



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์บนโทรศัพท์เคลื่อนที่สำหรับระบบข้อมูลจราจร
แบบไม่พึ่งพาโครงสร้างพื้นฐาน

Mobile Sensing for Infrastructureless Traffic Information System

สุขสันต์ พาณิชพาพิบูล

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน
ประจำปีงบประมาณ 2558

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์บนโทรศัพท์เคลื่อนที่สำหรับระบบข้อมูลจราจร
แบบไม่พึ่งพาโครงสร้างพื้นฐาน

Mobile Sensing for Infrastructureless Traffic Information System

สุขสันต์ พาณิชพาพิบูล

RCH
87437
2558

12๗๗45๗1

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 142228
รับเดือนปี 27 1๒๗ 255๙

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน
ประจำปีงบประมาณ 2558

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์บนโทรศัพท์เคลื่อนที่สำหรับระบบข้อมูลจราจรแบบไม่พึ่งพาโครงสร้างพื้นฐาน

แหล่งเงิน เงินงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2558

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 1,000,000 บาท

ระยะเวลาการวิจัย 1 ปี

ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2557 ถึง 30 กันยายน 2558

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการวิจัย

นายสุขสันต์ พาณิชพาพิบูล

คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ข้อมูลสภาพการจราจรบนท้องถนนมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อผู้ใช้รถใช้ถนน การทราบข้อมูลจราจร เช่น ความหนาแน่นของยานพาหนะ อัตราความเร็วเฉลี่ยของรถที่วิ่งบนถนนแต่ละเส้น อัตราการไหล ย่อมทำให้ผู้ขับขี่สามารถตัดสินใจในการเลือกใช้เส้นทางได้อย่างชาญฉลาดมากขึ้น ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบรรเทาปัญหาการจราจรติดขัดได้

ในระบบข้อมูลจราจรที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ข้อมูลจราจรต่างๆ เช่น ความหนาแน่นของยานพาหนะและความเร็วของของพาหนะนั้นคำนวณได้จากการตรวจจับพาหนะซึ่งเคลื่อนที่ผ่านเครื่องตรวจจับชนิดต่างๆ เช่น วงแหวนเหนี่ยวนำ (Inductive Loop Detector) หรือกล้องบันทึกภาพ (Surveillance Camera) อย่างไรก็ตาม การเก็บข้อมูลจราจรโดยวิธีนี้จำเป็นต้องอาศัยการวางระบบโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) ที่มีราคาสูง และใช้เวลานานในการติดตั้ง อีกทั้งยังก่อให้เกิดความไม่สะดวก นอกจากนี้การบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ติดตั้งไปแล้วยังทำได้อย่างยากลำบาก

โครงการวิจัยนี้มีแนวคิดใหม่ในการสร้างระบบเก็บรวบรวมข้อมูลสภาพจราจรโดยไม่ต้องพึ่งพาการติดตั้งโครงสร้างพื้นฐานซึ่งมีราคาแพง ซึ่งสามารถทำได้โดยการให้ยานพาหนะสามารถเป็นผู้เก็บรวบรวมข้อมูลเองและส่งต่อข้อมูลนั้นไปยังศูนย์ข้อมูล ซึ่งโครงการวิจัยนี้มีแนวคิดในการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่มาเป็นอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลสภาพการจราจรและส่งต่อข้อมูลนั้นออกไป เนื่องจากปัจจุบันโทรศัพท์เคลื่อนที่ประเภทสมาร์ทโฟน (Smartphone) ได้ถูกพัฒนาขีดความสามารถในการคำนวณไปอย่างมากและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย นอกจากนี้โทรศัพท์ประเภทสมาร์ทโฟนยังมีอุปกรณ์ตรวจจับหรือเซ็นเซอร์ชนิดต่างๆ มากมายที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เก็บข้อมูลจราจรได้ เช่น เซ็นเซอร์สำหรับระบุพิกัดบนพื้นโลก (Global Positioning System, GPS), เซ็นเซอร์สำหรับวัดความเร่ง (Accelerometer), กล้องถ่ายภาพ ฯลฯ หากเรานำความสามารถของอุปกรณ์ตรวจจับที่อยู่บนโทรศัพท์เคลื่อนที่เหล่านี้มาประยุกต์ใช้ ก็จะสามารถประมวลผลและเก็บข้อมูลจราจรต่างๆ เช่น ความเร็วเฉลี่ยของรถบนถนนและความหนาแน่นได้โดยไม่ต้องพึ่งพากระบวนโครงสร้างพื้นฐานอย่างที่ใช้กันอยู่ในระบบปัจจุบัน

คำสำคัญ : ระบบข้อมูลจราจรแบบไม่พึ่งพาโครงสร้างพื้นฐาน, การตรวจจับข้อมูลจราจร, เซ็นเซอร์เคลื่อนที่
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title: Mobile Sensing for Infrastructureless Traffic Information System

Type of Fund: National Budget

Fiscal Year: 2015

Amount of Fund: 1,000,000 THB

Duration: 1 Year

From: 1 October 2014 **To:** 30 September 2015

Principal Investigator:

Sooksan Panichpapiboon

Faculty of Information Technology

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ABSTRACT

Traffic information system is essential for solving a traffic problem. Real-time traffic information such as average speed of vehicles, vehicle density, flow rate, and travel time can help motorists choose a route more wisely. Currently, most of the traffic information systems are an infrastructure-based system, where traffic data are collected from fixed sensors such as inductive loop detectors and surveillance cameras. However, it usually takes a great deal of time and effort to install sensors in such a system. In many cases, this involves digging up the road surface to implant the sensors underneath it. In addition, it is extremely costly to install sensors to cover a large area (e.g., city-wide coverage). Moreover, maintenance of these large number of fixed sensors is also difficult. The system could be made much more effective and less expensive if the traffic information could be collected and distributed by the vehicles on the road.

With the advances in wireless communication and mobile computing, a future *infrastructureless* self-organizing traffic information system in a form of vehicular ad hoc networks will soon be realized. In an infrastructureless traffic information system, vehicles will act as mobile sensors and collect the traffic data as they travel. In our perspective, smartphones are a great choice for mobile traffic sensing devices. Smartphones are now equipped with a variety of sensors such as global positioning system (GPS) receiver, accelerometer, gyroscope, camera, and microphone. These sensors can be exploited to collect traffic data. In this research project, we explore a possibility of using sensors on a smartphone for traffic sensing.

Keywords : Infrastructureless traffic information system, traffic sensing, mobile sensors

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้หัวหน้าโครงการต้องฟันฝ่าอุปสรรคอย่างมากในการดำเนินงานให้สำเร็จตามเป้าหมายภายในระยะเวลาที่กำหนด ปัญหาอุปสรรคที่พบนั้นมีตั้งแต่เรื่องของงบประมาณที่ได้รับการจัดสรรอย่างล่าช้ามาก ไปจนกระทั่งความไม่สะดวกและข้อขัดข้องต่างๆ ซึ่งเป็นผลจากกฎระเบียบขั้นตอนอันล้าสมัยที่ไม่เอื้ออำนวยกับการทำงานวิจัย อย่างไรก็ตาม อุปสรรคเหล่านี้ยังนับว่าเล็กน้อยมากเมื่อเทียบกับอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากหน่วยงานต้นสังกัดของหัวหน้าโครงการ ซึ่งไม่ได้ให้การสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ตามที่สมควร ปัญหาที่หนักที่สุดคือการไม่สนับสนุนสถานที่เพื่อทำการวิจัย

ก่อนที่จะเริ่มโครงการนี้ หัวหน้าโครงการวิจัยได้ยื่นเรื่องต่อคณบดีคณะเทคโนโลยีสารสนเทศ เพื่อขอความอนุเคราะห์ใช้สถานที่ในการทำวิจัย โดยขอใช้ห้องว่างที่ปกติไม่มีการใช้งานมาเป็นสถานที่สำหรับจัดวางครุภัณฑ์และเป็นสถานที่ทำงานของผู้ช่วยนักวิจัยในโครงการ แต่ด้วยความมีอคติ ความไร้วิสัยทัศน์ ความไม่เป็นมืออาชีพ และด้วยระบบอุปถัมภ์อันชั่วร้ายที่แทรกซึมอยู่ในระบบการบริหารองค์กร ทำให้โครงการนี้ไม่ได้รับการอนุเคราะห์พื้นที่เพื่อทำการวิจัยแม้ว่าโครงการนี้จะไม่ต้องพึ่งพาการสนับสนุนด้านงบประมาณหรือด้านอื่นๆจากคณะเลยก็ตาม เมื่อสอบถามไปก็มักจะได้รับ การบ่ายเบี่ยงด้วยข้ออ้างต่างๆ เช่น ห้องยังไม่พร้อมใช้งานต้องนำมาปรับปรุงก่อน หรือ ยังต้องรองบ งบประมาณในการมาปรับปรุงห้อง เป็นต้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้วคณะมีห้องที่พร้อมนำมาใช้งานได้ทันที และถึงปัจจุบันเวลาก็ได้ล่วงเลยไปมากกว่า 1 ปีแล้ว แต่ก็ยังไม่ได้มีการปรับปรุงห้องดังที่กล่าวอ้าง ข้ออ้างเหล่านี้สวนทางกับการเอื้อประโยชน์ให้พวกพ้องของผู้บริหารตามที่ปรากฏอย่างชัดเจน ดังจะเห็นได้จากการจัดสรรห้องวิจัยให้แก่กลุ่มผู้บริหารหรือบุคคลที่เป็นพรรคพวกของตนพร้อมทั้ง มอบเงินงบประมาณของคณะไปสนับสนุนให้แก่บุคคลเหล่านั้นอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม แม้จะต้องพบกับอุปสรรคมากมายแต่โครงการนี้ก็ยังสามารถดำเนินการจนมี ผลสำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายที่วางไว้และเสร็จสิ้นภายในเวลาที่กำหนด ซึ่งหัวหน้าโครงการต้องขอขอบคุณผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งหลายที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้

ขอขอบคุณในความเอื้อเฟื้อด้านสถานที่จาก ผศ.ดร.สุเมธ ประภาวัต ซึ่งได้แบ่งปันพื้นที่บางส่วนในห้องวิจัยของท่านให้ใช้งาน ทำให้มีที่จัดวางครุภัณฑ์และเครื่องมือสำหรับทำการวิจัย นับเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้โครงการวิจัยนี้สามารถดำเนินไปได้

ขอขอบคุณผู้ช่วยนักวิจัยในโครงการนี้ ได้แก่ นายพุทธิพงษ์ เล็กขาว และ นายชัยภูมิ ศิริพันธ์ พรชนะ ซึ่งได้ช่วยทำงานวิจัยตามที่ได้รับมอบหมายด้วยความตั้งใจและความรับผิดชอบอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ได้ให้ความไว้วางใจและ สนับสนุนเงินทุนวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินปี 2558 ให้แก่โครงการวิจัยนี้

สุขสันต์ พาณิชพาพิบูล
หัวหน้าโครงการวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัยและผลการศึกษา.....	5
3.1 ขั้นตอนการวิจัย.....	5
3.2 ผลการศึกษา.....	14
บทที่ 4 บทสรุป	21
4.1 สรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัย	21
4.2 สรุปผลผลิตที่ได้จากโครงการวิจัย	22
เอกสารอ้างอิง	23
ภาคผนวก.....	26
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่จากโครงการวิจัย	27
ประวัตินักวิจัย	43

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 จำนวนครั้งในการหยุดและระยะเวลาในการหยุดของยานพาหนะ เปรียบเทียบข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร่งและข้อมูลที่บันทึกมาจากการสังเกตจริง	15
3.2 ความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์การถดถอยในแต่ละระดับความเร็วที่น่าพอใจ	17
3.3 ความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบของช่วงเวลาในแต่ละระดับความเร็วที่น่าพอใจ	19



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 เส้นทางในเมืองบริเวณเขตปทุมวัน.....	7
3.2 เส้นทางในเมืองบริเวณเขตลาดพร้าว.....	7
3.3 เส้นทางถนนที่ไม่ได้อยู่ในเมือง บริเวณทางหลวงพิเศษหมายเลข 7.....	7
3.4 (a) ความเร็วอ้างอิงของยานพาหนะ (b) สถานะของยานพาหนะซึ่งจำแนกโดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร็ว.....	9
3.5 ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะและเวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ได้ในช่วงเวลา 360 วินาที.....	10
3.6 ตัวอย่างของลำดับสถานะ.....	12
3.7 ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะในแต่ละความยาวของช่วงเวลาที่เคลื่อนที่ได้.....	13
3.8 ค่า MAE ของความเร็วเฉลี่ยที่ประเมินจากวิธีการวิเคราะห์การถดถอย ค่า T ในการพิจารณา คือ 360 วินาที.....	17
3.9 ค่า MAE ของความเร็วเฉลี่ยที่ประเมินจากวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบของช่วงเวลา และค่า MAE ของความเร็วเฉลี่ยที่ประเมินจากวิธีการวิเคราะห์การถดถอย ค่า T ในการพิจารณา คือ 360 วินาที.....	19
3.10 ความแม่นยำของวิธีการประเมินด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบของช่วงเวลาเมื่อมีการใช้ค่าปรับสมดุลข้อมูลในแต่ละระดับความเร็วที่น่าพอใจ โดยวิเคราะห์ที่ระยะเวลา $T = 360$ วินาที.....	20

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้อมูลสภาพการจราจรบนท้องถนนมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อผู้ใช้รถใช้ถนน การทราบข้อมูลจราจร เช่น ความหนาแน่นของยานพาหนะ อัตราความเร็วเฉลี่ยของรถที่วิ่งบนถนนแต่ละเส้น อัตราการไหล ตลอดจนระยะเวลาในการเดินทางผ่านถนนแต่ละเส้นย่อมทำให้ผู้ขับขี่สามารถตัดสินใจในการเลือกใช้เส้นทางได้อย่างชาญฉลาดมากขึ้น ซึ่งจะเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการบรรเทาปัญหาการจราจรติดขัดได้

ในระบบข้อมูลจราจรที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ข้อมูลจราจรต่างๆ เช่น ความหนาแน่นของยานพาหนะและความเร็วของของพาหนะนั้นคำนวณได้จากการตรวจจับพาหนะซึ่งเคลื่อนที่ผ่านเครื่องตรวจจับชนิดต่างๆ เช่น วงแหวนเหนี่ยวนำ (Inductive Loop Detector) หรือกล้องบันทึกภาพ (Surveillance Camera) อย่างไรก็ตาม การเก็บข้อมูลจราจรโดยวิธีนี้จำเป็นต้องอาศัยการวางระบบโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure) ที่มีราคาสูง และใช้เวลานานในการติดตั้ง อีกทั้งยังก่อให้เกิดความไม่สะดวก เช่น ในกรณีที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับไว้ใต้ผิวถนนก็จะต้องมีการขุดเจาะถนน ทำให้เสียเวลาและงบประมาณเป็นจำนวนมากต่อการติดตั้งแต่ละครั้ง นอกจากนี้การบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ติดตั้งไปแล้วยังทำได้ยากลำบาก เช่น การจะซ่อมแซมกล้องวงจรปิดที่ติดตั้งอยู่ที่สูงก็ทำได้ยากหรือการขุดเจาะผิวถนนเพื่อซ่อมแซมหรือเปลี่ยนวงแหวนเหนี่ยวนำก็จะสร้างความยากลำบากมาก

โครงการวิจัยนี้มีแนวคิดใหม่ในการสร้างระบบเก็บรวบรวมข้อมูลสภาพจราจรโดยไม่ต้องพึ่งพาการติดตั้งโครงสร้างพื้นฐานซึ่งมีราคาแพง ซึ่งสามารถทำได้โดยการให้ยานพาหนะสามารถเป็นผู้เก็บรวบรวมข้อมูลเองและส่งต่อข้อมูลนั้นไปยังศูนย์ข้อมูล ซึ่งโครงการวิจัยนี้มีแนวคิดในการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่มาเป็นอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลสภาพการจราจรและส่งต่อข้อมูลนั้นออกไป เนื่องจากปัจจุบันโทรศัพท์เคลื่อนที่ประเภทสมาร์ตโฟน (Smartphone) ได้ถูกพัฒนาขีดความสามารถในการคำนวณไปอย่างมากและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย นอกจากนี้โทรศัพท์ประเภทสมาร์ตโฟนยังมีอุปกรณ์ตรวจจับหรือเซ็นเซอร์ (Sensor) ชนิดต่างๆ มากมายที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เก็บข้อมูลจราจรได้ เช่น เซ็นเซอร์สำหรับระบุพิกัดบนพื้นโลก (Global Positioning System, GPS), เซ็นเซอร์สำหรับวัดความเร่ง (Accelerometer), เซ็นเซอร์สำหรับวัดเสียง (ไมโครโฟน), เซ็นเซอร์สำหรับจับภาพ (กล้องถ่ายภาพ) ฯลฯ หากเรานำความสามารถของอุปกรณ์ตรวจจับที่อยู่บนโทรศัพท์เคลื่อนที่เหล่านี้มาประยุกต์ใช้ ก็จะสามารถประมวลผลและเก็บข้อมูลจราจรต่างๆ เช่น ความเร็วเฉลี่ยของรถบนถนนและความหนาแน่นได้โดยไม่ต้องพึ่งพากระบวนโครงสร้างพื้นฐานอย่างที่ใช้กันอยู่ในระบบปัจจุบัน

เนื่องจากข้อมูลที่เก็บได้โดยวิธีการที่คิดค้นขึ้นใหม่นี้จะเป็นสภาพการจราจรแบบเวลาจริง (Real-time) และเป็นการรวบรวมข้อมูลในลักษณะการรวมข้อมูลจากกลุ่มชน (Crowd Sourcing) ทำให้ข้อมูลที่ได้มีความเป็นปัจจุบันและแม่นยำถูกต้องมากขึ้น นอกจากนี้วิธีที่นำเสนอใหม่ยังมีข้อได้เปรียบระบบข้อมูลจราจรที่ใช้ในปัจจุบัน คือสามารถเก็บข้อมูลได้ครอบคลุมพื้นที่ที่กว้างขวางมากขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ระบบปัจจุบันมีกล้องสำหรับเก็บข้อมูลจราจรในพื้นที่ที่จำกัดเท่านั้น ไม่สามารถครอบคลุมถนนทุกเส้น การใช้เซ็นเซอร์บนโทรศัพท์เคลื่อนที่จะทำให้เก็บข้อมูลได้ในทุกพื้นที่ที่รถสามารถเคลื่อนไปถึง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาวิธีการเก็บและประมวลผลข้อมูลจราจรโดยประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์บนโทรศัพท์เคลื่อนที่ประเภทสมาร์ทโฟน
2. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพความแม่นยำของข้อมูลจราจรที่เก็บได้จากเซ็นเซอร์บนโทรศัพท์เคลื่อนที่ประเภทสมาร์ทโฟน
3. เพื่อสร้างต้นแบบระบบข้อมูลจราจรที่ไม่ต้องพึ่งพาโครงสร้างพื้นฐาน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. งานวิจัยนี้จะพัฒนาวิธีการเก็บและประมวลผลข้อมูลจราจรโดยประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ต่างๆ ที่มีอยู่บนโทรศัพท์เคลื่อนที่ประเภทสมาร์ทโฟน
2. ต้นแบบระบบข้อมูลจราจรที่พัฒนาขึ้นสามารถเก็บ ประมวลผล และรายงานข้อมูลจราจรบนถนนจริงให้แก่ผู้ใช้งานได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้องค์ความรู้ใหม่และวิธีการใหม่ในการสังเคราะห์ข้อมูลจราจรจากข้อมูลที่เก็บได้จากเซ็นเซอร์บนโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบสมาร์ทโฟน เป็นประโยชน์ด้านวิชาการ และด้านการประยุกต์ใช้งาน
2. ได้ต้นแบบของนวัตกรรมใหม่ซึ่งก็คือระบบข้อมูลจราจรแบบไม่พึ่งพาโครงสร้างพื้นฐาน ช่วยบรรเทาปัญหาการจราจร เป็นประโยชน์ด้านสังคมและชุมชน
3. ได้ผลงานเผยแพร่ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติและ/หรือการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ เป็นประโยชน์ด้านวิชาการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การจราจรติดขัดเป็นปัญหาสำคัญของเมืองใหญ่ๆ ทั่วโลก นอกจากจะส่งผลให้เกิดความล่าช้าในการเดินทางแล้ว การจราจรติดขัดยังทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรโดยเฉพาะด้านพลังงานอย่างมหาศาล ตามรายงานการศึกษาของสถาบันการขนส่งแห่งรัฐเท็กซัส (Texas Transportation Institute) พบว่าในปี ค.ศ. 2010 ความสูญเสียที่เกิดขึ้นจากการจราจรติดขัดในเมืองต่างๆ ในประเทศสหรัฐอเมริกาประเมินเป็นมูลค่ารวมได้ราว 1.15 แสนล้านดอลลาร์ [1] แน่หน่อนว่าการแก้ปัญหาการจราจรที่ได้ผลอย่างยั่งยืนในระยะยาวคือ การจำกัดปริมาณพาหนะที่อนุญาตให้วิ่งบนถนน ซึ่งต้องอาศัยเวลานานกว่าจะประสบผล ดังนั้นการบรรเทาปัญหาจราจรเฉพาะหน้าในระยะสั้นจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง การมีระบบข้อมูลจราจรที่ดีจะช่วยให้ผู้ขับขี่สามารถตัดสินใจเลือกเวลาและเส้นทางที่จะใช้สัญจรได้ดีขึ้น ทำให้การระบายความแออัดเป็นไปได้ดีขึ้น บ่อยครั้งที่ผู้ขับขี่ต้องติดขัดอยู่บนถนนโดยไม่มีทางเลือกอื่นที่สามารถใช้เส้นทางอื่นที่ติดขัดน้อยกว่าไปยังจุดหมายได้ นี่เกิดมาจากการที่ไม่ได้รับข้อมูลจราจรที่ถูกต้องนั่นเอง

ระบบข้อมูลจราจรนั้นสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบคือ แบบที่ต้องพึ่งพาโครงสร้างพื้นฐานและแบบที่ไม่ต้องพึ่งพาโครงสร้างพื้นฐาน [2] ระบบข้อมูลจราจรที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันเป็นระบบข้อมูลจราจรแบบที่พึ่งพาโครงสร้างพื้นฐาน กล่าวคือ จำเป็นต้องมีการติดตั้งตัวตรวจวัดหรือเซ็นเซอร์สำหรับเก็บข้อมูลไว้ตามถนน เช่น เซ็นเซอร์ที่พบเห็นได้บ่อยก็เช่น กล้องวงจรปิด ซึ่งภาพหรือวิดีโอที่กล้องเก็บได้ก็จะถูกส่งไปประมวลผลที่ศูนย์ข้อมูลอีกครั้งด้วยวิธีการประมวลผลภาพเพื่อให้ได้ข้อมูลจราจรที่ต้องการออกมา [3]-[9] เช่น อาจหาความเร็วเฉลี่ยของพาหนะ หรืออาจหาความหนาแน่นของพาหนะบนถนนจากภาพที่เก็บได้จากกล้อง อย่างไรก็ตาม การพึ่งพาโครงสร้างพื้นฐานก็มีข้อเสียและข้อจำกัดอยู่ กล่าวคือ มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งที่สูง มีความยากต่อการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่ติดตั้งไปแล้ว และไม่สามารถติดตั้งให้ครอบคลุมได้ทุกพื้นที่หรือทุกถนน

โครงการวิจัยนี้ได้เล็งเห็นถึงปัญหาของระบบข้อมูลจราจรแบบที่พึ่งพาโครงสร้างพื้นฐานดังกล่าวข้างต้น ดังนั้นจึงมีแนวความคิดที่จะสร้างระบบข้อมูลจราจรแบบไม่ต้องพึ่งพาโครงสร้างพื้นฐานขึ้น ซึ่งในระบบนี้จะอาศัยเซ็นเซอร์ต่างๆบนโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบสมาร์ตโฟนเป็นตัวเก็บข้อมูลและส่งข้อมูลเข้าสู่ศูนย์ข้อมูลเพื่อประมวลผล

ปัจจุบันโทรศัพท์สมาร์ตโฟนถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัด (Sensing Device) ในงานหลากหลายประเภท ยกตัวอย่างเช่น นำมาใช้ในการตรวจจับการจราจร, การตรวจสอบสุขภาพ, ตรวจสอบด้านสิ่งแวดล้อม รวมไปถึงทางด้านสังคม [10] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตรวจจับทางด้านการจราจร ที่เริ่มได้รับความสนใจในการนำเซ็นเซอร์บนโทรศัพท์สมาร์ตโฟนมาใช้ในงานด้านดังกล่าวมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่นในงานวิจัย [11] ซึ่งเป็นงานวิจัยที่น่าถกเถียงบนโทรศัพท์สมาร์ตโฟนมาใช้ในการตรวจจับสัญญาณไฟจราจร และในงานวิจัย [12] เป็นการใช้อย่างไรก็ตามโทรศัพท์สมาร์ตโฟนเพื่อตรวจสอบความคับคั่งของการจราจรในประเทศอินเดีย เนื่องจากโดยทั่วไปผู้ขับขี่รถยนต์ในประเทศอินเดียนั้นจะนิยมที่จะบีบแตรเมื่อการจราจรคับคั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลจราจรที่มีกวดได้จากการใช้เซ็นเซอร์บนโทรศัพท์มือถือ คือ ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะ โดยส่วนมากการระบุความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะนั้นจะมุ่งเน้นไปในการใช้เซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอสเป็นหลัก ยกตัวอย่างเช่นระบบที่นำเสนอใน [13] ซึ่งยานพาหนะจะส่งพิกัดที่อยู่ปัจจุบันขึ้นไปยังเซิร์ฟเวอร์กลางเป็นช่วงๆ และเซิร์ฟเวอร์กลางจะทำหน้าที่คำนวณหาตำแหน่งพิกัดของยานพาหนะเพื่อคำนวณความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะบนเส้นทางนั้นๆ เช่นเดียวกับการศึกษาอื่นๆที่คล้ายคลึงกันในการใช้เซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอสเพื่อคำนวณความเร็วใน [14]-[16] และตัวอย่างของการใช้เซ็นเซอร์บนโทรศัพท์มือถือในการตรวจจับข้อมูลการจราจรร่วมกับการแชร์ข้อมูลการจราจรด้วยมนุษย์ จะสามารถดูได้จากโปรแกรมประยุกต์ [17] ซึ่งเป็นโปรแกรมประยุกต์ที่ทำการแสดงผลข้อมูลการจราจรจากผู้ใช้หลายๆคนที่รายงานเข้ามาผ่านทางโปรแกรมประยุกต์ ไม่ว่าจะเป็นรถติด อุบัติเหตุ ไปจนกระทั่งสภาพอากาศ เช่น ฝนตก เป็นต้น และยังมีในส่วนของ การบอกความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะที่วิ่งได้จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งได้มาจากการใช้การระบุความเร็วเฉลี่ยด้วยเซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอสร่วมด้วย แต่อย่างไรก็ตามการใช้เซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอสบนโทรศัพท์มือถือในงานด้านการจราจรนั้นจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมาก เนื่องจากเซ็นเซอร์ดังกล่าวเป็นเซ็นเซอร์ที่ใช้พลังงานในการทำงานมากเป็นลำดับต้นๆในทุกเซ็นเซอร์ที่มีอยู่บนโทรศัพท์มือถือ [18]

สำหรับการใช้งานเซ็นเซอร์วัดความเร็วในงานด้านการจราจรนั้น จะมีการใช้ในการตรวจสอบสภาพพื้นผิวถนน ยกตัวอย่างเช่น หลุม, ทางรถไฟ, หรือฝาท่อระบายน้ำ [19] หรือใช้ในการตรวจสอบการชนและการเบรก [20] และใน [21]-[23] เป็นการใช้งานเซ็นเซอร์วัดความเร็วบนโทรศัพท์มือถือในการระบุพฤติกรรมรถของผู้ขับขี่ เช่น ใช้เป็นการระบุว่าผู้ขับขี่มีพฤติกรรมการขับขี่แบบปลอดภัยหรืออันตราย เป็นต้น และในส่วนของโปรแกรมประยุกต์ [23] นั้นสามารถรายงานความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะได้ด้วย แต่อย่างไรก็ตามความเร็วเฉลี่ยที่รายงานผ่านโปรแกรมประยุกต์นี้ ยังคงใช้การหาความเร็วเฉลี่ยจากเซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอสอยู่ และใน [24] มีการใช้เซ็นเซอร์วัดความเร็วในการตรวจสอบจำนวนครั้งในการหยุดของยานพาหนะ ซึ่งถ้าหากมีจำนวนครั้งในการหยุดที่มากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ก็จะมีแนวโน้มว่าการจราจรคับคั่ง แต่อย่างไรก็ตามในงานดังกล่าวไม่สามารถที่จะประเมินหาความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะหรือชี้วัดปริมาณการจราจรได้ นอกเหนือจากนี้ยังมีโปรแกรมประยุกต์บนโทรศัพท์มือถือที่ใช้งานเซ็นเซอร์วัดความเร็วในการประเมินหาความเร็ว [25] แต่อย่างไรก็ตามงานดังกล่าวไม่ได้มีการระบุวิธีการทำงาน รวมไปถึงความแม่นยำก็ยังไม่ได้รับการประเมินหรือตรวจสอบแต่อย่างใด

ในงานวิจัยนี้ เราจะสร้างความแตกต่างจากแนวคิดที่มีมาในงานวิจัยก่อนๆโดยการประยุกต์ใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร็วในการประมาณค่าความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะ ซึ่งจะได้นำเสนอสองวิธีการประมาณค่า และเปรียบเทียบความความแม่นยำในการประมาณค่าของวิธีการทั้งสองวิธี

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัยและผลการศึกษา

ตามที่ได้อธิบายแล้วว่า เซ็นเซอร์ที่อยู่บนบนโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบสมาร์ตโฟนนั้นมีให้เลือกใช้งานหลายประเภท ในงานวิจัยนี้เราได้เลือกเซ็นเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) มาศึกษาเป็นอันดับแรก เนื่องจากเซ็นเซอร์วัดความเร่งนั้นใช้พลังงานน้อยที่สุดในบรรดาเซ็นเซอร์ที่มีอยู่บนโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบสมาร์ตโฟน [18] ซึ่งมีการรายงานว่าเซ็นเซอร์วัดความเร่งนั้นใช้พลังงานน้อยกว่าเซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอสถึง 6 เท่า

เป้าหมายหลักของงานวิจัยชิ้นนี้คือ การหาวิธีประเมินความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะบนถนนโดยใช้ข้อมูลที่เก็บและตรวจวัดได้จากเซ็นเซอร์วัดความเร่ง ซึ่งคำถามหลักที่เรามุ่งหาคำตอบคือ

- มีความเป็นไปได้หรือไม่ในการที่จะประเมินหาความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะโดยใช้ข้อมูลที่เก็บได้จากเซ็นเซอร์วัดความเร่ง
- ถ้าหากมีความเป็นไปได้ วิธีการที่ใช้คืออะไร และมีความแม่นยำของการประเมินมากน้อยเพียงใด

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

ในส่วนของขั้นตอนการวิจัยจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ส่วนหลักๆ โดยส่วนแรกจะอธิบายเกี่ยวกับสมมติฐานเบื้องต้นที่นำไปสู่การทดลอง ส่วนที่สองจะอธิบายเกี่ยวกับวิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลการจราจรด้วยเซ็นเซอร์วัดความเร่งบนโทรศัพท์สมาร์ตโฟน ส่วนที่สามจะอธิบายถึงวิธีการจำแนกสถานะของยานพาหนะ ส่วนที่สี่จะอธิบายเกี่ยวกับวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะโดยวิธีวิเคราะห์การถดถอย และส่วนสุดท้ายจะอธิบายวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะโดยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบของช่วงเวลา

3.1.1 สมมติฐานเกี่ยวกับรูปแบบการเคลื่อนที่ของยานพาหนะและการประเมินหาความเร็ว

หนึ่งในตัวชี้วัดสภาพการจราจรคือความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะที่กำลังเดินทางบนท้องถนน ซึ่งแน่นอนว่าในสภาพการจราจรที่แออัดนั้น ยานพาหนะจะมีความเร็วเฉลี่ยที่น้อยกว่าในสภาพการจราจรที่คล่องตัว ซึ่งผู้วิจัยตั้งสมมติฐานว่า ความเร็วของยานพาหนะนั้นมีความสัมพันธ์กับความถี่ในการหยุดและระยะเวลาที่ใช้ในการหยุดแต่ละครั้ง เช่นสภาพการจราจรที่แออัดยานพาหนะก็จะมี การหยุดบ่อยครั้ง หรือในการหยุดแต่ละครั้งจะใช้เวลา นาน ซึ่งในกรณีนี้ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะจะต่ำ และในทางกลับกัน ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะจะสูงขึ้นในสภาพการจราจรที่คล่องตัว เนื่องจากยานพาหนะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการหยุดใดๆ ซึ่งจากสมมติฐานดังกล่าว เราสามารถใช้การรวมกันของความถี่ในการหยุด และระยะเวลาในการหยุดแต่ละครั้งในการประเมินความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

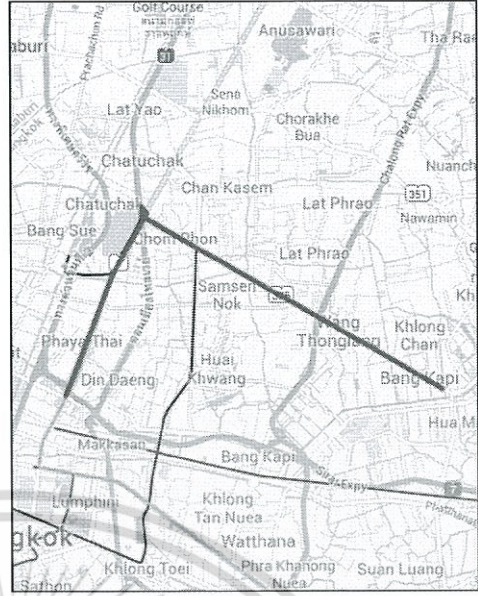
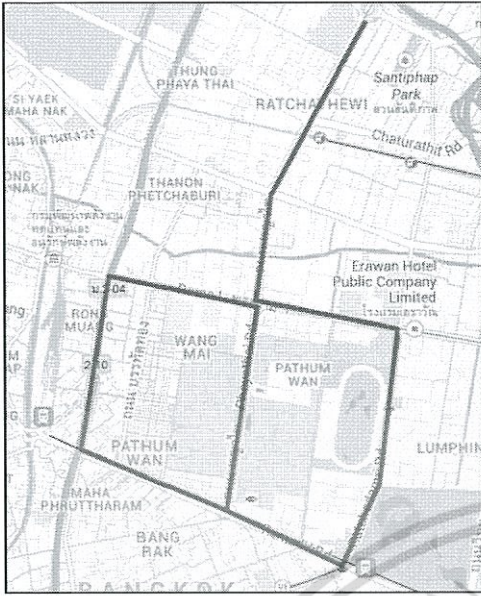
3.1.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ในการศึกษานี้จะใช้โทรศัพท์สมาร์ทโฟนไอโฟนห้า (iPhone 5) เป็นอุปกรณ์สำหรับเก็บรวบรวมข้อมูล และผู้วิจัยได้พัฒนาโปรแกรมขึ้นมาสำหรับเก็บข้อมูลโดยเฉพาะ ซึ่งในขั้นตอนการเก็บนั้นจะนำโทรศัพท์สมาร์ทโฟนวางไว้ด้านบนของแผงหน้าปัดรถยนต์ โดยสามารถวางในทิศทางใดหรือลักษณะใดก็ได้ เนื่องจากตัวโปรแกรมประยุกต์จะทำการประมวลผลเพื่อปรับปรุงค่าเริ่มต้นของเซ็นเซอร์วัดความเร่งทั้ง 3 แกนให้โดยอัตโนมัติ เมื่อวางโทรศัพท์ไว้ที่แผงหน้าปัดเรียบร้อยแล้ว และเปิดการใช้งานโปรแกรมประยุกต์แล้ว ผู้ขับขี่สามารถขับขี้นยานพาหนะไปได้ตามปกติ

ในส่วนของข้อมูลที่มีการเก็บนั้นจะทำการเก็บค่าที่สำคัญต่างๆ ดังนี้ ค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดความเร่งของทั้ง 3 แกน, ค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์ของยานพาหนะ (พิกัดเส้นรุ้ง และ พิกัดเส้นแวง) และความเร็วที่ได้มาจากการใช้เซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอสตรวจวัด ซึ่งความเร็วที่ได้จากเซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอสดังกล่าวจะใช้เพื่ออ้างอิงในการทดลองเท่านั้น เนื่องจากในการทดลองนี้จำเป็นต้องเก็บความเร็วจริงของยานพาหนะไว้ด้วย และเป็นเรื่องยากที่จะทำการเก็บความเร็วจริงจากมิเตอร์วัดความเร็วที่แสดงอยู่บนรถด้วยตาเปล่าให้ได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นการใช้ความเร็วที่วัดด้วยเซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอสนับว่าเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด ในขณะที่ค่าทั้งหมดนี้จะถูกบันทึกไว้ทุกๆ 1 วินาที แต่สำหรับค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดความเร่งของทั้ง 3 แกนนั้น จะถูกบันทึกไว้ทุกๆ 0.1 วินาที

ในการทดลองนี้ได้เก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ โดยทดลองทั้งในเส้นทางในถนนย่านใจกลางเมืองกรุงเทพมหานครที่มีการจราจรคับคั่งและเส้นทางที่ไม่ได้อยู่ในเมืองด้วย ตัวอย่างของถนนในเมืองที่ได้ทำการทดลองเก็บข้อมูลได้แก่ เส้นทางบริเวณเขตปทุมวัน ประกอบด้วยเส้นทางถนนพระราม 1, ถนนพระราม 4, ถนนพญาไท และถนนราชดำริ ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.1 และอีกเส้นทางหนึ่งบริเวณลาดพร้าว ประกอบด้วย ถนนพหลโยธิน และ ถนนลาดพร้าว ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.2 เส้นทางเหล่านี้นับเป็นเส้นทางที่มีการจราจรพลุกพล่านที่สุดแห่งหนึ่งในกรุงเทพฯ ซึ่งเส้นทางเหล่านี้มีลักษณะเป็นถนนในเมืองทั่วไปที่มีองค์ประกอบทั้งสัญญาณไฟจราจรและทางแยกต่างๆ และตัวอย่างของเส้นทางถนนที่ไม่ได้อยู่ในตัวเมืองได้แก่ ทางหลวงพิเศษหมายเลข 7 ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.3 ข้อมูลเหล่านี้ส่วนใหญ่ถูกเก็บในเวลากลางวันในวันทำงาน ซึ่งข้อมูลที่เก็บมาได้ประกอบไปด้วยระดับการจราจรที่หลากหลาย ตั้งแต่ระดับคล่องตัว (free flow) ไปจนถึงระดับการจราจรที่คับคั่ง ข้อมูลที่เก็บมาเพื่อทำการวิเคราะห์ในการทดลองนี้มีอยู่ด้วยกันทั้งสิ้นประมาณ 73,000 วินาที ประกอบไปด้วยข้อมูลจากถนนในเมืองประมาณ 90% และข้อมูลจากถนนที่ไม่ได้อยู่ในเมืองประมาณ 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 เส้นทางในเมืองบริเวณเขตปทุมวัน

รูปที่ 3.2 เส้นทางในเมืองบริเวณเขตลาดพร้าว



รูปที่ 3.3 เส้นทางถนนที่ไม่ได้อยู่ในเมือง บริเวณทางหลวงพิเศษหมายเลข 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การระบุสถานะของยานพาหนะ

หลังจากเก็บรวบรวมข้อมูลได้เพียงพอแล้ว จะทำการแบ่งข้อมูลออกเป็นชุดๆ โดยข้อมูลแต่ละชุดจะมีความยาว T วินาที กล่าวคือเราจะวิเคราะห์ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะในช่วงระยะเวลา T วินาที ในงานวิจัยนี้ได้เลือกกำหนดให้ $T = 360$ วินาที ซึ่งเป็นระยะเวลาที่เหมาะสม เนื่องจากสภาพจราจรจะไม่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันในระหว่างช่วงเวลาดังกล่าว และมันยังยาวเพียงพอที่จะอนุญาตให้สามารถวิเคราะห์ความหมายของข้อมูลได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ เวลา 360 วินาทีที่เหมาะสมสำหรับสภาพการจราจรโดยทั่วไปในกรุงเทพฯ เนื่องจากการเดินทางส่วนใหญ่จะใช้เวลามากกว่า 360 วินาที อย่างไรก็ตาม การเลือกค่า T นั้นก็จะส่งผลต่อความแม่นยำของการประเมินหาความเร็วเฉลี่ย ซึ่งเราจะได้วิเคราะห์ในลำดับต่อไป

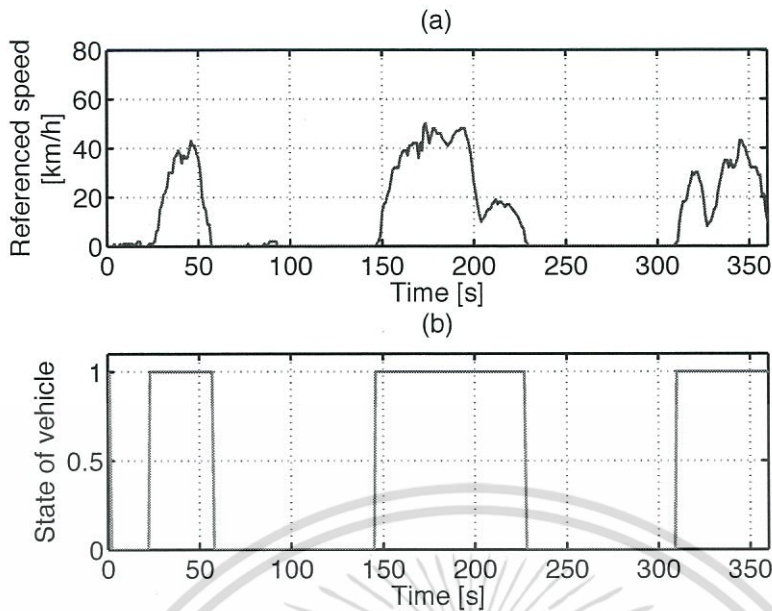
หลังจากที่ได้ชุดข้อมูลมาแล้ว เราจะนำชุดข้อมูลแต่ละชุดมาจำแนกสถานะของยานพาหนะ โดยจะแยกเป็นสองสถานะคือสถานะที่ยานพาหนะหยุดนิ่ง (Stationary State) และสถานะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ (Mobile State) โดยจะทำการแยกสถานะดังกล่าวด้วยข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร็วโดยมีวิธีการในการจำแนกสถานะดังกล่าวด้วยข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร็วดังนี้

1. ยานพาหนะจะถูกระบุว่ายานพาหนะหยุดนิ่ง เมื่อความเบี่ยงเบนจากค่าเริ่มต้นของค่าบนแกนทุกๆ แกนของเซ็นเซอร์วัดความเร็วน้อยกว่า γ m/s² ต่อเนื่องกันเป็นระยะเวลาอย่างน้อย ω วินาที
2. ยานพาหนะจะเปลี่ยนจากสถานะหยุดนิ่งเป็นเคลื่อนที่ เมื่อความเบี่ยงเบนจากค่าเริ่มต้นของค่าบนแกนใดแกนหนึ่งของเซ็นเซอร์วัดความเร็วมากกว่าหรือเท่ากับ γ m/s² ต่อเนื่องกันเป็นระยะเวลาอย่างน้อย ψ วินาที

ซึ่งค่าของ γ ที่ใช้ในการศึกษานี้คือ 0.04g โดยที่ $g = 9.8$ m/s² คือความเร่งจากแรงดึงดูดของโลก ค่า ω และ ψ ที่ใช้ในการศึกษานี้คือ 1.5 และ 0.3 วินาทีตามลำดับ ผู้วิจัยได้ทดลองใช้ค่าอื่นๆ สำหรับ γ , ω และ ψ ด้วยเช่นกัน แต่ค่าตามที่ระบุให้ผลที่ดีที่สุด

ตัวอย่างของสถานะของยานพาหนะในช่วงเวลา 360 วินาทีที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.4 ในรูปที่ 3.4(a) ความเร็วอ้างอิงของยานพาหนะได้ถูกแสดงในเชิงเวลา ความเร็วที่แสดงเหล่านี้คือความเร็วของยานพาหนะที่บันทึกได้โดยเซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอส จะสังเกตได้ว่ามีช่วงเวลาอยู่ประมาณ 3 ช่วงที่ยานพาหนะมีการเคลื่อนที่ ช่วงเวลาเหล่านี้ก็คือช่วงเวลาที่ยานพาหนะมีความเร็วมากกว่าศูนย์ ในรูปที่ 3.4(b) สถานะของยานพาหนะที่ถูกจำแนกโดยข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร็วได้ถูกนำมาแสดงในเชิงเวลา สถานะหยุดนิ่งนั้นถูกแทนด้วย “0” และสถานะเคลื่อนที่นั้นถูกแทนด้วย “1” จะเห็นได้ว่าสถานะของยานพาหนะซึ่งตีความจากข้อมูลเซ็นเซอร์วัดความเร็วมีความสอดคล้องกันกับสถานะจริงของยานพาหนะที่ตีความจากความเร็วอ้างอิง

แม้ว่าการจำแนกสถานะของยานพาหนะโดยใช้เซ็นเซอร์วัดความเร็วจะทำงานได้ดี แต่ก็ยังไม่สมบูรณ์ ดังจะเห็นได้ว่าการจำแนกสถานะที่ผิดพลาดในบางช่วงเวลา ความแม่นยำของวิธีการจำแนกสถานะจะนำมากล่าวถึงในลำดับต่อไป



รูปที่ 3.4 (a) ความเร็วอ้างอิงของยานพาหนะ (b) สถานะของยานพาหนะซึ่งจำแนกโดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร็ว

3.1.4 การประเมินความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย

หลังจากสามารถจำแนกสถานะของยานพาหนะได้แล้ว เราจำเป็นต้องแปลงข้อมูลเหล่านี้ไปเป็นความเร็วเฉลี่ย มีความสมเหตุสมผลที่เราจะหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ในเวลา T วินาทีกับความเร็วเฉลี่ยที่ทำได้ ซึ่งแน่นอนว่าถ้าหากยานพาหนะมีระยะเวลาในการเคลื่อนที่ที่ยาวนาน ย่อมมีโอกาสที่จะใช้ความเร็วได้สูงขึ้น กำหนดให้ m เป็นระยะเวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ได้ในช่วงเวลา T วินาที เราสามารถหาค่า m ได้จากสมการ (3.1)

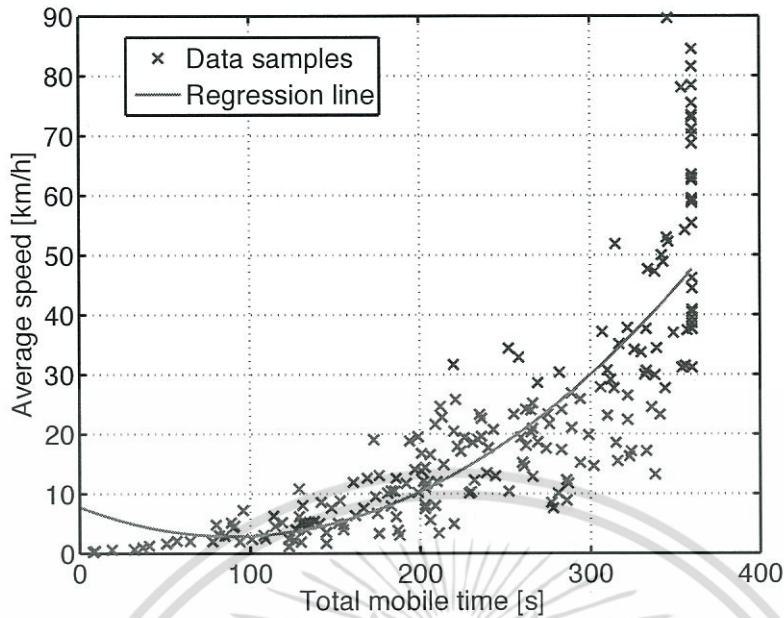
$$m = \sum_{t=1}^T s_t \quad (3.1)$$

โดยที่ s_t คือ สถานะของยานพาหนะที่เวลา t และ t คือ เวลาในหน่วยวินาที โปรดสังเกตว่า s_t จะเท่ากับ 0 เมื่อพาหนะอยู่ในสถานะหยุดนิ่งและเท่ากับ 1 เมื่อพาหนะอยู่ในสถานะเคลื่อนที่

ถัดมาเราจะนำระยะเวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ใน T วินาทีที่ได้จากสมการข้างต้นมาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์กับความเร็วจริงเฉลี่ยของยานพาหนะ โดยในการทดลองนี้จะใช้ความเร็วที่ได้จากเซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอสเป็นความเร็วอ้างอิง ซึ่งนำมาใช้เพียงเพื่อวัตถุประสงค์ในการทดลองเท่านั้น เมื่อได้ฟังก์ชันสำหรับแสดงความสัมพันธ์เรียบร้อยแล้ว ก็จะสามารถใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร็วเพียงอย่างเดียวในการประเมินหาความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะได้ โดยค่าความเร็วจริงเฉลี่ยของยานพาหนะในช่วงเวลา T วินาที สามารถหาได้ดังนี้

$$\bar{v}_t = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T v_t \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะและเวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ได้ในช่วงเวลา 360 วินาที

โดยที่ v_t คือ ความเร็วของยานพาหนะที่เวลา t และ t คือเวลาในหน่วยวินาที หลังจากได้ระยะเวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ได้ใน T วินาทีและค่าความเร็วจริงเฉลี่ยของยานพาหนะเรียบร้อยแล้ว จะนำสองค่าดังกล่าวมาใช้ในการสร้างฟังก์ชันความสัมพันธ์ โดยเราจะใช้ฟังก์ชันการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial Regression) ซึ่งเป็นไปตามรูปแบบดังนี้

$$\hat{v}_R = \alpha m^2 + \beta m + c \quad (3.3)$$

โดย \hat{v}_R เป็นความเร็วเฉลี่ยที่ประมาณ α , β เป็นสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันพหุนาม และ c คือค่าคงที่ รูปที่ 3.5 แสดงความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะที่เกิดขึ้นจริงกับเวลาทั้งหมดที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ได้ในช่วงเวลา $T = 360$ วินาที ตัวอย่างของเวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ได้จริงกับเวลาเฉลี่ยจริงได้แสดงโดยสัญลักษณ์ "X" นอกจากนี้ เรายังแสดงเส้นการถดถอยซึ่งเข้ากันได้มากที่สุดกับชุดข้อมูลนี้ไว้ในรูปด้วย ซึ่งเส้นแสดงการถดถอยนี้ได้มาจากซอฟต์แวร์ทางคณิตศาสตร์ สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยพหุนามได้แก่ $\alpha = 6.27 \times 10^{-4}$, $\beta = -0.01099$, และ $c = 7.7905$ เราจะสังเกตได้ว่าความเร็วเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะมีมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม จะสามารถสังเกตจากรูปที่ 3.5 ได้ว่าความแปรปรวนของค่าความเร็วเฉลี่ยมีสูงขึ้นเมื่อเวลาในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ยานพาหนะสามารถเคลื่อนที่ได้ 360 วินาที ค่าความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 30 กิโลเมตร/ชั่วโมง ไปจนถึง 85 กิโลเมตร/ชั่วโมง นี้เกิดจากเหตุที่ว่า เมื่อยานพาหนะสามารถเคลื่อนที่ได้เป็นเวลานาน แสดงว่าการจราจรไม่คับคั่งมาก ดังนั้นผู้ขับขี่สามารถใช้ความเร็วที่หลากหลาย ซึ่งส่งผลให้ความเร็วเฉลี่ยมีความแปรปรวนสูง ความแปรปรวนสูงของความเร็วเฉลี่ยจะส่งผลต่อความแม่นยำในการประมาณค่าความเร็ว กล่าวคือมันทำให้ประมาณค่าความเร็วเฉลี่ยได้ยากขึ้นนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่นับผูกมัดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการหนึ่งที่จะสามารถลดความแปรปรวนของความเร็วเฉลี่ยได้ คือการควบคุมความเร็วที่สูงจนเป็นที่น่าพอใจไว้ในระดับเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น สภาพการจราจรในเมืองที่จำกัดความเร็วที่ 80 กิโลเมตร/ชั่วโมง หากยานพาหนะสามารถวิ่งได้ด้วยความเร็วเฉลี่ยสูงกว่า 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง อาจถือได้ว่าการจราจรไม่แออัดและอยู่ในระดับที่น่าพอใจ ก็ไม่จำเป็นที่จะต้องสนใจที่จะแยกแยะความเร็วเฉลี่ยที่มากกว่านี้อีก เช่น อาจไม่มีความจำเป็นที่ต้องแยกแยะความเร็วเฉลี่ย 70 กิโลเมตร/ชั่วโมงกับความเร็วเฉลี่ย 80 กิโลเมตร/ชั่วโมง เนื่องจากความเร็วดังกล่าวนี้จัดว่าสูงเกินกว่าระดับที่น่าพอใจแล้ว ซึ่งวิธีการนี้จะสามารถลดช่วงของความเร็วจุดที่มีความแปรปรวนมากๆ ลงได้ เราจะเรียกระดับความเร็วที่ควบคุมนี้ว่า “ระดับความเร็วที่น่าพอใจ” ความแม่นยำในการประมาณหาความเร็วโดยวิธีวิเคราะห์การถดถอยและการควบคุมระดับความเร็วนี้จะกล่าวถึงในลำดับต่อไป

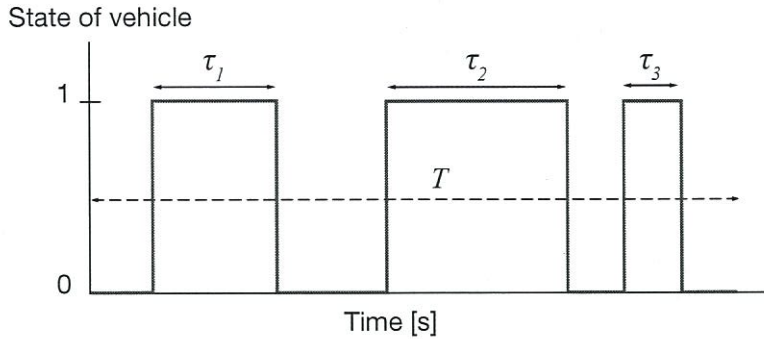
3.1.5 การประเมินความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะด้วยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบของช่วงเวลา

ถึงแม้ว่าวิธีในการประเมินหาความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยที่ผู้วิจัยได้เสนอไปข้างต้นจะเป็นวิธีการที่ดี และได้ผลลัพธ์ที่ค่อนข้างแม่นยำ แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดอยู่บ้าง เนื่องจากวิธีที่ได้เสนอไปข้างต้นนั้นใช้เพียงระยะเวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่เพียงค่าเดียว ซึ่งอาจจะทำให้ไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างสองสภาพการจราจรที่ยานพาหนะมีระยะเวลาในการเคลื่อนที่เท่ากันได้ ยกตัวอย่างเช่น ในช่วงเวลา 360 วินาที ยานพาหนะ ก มีการเคลื่อนที่ 5 วินาที และหยุด 5 วินาทีสลับกันไป จะได้ระยะเวลาทั้งหมดที่ยานพาหนะเคลื่อนที่เท่ากับ 180 วินาที ในขณะที่ยานพาหนะ ข หยุดเพียงครั้งเดียวนาน 180 วินาที จากนั้นได้เคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 180 วินาที ก็จะมีระยะเวลาเคลื่อนที่รวม 180 วินาทีเช่นกัน ซึ่งแน่นอนว่าทั้งสองสถานการณ์นั้นควรจะได้ความเร็วเฉลี่ยที่แตกต่างกัน เนื่องจากยานพาหนะ ข มีช่วงเวลากการเคลื่อนที่ที่ต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน ทำให้สามารถเร่งความเร็วให้สูงขึ้นได้เรื่อยๆ ในขณะที่ยานพาหนะ ก มีโอกาสเคลื่อนที่เพียงระยะเวลาสั้นๆเท่านั้น ทำให้ไม่สามารถเร่งความเร็วให้สูงขึ้นได้

ในส่วนนี้ เราจะแนะนำวิธีในการประเมินหาความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะด้วยข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร็วโดยวิธีการใหม่ที่เรียกว่า การวิเคราะห์องค์ประกอบของช่วงเวลา (Interval Component Analysis) หรือ ICA ซึ่งจะใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมของยานพาหนะในการประเมิน ในวิธีการนี้จะดูลำดับการสลับของช่วงที่ยานพาหนะเคลื่อนที่และหยุดหนึ่งในระยะเวลาที่สังเกตทั้งหมด (T) โดยจะเรียกแทนว่า “ลำดับสถานะ (State Sequence)” โดยตัวอย่างของลำดับสถานะแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.6 ในตัวอย่างนี้จะมีช่วงที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ 3 ช่วง และช่วงที่ยานพาหนะหยุดหนึ่ง 4 ช่วงภายในระยะเวลาทั้งหมด โดยช่วงที่เคลื่อนที่สถานะของยานพาหนะจะเป็น “1” และในช่วงที่หยุดหนึ่งสถานะของยานพาหนะจะเป็น “0” ซึ่งช่วงเวลาเหล่านี้จะสามารถใช้ระบุความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะในระยะเวลา T ได้ โดยให้ τ_j เป็นช่วงระยะเวลาเคลื่อนที่ที่ j และ ν_{τ_j} เป็นความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะในช่วงเวลาการเคลื่อนที่ที่ j ซึ่งมีระยะเวลา τ_j โดยทฤษฎีแล้วความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะในระยะเวลา T จะแสดงได้เป็น

$$\bar{v}_T = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^J \tau_j \nu_{\tau_j} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างของลำดับสถานะ

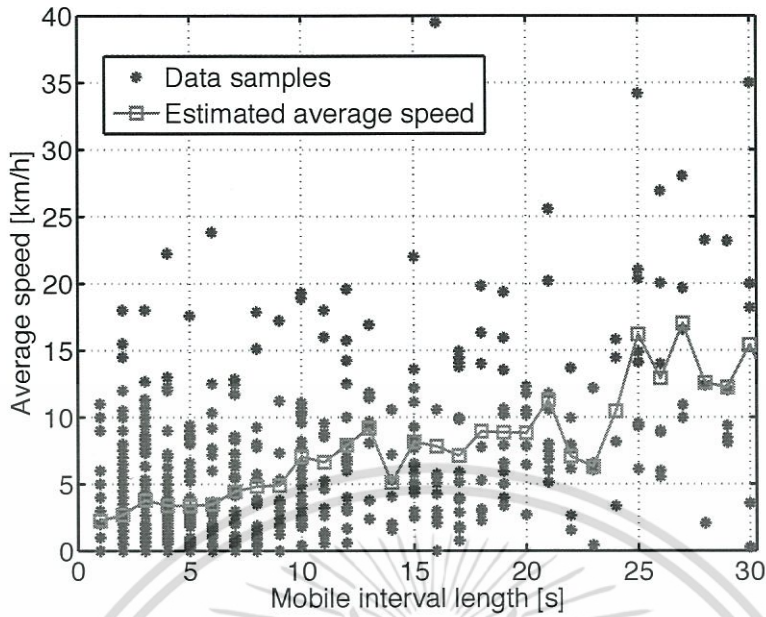
โดยที่ J คือจำนวนของช่วงเวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ในช่วงเวลา T และเนื่องจากความเร็วของยานพาหนะในช่วงที่หยุดนิ่งจะเป็นศูนย์ จึงไม่ได้เป็นตัวแปรในสมการที่ (3.4)

ถ้าหากเรามีข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร็ว ลำดับสถานะจะสามารถหาได้จากวิธีการจำแนกสถานะที่ได้กล่าวถึงแล้วในหัวข้อที่ 3.1.3 ระยะเวลาของแต่ละช่วงการเคลื่อนที่ τ_j ก็สามารถหาได้จากลำดับสถานะนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามยังมีข้อมูลที่ขาดไปในการคำนวณนี้คือค่าความเร็วเฉลี่ย ν_{τ_j} ของแต่ละช่วงการเคลื่อนที่ ซึ่งไม่สามารถหาได้โดยตรงจากข้อมูลของเซ็นเซอร์วัดความเร็ว ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้ความเร็วอ้างอิงที่เก็บจากเซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอสในการคำนวณความเร็วเฉลี่ยของแต่ละช่วงการเคลื่อนที่ จากนั้นจะนำลำดับสถานะที่เราได้มาใช้ในการสร้างฐานข้อมูลสำหรับเก็บช่วงระยะเวลาเคลื่อนที่และความเร็วเฉลี่ยที่สัมพันธ์กัน โดยที่ฐานข้อมูลนี้จะใช้เป็นตารางการค้นหาสำหรับขั้นตอนวิธีการประมาณค่า กล่าวคือเราจะสามารถหาความเร็วเฉลี่ย ν_{τ_j} ที่ช่วงระยะเวลาเคลื่อนที่ τ_j ได้จากฐานข้อมูลนั่นเอง ซึ่งฐานข้อมูลนี้สามารถสร้างได้แบบออฟไลน์ และเมื่อฐานข้อมูลถูกสร้างขึ้นแล้วก็จะสามารถประเมินหาความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะในช่วงเวลา T ได้โดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร็วเพียงอย่างเดียว ไม่ต้องพึ่งพาข้อมูลจากเซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอส ซึ่งจากฐานข้อมูล ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะในช่วงเวลา T จะสามารถหาได้ดังนี้

$$\hat{\nu}_I = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^J \tau_j \hat{\nu}_{\tau_j} \quad (3.5)$$

โดย $\hat{\nu}_{\tau_j}$ คือความเร็วเฉลี่ยที่ประเมินได้ภายในช่วงความยาวของเวลา τ_j ซึ่งได้มาจากฐานข้อมูล และ J คือจำนวนของช่วงเวลาการเคลื่อนที่ในระยะเวลา T

ตัวอย่างของช่วงเวลาในการเคลื่อนที่ซึ่งสัมพันธ์กับค่าความเร็วเฉลี่ยแสดงได้ดังรูปที่ 3.7 ในแต่ละตัวอย่างข้อมูลจะแทนด้วยสัญลักษณ์ “*” เราจะสามารถสังเกตได้ว่า ในแต่ละช่วงระยะเวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ได้อย่างต่อเนื่องจะมีความเร็วเฉลี่ยที่เป็นไปได้หลายค่า เช่น ช่วงระยะเวลาเคลื่อนที่ $\tau_j = 10$ วินาที ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะในช่วงระยะเวลาเคลื่อนที่ดังกล่าว มีค่าตั้งแต่ 0.5 กิโลเมตร/ชั่วโมงไปจนถึง 19 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งไม่ใช่เรื่องที่น่าแปลกใจแต่อย่างใด เนื่องจากความเร็วเฉลี่ยในช่วงระยะเวลาเคลื่อนที่นั้นมาจากหลากหลายสภาพการจราจรและพฤติกรรมกรับของผู้ขับขี่ ดังนั้นการเคลื่อนที่ในช่วงระยะเวลาเท่ากันจึงไม่จำเป็นว่าจะต้องได้ค่าความเร็วเฉลี่ยเท่ากัน เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะในแต่ละความยาวของช่วงเวลาที่เคลื่อนที่ได้

กัน อย่างไรก็ตาม เราต้องการค่าความเร็วเฉลี่ย \hat{v}_{τ_j} เพียงค่าเดียวในแต่ละช่วงระยะเวลาเคลื่อนที่ได้ เราจึงใช้ค่าเฉลี่ยของความเร็วเฉลี่ยที่มีอยู่ในฐานข้อมูลในการประมาณการ โดยให้ $v_{\tau_j, i}$ เป็นลำดับที่ i ของความเร็วเฉลี่ยที่สอดคล้องกับช่วงระยะเวลาเคลื่อนที่ τ_j โดยที่ความเร็วเฉลี่ย \hat{v}_{τ_j} สำหรับช่วงระยะเวลาเคลื่อนที่ τ_j หาได้จาก

$$\hat{v}_{\tau_j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{\tau_j, i} \quad (3.6)$$

โดยที่ N คือจำนวนของชุดข้อมูลความเร็วเฉลี่ยในฐานข้อมูลที่สัมพันธ์กับช่วงระยะเวลาเคลื่อนที่

รูปที่ 3.7 แสดงค่าความเร็วเฉลี่ย \hat{v}_{τ_j} ในแต่ละช่วงระยะเวลาเคลื่อนที่ τ_j โดยแสดงให้เห็นด้วยสัญลักษณ์ “□” เมื่อเราทราบระยะเวลาการเคลื่อนที่ก็จะสามารถประมาณหาความเร็วเฉลี่ยได้ ยกตัวอย่างเช่น ที่ช่วงระยะเวลาเคลื่อนที่ $\tau_j = 10$ วินาที ประมาณหาความเร็วเฉลี่ยที่สอดคล้องกันออกมาจะได้ค่าประมาณ 7 กิโลเมตร/ชั่วโมง นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าโดยแนวโน้มแล้วค่าเฉลี่ยของความเร็วเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของช่วงเวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ได้เพิ่มขึ้น ซึ่งตรงกับที่คาดหวังเพราะยานพาหนะจะสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้นเมื่อมีช่วงระยะเวลาในการเคลื่อนที่ติดต่อกันที่นานขึ้น

จากวิธีการดังกล่าวจะเห็นได้ว่าต้องมีการเก็บรวบรวมข้อมูลความเร็วเฉลี่ยของทุกๆช่วงระยะเวลาการเคลื่อนที่ลงในฐานข้อมูล ดังนั้นหากมีข้อมูลความเร็วเฉลี่ยของช่วงระยะเวลาเคลื่อนที่ใดขาดหายไปอาจส่งผลให้การประเมินความเร็วเฉลี่ยมีความแม่นยำลดลง นอกจากนี้ยังมีความผันผวนที่อาจเกิดขึ้นจากค่าที่ผิดปกติภายในกลุ่มตัวอย่างของความเร็วเฉลี่ยอีกด้วย (Outliers) เพื่อที่จะลดปัญหาดังกล่าวเราสามารถปรับค่าความสมดุลเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น นั่นคือแทนที่จะใช้ค่าความเร็วเฉลี่ย \hat{v}_{τ_j} จากช่วงความยาวของเวลา τ_j เพียงค่าเดียวในการประเมิน เราจะใช้ความเร็วค่า

เฉลี่ยจากช่วงความยาวของเวลาที่ใกล้เคียงกันเข้ามาเฉลี่ยร่วมด้วย โดยจะใช้ค่าเฉลี่ยของ $\hat{V}_{\tau_j-G}, \dots, \hat{V}_{\tau_j+G}$ โดยที่ G เป็นจำนวนเต็มที่ไม่เป็นลบ ซึ่งค่า G จะใช้เป็นค่าปรับความสมดุล (Smoothing Factor) ยกตัวอย่างเช่น หากกำหนดค่าปรับสมดุลให้ $G = 1$ ในกรณีที่ต้องการหาค่าความเร็วเฉลี่ย \hat{V}_{τ_j} ของช่วงระยะเวลาเคลื่อนที่ $\tau_j = 10$ วินาที ค่าความเร็วเฉลี่ยจากช่วงระยะเวลาเคลื่อนที่ $\tau_j = 9$ และ $\tau_j = 11$ วินาทีจะถูกนำมาใช้ในการหาความเร็วเฉลี่ยร่วมด้วย สรุปคือ ผลลัพธ์จะได้อาจมาจากค่าเฉลี่ยของ $\hat{V}_9, \hat{V}_{10}, \hat{V}_{11}$ นั้นเอง แต่หากกำหนดให้ค่า $G = 0$ ก็เท่ากับว่าไม่มีการปรับความสมดุล โดยความแม่นยำของความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบของช่วงเวลาจะกล่าวถึงในลำดับต่อไป

3.2 ผลการศึกษา

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษา โดยจะแสดงผลการทดสอบความแม่นยำของวิธีการจำแนกสถานะด้วยข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร่ง และวิธีการประเมินค่าความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะทั้งสองวิธีที่ได้นำเสนอ

3.2.1 ความแม่นยำของวิธีการจำแนกสถานะของยานพาหนะ

เนื่องจากเราใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร่งในการอนุมานสถานะของยานพาหนะ จึงเป็นสิ่งสำคัญมากที่จะต้องประเมินค่าความแม่นยำของวิธีการจำแนกสถานะ ซึ่งในการทดสอบความแม่นยำเราจะเปรียบเทียบจำนวนครั้งที่ยานพาหนะหยุดและระยะเวลาทั้งหมดที่ยานพาหนะหยุดหนึ่งที่ได้มาจากการวิธีการจำแนกสถานะ กับจำนวนการหยุดจริงและระยะเวลาจริงที่ยานพาหนะหยุดหนึ่งที่ได้มาจากการสังเกตจริงและบันทึกไว้ โดยเราทำการเก็บข้อมูลด้วยการสังเกตจริงเป็นระยะเวลา 7,200 วินาที ซึ่งนับเป็นจำนวน 20 ชุดข้อมูลของระยะเวลา 360 วินาที

ผลลัพธ์ที่ได้จากข้อมูลเซ็นเซอร์วัดความเร่งและที่ได้มาจากการสังเกตจริงได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกันและสรุปให้เห็นในตารางที่ 3.1 จากทั้งหมดจะสังเกตได้ว่าความแตกต่างระหว่างจำนวนครั้งในการหยุดของยานพาหนะที่ได้มาจากการข้อมูลเซ็นเซอร์วัดความเร่งกับข้อมูลที่ได้มาจากการสังเกตจริงนั้นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยอยู่ที่เพียง 1.35 ครั้งเท่านั้น และในส่วนของระยะเวลาทั้งหมดที่ยานพาหนะหยุดหนึ่ง ที่ได้มาจากการเซ็นเซอร์วัดความเร่ง กับที่ได้มาจากการจับเวลาการหยุดหนึ่งจริงก็คลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยเพียง 7.51 วินาที ซึ่งคิดเป็นประมาณ 2.08% ของระยะเวลา 360 วินาทีเท่านั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า ความแม่นยำของวิธีการจำแนกสถานะของยานพาหนะจากข้อมูลเซ็นเซอร์วัดความเร่งนั้นอยู่ในระดับที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 จำนวนครั้งในการหยุดและระยะเวลาในการหยุดของยานพาหนะ เปรียบเทียบข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร็วและข้อมูลที่บันทึกมาจากการสังเกตจริง

ชุด	เซ็นเซอร์วัดความเร็ว		สังเกตจริง	
	จำนวนครั้งที่หยุด	ระยะเวลาที่หยุดหนึ่ง (วินาที)	จำนวนครั้งที่หยุด	ระยะเวลาที่หยุดหนึ่ง (วินาที)
1	5	122.44	4	114
2	8	190	5	174
3	2	218.14	2	225.7
4	1	162	2	166.4
5	6	100.3	6	101.4
6	8	217.93	6	221.9
7	6	135.60	4	148.5
8	12	122.76	12	131
9	3	109.50	3	112.04
10	3	80.38	3	83.92
11	3	93.56	3	101.23
12	16	107.59	12	92.30
13	6	31.25	4	23.85
14	4	28.96	3	39.13
15	2	106.89	2	112.98
16	8	124.64	5	115.70
17	15	214.65	11	208.12
18	10	168.29	8	156.83
19	7	61.34	5	57.07
20	3	142.11	3	145.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ความแม่นยำของการประเมินความเร็วเฉลี่ยโดยวิธีวิเคราะห์การถดถอย

ในส่วนนี้เราจะประเมินหาความแม่นยำของวิธีการประเมินความเร็วเฉลี่ยโดยวิธีวิเคราะห์การถดถอย จากข้อมูลเซ็นเซอร์วัดความเร่งที่เก็บได้ ช่วงเวลาที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ได้ใน T วินาทีได้ถูกดึงออกมา ซึ่งเราจะแบ่งแยกข้อมูลที่ดึงออกมานี้ออกเป็นสองกลุ่ม ได้แก่ กลุ่มการสอน (Training Set) และกลุ่มทดสอบ (Test Set) ข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มทดสอบจะไม่อยู่ในกลุ่มการสอน และเพื่อเป็นการลดอคติ (Bias) ที่อาจเกิดขึ้น ข้อมูลที่คัดเลือกมาอยู่ในกลุ่มการสอนและกลุ่มทดสอบจะถูกคัดเลือกมาโดยการสุ่ม ข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มการสอนจะนำมาใช้เพื่อสร้างสมการพหุนามของการถดถอย (Polynomial Regression) จากนั้นจะหาค่าเฉลี่ยของความเร็วของยานพาหนะจากข้อมูลในกลุ่มทดสอบโดยใช้สมการ (3.3) ความแม่นยำของการประเมินความเร็วเฉลี่ยจะถูกวัดโดยค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error, MAE) ดังนี้

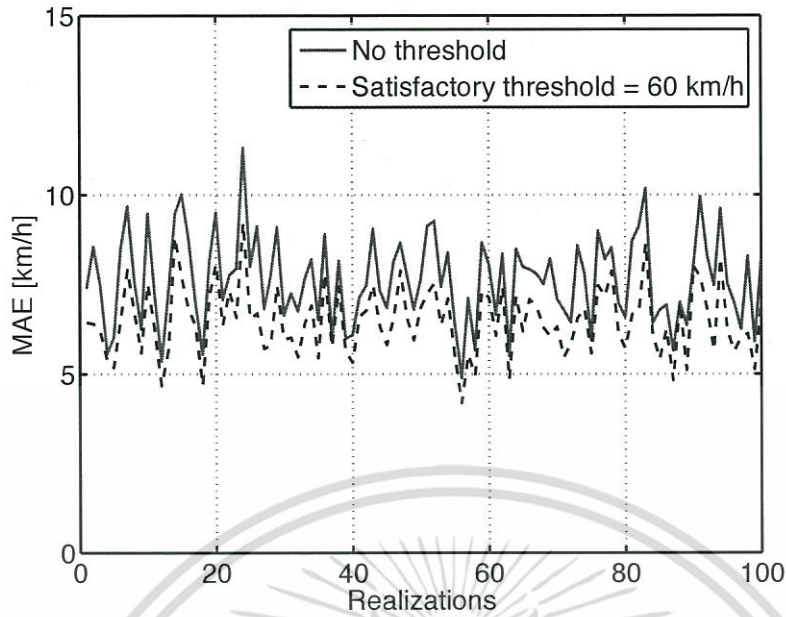
$$\epsilon_R = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |\hat{v}_{R,k} - \bar{v}_{T,k}| \quad (3.7)$$

โดยที่ ϵ_R คือ ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์ $\hat{v}_{R,k}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยของชุดข้อมูลที่ k ที่ประเมินโดยวิธีวิเคราะห์การถดถอย และ $\bar{v}_{T,k}$ คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยอ้างอิงของชุดข้อมูลที่ k และ M คือ จำนวนข้อมูลที่มีอยู่ในกลุ่มทดสอบ โปรดสังเกตว่าข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มการสอนและกลุ่มทดสอบได้มาจากการสุ่ม ดังนั้นการสร้างกลุ่มการสอนและกลุ่มทดสอบหนึ่งครั้ง (Realization) จะให้สมการพหุนามหนึ่งสมการ และเราจะได้ค่า MAE หนึ่งค่าต่อหนึ่งรูปแบบการสุ่ม

รูปที่ 3.8 แสดงค่า MAE ของความเร็วเฉลี่ยจาก 100 ครั้งของการสุ่มของกลุ่มการสอนและกลุ่มทดสอบ ในแต่ละครั้งประกอบไปด้วย 150 ตัวอย่างของเวลาในการเคลื่อนที่ในกลุ่มการสอนและ 30 ตัวอย่างของเวลาในการเคลื่อนที่ในกลุ่มทดสอบ ค่า MAE ในแต่ละรูปแบบการสุ่มคำนวณจากสมการ (3.7) ในรูปที่ 3.8 นี้ได้เปรียบเทียบกับสองกรณี คือ กรณีปกติที่ไม่ใช่ระดับความเร็วที่น่าพอใจ (Satisfactory Threshold) และกรณีที่ตั้งระดับความเร็วที่น่าพอใจไว้ที่ 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง จะสังเกตได้ว่าในกรณีปกติ ค่า MAE จะอยู่ในช่วงระหว่าง 5 ถึง 11 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งความแปรปรวนที่ค่อนข้างสูงแสดงให้เห็นว่ายานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่หลากหลายเมื่อมีระยะเวลาในการเคลื่อนที่มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยของ MAE จากการทดลองในกรณีปกติทั้ง 100 ครั้งก็มีเพียง 7.64 กิโลเมตร/ชั่วโมงเท่านั้น

อย่างที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ว่าหากมีการกำหนดระดับความเร็วที่น่าพอใจ จะสามารถลดความแปรปรวนของความเร็วเฉลี่ยลงได้ ส่งผลให้การประเมินมีประสิทธิภาพมากขึ้น สังเกตได้จากรูปที่ 3.8 ว่าค่า MAE ลดลงเมื่อกำหนดระดับความเร็วที่น่าพอใจไว้ที่ 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งมีค่า MAE จากการทดสอบทั้ง 100 ครั้งอยู่ในช่วง 4 กิโลเมตร/ชั่วโมง ถึง 9 กิโลเมตร/ชั่วโมง และค่าเฉลี่ยของ MAE ทั้งหมดอยู่ที่ 6.48 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งค่าเฉลี่ยของ MAE เมื่อมีการกำหนดระดับความเร็วที่น่าพอใจอื่น ๆ ได้แสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งจะสามารถสังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยของ MAE ลดลงเมื่อประเมินภายใต้ระดับความเร็วที่น่าพอใจที่ต่ำลง เนื่องมาจากการกำหนดระดับความเร็วที่น่าพอใจนั้นช่วยลดความแปรปรวนของความเร็วของยานพาหนะออกไปนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ค่า MAE ของความเร็วเฉลี่ยที่ประเมินจากวิธีการวิเคราะห์การถดถอย ค่า T ในการพิจารณา คือ 360 วินาที

ตารางที่ 3.2 ความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์การถดถอยในแต่ละระดับความเร็วที่น่าพอใจ

ระดับความเร็วที่น่าพอใจ (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	ค่าเฉลี่ยของค่า MAE 100 ครั้ง (กิโลเมตร/ชั่วโมง)		
	$T = 360$ วินาที	$T = 270$ วินาที	$T = 180$ วินาที
ไม่กำหนด	7.64	8.09	8.68
80	7.54	7.96	8.49
60	6.48	6.84	7.23
40	4.38	4.64	5.03

สิ่งที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ได้จากตารางที่ 3.2 คือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ (T) ความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์การถดถอยจะลดลงเมื่อระยะเวลาที่เราใช้ในการวิเคราะห์สั้นลง เหตุผลหลักก็คือหากช่วงเวลาที่จะใช้ในการวิเคราะห์ลดลง ข้อมูลที่มีสำหรับการวิเคราะห์ก็จะลดลงไปด้วย ทำให้มีข้อมูลไม่เพียงพอที่จะทำให้การประเมินมีความแม่นยำนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ความแม่นยำของการประเมินความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะด้วยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบของช่วงเวลา

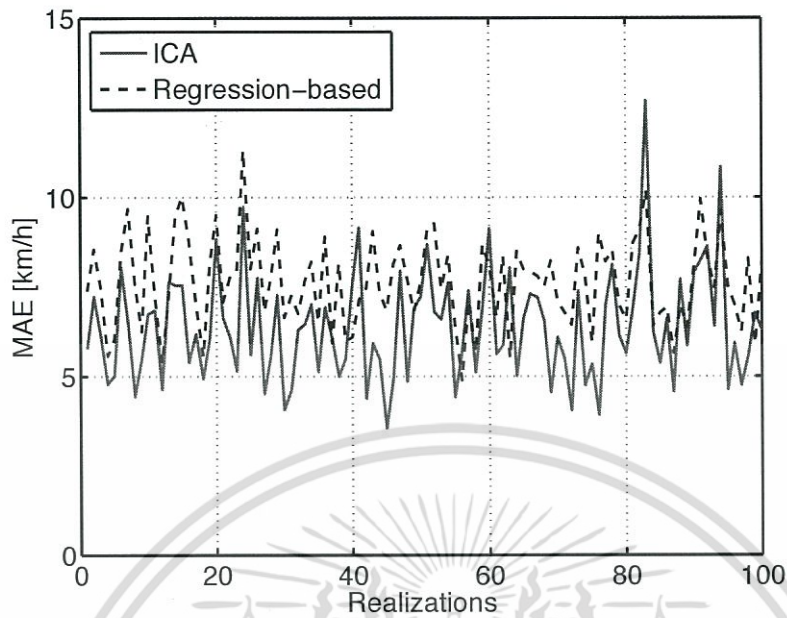
ในส่วนนี้จะประเมินประสิทธิภาพของวิธีการประเมินความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบของช่วงเวลา ที่ได้นำเสนอไปในหัวข้อที่ 3.1.5 โดยในวิธีการนี้เราจะมองในแต่ละส่วนตลอดระยะเวลา T วินาทีเป็นลำดับสถานะ โดยที่ลำดับสถานะดังกล่าวได้มาจากข้อมูลของเซ็นเซอร์วัดความเร่งที่ผ่านวิธีการจำแนกสถานะที่ได้นำเสนอไปในหัวข้อที่ 3.1.3 จากนั้นจะทำการสุ่มลำดับสถานะเข้าไปอยู่ในกลุ่มการสอน 150 ชุด และกลุ่มทดสอบ 30 ชุด โดยที่ลำดับสถานะในกลุ่มการสอนนั้นจะใช้ในการนำไปสร้างฐานข้อมูลความเร็วเฉลี่ยในแต่ละระยะเวลาการเคลื่อนที่ โดยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบของช่วงเวลาจะใช้ประเมินหาความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะในแต่ละลำดับสถานะในกลุ่มทดสอบ โดยค่าความเร็วเฉลี่ยที่ประเมินได้ของแต่ละลำดับสถานะในกลุ่มทดสอบจะถูกคำนวณด้วยสมการที่ (3.5) และเปรียบเทียบกับความเร็วเฉลี่ยอ้างอิงที่ได้จากเซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอส โดยที่ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์สามารถคำนวณหาได้จาก

$$\epsilon_I = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |\hat{v}_{I,k} - \bar{v}_{T,k}| \quad (3.8)$$

โดยที่ ϵ_I คือ ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์ $\hat{v}_{I,k}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยของชุดข้อมูลที่ k ที่ประเมินโดยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบของช่วงเวลา และ $\bar{v}_{T,k}$ คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยอ้างอิงของชุดข้อมูลที่ k และ M คือจำนวนข้อมูลที่มีอยู่ในกลุ่มทดสอบ

ซึ่งในการสุ่มลำดับสถานะเข้าไปในกลุ่มการสอนและกลุ่มทดสอบนั้นจะสุ่มเลือกข้อมูลเข้าไปในทั้งสองกลุ่มให้แตกต่างกันทั้งหมด 100 ครั้งโดยจะได้ผลลัพธ์ของค่า MAE ที่แตกต่างกันในแต่ละรอบตามที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.9 โดยที่ค่า MAE จากวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบของช่วงเวลาในแต่ละครั้งนั้นได้มาจากสมการที่ (3.8) ซึ่งจากรูปจะเปรียบเทียบกับค่า MAE ที่ได้มาจากวิธีวิเคราะห์การถดถอย จะสามารถสังเกตเห็นได้ว่าค่า MAE ในกรณีของวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบของเวลานั้นจะต่ำกว่าของวิธีวิเคราะห์การถดถอย ซึ่งค่าเฉลี่ยของ MAE จากทั้ง 100 ครั้งสำหรับวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบของช่วงเวลาอยู่ที่ 6.39 กิโลเมตร/ชั่วโมง และค่าเฉลี่ยของ MAE จากทั้ง 100 ครั้งสำหรับวิธีวิเคราะห์การถดถอยอยู่ที่ 7.64 กิโลเมตร/ชั่วโมง

ในส่วนของความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบของช่วงเวลาในกรณีที่มีการกำหนดระดับความเร็วที่น่าพอใจและช่วงระยะเวลาในการวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน ได้นำมาสรุปอยู่ในตารางที่ 3.3 โดยสามารถสังเกตเห็นได้ว่าวิธีการประเมินความเร็วเฉลี่ยด้วยวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบของเวลานั้น ความแม่นยำจะลดลงเมื่อไ้ระยะเวลาสำหรับวิเคราะห์น้อยลงเช่นเดียวกันกับวิธีวิเคราะห์การถดถอย

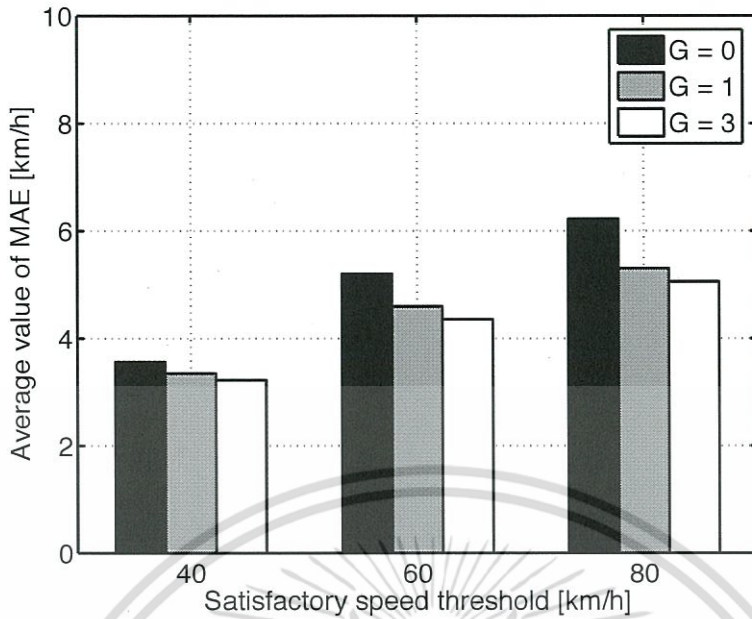


รูปที่ 3.9 ค่า MAE ของความเร็วเฉลี่ยที่ประเมินจากวิธีการวิเคราะห์ห้องประกอบของช่วงเวลา และค่า MAE ของความเร็วเฉลี่ยที่ประเมินจากวิธีวิเคราะห์การถดถอย ค่า T ในการพิจารณา คือ 360 วินาที

ตารางที่ 3.3 ความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์ห้องประกอบของช่วงเวลาในแต่ละระดับความเร็วที่นำพอใจ

ระดับความเร็วที่นำ พอใจ (กิโลเมตร/ชั่วโมง)	ค่าเฉลี่ยของค่า MAE 100 ครั้ง (กิโลเมตร/ชั่วโมง)		
	$T = 360$ วินาที	$T = 270$ วินาที	$T = 180$ วินาที
ไม่กำหนด	6.39	6.69	7.37
80	6.22	6.60	7.25
60	5.20	5.73	6.32
40	3.57	3.77	4.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ความแม่นยำของวิธีการประเมินด้วยการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของช่วงเวลาเมื่อมีการใช้ค่าปรับสมดุลข้อมูลในแต่ละระดับความเร็วที่น่าพอใจ โดยวิเคราะห์ที่ระยะเวลา $T = 360$ วินาที

เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของช่วงเวลานั้นมีการเพิ่มในส่วนของการปรับสมดุลข้อมูล (Smoothing Factor) เพื่อเพิ่มความแม่นยำ รูปที่ 3.10 จะแสดงค่าเฉลี่ยของค่า MAE เมื่อมีการใช้ค่าสมดุลที่แตกต่างกันในแต่ละระดับความเร็วที่น่าพอใจ โดยค่าเฉลี่ยของค่า MAE แต่ละค่าที่แสดงในรูปที่ 3.10 นั้นได้มาจากการสอนและทดลอง 100 ครั้ง และเช่นเดียวกันกับวิธีวิเคราะห์การถดถอยที่ความแม่นยำจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อกำหนดระดับความเร็วที่น่าพอใจให้ต่ำลง เพราะค่าระดับความเร็วที่น่าพอใจจะช่วยให้การกำจัดค่าความเร็วที่มีความแปรปรวนสูงในช่วงที่ยานพาหนะใช้ความเร็วได้อย่างอิสระออกไปนั่นเอง และจะสังเกตได้ว่าการปรับสมดุลข้อมูลสามารถเพิ่มความแม่นยำได้ ยกตัวอย่างเช่นที่ระดับความเร็วที่น่าพอใจ 80 กิโลเมตร/ชั่วโมง จะสังเกตเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างกรณีที่ไม่มีการใช้การปรับสมดุลข้อมูล ($G = 0$) กับกรณีที่มีการใช้การปรับสมดุลข้อมูล ($G > 0$) อย่างไรก็ตาม ข้อได้เปรียบที่ได้มาจากการปรับสมดุลข้อมูลจะลดลงเมื่อค่า G เพิ่มขึ้น นี่แสดงให้เห็นว่าการใช้เพียงค่าข้างเคียงไม่ก็ค่าสำหรับการปรับสมดุลข้อมูลก็ได้ผลดีเป็นที่น่าพอใจแล้ว ในกรณีที่เกิดขึ้นได้จริงในทางปฏิบัติ เช่น ที่ระดับความเร็วที่น่าพอใจเท่ากับ 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง และที่ค่า $G = 1$ ค่าเฉลี่ยของค่า MAE อยู่ที่ราว 4.5 กิโลเมตร/ชั่วโมง เท่านั้น ซึ่งค่าความผิดพลาดในระดับนี้เพียงพอต่อการประยุกต์ใช้ทางด้านการรายงานข้อมูลจราจรโดยทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

บทสรุป

4.1 สรุปองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้และวิธีการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์บนโทรศัพท์เคลื่อนที่สำหรับเก็บข้อมูลและแปรผลเป็นข้อมูลสภาพการจราจรที่ถูกต้อง ในงานวิจัยอื่นๆที่ผ่านมาพบเห็นว่าการนำเอาข้อมูลที่เก็บได้จากเซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอสมาประยุกต์ใช้เพื่อบ่งบอกสภาพการจราจร แต่ทว่าเซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอสนั้นเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานมาก ทำให้ไม่เหมาะสมในการนำมาใช้สำหรับงานเก็บข้อมูลจราจร โดยเฉพาะถ้าหากใช้เซ็นเซอร์รับสัญญาณจีพีเอสที่อยู่บนโทรศัพท์เคลื่อนที่ก็จะส่งผลให้แบตเตอรี่ของโทรศัพท์หมดลงอย่างรวดเร็ว

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เซ็นเซอร์ชนิดอื่นที่มีอยู่บนโทรศัพท์เคลื่อนที่สำหรับเก็บและแปรผลเป็นข้อมูลสภาพการจราจร ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การใช้งานเซ็นเซอร์วัดความเร็วเป็นหลัก เนื่องจากเซ็นเซอร์ดังกล่าวมีอัตราการบริโภคพลังงานที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับเซ็นเซอร์ชนิดอื่นๆที่มีบนสมาร์ตโฟน ซึ่งเราพบความเป็นไปได้และสามารถหาความเร็วเฉลี่ยของยานพาหนะด้วยข้อมูลที่ได้มาจากเซ็นเซอร์วัดความเร็วได้โดยสองวิธีการที่มีชื่อว่า วิธีวิเคราะห์การถดถอย (Regression-based Analysis) และวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบของช่วงเวลา (Interval Component Analysis) หรือ ICA ซึ่งวิธีการเหล่านี้ใช้การวิเคราะห์สถานะของการเคลื่อนที่และระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะเป็นหลัก โดยสถานะเหล่านี้ใช้เพียงแค่ข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดความเร็วในการระบุเท่านั้น การประเมินความเร็วด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยนั้นไม่ยุ่งยากเท่าไรนัก มีเพียงแค่เวลาในการเคลื่อนที่ทั้งหมดของยานพาหนะในระยะเวลาที่กำหนดเท่านั้นที่ต้องใช้ในฟังก์ชันการถดถอยพหุนาม จากการวิจัยพบว่าโดยเฉลี่ยแล้วค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์ของการประเมินความเร็วเฉลี่ยด้วยวิธีการนี้จะอยู่ที่ประมาณ 7.64 กิโลเมตร/ชั่วโมง แต่ความแม่นยำก็ยังสามารถปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ด้วยการกำหนดระดับความเร็วที่น่าพอใจตามที่ได้อธิบายไปในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความแม่นยำในการประเมินหาความเร็วเฉลี่ยได้ เนื่องจากความแปรปรวนของความเร็วที่ถูกลดลงไป ตัวอย่างเช่น เมื่อกำหนดระดับความเร็วที่น่าพอใจที่ 60 กิโลเมตร/ชั่วโมงนั้น ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์ลดลงเหลือเพียง 6.48 กิโลเมตร/ชั่วโมง ซึ่งค่าความผิดพลาดก็จะลดลงไปอีกเมื่อกำหนดระดับความเร็วที่น่าพอใจให้ต่ำลง

ส่วนวิธีการประเมินด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบของช่วงเวลานั้นมีความยุ่งยากกว่าวิธีวิเคราะห์การถดถอยอยู่บ้าง เพราะในวิธีการนี้ความเร็วเฉลี่ยจะถูกประเมินมาจากการสลับกันระหว่างการเคลื่อนที่และหยุดนิ่งของยานพาหนะ ซึ่งให้ความแม่นยำที่มากกว่าวิธีวิเคราะห์การถดถอย โดยเฉลี่ยแล้วค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์ของความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 6.39 กิโลเมตร/ชั่วโมง และจะลดลงไปอีกหากใช้การปรับสมดุลข้อมูลร่วมด้วย และหากกำหนดระดับความเร็วที่น่าพอใจที่ระดับ 60 กิโลเมตร/ชั่วโมง ร่วมกับใช้ค่าปรับสมดุลที่ระดับ 1 ค่าความผิดพลาดจะลดลงเหลือเพียงแค่ประมาณ 4.5 กิโลเมตร/ชั่วโมง เท่านั้น ซึ่งนับว่าเป็นความแม่นยำที่อยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในการรายงานข้อมูลการจราจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 สรุปผลผลิตที่ได้จากโครงการวิจัย

ผลผลิตที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ ได้แก่

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ 1 เรื่อง คือ
 - S. Panichpapiboon and P. Leakkaw, "Traffic Sensing Through Accelerometers," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, in press.
2. ผลงานตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 1 เรื่อง คือ
 - P. Leakkaw and S. Panichpapiboon, "Speed Estimation Through Mobile Sensing," *IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Oct. 2014, pp. 1-5.
3. ต้นแบบระบบข้อมูลจราจรที่ไม่ต้องพึ่งพาโครงสร้างพื้นฐาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Schrank, T. Lomax, and B. Eisele, "TTI's 2011 Urban Mobility Report," Texas Transportation Institute, *Tech. Rep.*, Sep. 2011.
- [2] S. Panichpapiboon, *Self-Organizing Traffic Information Systems: Challenges and Design Issues*, Bangkok, Thailand: Tanabutr, 2012, ISBN: 978-616-305-966-6.
- [3] Y. Wakabayashi and M. Aoki, "Traffic Flow Measurement Using Stereo Slit Camera," in *Proc. IEEE Intell. Transp. Syst. Conf. (ITSC)*, Sep. 2005, pp. 198–203.
- [4] S. Santini, "Analysis of Traffic Flow in Urban Areas Using Web Cameras," in *Proc. IEEE Workshop Applicat. Comput. Vision*, Dec. 2000, pp. 140–145.
- [5] X. Yu, L. Duan, and Q. Tian, "Highway Traffic Information Extraction from Skycam MPEG Video," in *Proc. IEEE Intell. Transp. Syst. Conf. (ITSC)*, Sep. 2002, pp. 37–41.
- [6] T. N. Schoepflin and D. J. Dailey, "Dynamic Camera Calibration of Roadside Traffic Management Cameras for Vehicle Speed Estimation," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 4, no. 2, pp. 90–98, Jun. 2003.
- [7] P. G. Michalopoulos, "Vehicle Detection Video Through Image Processing: The Autoscope System," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 40, no. 1, pp. 21–29, Feb. 1991.
- [8] D. Douxchamps, B. Macq, and K. Chihara, "High Accuracy Traffic Monitoring Using Road-side Line-scan Cameras," in *Proc. IEEE Intell. Transp. Syst. Conf. (ITSC)*, Sep. 2006, pp. 875–878.
- [9] Y. Wu, F. Lian, and T. Chang, "Traffic Monitoring and Vehicle Tracking Using Roadside Cameras," in *Proc. IEEE Int. Conf. Syst., Man, and Cybern. (ICSMC)*, Oct. 2006, pp. 4631–4636.
- [10] W. Z. Khan, Y. Xiang, M. Y. Aalsalem, and Q. Arshad, "Mobile phone sensing systems: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 15, no. 1, pp. 402–427, First Quarter 2013.
- [11] E. Koukoumidis, M. Martonosi, and L. Peh, "Leveraging smartphone cameras for collaborative road advisories," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 11, no. 5, pp. 707–723, May 2012.
- [12] R. Banerjee and A. Sinha, "TrigSense: Accelerometer Triggered Audio Sensing for Traffic Condition Monitoring," in *Proc. IEEE Int. Conf. Intell. Sensors, Sensor Netw., and Info. Processing*, Apr. 2013, pp. 135–140.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] A. Kovacheva, R. Frank, and T. Engel, "LuxTraffic: A Collaborative Traffic Sensing System," in *Proc. IEEE Int. Workshop on Local and Metropolitan Area Netw.*, Apr. 2013, pp. 1–6.
- [14] D.B.Work, O.Tossavainen, Q.Jacobson, and A.M.Bayen, "Lagrangian Sensing: Traffic Estimation with Mobile Devices," in *Proc. IEEE Amer. Control Conf.*, Jun. 2009, pp. 1536–1543.
- [15] Z. Li, Y. Zhu, H. Zhu, and M. Li, "Compressive Sensing Approach to Urban Traffic Sensing," in *Proc. IEEE Int. Conf. Distributed Comput. Syst. (ICDCS)*, Jun. 2011, pp. 889–898.
- [16] X. Li, W. Shu, M. Li, H. Huang, P. Luo, and M. Wu, "Performance Evaluation of Vehicle-Based Mobile Sensor Networks for Traffic Monitoring," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 4, pp. 1647–1653, May 2009.
- [17] Waze Website, [Online], 2014, available: <http://www.waze.com>.
- [18] F. B. Abdesslem, A. Phillips, and T. Henderson, "Less is More: Energy Efficient Mobile Sensing with Senseless," in *Proc. ACM Workshop on Netw., Syst., and Appl. for Mobile Handhelds (MobiHeld)*, Aug. 2009, pp. 61–62.
- [19] J. Eriksson, L. Girod, B. Hull, R. Newton, S. Madden, and H. Balakrishnan, "The Pothole Patrol: Using a Mobile Sensor Network for Road Surface Monitoring," in *Proc. ACM Int. Conf. Mobile Syst. Appl. And Services (MobiSys)*, Jun. 2008, pp. 29–39.
- [20] R. Bhoraskar, N. Vankadhara, B. Raman, and P. Kulkarni, "Wolverine: Traffic and Road Condition Estimation Using Smartphone Sensors," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Syst. and Netw. (COMSNETS)*, Jan. 2012, pp. 1–6.
- [21] H. Eren, S. Makinist, E. Akin, and A. Yilmaz, "Estimating Driving Behavior by a Smartphone," in *Proc. IEEE Intell. Vehicles Symp. (IV)*, Jan. 2012, pp. 234 – 239.
- [22] D. A. Johnson and M. M. Trivedi, "Driving Style Recognition Using a Smartphone as a Sensor Platform," in *Proc. IEEE Intell. Transp. Syst. Conf. (ITSC)*, Oct. 2011, pp. 1609–1615.
- [23] SafeMate Application, Google Play Website, [Online], available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.mbi.safemate>.
- [24] U. Dakshitha, D. Lenagala, L. Silva, H. Siriwardene, and D. Dias, "Vehicular Traffic Monitoring with Mobile Devices," in *Proc. IEEE Int. Conf. Industrial and Info. Syst. (ICIIS)*, Dec. 2013, pp. 676–681.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[25] Accelerometer Application, Google Play Website, [Online], available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.a10>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่จากโครงการวิจัย

วารสารวิชาการระดับนานาชาติ 1 เรื่องคือ

- S. Panichpapiboon and P. Leakkaw, "Traffic Sensing Through Accelerometers," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, in press.

การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 1 เรื่อง คือ

- P. Leakkaw and S. Panichpapiboon, "Speed Estimation Through Mobile Sensing," *IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Oct. 2014, pp. 1-5.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Traffic Sensing Through Accelerometers

Sooksan Panichpapiboon, *Member, IEEE*, and Puttipong Leakkaw

Abstract—With the advances in wireless communication and mobile computing, a future *infrastructureless* self-organizing traffic information system, where vehicles can form a network for exchanging traffic information among themselves, will soon be realized. In an infrastructureless traffic information system, vehicles will act as mobile sensors and collect the traffic data as they travel. Smartphones are a great choice for traffic sensing devices as they are now equipped with a variety of sensors such as global positioning system (GPS) receiver, accelerometer, gyroscope, camera, and microphone. These sensors can be exploited to collect traffic data. Although there are many types of sensors available for traffic sensing, past studies have mainly focused on a GPS receiver. However, a GPS receiver consumes a lot of power, and hence it can significantly shorten the battery life. In this paper, we explore a possibility of using other types of sensors on a smartphone for traffic sensing. Particularly, we investigate whether it is possible and how accurate it is to estimate the average speed of a vehicle from the data sensed by an accelerometer. Two estimation methods will be introduced and their accuracy will be evaluated.

Index Terms—Traffic sensing, speed estimation, accelerometers, traffic information systems, vehicular networks.

I. INTRODUCTION

TRAFFIC information system is essential for solving a traffic problem. Real-time traffic information such as average speed of vehicles, vehicle density, flow rate, and travel time can help motorists choose a route more wisely. For example, instead of getting stuck unnecessarily on a congested road, many drivers may be able to take an alternative less congested route if the information about the road traffic condition is available to them in advance. Currently, most of the traffic information systems are an infrastructure-based system, where traffic data are collected from fixed sensors such as inductive loop detectors and surveillance cameras. However, it usually takes a great deal of time and effort to install sensors in such a system. In many cases, this involves digging up the road surface to implant the sensors underneath it. In addition, it is extremely costly to install sensors to cover a large area (e.g., city-wide coverage). Moreover, maintenance of these large number of fixed sensors is also difficult. The system could be made much more effective and less expensive if the traffic information could be collected and distributed by the vehicles on the road.

With the advances in wireless communication and mobile computing, a future *infrastructureless* self-organizing traffic information system in a form of vehicular ad hoc networks will

Copyright © 2015 IEEE. Personal use of this material is permitted. However, permission to use this material for any other purposes must be obtained from the IEEE by sending a request to pubs-permissions@ieee.org. S. Panichpapiboon and P. Leakkaw are with the Faculty of Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand. (e-mails: sooksan@it.kmitl.ac.th, puttipong.plk@gmail.com)

soon be realized. In an infrastructureless traffic information system, vehicles will act as mobile sensors and collect the traffic data as they travel. They can also disseminate and share the traffic information with others. The main challenge in this type of systems is in designing how to collect and process the traffic data since the sensors are now mobile and distributed. Among many issues, a system designer needs to consider the following: (i) which types of sensors to use; (ii) how to use them to collect the traffic data; and most importantly (iii) how to turn the data into information that can accurately reflect the real traffic condition.

In our perspective, smartphones are a great choice for mobile traffic sensing devices. Smartphones are now equipped with a variety of sensors such as global positioning system (GPS) receiver, accelerometer, gyroscope, camera, and microphone. These sensors can be exploited to collect traffic data. Moreover, smartphones are now adopted by a large number of users. Consequently, a person with a smartphone can turn any vehicle, whether new or old, into a mobile traffic sensor.

The use of smartphones for traffic sensing is gaining more attention from the research community. However, most of the existing studies have mainly focused on using only a GPS receiver in determining the average speed of a vehicle [1–4]. Other types of potential sensors have mostly been neglected. Despite its convenience, using a GPS receiver for traffic sensing has a serious shortcoming. A GPS receiver is a power-hungry sensor [5]. Using it continuously, especially for traffic sensing, can quickly drain out the phone battery.

In this paper, we explore a possibility of using other types of sensors on a smartphone for traffic sensing. Particularly, we will focus on an accelerometer since it consumes the least amount of power among the sensors on a smartphone [5]. In fact, its power consumption rate is approximately six times lower than that of a GPS receiver [5]. The key questions which we try to answer in this study are:

- Is it possible to estimate an average speed of a vehicle from the data sensed by an accelerometer on a smartphone?
- If so, how to estimate it and what is the accuracy of the estimation method?

The rest of this paper is organized as follows. In Section II, we briefly discuss the work related to mobile traffic sensing. In Section III, we describe how our research is conducted and how the average speed can be estimated from the data sensed by an accelerometer. Accuracy of the estimation methods is evaluated in Section IV. Finally, we conclude the paper in Section V.

II. RELATED WORK

Smartphones are now used as sensing devices in many applications such as traffic sensing, health monitoring, environmental monitoring, and social interaction [6]. Traffic sensing is an application which has recently gained much attention from the intelligent transportation systems (ITS) research community. A variety of sensors on a smartphone can potentially be used for traffic sensing. For example, in [7], a camera on a smartphone is used for capturing and detecting the traffic lights. In [8], a microphone is used for detecting a honking sound on a road in India. Basically, the motorists in India tend to honk more when the traffic is congested.

Most of the traffic sensing applications, however, rely mainly on a GPS receiver. In [1], a GPS receiver on a smartphone is used in determining the average speed of a vehicle. In the system proposed in [1], vehicles will periodically send their locations to a central server. The central server will then use traces of vehicle locations to estimate the average speed of vehicles on a particular road. Similar studies which use GPS data for speed estimation can be found in [2–4]. An example of mobile traffic sensing applications which relies on a combination of GPS data and crowdsourcing can be found in [9]. However, using a GPS receiver on a smartphone is not energy-efficient. In fact, a GPS receiver consumes a lot more power than other types of sensors [5].

There are also studies which use accelerometers for traffic applications. In [10, 11], the accelerometer data are used for identifying the road surface conditions (e.g., whether there are potholes and bumps on the road surface). In [12–14], the accelerometer data are used for identifying the driving behaviors of drivers (e.g., whether a driver drives safely or dangerously). In [15], an accelerometer is used to detect the number of stops that a vehicle makes. If the number of stops is greater than a pre-defined threshold, then it is implied that the road is congested. However, the proposed method is not able to estimate vehicle speed and any other quantitative traffic metrics. There is also a mobile application which uses an accelerometer for speed estimation [16]. However, the estimation method used in the application is not specified. Moreover, the correctness of the estimation method and its accuracy are neither evaluated nor verified. In [17], vehicle speed is estimated by a wheel speed sensor, and measurements from an accelerometer are used for acceleration offset. Accelerometers are also used to estimate walking speed in [18, 19]. While using an accelerometer consumes less power than using a GPS receiver, it is reported in [5] that frequent usage of an accelerometer may slightly increase the average CPU load of a smartphone.

In this paper, we distinguish ourselves from the existing works by presenting a way to estimate an average speed of a vehicle from its activities detected through an accelerometer. Two speed estimation methods will be discussed in the next section.

III. ACTIVITY ANALYSIS AND SPEED ESTIMATION

One of the main indicators of road traffic conditions is the average speed of vehicles traveling on the road. Obviously,

the average speed of vehicles on a congested road will be smaller than that of the freely flowing one. Intuitively, how fast an individual vehicle can move will depend on how often it needs to stop and the duration of each stop it makes. On a congested road, a vehicle will have to stop frequently and each stop may last a while. In this case, the average speed of the vehicle will be small. In contrast, the average speed of a vehicle will be higher on a non-congested road since it can move continuously without many interruptions. Based on these observations, the activities of a vehicle (i.e., stops and moves) can be used to estimate its average speed. In this research, we introduce an innovative way to detect vehicle activities with an accelerometer on a smartphone. Moreover, we propose a few approaches to transform these activities into the average speed accurately.

A. Data Collection

Actual field experiments are conducted to collect real data sensed by an accelerometer. In this study, an iPhone 5 is used as a mobile device, and a simple iOS application is developed for data collection purposes. The application is designed for data logging only. Its main task is to record the status of the accelerometer and other essential data which will later be used for analysis. In the beginning of each experiment, the mobile phone will be placed firmly on top of the dashboard of a vehicle. The phone can be placed in any orientation since the initial state of the 3-axis accelerometer will be automatically calibrated by the application.

During the experiment, a driver can drive naturally with the flow of the traffic. The application will record the values sensed by the accelerometer, the geolocation of the mobile phone, and the speed obtained through the GPS receiver. The speed obtained through the GPS receiver will be used as a reference in the experiment. In principle, the actual ground-truth speed displayed on the speedometer of the vehicle should be used as a referenced speed. However, it is rather difficult and highly inaccurate to read the ground-truth speed from the speedometer with bare eyes since the scale on the speedometer is very coarse. Thus, using the speed obtained through the GPS receiver as a referenced speed is a reasonable alternative. It is also important for a traffic sensing application to be able to identify the location at which the traffic data are collected. There is a wide variety of positioning techniques that could be used to determine the location of a mobile phone [20]. Examples include a number of cellular triangulation techniques and the GPS technique. In this study, for convenience, the geolocation of the mobile phone is obtained through the GPS receiver. However, in general, any other positioning techniques can be used as well. In addition, for analytical purposes only, the geolocation of the mobile phone is sampled every second in this experiment. In practice, however, it is not necessary to sample the geolocation of the mobile phone at this high frequency. Only a few geolocation samples are needed to indicate where a block of data is collected.

Since our focus is on urban traffic, the experiments are conducted in Bangkok, Thailand during daytime on the weekdays. The collected data consist of a wide variety of traffic

conditions, ranging from free-flow to severely congested. About 90% of the data are from city roads, and 10% of the data are from highways. The data set used in this study contains approximately 73,000 seconds of data samples.

B. State Classification

After the data have been obtained, we divide them into blocks of T seconds each. This allows us to analyze the average speed of a vehicle over a period of T . The particular value of T chosen in this study is 360 seconds. This is appropriate because the traffic condition does not change abruptly over such a period, and it is long enough to get a meaningful interpretation from the data. In addition, the 360-second period fits well for a typical Bangkok traffic, as most trips usually take longer than 360 seconds. The choice of T will also affect the accuracy of the estimated speed. This will be discussed in Section IV.

Since our speed estimation methods will be based on the activities of the vehicle, we need to identify when the vehicle is moving and when it is stationary over a period of T . In principles, at any time instant, a vehicle can only be in one of these two states: (i) stationary and (ii) mobile. Using only the data sensed by an accelerometer, these states can be identified. The difference between the stationary state and the mobile state of a vehicle can be classified as follows:

- 1) A vehicle will be considered as in a stationary state if the deviation from the initial calibrated value, on every axes of the accelerometer, is less than a threshold γ m/s^2 for a continuous duration of at least ω seconds.
- 2) A vehicle will transit from the stationary state to a mobile state if the deviation from the initial calibrated value, on any axes of the accelerometer, is greater than or equal to the threshold γ m/s^2 for a continuous duration of at least ψ seconds.

The value of γ used in this study is $0.04g$, where $g = 9.8$ m/s^2 is the gravitational acceleration. The values of ω and ψ used in this study are 1.5 second and 0.3 second, respectively. We have also experimented with other values of γ , ω , and ψ , but the values chosen here yield the best results.

An example of the states of the vehicle over a period of 360 seconds is illustrated in Fig. 1. In Fig. 1.(a), the referenced speed of the vehicle is shown as a function of time. This is basically the instantaneous speed of the vehicle as specified by the GPS receiver. It can clearly be observed from this figure that there are roughly three intervals in which the vehicle is mobile. These are the intervals where the referenced speed is above zero. More specifically, they are the interval from 20 to 57 seconds, the interval from 146 to 230 seconds, and the interval from 309 to 360 seconds. Similarly, it can be observed that there are roughly three intervals in which the vehicle is stationary. These are the intervals where the referenced speed is zero or very close to zero. In Fig. 1.(b), the states of the vehicle, as identified by the state classification method, are shown as a function of time. The stationary state is represented by the value '0' while the mobile state is represented by the value '1'. These states are classified based purely on the data sensed by the accelerometer. Generally, it

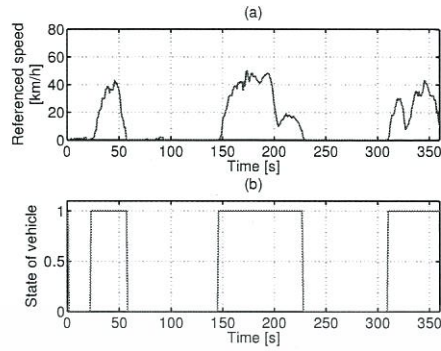


Fig. 1. (a) Referenced instantaneous speed as a function of time. (b) Vehicle states as identified by the classification method.

can be observed that the states of the vehicle inferred from the accelerometer data are in good agreement with the states of the vehicle inferred from the referenced speed. Although the state classification algorithm works well, it is not perfect. There are, of course, possible misclassified states. The accuracy of the state classification method will be discussed in Section IV.

C. Regression-based Speed Estimation

Once the states of the vehicle in a period of T are classified, we need to transform them to the average speed. It is logical to correlate the total time which the vehicle is mobile during the period of T to its average speed. Intuitively, if the vehicle is able to stay in motion over a longer period of time, it has a better chance of accelerating to a higher speed. More formally, let m be the total time which the vehicle stays in the mobile state over a period of T . An expression for m can be given as

$$m = \sum_{t=1}^T s_t \quad (1)$$

where $s_t \in \{0,1\}$ is the state of the vehicle at time t , and $t \in \{1,2,\dots,T\}$ is the time instant in second. Note that s_t is equal to 1 when the vehicle is in the mobile state, and it is equal to 0 otherwise. For convenience, we will refer to m as the *total mobile time*.

Next, the total mobile time of the vehicle will be mapped to the average speed. In this study, we use the speed obtained through the GPS receiver on the mobile phone as a reference. Note that this is done in the training phase only. Once a mapping function is obtained, the average speed can be estimated using only the accelerometer data, regardless of whether a GPS receiver is available or not. Based on the collected data, the instantaneous speed obtained through the GPS receiver is recorded every second. The average speed of the vehicle over the period of T , denoted by \bar{v}_T , can then be calculated by averaging over the instantaneous speed samples

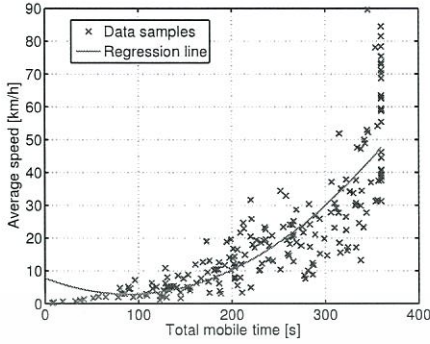


Fig. 2. Average speed as a function of total mobile time.

as

$$\bar{v}_T = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T v_t \quad (2)$$

where v_t is the referenced instantaneous speed at time t , and $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ is the time instant in second.

A mapping between the total mobile time, m , and the average speed, \bar{v}_T , is done through a polynomial regression. A second-order polynomial regression function is used to correlate the total mobile time of the vehicle with the average speed. The regression equation is of the following form

$$\hat{v}_R = \alpha m^2 + \beta m + c \quad (3)$$

where \hat{v}_R is the estimated average speed, α and β are the coefficients of the polynomial, and c is a constant. In practice, given the total mobile time of the vehicle, the average speed can be determined from the polynomial regression equation in (3).

Fig. 2 illustrates the average speed, \bar{v}_T , as a function of the total mobile time, m , of the vehicle. The mobile time samples and their corresponding values of referenced average speed are shown with the symbol 'x'. The polynomial regression line is also illustrated. This regression line, which best fit the data samples, is obtained through a mathematical software. The coefficients of the polynomial are $\alpha = 6.127 \times 10^{-4}$, $\beta = -0.1099$, and $c = 7.7905$. It can be observed that the average speed generally increases as the total mobile time increases. This agrees with our initial intuition. Similar results are also observed in our previous work [21]. However, the range of the average speed observed in the data set used in the previous work is much more limited than that of the current data set. More specifically, the maximum average speed observed in the previous data set is only around 50 km/h while the maximum average speed observed in this data set is approximately 90 km/h. As a result, the data set considered in this paper covers a broader range of traffic.

Nonetheless, it can be noted from Fig. 2 that the variation on the average speed increases as the total mobile time increases.

For example, with the total mobile time of $m = 360$ seconds, the average speed of the vehicle ranges from around 30 km/h to 85 km/h. This is mainly due to the following reason. If a vehicle is able to stay in motion for a long period of time, it suggests that the traffic condition is likely to be fluid (i.e., not congested). Consequently, a driver will be able to drive at a wide range of speed. In the particular case of $m = 360$ seconds, the vehicle moves continuously without any stop. As a result, the average speed has a large variation. A large variation of the average speed will affect the accuracy of the estimation method. Basically, it makes the average speed more difficult to estimate.

One possible way to reduce the large variation of the average speed is to aggregate the speed levels above a specified threshold into a single category. For example, in an urban environment with a speed limit of 80 km/h, a traffic flow with an average speed above 60 km/h could already be considered as non-congested or satisfactory. In this case, it might be unnecessary to differentiate between an average speed of 70 km/h and an average speed of 80 km/h as they both are already above the satisfactory threshold. Aggregating these speed levels into one category will help reduce the variation without sacrificing the accuracy of the estimation at the lower end. We will refer to the threshold above which the average speed is aggregated as *satisfactory threshold*. The accuracy of the regression-based speed estimation method and the effects of the satisfactory threshold will be discussed in Section IV.

D. Interval Component Analysis Method

Although the regression-based speed estimation method presented in Section III-C works reasonably well, it still has some limitations. Note that the total mobile time of the vehicle, which is used as an input in the regression-based method, is a summary quantity. Some information regarding the activities of the vehicle over the period of T is neglected. Using only the total mobile time alone will not allow us to differentiate between two traffic conditions which may yield the same total mobile time. For example, over a period of 360 seconds, a situation where a vehicle keeps alternating between moving for 5 seconds and stopping for 5 seconds will result in a total mobile time of 180 seconds. Similarly, over a period of 360 seconds, a situation where a vehicle stops in the first half of the period and moves continuously in the second half of the period will also result in a total mobile time of 180 seconds. However, these two situations can yield extremely different values of the average speed. Certainly, in the former case the vehicle will be able to move at a much lower speed than that in the latter case. The main reason is that the vehicle has to stop a lot more frequently in the former case; therefore, it will not be able to accelerate to a high speed. Clearly, we need a better way to estimate the average speed of the vehicle from the data sensed by an accelerometer.

In this section, we introduce a new estimation approach called *Interval Component Analysis (ICA)* method, which exploits the information regarding vehicle activities in estimation. In the ICA method, the whole period of T will be viewed as an alternating sequence of mobile and stationary intervals.

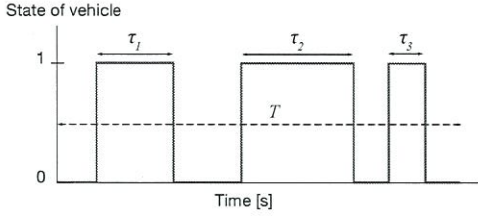


Fig. 3. An example of a state sequence.

For convenience, we will refer to this type of sequences as a *state sequence*. An example of a state sequence is shown in Fig. 3. In this example, there are three mobile intervals and four stationary intervals in the period of T . The mobile intervals are those where the state of the vehicle is '1' whereas the stationary intervals are those where the state of the vehicle is '0'. Based on these intervals the average speed of the vehicle in the period of T can be determined. Let τ_j be the length of the mobile interval j . Let ν_{τ_j} be the average speed of the vehicle within the mobile interval j of length τ_j . Theoretically, the average speed of the vehicle in the period of T , denoted by $\bar{\nu}_T$, can be expressed as

$$\bar{\nu}_T = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^J \tau_j \nu_{\tau_j} \quad (4)$$

where J is the number of mobile intervals in the period of T . Note that the speed of the vehicle in the stationary intervals is zero; therefore, it does not become a factor in (4).

Given the data sensed by an accelerometer, a state sequence can be obtained through the state classification method described in Section III-B. The length of each mobile interval, τ_j , can easily be determined from the state sequence. However, the missing piece of information for computing $\bar{\nu}_T$ is the average speed, ν_{τ_j} , in each mobile interval. This cannot be determined directly from the accelerometer data; therefore, it needs to be estimated. In the experiments, the referenced instantaneous speed is collected from a GPS receiver every second. This allows us to compute the average speed ν_{τ_j} for each mobile interval. Furthermore, given a large number of state sequences, a database of mobile interval length, τ_j , and the corresponding average speed, ν_{τ_j} , can be created. This database can be used as a lookup table for the estimation algorithm. In other words, given a mobile interval of length τ_j , a corresponding average speed ν_{τ_j} can be searched from the database. In practice, this database can be created offline in the training phase. Once the database is created, the average speed of a vehicle over a period of T can be estimated based purely on the data sensed by an accelerometer, regardless of whether a GPS receiver is available or not. Given the database, the average speed of a vehicle over a period of T can be estimated as

$$\hat{\nu}_T = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^J \tau_j \hat{\nu}_{\tau_j} \quad (5)$$

where $\hat{\nu}_{\tau_j}$ is the estimated average speed in the interval of

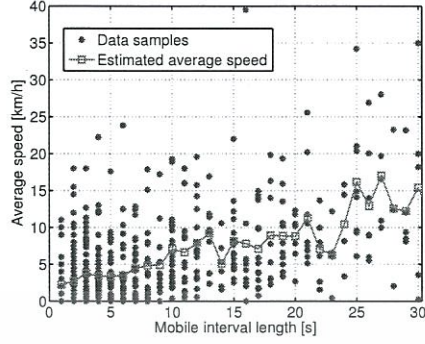


Fig. 4. Average speed at different values of mobile interval length.

length τ_j obtained from the database, and J is the number of mobile intervals in the period of T .

The samples of mobile interval length and the corresponding values of average speed are shown in Fig. 4. Each data sample is represented by the symbol '•'. It can be observed that, for a particular mobile interval length, there are many possible corresponding values of average speed. For example, for an interval of length $\tau_j = 10$ seconds, the average speed of the vehicle in such an interval ranges approximately from 0.5 km/h to 19 km/h. This is not unusual because the average speed for a particular interval length can vary due to different traffic conditions and driving behaviors. Thus, two mobile intervals with the same length may not necessarily have the same value of the average speed. However, given an interval length τ_j , we need a single value $\hat{\nu}_{\tau_j}$ as an estimate for the average speed in such an interval. In this study, we use the mean of the average speed samples as an estimate. More specifically, let $\nu_{\tau_j,i}$ be the i^{th} sample of the average speed that corresponds to the mobile interval of length τ_j . The estimated average speed, $\hat{\nu}_{\tau_j}$, for a mobile interval of length τ_j is obtained from

$$\hat{\nu}_{\tau_j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \nu_{\tau_j,i} \quad (6)$$

where N is the total number of samples of the average speed in the database that corresponds to the mobile interval of length τ_j .

In Fig. 4, the estimated average speed $\hat{\nu}_{\tau_j}$ for each mobile interval of length τ_j is shown with the symbol '□'. Given a value of mobile interval length, an estimated average speed can be determined. For example, for a mobile interval of length $\tau_j = 10$ seconds, the corresponding estimated average speed is $\hat{\nu}_{\tau_j} \approx 7$ km/h. In addition, it can be observed that, trend-wise, the estimated average speed increases as the interval length increases. This is expected because a vehicle is able to move at a higher speed as the mobile interval length increases.

Although the estimated average speed is supposed to be a non-decreasing function of the mobile interval length, its value can fluctuate as observed in Fig. 4. This could happen

due to data insufficiency. In other words, there might not be enough average speed samples for a particular mobile interval length to compute an accurate estimated average speed. In addition, the fluctuation could also happen if there were outliers in the average speed samples. In order to alleviate this possible problem, data smoothing may be exercised. That is, instead of using only \hat{v}_{τ_j} as an estimate, an average among its neighboring values may be used to smoothen out the estimated value. Particularly, for an interval of length τ_j , we may use the average value among $\hat{v}_{\tau_j-G}, \dots, \hat{v}_{\tau_j+G}$, where $G \in \{0, 1, 2, \dots\}$, as the estimated average speed. The parameter G will be referred to as the *smoothing factor*. For example, if the smoothing factor is set to $G = 1$, the average value among \hat{v}_9, \hat{v}_{10} , and \hat{v}_{11} will be used as an estimated average speed for the mobile interval of length $\tau_j = 10$ seconds. When the smoothing factor is set to $G = 0$, this corresponds to the case where no data smoothing is used. The accuracy of the average speed estimated by the ICA method will be discussed in Section IV.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, we evaluate the accuracy of the state classification method and the accuracy of the speed estimation methods.

A. Accuracy of State Classification Method

Since we use the data sensed by an accelerometer to infer the states of the vehicle, it is important to evaluate the accuracy of the state classification method. In order to test the accuracy, we compare the number of stationary intervals and the total stationary time obtained from the classification method with the actual number of stops and the actual duration of stationary time in each 360-second period. The actual number of stops and the actual duration of stationary time are obtained by physically observing the number of stops that the vehicle makes and the total duration of each stop. We have physically observed the states of the vehicle over the duration of 7,200 seconds. This constitutes to 20 sets of 360-second periods.

The results inferred from the accelerometer data and those obtained from the physical observations are shown in Table I. Overall, it can be observed from Table I that the differences between the number of stops inferred from the accelerometer data and those obtained from the physical observations are quite small. In fact, on average, the absolute difference between them is only about 1.35. In addition, it can also be observed that the differences between the stationary times inferred from the accelerometer data and those obtained from the physical observations are also quite small. On average, the absolute difference between them is only 7.51 seconds, which is equivalent to around 2.08% of the 360-second observation period. As a result, the method used in classifying the state of the vehicles based on the accelerometer data is accurate.

B. Accuracy of Regression-based Speed Estimation Method

In this section, we evaluate the accuracy of the average speed estimated by the regression-based method described

TABLE I
THE NUMBER OF STOPS AND STATIONARY TIME INFERRED FROM ACCELEROMETER DATA AND THOSE OBTAINED FROM PHYSICAL OBSERVATIONS

Set	Accelerometer		Physical Observations	
	Stop Count	Stationary Time (s)	Stop Count	Stationary Time (s)
1	5	122.44	4	114
2	8	190	5	174
3	2	218.14	2	225.7
4	1	162	2	166.4
5	6	100.3	6	101.4
6	8	217.93	6	221.9
7	6	135.60	4	148.5
8	12	122.76	12	131
9	3	109.50	3	112.04
10	3	80.38	3	83.92
11	3	93.56	3	101.23
12	16	107.59	12	92.30
13	6	31.25	4	23.85
14	4	28.96	3	39.13
15	2	106.89	2	112.98
16	8	124.64	5	115.70
17	15	214.65	11	208.12
18	10	168.29	8	156.83
19	7	61.34	5	57.07
20	3	142.11	3	145.84

in Section III-C. Based on the collected accelerometer data, the total mobile time of the vehicle in each period of T is extracted. Then, the extracted total mobile time samples are divided into two mutually exclusive sets, namely the training set and the test set. In order to avoid any biases, the samples to be placed in the training set and those to be placed in the test set are chosen randomly from the pool of all samples. The samples in the training set are used to derive a polynomial regression function. The estimated average speed, \hat{v}_R , for each sample in the test set is calculated through (3). The accuracy of the estimation is quantified in terms of mean absolute error (MAE) of the average speed. The MAE of the average speed can be expressed as

$$\epsilon_R = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |\hat{v}_{R,k} - \bar{v}_{T,k}| \quad (7)$$

where ϵ_R is the MAE of the average speed, $\hat{v}_{R,k}$ is the average speed of the k^{th} sample estimated by the regression function, $\bar{v}_{T,k}$ is the referenced average speed of the k^{th} sample, and M is the number of samples in the test set. Note that the samples in the training set and the test set are randomly selected; therefore, one realization of the training sets and the test sets will yield one regression function and one value of MAE.

Fig. 5 illustrates the MAE of the average speed obtained from 100 different realizations of the training sets and the test sets. In each realization, there are 150 samples of the total mobile time in the training set, and there are 30 samples of the total mobile time in the test set. The MAE in each realization is obtained from (7). Two cases are shown for a comparison. The natural case, where a satisfactory speed threshold is not used, is shown with the solid line. The other case, where a satisfactory speed threshold of 60 km/h is

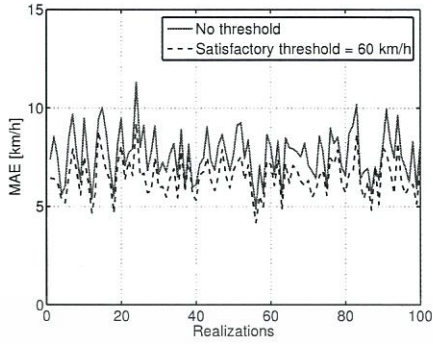


Fig. 5. MAE of the average speed estimated by the regression-based method. The value of T considered in this analysis is 360 seconds.

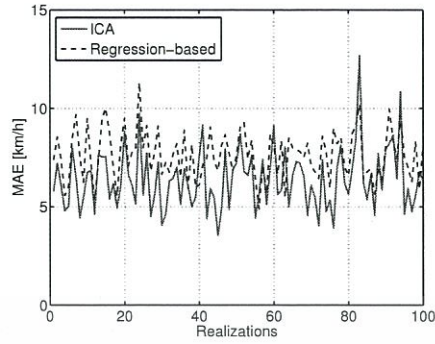


Fig. 6. MAE of the average speed estimated by the ICA method and MAE of the average speed estimated by the regression-based method. The value of T considered in this analysis is 360 seconds.

imposed, is illustrated with the dashed line. It can be observed that, in the natural case, the MAE varies in the range of 5 km/h to 11 km/h. A large variation of errors is partly due to the fact that the vehicle is able to move at a wide range of speed when the total mobile time is large. Nonetheless, the average value of the MAE from these 100 realizations is only around 7.64 km/h.

As discussed earlier, the accuracy can be improved if the satisfactory speed threshold is used. It can be observed from Fig. 5 that the MAE of the average speed is reduced when the satisfactory speed threshold of 60 km/h is imposed. The MAE of the average speed in this case ranges approximately from 4 km/h to 9 km/h. The average value of the MAE from these 100 realizations is reduced to 6.48 km/h. In addition to these two cases, the average values of the MAE in the cases of other satisfactory speed thresholds are listed in Table II. It can be observed that the average value of the MAE decreases as the speed threshold decreases. This is because imposing the speed threshold helps reduce the variation of the vehicle speed.

Finally, it is important to know how the estimation method will perform when the period of analysis, T , changes. The accuracy of the regression-based estimation method at various values of T is shown in Table II. It can be observed that the estimation method loses its accuracy as the value of T decreases. The main reason is that when the period T is small, the amount of information contained in the period is not sufficient to make an accurate estimation.

C. Accuracy of Interval Component Analysis Method

In this section, we evaluate the performance of the ICA method. Recall that, in this method, each period of T is viewed as a state sequence. The state sequences are extracted from the data sensed by the accelerometer, using the state classification method. Then, the state sequences are randomly selected to be placed in the training set and the test set. These two sets are mutually exclusive. The state sequences in the training set are used in building a database of the mobile interval length and

the corresponding estimated average speed. Once the database is obtained, the ICA method is used to estimate the average speed of the vehicle for each state sequence in the test set. The estimated average speed \hat{v}_I for each state sequence in the test set is calculated through (5), and it is compared with the referenced average speed obtained from the GPS receiver. The MAE of the average speed can then be calculated as

$$\epsilon_I = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |\hat{v}_{I,k} - \bar{v}_{T,k}| \quad (8)$$

where ϵ_I is the MAE of the average speed, $\hat{v}_{I,k}$ is the average speed of the k^{th} sequence estimated by the ICA method, $\bar{v}_{T,k}$ is the referenced average speed of the k^{th} sequence, and M is the number of sequences in the test set.

Since the state sequences in the training set and the test set are randomly chosen, different realizations of the training sets and the test sets will yield different MAE values. Fig. 6 illustrates the values of the MAE obtained from 100 realizations of the training sets and the test sets. In each realization, there are 150 sequences in the training set, and there are 30 sequences in the test set. The MAE incurred by the ICA method in each realization is obtained from (8). In this figure, the MAE values obtained from the regression-based estimation method are also shown for a comparison. It can be observed that the MAE values in the case of the ICA method are generally lower than those in the case of the regression-based method. Averaging over these 100 realizations, the average value of the MAE in the case of the ICA method is 6.39 km/h whereas the average value of the MAE in the case of the regression-based method is 7.64 km/h. The accuracy of the ICA estimation method at different satisfactory speed thresholds and values of T is summarized in Table III. Similarly to the case of the regression-based method, the ICA method also loses its accuracy as the value of T decreases.

A combination of data smoothing and satisfactory speed threshold can be used in the ICA method to improve the accuracy. Fig. 7 shows the average values of the MAE for

TABLE II
ACCURACY OF THE REGRESSION-BASED ESTIMATION METHOD AT DIFFERENT SATISFACTORY SPEED THRESHOLDS AND VALUES OF T .

Satisfactory speed threshold (km/h)	Average value of MAE over 100 realizations (km/h)		
	$T = 360$ s	$T = 270$ s	$T = 180$ s
Natural (no threshold)	7.64	8.09	8.68
80	7.54	7.96	8.49
60	6.48	6.84	7.23
40	4.38	4.64	5.03

TABLE III
ACCURACY OF THE ICA ESTIMATION METHOD AT DIFFERENT SATISFACTORY SPEED THRESHOLDS AND VALUES OF T .

Satisfactory speed threshold (km/h)	Average value of MAE over 100 realizations (km/h)		
	$T = 360$ s	$T = 270$ s	$T = 180$ s
Natural (no threshold)	6.39	6.69	7.37
80	6.22	6.60	7.25
60	5.20	5.73	6.32
40	3.57	3.77	4.31

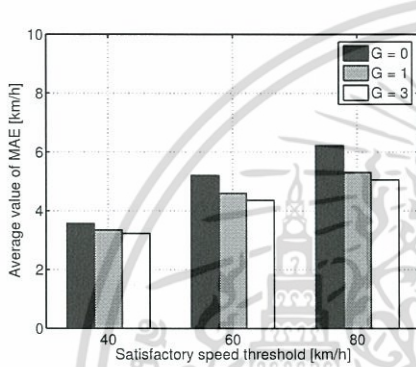


Fig. 7. Accuracy of the ICA method at various combinations of smoothing factors and satisfactory speed thresholds. The value of T considered in this analysis is 360 seconds.

various combinations of smoothing factors and satisfactory speed thresholds. Each average value of the MAE shown in Fig. 7 is obtained from 100 realizations of the training sets and the test sets. As previously observed in the case of the regression-based method, the estimation accuracy improves as the satisfactory speed threshold decreases. The satisfactory speed threshold helps reduce the variation by aggregating the speed above the threshold into one category. In addition, it can be observed that data smoothing can help improve the estimation accuracy. For example, at the speed threshold of 80 km/h, there is a clear distinction between the case where data smoothing is not used (i.e., $G = 0$) and the cases where data smoothing is exercised (i.e., $G > 0$). However, the improvement becomes marginal as the value of the smoothing factor, G , increases. This suggests that using only a few neighboring values for data smoothing works sufficiently well. In the practical case with the speed threshold of 60 km/h and $G = 1$, the average value of the MAE is only around 4.5 km/h. This level of accuracy is acceptable for a typical traffic application.

V. CONCLUSION

In this paper, instead of a power-hungry GPS receiver, we have explored a new possibility of using other types of sensors for traffic sensing. A particular type of sensors focused in this study is an accelerometer because it consumes the least amount of power among the sensors on a smartphone. Basically, we investigate whether it is possible and how to estimate an average speed of a vehicle based on the data sensed by an accelerometer. Two speed estimation methods, namely the Regression-based method and the Interval Component Analysis (ICA) method, are introduced in this paper. These estimation methods are based on an analysis of the mobile state and the stationary state of a vehicle. These states are determined purely from the data sensed by an accelerometer.

The regression-based speed estimation method is quite simple. Only the total mobile time of a vehicle in a specified period is needed as an input to a polynomial regression function. On average, the mean absolute error of the average speed estimated by this method is around 7.64 km/h. Nonetheless, the accuracy can further be improved by specifying a satisfactory speed threshold as discussed in the paper. The satisfactory speed threshold defines the speed level that can be considered as non-congested. This helps improve the accuracy of the estimation method by reducing the speed variation. At the satisfactory speed threshold of 60 km/h, the mean absolute error can be reduced to 6.48 km/h. The error can further be reduced if the lower satisfactory speed threshold is imposed.

The Interval Component Analysis estimation method is slightly more complex than the regression-based method. In this method, the estimated average speed is derived from the alternating sequence of mobile and stationary states of the vehicle. It can achieve higher accuracy than the regression-based method. On average, the mean absolute error of the average speed estimated by this method is around 6.39 km/h. However, the accuracy can further be improved by using a combination of data smoothing and satisfactory speed threshold. Concretely, at the satisfactory speed threshold of 60 km/h and the smoothing factor of 1, the error can be reduced to around 4.5 km/h. This level of accuracy is highly acceptable for a typical traffic report application.

It is important to note that, in estimating speed, we have not differentiated between different types of roads that a vehicle travels. Different types of roads have different speed limits and traffic rules. The speed limits on the roads that the vehicle travels in our experiments vary. This will certainly have an impact on the accuracy of the estimated speed. Nonetheless, even without the information on the types of roads and their speed limits, it is shown in this study that the estimation methods can achieve an acceptable level of accuracy. Had the information about the types of roads and their speed limits been incorporated into the estimation methods, a higher level of accuracy would be expected.

Finally, the analysis done in this study is based on the traffic data collected in Bangkok, Thailand. While its traffic characteristics may not necessarily represent the traffic in all regions of the world, the results shown in this study do serve as evidence that it is possible to use an accelerometer on a smartphone for speed estimation. In addition, the level of accuracy achieved is also sufficient for a typical traffic sensing and traffic information application.

ACKNOWLEDGMENT

This work is supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang and the National Research Council of Thailand under grant number 2558A11802051.

REFERENCES

- [1] A. Kovacheva, R. Frank, and T. Engel, "LuxTraffic: A collaborative traffic sensing system," in *Proc. IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks*, Apr. 2013, pp. 1–6.
- [2] D. B. Work, O. Tossavainen, Q. Jacobson, and A. M. Bayen, "Lagrangian sensing: Traffic estimation with mobile devices," in *Proc. IEEE American Control Conference*, Jun. 2009, pp. 1536–1543.
- [3] Z. Li, Y. Zhu, H. Zhu, and M. Li, "Compressive sensing approach to urban traffic sensing," in *Proc. IEEE International Conference on Distributed Computing Systems*, Jun. 2011, pp. 889–898.
- [4] X. Li, W. Shu, M. Li, H. Huang, P. Luo, and M. Wu, "Performance evaluation of vehicle-based mobile sensor networks for traffic monitoring," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 4, pp. 1647–1653, May 2009.
- [5] F. B. Abdesslem, A. Phillips, and T. Henderson, "Less is more: Energy-efficient mobile sensing with senseless," in *Proc. ACM Workshop on Networking, Systems, and Applications for Mobile Handhelds*, Aug. 2009, pp. 61–62.
- [6] W. Z. Khan, Y. Xiang, M. Y. Aalsalem, and Q. Arshad, "Mobile phone sensing systems: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 15, no. 1, pp. 402–427, First Quarter 2013.
- [7] E. Koukoumidis, M. Martonosi, and L. Peh, "Leveraging smartphone cameras for collaborative road advisories," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 11, no. 5, pp. 707–723, May 2012.
- [8] R. Banerjee and A. Sinha, "TrigSense: Accelerometer triggered audio sensing for traffic condition monitoring," in *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks, and Information Processing*, Apr. 2013, pp. 135–140.
- [9] Waze Website, [Online], 2014, available: <http://www.waze.com>.
- [10] J. Eriksson, L. Girod, B. Hull, R. Newton, S. Madden, and H. Balakrishnan, "The pothole patrol: Using a mobile sensor network for road surface monitoring," in *Proc. ACM International Conference on Mobile Systems, Applications and Services*, Jun. 2008, pp. 29–39.
- [11] R. Bhoraskar, N. Vankadhara, B. Raman, and P. Kulkarni, "Wolverine: Traffic and road condition estimation using smartphone sensors," in *Proc. IEEE International Conference on Communication Systems and Networks*, Jan. 2012, pp. 1–6.
- [12] H. Eren, S. Makinist, E. Akin, and A. Yilmaz, "Estimating driving behavior by a smartphone," in *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Jun. 2012, pp. 234–239.
- [13] D. A. Johnson and M. M. Trivedi, "Driving style recognition using a smartphone as a sensor platform," in *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Oct. 2011, pp. 1609–1615.
- [14] SafeMate Application, Google Play Website, [Online], available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.mbi.safemate>.
- [15] U. Dakshitha, D. Lenagala, L. Silva, H. Siriwardene, and D. Dias, "Vehicular traffic monitoring with mobile devices," in *Proc. IEEE International Conference on Industrial and Information Systems*, Dec. 2013, pp. 676–681.
- [16] Accelerometer Application, Google Play Website, [Online], available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.a10>.
- [17] L. Wu, "Experimental study on vehicle speed estimation using accelerometer and wheel speed measurements," in *Proc. IEEE International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, Jul. 2011, pp. 294–297.
- [18] Y. Song, S. Shin, S. Kim, D. Lee, and K. H. Lee, "Speed estimation from a tri-axial accelerometer using neural networks," in *Proc. IEEE International Conference on Engineering in Medicine and Biology Society*, Aug. 2007, pp. 3224–3227.
- [19] Z. He and W. Zhang, "Estimation of walking speed using accelerometer and artificial neural networks," in *Computer Science for Environmental Engineering and Ecoinformatics*, ser. Communications in Computer and Information Science, Y. Yu, Z. Yu, and J. Zhao, Eds., Springer Berlin Heidelberg, 2011, vol. 159, pp. 42–47.
- [20] M. Yassin and E. Rachid, "A survey of positioning techniques and location based services in wireless networks," in *Proc. IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems*, Feb. 2015, pp. 1–5.
- [21] P. Leakkaw and S. Panichpapiboon, "Speed estimation through mobile sensing," in *Proc. IEEE Region 10 Conference*, Oct. 2014, pp. 1–5.



Sooksan Panichpapiboon (S'05-M'07) received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, in 2000, 2002, and 2006, respectively, all in electrical and computer engineering. In April 2008, he was a Visiting Researcher with the Department of Information Engineering, University of Parma, Parma, Italy. He is currently an Associate Professor with the Faculty of Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. His current research interests include intelligent transportation systems, ad hoc wireless networks, and performance modeling.

Dr. Panichpapiboon received the Asia-Europe Meeting DUO-Thailand Fellowship in 2007 and the Doctoral Dissertation Award from the National Research Council of Thailand in 2011.



Puttipong Leakkaw received a bachelor degree in information technology from King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Prachinburi, Thailand, in 2011. He is currently pursuing the M.S. degree in information technology at the Faculty of Information Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand. His current research interests are vehicular technology and mobile sensors.

Speed Estimation Through Mobile Sensing

Puttipong Leakkaw and Sooksan Panichpapiboon

Faculty of Information Technology
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
E-mail: puttipong.plk@gmail.com, sooksan@alumni.cmu.edu

Abstract—With the advances in wireless communication and mobile computing, a future *infrastructureless* self-organizing traffic information system, where vehicles can form a network for exchanging traffic information among themselves, will soon be realized. In an infrastructureless traffic information system, vehicles will act as mobile sensors and collect the traffic data as they travel. Smartphones are a great choice for traffic sensing devices as they are now equipped with a variety of sensors such as global positioning system (GPS) receiver, accelerometer, gyroscope, camera, and microphone. These sensors can be exploited to collect traffic data. Although there are many types of sensors available for traffic sensing, past studies have mainly focused on a GPS receiver. However, a GPS receiver consumes a lot of power and hence it can significantly shorten the battery life. In this paper, we explore the possibility of using other types of sensors on a smartphone for traffic sensing. Particularly, we investigate whether it is possible and how accurate it is to estimate vehicle speed from the data sensed by an accelerometer. The accuracy of our proposed estimation method will be presented.

Index Terms—Speed estimation, traffic sensing, traffic information systems, accelerometers, vehicular networks

I. INTRODUCTION

A traffic information system is essential for collecting and disseminating traffic data. Real-time traffic information such as the average speed of vehicles, vehicle density, flow rate, and travel time can help a motorist choose a route more wisely. Currently, most of the traffic information systems are an infrastructure-based system, where traffic data are collected from fixed sensors such as inductive loop detectors and surveillance cameras. However, it usually takes a great deal of time and effort to install sensors in such a system. In many cases, this involves digging up the road surface to implant the sensors underneath it. In addition, it is extremely costly to install sensors to cover a large area (e.g., city-wide coverage). Moreover, maintenance of these large number of fixed sensors is also difficult. The system could be made much more effective and less expensive if the traffic information could be collected and distributed by the vehicles on the road.

With the advances in wireless communication and mobile computing, a future *infrastructureless* self-organizing traffic information system in a form of vehicular ad hoc networks will soon be realized. In an infrastructureless traffic information system, vehicles will act as mobile sensors and collect the traffic data as they travel. They can also disseminate and share the traffic information with other vehicles. The main challenge

in this type of systems is in designing how to collect and process the traffic data since the sensors are now mobile and distributed. Among many things, a system designer needs to consider the following factors: (i) which types of sensors to use; (ii) how to use them to collect the traffic data; and most importantly (iii) how to turn the data into information that can accurately reflect the real traffic condition.

In our perspective, smartphones are a great choice for mobile traffic sensing devices. Smartphones are now equipped with a variety of sensors such as global positioning system (GPS) receiver, accelerometer, gyroscope, camera, and microphone. These sensors can be exploited to collect traffic data. Moreover, smartphones are now adopted by a large number of users. Consequently, a person with a smartphone can turn any vehicle, whether new or old, into a mobile traffic sensor.

The use of smartphones for traffic sensing is gaining more attention from the research community. However, most of the existing works have mainly focused on using only a GPS receiver in determining the average speed of a vehicle [1–4]. Other types of potential sensors have mostly been neglected. Despite its convenience, using a GPS receiver for traffic sensing has a serious shortcoming. A GPS receiver is a power-hungry sensor [5]. Using it continuously, especially for traffic sensing, can quickly drain out the phone battery.

In this paper, we explore the possibility of using other types of sensors on a smartphone for traffic sensing. Particularly, we will focus on an accelerometer since it consumes the least amount of power among the sensors on a smartphone [5]. In fact, its power consumption rate is approximately six times lower than that of a GPS receiver [5]. The key questions which we try to answer in this study are:

- Is it possible to estimate an average speed of a vehicle from the data sensed by an accelerometer on a smartphone?
- If so, how to estimate it and what is the accuracy of the estimation method?

The remainder of this paper is organized as follows. In Section II, we briefly discuss the work related to mobile traffic sensing. In Section III, we describe how our research is conducted and how the speed is estimated from the accelerometer data. In Section IV, we discuss the performance of the estimation method. Finally, we conclude the paper in Section V.

II. RELATED WORK

Smartphones are now used as sensing devices in many applications such as traffic sensing, health monitoring, environmental monitoring, and social interaction [6]. Traffic sensing is an application which has recently gained much attention from the intelligent transportation system (ITS) research community. A variety of sensors on a smartphone can potentially be used for traffic sensing. For example, in [7], a camera on a smartphone is used for capturing and detecting the traffic lights. In [8], a microphone is used for detecting a honking sound on a road in India. Basically, the motorists in India tend to honk more when the traffic is congested.

Most of the traffic sensing applications, however, rely on a GPS receiver. In [1], a GPS receiver on a smartphone is used in determining the average speed of a vehicle. In the system proposed in [1], vehicles will periodically send their locations to a central server. The central server will then use traces of vehicle locations to estimate the average speed of vehicles on a particular road. Similar studies which use GPS data for speed estimation can be found in [2–4]. An example of mobile traffic sensing applications which relies on a combination of GPS data and crowdsourcing can be found in [9]. However, using a GPS receiver on a smartphone is not energy-efficient. In other words, a GPS receiver consumes a lot of power [5].

There are also studies which use accelerometers for traffic applications. In [10, 11], the accelerometer data are used for identifying the road surface conditions (e.g., whether there are potholes and bumps on the road surface). In [12–14], the accelerometer data are used for identifying the driving behaviors of drivers (e.g., whether a driver drives safely or dangerously). Some of these applications (e.g., [14]) can also report a vehicle speed; however, the speed is still obtained through a GPS receiver. In [15], an accelerometer is used to detect the number of stops that a vehicle makes. If the number of stops is greater than a pre-defined threshold, then it is implied that the road is congested. However, it is not able to estimate the average speed of a vehicle or any quantitative traffic metrics. There is also a mobile application which uses an accelerometer for speed estimation [16]. However, the estimation method used in the application is not specified. Moreover, the correctness of the estimation method and its accuracy are neither evaluated nor verified.

In this paper, we distinguish ourselves from the existing works by investigating a way to estimate an average speed of a vehicle from a pattern of vehicle movement detected through an accelerometer. The speed estimation approach presented in this paper has not been considered by any of the existing works.

III. PATTERN ANALYSIS AND SPEED ESTIMATION

One of the main indicators of road traffic condition is the average speed of vehicles traveling on the road. Obviously, the average speed of vehicles on a congested road will be smaller than that of the freely flowing one. Intuitively, how fast an individual vehicle can move will depend on how frequent it needs to stop and the duration of each stop it makes. On a

congested road, a vehicle will have to stop frequently and each stop may last a while. In this case, the average speed of the vehicle will be small. In contrast, the average speed of a vehicle is higher on a non-congested road since it can move continuously without many interruptions. As a result, we can use the combination of the frequency of stops and the duration of stops to estimate the average speed of the vehicle. In this research, we introduce an innovative way to detect the stop frequency and the stop duration with an accelerometer on a smartphone. Moreover, we find a function which can transform the stop frequency and the stop duration into the average speed accurately. The approaches used in our study are described in the following subsections.

A. Data Collection

1) *Device*: In this study, an iPhone 5 is used as a mobile device for collecting the sensor data. An iOS application is developed for data collection purposes. In the beginning of each experiment, the mobile phone will be placed firmly on top of the dashboard of a vehicle. The phone can be placed in any orientation since the initial state of the 3-axis accelerometer will be automatically calibrated by the application. During the experiment, a driver can drive naturally with the flow of the traffic. The application will record the values sensed by the accelerometer, the geo-location of the mobile phone (i.e., its latitude and longitude), and the speed obtained through the GPS receiver. The speed obtained through the GPS receiver will only be used as a reference in our experiment. Note that it is rather difficult to get an accurate ground-truth speed displayed on the speedometer of the vehicle with bare eyes since the scale on the speedometer is very coarse. Thus, using the speed obtained from the GPS receiver as a referenced ground-truth speed is a better option.

2) *Experimental Sites*: Since our focus is on the urban road traffic, we conduct our experiments in Bangkok, Thailand. The data were collected on two routes as shown in Fig. 1. The route on the left of Fig. 1 is in the Pathumwan area, consisting of Rama I Road, Rama IV Road, Payathai Road, and Rajdamri Road. The route on the right of Fig. 1 is in the Ladprao area, consisting of Paholyothin Road and Ladprao Road. These are among the busiest roads in Bangkok. The structures of these roads are those of the typical urban roads, with multiple lanes, traffic lights, and intersections. The data were collected during daytime on weekdays in October and November 2013. Currently, we have approximately 36,000 seconds of data for analysis.

B. Data Analysis

After the data have been obtained, we divide them into blocks of 360 seconds each. This allows us to analyze the average speed of the vehicle over a 360-second period. This is appropriate because the traffic condition does not change abruptly in such a period. In each period, we need to identify when the vehicle is moving and when it is stationary. The difference between a stationary state and a non-stationary state of a vehicle can be classified as follows.

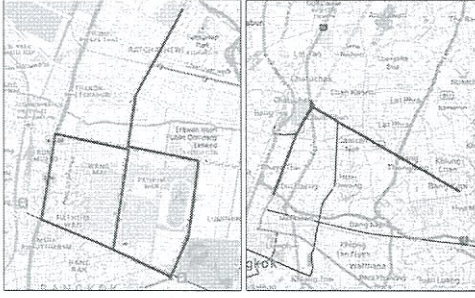


Fig. 1. Routes used in data collection. On the left is the Pathumwan area, consisting of Rama I Road, Rama IV Road, Payathai Road, and Rajdamri Road. On the right is the Ladprao area, consisting of Paholyothin Road and Ladprao Road. (Images from Google Maps.)

- 1) A vehicle will be considered as in a *stationary* state if the deviation from the initial calibrated value, on *every* axes of the accelerometer, is less than a threshold γ m/s² for a continuous duration of at least ω seconds.
- 2) A vehicle will transit from the stationary state to a *non-stationary* state if the deviation from the initial calibrated value, on *any* axes of the accelerometer, is greater than or equal to the threshold γ m/s² for a continuous duration of at least ψ seconds.

The value of γ used in our study is $0.04g$, where $g = 9.8$ m/s² is the gravitational acceleration. The values of ω and ψ used in our study are 1.5 second and 0.3 second, respectively.¹ The accuracy of this state classification method will be discussed in Section IV.

Once the number of stops and the duration of each stop in a 360-second period are determined, we need to map them to the ground-truth speed of the vehicle. It is logical to correlate the non-stationary time of the vehicle to the average speed. Intuitively, if the vehicle is able to move continuously over a longer period of time (i.e., longer non-stationary time), it has a better chance of accelerating to a higher speed. More formally, let τ be a non-stationary time of the vehicle over a 360-second period. The expression for τ can be given as

$$\tau = 360 - \sum_{k=1}^N s_k \quad (1)$$

where s_k is the duration of the k^{th} stop, and N is the total number of stops in the 360-second period.

Next, we will map the non-stationary time of the vehicle to the average speed. In this experiment, we will use the speed obtained through the GPS receiver on the mobile phone as a reference. Note that this is done for experimental purposes only. Once a mapping function is obtained, the speed estimation can be used on a device with an accelerometer, regardless of whether the device is equipped with a GPS

¹We have also experimented with other values of γ , ω , and ψ , but the values chosen here yield the best results.

TABLE I
NUMBER OF SAMPLES IN THE TRAINING SET AND THE RESULTING COEFFICIENTS OF THE POLYNOMIAL FUNCTIONS

Number of samples in the training set	Coefficients of polynomials		
	α	β	C
60	3.653×10^{-4}	-0.0287	3.0887
70	3.503×10^{-4}	-0.0273	2.8572
80	3.165×10^{-4}	-0.0102	1.4876

receiver or not. Based on the collected data, the instantaneous speed obtained through the GPS receiver is recorded every second. The average speed of the vehicle, denoted by \bar{v} , can then be calculated by averaging the instantaneous speed over the 360-second period as follows

$$\bar{v} = \frac{1}{360} \sum_{k=1}^{360} v_k \quad (2)$$

where v_k is the k^{th} sample of the instantaneous speed.

A mapping between a non-stationary time sample (τ) and an average speed (\bar{v}) can now be created. This is done as follows. The non-stationary time samples are divided into two separate sets. One set will be used for creating a mapping function, and the other set will be used for testing the accuracy of the mapping function. The former will be referred to as the "training set" while the latter will be referred to as the "testing set." A second-order polynomial regression function is used to map the non-stationary time of the vehicle to the average speed. The regression equation is of the following form

$$\eta = \alpha\tau^2 + \beta\tau + C \quad (3)$$

where η is the regressed average speed, α and β are coefficients of the polynomial, and C is a constant. The resulting coefficients of the polynomial functions at different sizes of the training set are listed in Table I.

Fig. 2 illustrates the average speed as a function of non-stationary time of the vehicle. The non-stationary time samples and their corresponding referenced average speed are shown with the symbol 'o'. The polynomial regression line is also shown for a comparison. The number of non-stationary time samples used in the training set in this case is 60. The coefficients of the polynomial function are as listed in Table I. Similarly, the scenarios where the number of non-stationary time samples in the training set is 70 and 80 are illustrated in Fig. 3 and Fig. 4, respectively. It can be observed that the average speed ranges approximately from 1 km/h to 48 km/h. In general, as the number of samples in the training set increases, the regression line is able to fit the data better. In order to concretely evaluate the performance of these polynomial regression functions, their accuracy will be tested on a separate set of data in the testing set. The performance evaluation will be discussed in Section IV.

IV. PERFORMANCE EVALUATION

In this section, we evaluate the accuracy of the state classification method and the accuracy of the speed estimation

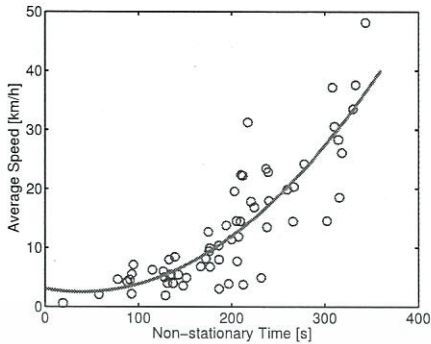


Fig. 2. Average speed as a function of non-stationary time. The number of samples in the training set in this case is 60.

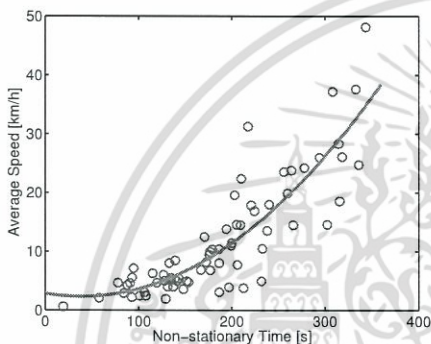


Fig. 3. Average speed as a function of non-stationary time. The number of samples in the training set in this case is 70.

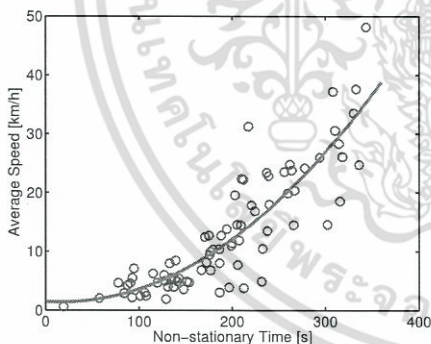


Fig. 4. Average speed as a function of non-stationary time. The number of samples in the training set in this case is 80.

TABLE II
A COMPARISON BETWEEN THE NUMBER OF STOPS AND STATIONARY TIME
INFERRED FROM THE ACCELEROMETER DATA AND THOSE OBTAINED
FROM PHYSICAL OBSERVATIONS

Set	Accelerometer		Physical Observations	
	Stop Count	Stationary Time (s)	Stop Count	Stationary Time (s)
1	5	122.44	4	114
2	8	190	5	174
3	2	218.14	2	225.7
4	1	162	2	166.4
5	6	100.3	6	101.4
6	8	217.93	6	221.9
7	6	135.60	4	148.5
8	12	122.76	12	131
9	3	109.50	3	112.04
10	3	80.38	3	83.92
11	3	93.56	3	101.23
12	16	107.59	12	92.30
13	6	31.25	4	23.85
14	4	28.96	3	39.13
15	2	106.89	2	112.98
16	8	124.64	5	115.70
17	15	214.65	11	208.12
18	10	168.29	8	156.83
19	7	61.34	5	57.07
20	3	142.11	3	145.84

method.

A. Accuracy of State Classification Method

Since we use the data sensed by an accelerometer to infer the stationary and non-stationary states of the vehicle, it is important to evaluate the accuracy of the state classification method. In order to test the accuracy of the state classification method, we compare the results obtained from the classification method with the actual number of stops and the duration of stationary time in each 360-second period. The actual number of stops and the duration of stationary time are obtained by physically observing the number of stops that the vehicle makes and the total duration of each stop. We have physically observed the states of the vehicle over the duration of 7,200 seconds. This constitutes to 20 sets of 360-second periods.

The number of stops and the stationary time obtained from the accelerometer data and those obtained from the physical observations are shown in Table II. Overall, it can be observed from Table II that the differences between the number of stops obtained from the accelerometer data and those obtained from the physical observations are quite small. In fact, on average, the difference between them is only about 1.35. In addition, it can also be observed that the differences between the stationary time obtained from the accelerometer data and those obtained from the physical observations are also quite small. Actually, the average difference between them is only

TABLE III
ACCURACY OF THE ESTIMATED AVERAGE SPEED AT VARIOUS SIZES OF
THE TRAINING SET

Number of samples in the training set	ϵ (km/h)
60	4.81
70	4.76
80	4.72

7.51 seconds, which is equivalent to around 2.08% of the duration of each observation period. As a result, the method used in classifying the state of the vehicles based on the accelerometer data is accurate.

B. Accuracy of Speed Estimation Method

In this section, we evaluate the accuracy of the average speed estimated from the accelerometer data. After obtaining a regression function for each training set, we test the accuracy of the function with a separate set of non-stationary time samples. The accuracy of the regression function is quantified in terms of mean absolute error, which can be expressed as follows

$$\epsilon = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |\eta_k - \bar{v}_k| \quad (4)$$

where ϵ is the mean absolute error, η_k is the k^{th} sample of the average speed estimated by the regression function, \bar{v}_k is the k^{th} sample of the referenced average speed, and M is the number of samples in the testing set.

The accuracy of the regression function in each case, in terms of mean absolute error, is shown in Table III. It can be observed that the mean absolute error ranges from 4.72 km/h to 4.81 km/h, which is rather small and acceptable for the targeted traffic applications. In addition, the accuracy tends to increase as the number of samples in the training set increases. Thus, we expect that the accuracy will be further improved if we have a larger number of samples in the training set. We are still in the process of collecting more data. However, the results presented in this paper serve as an evidence that our proposed method is able to transform the data sensed by an accelerometer on a smartphone into an average speed accurately.

V. CONCLUSION

In this paper, we have investigated the possibility of using an accelerometer on a smartphone for estimating the average speed of a vehicle. An accelerometer is considered in this study because it consumes much less power than a GPS receiver. Particularly, we have devised a novel method for transforming the data sensed by a 3-axis accelerometer into an average speed of a vehicle. Our estimation approach is based on an analysis of stationary and non-stationary states of a vehicle. It is shown in this paper that the average speed and the non-stationary time of a vehicle has a correlation which can be described by a second-order polynomial function. The

accuracy of our proposed estimation method is evaluated. It is shown that the proposed method can achieve the mean absolute error in the range of 4.72 km/h - 4.81 km/h, which is quite small and acceptable for the targeted traffic applications. However, the accuracy is expected to improve as the number of samples in the training set increases.

Further research is still needed to improve the accuracy. Moreover, a wider range of average speed samples also needs to be considered. We are in the process of collecting more data.

REFERENCES

- [1] A. Kovacheva, R. Frank, and T. Engel, "LuxTraffic: A collaborative traffic sensing system," in *Proc. IEEE Int. Workshop on Local and Metropolitan Area Netw.*, Brussels, Belgium, Apr. 2013, pp. 1-6.
- [2] D. B. Work, O. Tossavainen, Q. Jacobson, and A. M. Bayen, "Lagrangian sensing: Traffic estimation with mobile devices," in *Proc. IEEE Amer. Control Conf.*, St. Louis, MO, USA, Jun. 2009, pp. 1536-1543.
- [3] Z. Li, Y. Zhu, H. Zhu, and M. Li, "Compressive sensing approach to urban traffic sensing," in *Proc. IEEE Int. Conf. Distributed Comput. Syst. (ICDCS)*, Minneapolis, MN, USA, Jun. 2011, pp. 889-898.
- [4] X. Li, W. Shu, M. Li, H. Huang, P. Luo, and M. Wu, "Performance evaluation of vehicle-based mobile sensor networks for traffic monitoring," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 4, pp. 1647-1653, May 2009.
- [5] F. B. Abdesslem, A. Phillips, and T. Henderson, "Less is more: Energy-efficient mobile sensing with senseless," in *Proc. ACM Workshop on Netw., Syst., and Appl. for Mobile Handhelds (MobiHeld)*, Barcelona, Spain, Aug. 2009, pp. 61-62.
- [6] W. Z. Khan, Y. Xiang, M. Y. Aalsalem, and Q. Arshad, "Mobile phone sensing systems: A survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 15, no. 1, pp. 402-427, First Quarter 2013.
- [7] E. Koukoulidis, M. Martonosi, and L. Peh, "Leveraging smartphone cameras for collaborative road advisories," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 11, no. 5, pp. 707 - 723, May 2012.
- [8] R. Banerjee and A. Sinha, "TrigSense: Accelerometer triggered audio sensing for traffic condition monitoring," in *Proc. IEEE Int. Conf. Intell. Sensors, Sensor Netw., and Info. Processing*, Melbourne, Australia, Apr. 2013, pp. 135-140.
- [9] Waze Website, [Online], 2014, available: <http://www.waze.com>.
- [10] J. Eriksson, L. Girod, B. Hull, R. Newton, S. Madden, and H. Balakrishnan, "The pothole patrol: Using a mobile sensor network for road surface monitoring," in *Proc. ACM Int. Conf. Mobile Syst. Appl. and Services (MobiSys)*, Breckenridge, CO, USA, Jun. 2008, pp. 29-39.
- [11] R. Bhoraskar, N. Vankadhara, B. Raman, and P. Kulkarni, "Wolverine: Traffic and road condition estimation using smartphone sensors," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Syst. and Netw. (COMSNETS)*, Bangalore, India, Jan. 2012, pp. 1-6.
- [12] H. Eren, S. Makinist, E. Akin, and A. Yilmaz, "Estimating driving behavior by a smartphone," in *Proc. IEEE Intell. Vehicles Symp. (IV)*, Alcalá de Henares, Spain, Jan. 2012, pp. 234 - 239.
- [13] D. A. Johnson and M. M. Trivedi, "Driving style recognition using a smartphone as a sensor platform," in *Proc. IEEE Intell. Transp. Syst. Conf. (ITSC)*, Washington, DC, USA, Oct. 2011, pp. 1609-1615.
- [14] SafeMate Application, Google Play Website, [Online], available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.mbi.safemate>.
- [15] U. Dakshitha, D. Lenagala, L. Silva, H. Sriwardene, and D. Dias, "Vehicular traffic monitoring with mobile devices," in *Proc. IEEE Int. Conf. Industrial and Info. Syst. (ICIIS)*, Sri Lanka, Dec. 2013, pp. 676-681.
- [16] Accelerometer Application, Google Play Website, [Online], available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.a10>.



แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 2 รอบ 12 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2558

 แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ) แหล่งเงินรายได้ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์บนโทรศัพท์เคลื่อนที่สำหรับระบบข้อมูลจราจรแบบไม่พึ่งพาโครงสร้างพื้นฐาน
(ภาษาอังกฤษ) Mobile Sensing for Infrastructureless Traffic Information System

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย (อ./ดร./ผศ./รศ./ศ.) รศ.ดร. สุขสันต์ พาณิชพาพิบูล

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2557 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558

ระยะเวลาดำเนินการ 1 ปี ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม 2557 ถึงวันที่ 30 กันยายน 2558

ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

1. การเบิกจ่ายงบประมาณ

งวดที่ 1	254,653.46 บาท	25.46 %	วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)	30 พย.2557
งวดที่ 2	387,206.00 บาท	38.72 %	วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)	30 ธค.2557
งวดที่ 3	25,760.00 บาท	2.57 %	วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)	31 มค.2558
งวดที่ 4	23,360.00 บาท	2.33 %	วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)	27 กพ.2558
งวดที่ 5	30,310.00 บาท	3.03 %	วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)	31 มีค.2558
งวดที่ 6	35,720.00 บาท	3.57 %	วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)	30 เมย.2558
งวดที่ 7	53,169.00 บาท	5.32 %	วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)	31 พค.2558
งวดที่ 8	44,420.00 บาท	4.44 %	วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)	30 มิย.2558
งวดที่ 9	35,189.00 บาท	3.52 %	วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)	31 กค.2558
งวดที่ 10	32,458.00 บาท	3.24 %	วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)	31 สค.2558
งวดที่ 11	25,760.00 บาท	2.58 %	วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว)	30 กย.2558

2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้ นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร : ค่าจ้างชั่วคราว	233,600.00	233,600.00	-
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน	-	-	-
ค่าใช้สอย	-	-	-
ค่าวัสดุ	110,000.00	110,000.00	-
ค่าสาธารณูปโภค	24,000.00	21,600.00	2,400.00
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	632,400.00	582,805.46	49,594.54
รวม	1,000,000.00	948,005.46	51,994.54

รศ.ดร. สุขสันต์ พาณิชพาพิบูล

(นางสาวพิจิตรา สุวรรณศรี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารโครงการวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อาจนำไปใช้ในการดำเนินการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ หัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน แล่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเงินที่การเงิน

30 / กันยายน / 2558

30 / ๙๕ / ๕๕

ประวัตินักวิจัย

ชื่อ-สกุล สุขสันต์ พาณิชพาพิบูล
ตำแหน่ง รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

- Ph.D. Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, USA, 2006
- M.S. Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, USA, 2002
- B.S. Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, USA, 2000

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ

- Intelligent Transportation Systems
- Vehicular Ad Hoc Networks
- Wireless Sensor Networks

ผลงานวิจัย

ประเภทวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

1. **S. Panichpapiboon** and P. Leakkaw, "Traffic Sensing Through Accelerometers," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, in press, doi: 10.1109/TVT.2015.2448237
2. **S. Panichpapiboon**, "Time-Headway Distributions on an Expressway: Case of Bangkok," *ASCE Journal of Transportation Engineering*, vol. 141, no. 1, pp. 05014007, Jan. 2015.
3. **S. Panichpapiboon** and L. Cheng, "Irresponsible Forwarding Under Real Inter-vehicle Spacing Distributions," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 5, pp. 2264-2272, Jun. 2013.
4. L. Cheng and **S. Panichpapiboon**, "Effects of Intervehicle Spacing Distributions on Connectivity of VANET: A Case Study from Measured Highway Traffic," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 10, pp. 90-97, Oct. 2012.
5. **S. Panichpapiboon** and W. Pattara-atikom, "A Review of Information Dissemination Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 14, no. 3, pp. 784-798, Third Quarter, 2012.
6. **S. Panichpapiboon** and W. Pattara-atikom, "Exploiting Wireless Communication in Vehicle Density Estimation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 6, pp. 2742-2751, Jul. 2011.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. **S. Panichpapiboon**, G. Ferrari, and O. K. Tonguz, "Connectivity of Ad Hoc Wireless Networks: An Alternative to Graph-Theoretic Approaches," *Wireless Networks*, vol. 16, no. 3, pp. 793-811, Apr. 2010.
8. **S. Panichpapiboon** and W. Pattara-atikom, "Connectivity Requirements for Self-Organizing Traffic Information Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 6, pp. 3333-3340, Nov. 2008.
9. **S. Panichpapiboon** and J. M. Peha, "Providing Secondary Access to Licensed Spectrum Through Coordination," *Wireless Networks*, vol. 14, no. 3, pp. 295-307, Jun. 2008.
10. **S. Panichpapiboon**, G. Ferrari, N. Wisitpongphan, and O. K. Tonguz, "Route Reservation in Ad Hoc Wireless Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 6, no. 1, pp. 56-71, Jan. 2007.
11. **S. Panichpapiboon**, G. Ferrari, and O. K. Tonguz, "Optimal Transmit Power in Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 5, no. 10, pp. 1432-1447, Oct. 2006.
12. J. M. Peha and **S. Panichpapiboon**, "Real-Time Secondary Markets for Spectrum," *Telecommunications Policy*, vol. 28, pp. 603-618, Aug.-Sep. 2004.

ประเภทการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1. P. Leakkaw and **S. Panichpapiboon**, "Speed Estimation Through Mobile Sensing," in *Proc. IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Bangkok, Thailand, Oct. 2014, pp. 1-5.
2. **S. Panichpapiboon**, "Irresponsible Forwarding Under General Inter-vehicle Spacing Distributions," in *Proc. ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI-CON)*, Khon Kaen, Thailand, May 2011, pp. 357-360.
3. **S. Panichpapiboon** and W. Pattara-atikom, "An Analysis of GPS Sampling Rates Required in Travel Time Estimation," in *Proc. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Tokyo, Japan, Oct. 2009, pp. 1-6.
4. **S. Panichpapiboon** and W. Pattara-atikom, "Connectivity Requirements for Vehicular Networks with Single-Hop Broadcasting," in *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST)*, Lille, France, Oct. 2009, pp. 388-392.
5. **S. Panichpapiboon** and G. Ferrari, "Irresponsible Forwarding," in *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST)*, Phuket, Thailand, Oct. 2008, pp. 311-316.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. **S. Panichpapiboon** and W. Pattara-atikom, "Evaluation of a Neighbor-based Vehicle Density Estimation Scheme," in *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST)*, Phuket, Thailand, Oct. 2008, pp. 294-298.
7. **S. Panichpapiboon** and W. Pattara-atikom, "Connectivity Requirements for a Self-Organizing Vehicular Network," in *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Eindhoven, The Netherlands, Jun. 2008, pp. 968-972.
8. **S. Panichpapiboon**, "Adaptive Frame Length Selection Scheme for RFID Object Identification," in *Proc. IEEE International Conference on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Athens, Greece, Sep. 2007, pp. 1-5.
9. **S. Panichpapiboon**, G. Ferrari, N. Wisitpongphan, and O. K. Tonguz, "Pros and Cons of Route Reservation in Static Multi-hop Networks," in *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Seoul, Korea, May 2005, pp. 3000-3004.
10. **S. Panichpapiboon**, G. Ferrari, and O. K. Tonguz, "Optimal Common Transmit Power in Ad Hoc Wireless Networks," in *Proc. IEEE Performance, Computing, and Communications Conference (IPCCC)*, Phoenix, Arizona, USA, Apr. 2005, pp. 593-597.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้