaluation of the IEEE 802.11p MAC Method for Vehicle-to-Vehicle Communication," in *2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference*, 2008, pp. 1-5.

[6] K. Sjöberg, E. Uhlemann, and E. G. Ström, "Delay and interference comparison of CSMA and self-organizing TDMA when used in VANETs," in *2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, 2011, pp. 1488-1493.

[7] L. N. Hoang, E. Uhlemann, and M. Jonsson, "A framework for reliable exchange of periodic and event-driven messages in platoons," in *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, 2015, pp. 2471-2476.

[8] A. Balador, A. Bohm, E. Uhlemann, C. T. Calafate, and J. C. Cano, "A Reliable Token-Based MAC Protocol for Delay Sensitive Platooning Applications," in *2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall)*, 2015, pp. 1-5.

[9] J. Degesys, I. Rose, A. Patel, and R. Nagpal, "DESYNC: Self-Organizing Desynchronization and TDMA on Wireless Sensor Networks," in *2007 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 2007,

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

pp. 11-20.

[10] T. Settawatcharawanit, S. Choochaisri, C. Intanagonwiwat, and K. Rojviboonchai, "V-DESYNC: Desynchronization for Beacon Broadcasting on Vehicular Networks," in *2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2012, pp. 1-5.

[11] G. F. Riley and T. R. Henderson, "The ns-3 Network Simulator," in *Modeling and Tools for Network Simulation*, K. Wehrle, M. Güneş, and J. Gross, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 15-34.

[12] M. Segata, S. Joerer, B. Bloessl, C. Sommer, F. Dressler, and R. L. Cigno, "Plexe: A platooning extension for Veins," in *2014 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2014, pp. 53-60.

[13] D. Buranapanichkit, N. Deligiannis, and Y. Andreopoulos, "Convergence of Desynchronization Primitives in Wireless Sensor Networks: A Stochastic Modeling Approach," *IEEE Transactions on Signal Processing,* vol. 63, no. 1, pp. 221-233, 2015.

[14] Y. D. Wong and P. K. Goh, "Perception-braking response time of unalerted drivers at signalized intersections," *ITE Journal (Institute of Transportation Engineers),* Article vol. 71, no. 6, pp. 73-76, 2001.

[15] J. Y. Wong, *Theory of Ground Vehicles*. Wiley, 1993.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วิศทัศน์ ดียิ่ง
วัน เดือน ปี เกิด	22 มิถุนายน พ.ศ. 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วิศวกรรมคอมพิวเตอร์) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	364 ถนนรังสิต-นครนายก 27 ตำบลประชาธิปัตย์ อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12130
ผลงานตีพิมพ์	V. Deeying, K. Kawila, K. N. Nakorn and K. Rojviboonchai, "A study of vehicular desynchronization for platooning application," 2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT), Chengdu, 2017, pp. 1482-1486.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY