

การพัฒนาวิธีประมาณระยะเวลาเดินทางบนทางยกระดับจากข้อมูลเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ Travel Time Estimation on Tollways Based on Bluetooth Scanner Data

จุฑาทิพย์ อัจฉาญา^{1,*} และ สโรช บุญศิริพันธ์²

^{1,2,3} สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

*Corresponding author; E-mail address: chuthathip.at@ku.th

บทคัดย่อ

ข้อมูลระยะเวลาเดินทางเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งช่วยในการตัดสินใจและวางแผนเลือกเส้นทางในการเดินทางจากต้นทางไปยังปลายทาง ช่วยให้ผู้ใช้ทางสามารถเลือกเส้นทางที่เหมาะสม และยังช่วยเจ้าหน้าที่บริหารจัดการและควบคุมการจราจรได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่ใช้ในการคำนวณระยะเวลาเดินทางหลายวิธี เช่น การคำนวณจากข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนถนน (Roadside Sensor) การคำนวณจากข้อมูล Automatic Vehicle Identification (AVI) และการคำนวณจากข้อมูลสัญญาณบลูทูธ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการประมาณระยะเวลาเดินทางบนทางยกระดับ ซึ่งอุปกรณ์ต่าง ๆ รวมทั้งรถยนต์มีแนวโน้มที่จะมีอุปกรณ์บลูทูธเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ข้อมูลที่ใช้คือข้อมูล MAC Address ของอุปกรณ์ที่ติดตั้งในยานพาหนะและโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้ทาง ที่สามารถตรวจวัดได้จากเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ ที่ติดตั้งบนทางยกระดับอุตราภิมุข โดยผู้วิจัยได้พัฒนาการเก็บข้อมูล ขั้นตอนการกรองข้อมูล การคำนวณหาระยะเวลาเดินทาง และทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของระยะเวลาเดินทางที่ได้จากเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ และคำนวณหาสัดส่วนของปริมาณรถยนต์ที่ติดอุปกรณ์บลูทูธ กับปริมาณจราจรจริงจากกล้องบันทึกวิดีโอบนทางยกระดับจากผลการเปรียบเทียบข้อมูลพบว่า วิธีการหาระยะเวลาเดินทางที่พัฒนาขึ้นจากการศึกษาที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาระยะเวลาเดินทาง เพื่อแจ้งให้ผู้ใช้ทางและเจ้าหน้าที่พนักงานในการบริหารจัดการระบบจราจรได้

คำสำคัญ: การประมาณระยะเวลาเดินทาง, เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ, ทางยกระดับ

Abstract

Travel time is one of the most important factors that help traveler making decisions and choosing the appropriate route. Furthermore, it also helps road authorities to manage traffic and solve traffic problems efficiently. Therefore, travel time information is necessary to be highly accurate and reliable. The objective of this paper is to develop the method for estimating

travel time based on Bluetooth scanner data, which is a relatively new technology that has recently implemented in Thailand. MAC Addresses of entertainment devices and mobile phones in vehicles were detected by the Bluetooth scanners installed along the Don Mueang Tollway. The researchers have developed the process of data collection, data filtering, and travel time estimation. Moreover, we have compared Bluetooth travel time accuracy with the actual travel time. Additionally, the penetration rate calculated based on number of MAC Addresses and traffic count collected from the video image processing cameras. The results showed that travel time estimated from the Bluetooth scanners can be used to inform travelers and road authorities to manage traffic.

Keywords: travel time estimation, Bluetooth scanner, tollway

1. ที่มาและความสำคัญ

ข้อมูลระยะเวลาการเดินทางเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งช่วยในการตัดสินใจและวางแผนเลือกเส้นทางในการเดินทางจากต้นทางไปยังปลายทาง การทราบระยะเวลาการเดินทาง จะทำให้สามารถเลือกเส้นทางที่ใช้ระยะเวลาการเดินทางที่เหมาะสม หรือในสภาพจราจรที่ไม่ติดขัดได้ และยังช่วยเจ้าหน้าที่ในการประมวลผลบริหารจัดการ และควบคุมการจราจรเพื่อแก้ไขหรือลดปัญหาจราจรติดขัด โดยใช้วิธีที่เหมาะสมและได้ประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อประหยัดเวลามากยิ่งขึ้น ดังนั้นข้อมูลระยะเวลาเดินทางที่มีควรมีความน่าเชื่อถือในระดับหนึ่ง โดยวิธีที่ใช้ในคำนวณหาระยะเวลาเดินทางนั้น สามารถคำนวณหาระยะเวลาเดินทางทางอ้อมได้ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากจุดสังเกตที่ไม่ใช่ค่าระยะเวลาโดยตรง เช่น ค่าความเร็ว ค่าปริมาณจราจร ค่าความหนาแน่นของจราจร ซึ่งอาจส่งผลให้ค่าระยะเวลาเดินทางที่คำนวณได้ไม่แม่นยำมากนัก [14, 16, 18] เช่น Video image processing, Loop detector และ Microwave sensors เป็นต้น และการคำนวณหาระยะเวลาเดินทางได้โดยตรง จากจุดต้นทางไปยังจุดปลายทาง [2, 4, 6, 15, 18] เช่น การใช้รถทดสอบ ที่ต้องกำหนดจำนวนกลุ่มตัวอย่างให้พอเพียงต่อการทดสอบ การคำนวณจากข้อมูล Automatic

Vehicle Identification (AVI) ที่มีข้อจำกัดด้านการติดตั้งอุปกรณ์ และการคำนวณจากข้อมูลจากเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ ที่จำนวนกลุ่มตัวอย่างขึ้นอยู่กับจำนวนอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนยานพาหนะ เป็นต้น

ซึ่งในปัจจุบันมียานพาหนะที่มีการติดตั้งสัญญาณบลูทูธออกจำหน่ายมากถึง 86% และผู้ใช้ทางที่พกพาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถส่งสัญญาณบลูทูธได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น [9] ซึ่งส่งผลให้กลุ่มตัวอย่างยิ่งเพิ่มสูงขึ้น อุปกรณ์ที่กล่าวถึงในงานวิจัยนี้ คือ เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลระยะเวลาเดินทางจริงบนทางยกระดับ ซึ่งยังไม่ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายมากนักในประเทศไทย โดยข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์เป็นข้อมูลจากโครงการงานจ้างเหมาก่อสร้างและปรับปรุงระบบควบคุมจราจรและระบบเฝ้าระวังบนทางยกระดับอุดรธานี ของบริษัททางยกระดับดอนเมือง จำกัด (มหาชน) ซึ่งผู้วิจัยได้นำมาใช้ในการประมาณระยะเวลาเดินทางจริงบนทางยกระดับอุดรธานี โดยได้พัฒนาขั้นตอนที่ใช้ในการเก็บข้อมูล คัดกรองข้อมูล เปรียบเทียบความถูกต้องข้อมูล และสรุปอภิปรายผลของผลลัพธ์ข้อมูลระยะเวลาเดินทางที่คำนวณได้

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระยะเวลาเดินทาง (Travel Time)

“ระยะเวลาเดินทาง” คือ ระยะเวลาของเส้นทางระหว่างจุดที่สนใจสองจุด ซึ่งบ่งบอกถึงสภาพจราจร สามารถช่วยในการตัดสินใจของผู้ใช้ทาง และช่วยเจ้าหน้าที่ในการประเมินและวางแผนการจัดการจราจร [15]

2.2 วิธีการหาระยะเวลาเดินทาง (Travel Time Measurement)

วิธีในการหาระยะเวลาเดินทางสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ การหาระยะเวลาเดินทางโดยตรง จะใช้อุปกรณ์ที่วัดค่าระยะเวลาเดินทางในรูปแบบต่าง ๆ และการหาระยะเวลาเดินทางโดยอ้อม จะใช้การคำนวณจากตัวแปรอื่นที่วัดได้จากอุปกรณ์ เช่น ความเร็ว ระยะทาง อัตราการไหล เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้การหาระยะเวลาเดินทางโดยตรง โดยใช้อุปกรณ์เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ

2.3 เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ (Bluetooth Scanners)

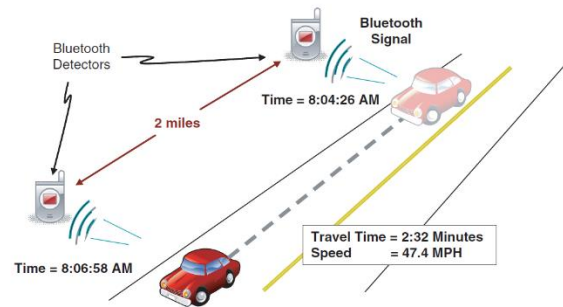
2.3.1 การทำงานของเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ

บลูทูธเป็นมาตรฐานเทคโนโลยีไร้สายเพื่อใช้ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระยะสั้นโดยใช้คลื่นความถี่วิทยุ UHF ในช่วง ISM Band ที่ความถี่ 2.4 - 2.495 GHz ซึ่งถูกคิดค้นโดยบริษัท Ericsson ในปี 1994 ในการตรวจจับสัญญาณบลูทูธ อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณบลูทูธจะทำหน้าที่ค้นหาอุปกรณ์ที่เปิดบลูทูธในการตรวจจับ โดยเมื่อพบอุปกรณ์ที่เปิดสัญญาณบลูทูธในรัศมีค้นหาประมาณ 100 เมตร จะบันทึกเลข Media Access Control Address หรือ MAC Address ซึ่งเป็นเลขเฉพาะที่ใช้ในการระบุตัวตนของอุปกรณ์บลูทูธ พร้อมกับเวลาที่ตรวจจับได้

2.3.2 การหาระยะเวลาเดินทางจากข้อมูลบลูทูธ

ใช้หลักการจับคู่ของเลข MAC Address ที่บันทึกไว้จากจุดสองจุด พร้อมกับบันทึก Timestamp ซึ่งเมื่อพบ MAC Address เลขเดิมซ้ำกันจาก

เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธที่อยู่คนละจุดจะสามารถนำเวลาที่ตรวจพบของทั้งสองจุด มาลบกันเพื่อหาเวลาเดินทางระหว่างจุดนั้นได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การหาระยะเวลาเดินทางจากเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ [6]

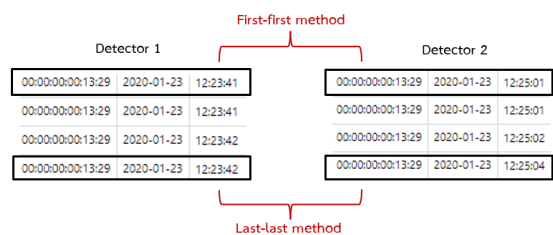
2.3.3 การตรวจจับอุปกรณ์บลูทูธ

งานวิจัยในอดีตได้คำนวณอัตราการตรวจจับของบลูทูธบนทางพิเศษอยู่ที่ 0.2-70% ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 15% [9] และยิ่งพบว่ายานพาหนะ 20 คันจะมีอย่างน้อย 1 คันที่เปิดสัญญาณบลูทูธ [17] ซึ่งความสามารถในการตรวจจับของเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธนั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย [13] เช่น ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ ความสูงและมุมมองศกการติดตั้ง ความถี่การค้นหา และจำนวนสัญญาณบลูทูธจากอุปกรณ์ในขณะนั้น เป็นต้น ในบางกรณีที่อุปกรณ์นั้นอาจอยู่ในโหมดของ Discoverable จะไม่สามารถตรวจจับได้ [3] โดยข้อมูลที่เก็บได้ 3-5% ของจำนวนยานพาหนะทั้งหมดในทุก ๆ หนึ่งชั่วโมงเพียงพอต่อการนำมาคำนวณหาระยะเวลาเดินทางและความแปรปรวนของกระแสจราจรที่เกิดขึ้น [12]

2.4 เทคนิคการจัดการข้อมูลจากบลูทูธ

2.4.1 การกรองข้อมูลที่ต้นทาง

การเก็บข้อมูลจะต้องเจอปัญหาเกี่ยวกับการตรวจจับได้มากกว่า 1 ครั้งในแต่ละจุด จึงมีวิธีการกรองข้อมูลซ้ำกันจาก MAC Address ค่าเดียวกันได้แก่วิธี First-first คือการใช้ข้อมูล MAC Address ที่ตรวจจับได้จากอุปกรณ์ครั้งแรก [1, 6, 10] และวิธี Last-last คือการใช้ข้อมูล MAC Address จากการตรวจจับได้ครั้งสุดท้าย [11] และวิธีการตรวจจับตัวแรกที่จุดต้นทาง คู่กับตัวสุดท้ายที่จุดปลายทาง แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2 เนื่องจากแต่ละวิธีจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละสถานที่ ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้วิธี Last-last เนื่องจากอุปกรณ์จุดปลายทางติดตั้งอยู่ด้านหลังใกล้กับทางออกหรือด่านเก็บเงิน และผู้วิจัยต้องการทราบระยะเวลาเดินทางของยานพาหนะหลังจากผ่านด่านเก็บเงินแล้ว



รูปที่ 2 ตัวอย่างการเก็บข้อมูล MAC Address

2.4.2 การคัดกรองข้อมูลที่มีผิดปกติ

การใช้อุปกรณ์บลูทูธในการเก็บข้อมูลยังมีข้อมูลที่มีผิดพลาดในบางกรณีที่เกิดขึ้น คือ มีอุปกรณ์บลูทูธหลายตัวในยานพาหนะเดียวกัน หรือตรวจจับอุปกรณ์ได้ที่ต้นทาง แต่ไม่ตรวจจับที่ปลายทางหรือตรวจจับได้อีกครั้งในวันถัดไป [6, 8] ซึ่งสาเหตุดังกล่าวส่งผลให้ข้อมูลที่ได้รับมาทั้งหมด ไม่สามารถนำมาใช้งานได้ทันที ต้องนำมาคัดกรองข้อมูลที่เป็นค่าผิดปกติออกก่อน

2.4.3 ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter)

ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) เป็นเทคนิคการประมาณค่าแบบวนซ้ำที่ได้รับการยอมรับและถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้มีการนำวิธี Kalman Filter ไปปรับใช้ในการประมาณระยะเวลาเดินทาง [2, 5, 7] หลักการคือการ Minimize ค่า Variance หรือ Covariance ของตัวแปรสถานะ (State Variables) ตัวก่อนหน้า เพื่อให้ได้ค่าที่เรียกว่า Kalman Gain และนำไปปรับใช้กับค่าตัวแปรสถานะตัวถัดไป โดยให้พิจารณาเป็นค่า Weighting ระหว่างค่าที่คำนวณและค่าที่วัดได้ของตัวแปรนั้น ประกอบด้วยแบบจำลองที่สร้างขึ้น 2 ส่วนคือ แบบจำลองระบบ (State Transition Model) และแบบจำลองการวัด (Measurement Model) ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับเพื่อหาค่าประมาณของสถานะระบบที่ดีที่สุด

$$X_{k+1} = AX_k + Bu_k + Gw_k \quad (1)$$

$$Z_k = CX_k + n_k \quad (2)$$

โดย X_k คือ สถานะของระบบ, u_k คือ สัญญาณควบคุม, Z_k คือ ข้อมูลที่สามารถวัดได้; A, B, G และ C เป็น Constant Matrices ที่มีขนาดสอดคล้องกับเวกเตอร์ X_k, u_k และ Z_k ; w_k และ n_k เป็นตัวแปรสุ่ม (Random Variables) เรียกว่า Process Noise และ Measurement Noise ตามลำดับ โดยมีคุณสมบัติเป็น white noises และไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน (Uncorrelated)

Noise Covariance Matrices นิยามดังสมการที่ (3) และสมการที่ (4)

$$Q = E\{w_k w_k^T\} \quad (3)$$

$$R = E\{n_k n_k^T\} \quad (4)$$

โดยที่ $E\{\cdot\}$ แทน Expectation ของตัวแปรในเครื่องหมาย $\{\cdot\}$, Q และ R เรียกว่า Process Noise Covariance Matrix และ Measurement Noise Covariance Matrix ตามลำดับ

ค่าความผิดพลาด (Error) ของการประมาณค่าสถานะระบบมีค่าดังสมการที่ (5)

$$e_k = X_k - \hat{X}_k \quad (5)$$

โดย \hat{X}_k คือค่าประมาณของสถานะระบบ และ X_k คือค่าจริงของสถานะระบบ Error Covariance Matrix นิยามดังสมการที่ (6)

$$P_k = E\{e_k e_k^T\} \quad (6)$$

Error Covariance Matrix ณ เวลาที่ $k + 1$ ก่อนมีข้อมูลการวัดมีค่าดังสมการที่ (7)

$$P_{k+1}^- = AP_k A^T + GQG^T \quad (7)$$

และค่าประมาณของสถานะระบบก่อนมีข้อมูลการวัดมีค่าสมการที่ (8)

$$\hat{X}_{k+1}^- = A\hat{X}_k^- + Bu_k \quad (8)$$

สัญลักษณ์ $-$ แทนปริมาณที่มีการประมาณค่า ก่อนมีข้อมูลการวัด

หลังการวัดข้อมูล P_{k+1} และ X_{k+1} มีค่าดังสมการที่ (9) และสมการที่ (10) ตามลำดับ

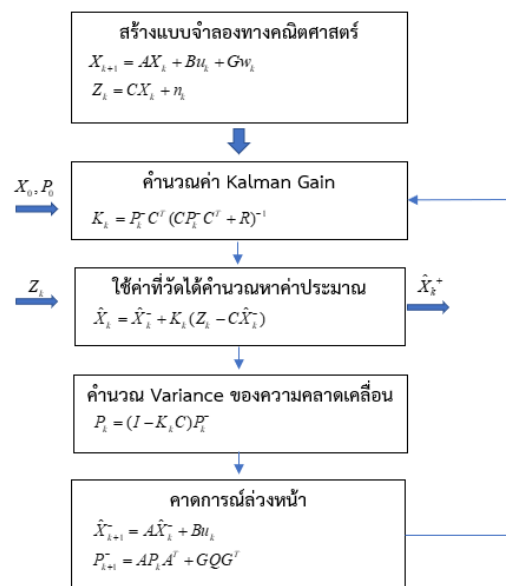
$$P_{k+1} = (I - K_{k+1}C)P_{k+1}^- \quad (9)$$

$$\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_{k+1}^- + K_{k+1}(Z_{k+1} - C\hat{X}_{k+1}^-) \quad (10)$$

โดย

$$K_{k+1} = P_{k+1}^- C^T (CP_{k+1}^- C^T + R)^{-1} \quad (11)$$

Matrix K เรียกว่า Kalman Gain และปริมาณ $(Z_{k+1} - C\hat{X}_{k+1}^-)$ เรียกว่า Residual ซึ่งแทนปริมาณแตกต่างระหว่างค่าที่ประมาณได้ก่อนการวัด และค่าที่วัดได้จริง ซึ่งแสดงขั้นตอนการทำงานของวิธีตัวกรองคาลมานดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนการทำงานของวิธีตัวกรองคาลมานที่เวลา k ไต่ ๆ

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นถึงการนำวิธีประมาณค่าแบบตัวกรองคาลมานมาใช้ประยุกต์ใช้กับการประมาณระยะเวลาเดินทางจากเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยในอดีตได้พัฒนาวิธีคัดกรองข้อมูลที่เก็บได้จากเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธขึ้นไว้หลายวิธี โดยผู้วิจัยได้ทำการสรุปขั้นตอนคัดกรองข้อมูลจากงานวิจัยในอดีตไว้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนวิธีคัดกรองข้อมูลจากเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ

งานวิจัย	ขอบเขต	วัตถุประสงค์	ขั้นตอน	Accuracy
[1]	Motorway, Spain	ประมาณระยะเวลาเดินทางสำหรับ	ประยุกต์ใช้ Kalman filter กับค่าทางสถิติที่ +/-3SD	RMSE = 1.17 min

		Origin-destination matrix		
[6]	Freeway, US	คัดกรองข้อมูลความเร็วเทียบกับวิธีขับรถทดสอบ	<ol style="list-style-type: none"> ใช้วิธี Moving average ทุกช่วงระยะห่างเท่ากับ ±4 ตำแหน่งเพื่อหาค่าระยะเวลาเดินทางทางสุดและต่ำสุดในแต่ละวัน คัดกรองข้อมูลที่มีค่ามากกว่า 1.5 เท่า SD ทุก ๆ 5 นาทีออก กรองจำนวนข้อมูลที่น้อยกว่า 5% ของจำนวนรถทุก ๆ ชั่วโมง กรองค่าข้อมูลที่มีค่า Coefficient of variations (COVs) มากกว่า 1 ออก 	MAPE = 6.9%
[7]	Motorway, Korea	ประมาณระยะเวลาเดินทาง	Kalman filter ร่วมกับการ aggregate ข้อมูล ทุก ๆ 5 นาที	MAPE = 6.2%
[8]	Freeway, German	ประมาณสภาพจราจรจากข้อมูลบลูทูธ	<ol style="list-style-type: none"> กรองข้อมูล MAC ที่คาดว่าอยู่ในรถคันเดียวกัน กรอง $v > 250$ kph และ $v < 5$ kph ออก เปรียบเทียบข้อมูลตำแหน่งที่อยู่ใกล้เคียง ± 1 ตำแหน่งและคำนวณหาค่า factor ที่ดีที่สุดเพื่อกรองค่าที่ไม่ได้อยู่ในเกณฑ์ออก 	
[10]	Motorway, US	ประมาณระยะเวลาเดินทาง	<ol style="list-style-type: none"> กรองระยะเวลาเดินทางต่ำสุดที่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระยะเวลาเดินทางช่วงจราจรอิสระออก กรองระยะเวลาเดินทางสูงสุดที่มากกว่า 2 เท่าของค่า SD ของระยะเวลาเดินทางทุก ๆ 30 นาทีออก Kalman filter 	MAPE = 6.7%

**v = ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง), SD = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2.6 คำนวณประสิทธิภาพแบบจำลอง

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ดัชนีวัดประสิทธิภาพของการประมาณระยะเวลาเดินทางเทียบกับระยะเวลาเดินทางจริง 2 ชนิด ดังนี้ Mean Absolute Error (MAE) และ Mean Absolute Percentage Error (MAPE) แสดงในสมการที่ (8) และ (9) ตามลำดับ

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_i - \hat{f}_i| \quad (8)$$

$$MAPE = 100 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|f_i - \hat{f}_i|}{f_i} \quad (9)$$

โดย f_i คือระยะเวลาเดินทางจริง และ \hat{f}_i คือระยะเวลาเดินทางที่คำนวณจากเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ

3. การอธิบายและการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ข้อมูลที่นำมาใช้ในงานวิจัย ผู้วิจัยได้เก็บจากอุปกรณ์เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธที่ติดตั้งบนทางยกระดับอุตราภิมุขฯ ขาเข้าเมืองที่ศทางมุ่งลงใต้ความยาวประมาณ 1 กิโลเมตร ดังรูปที่ 3 โดยมีการติดตั้งเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธที่ต้นทางและปลายทางรวม 2 จุดแสดงดังรูปที่ 4 โดยใช้ข้อมูลวันที่ 18-27 มกราคม พ.ศ. 2563 เป็นระยะเวลา 10 วัน ซึ่งเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธจะทำการจับคู่ MAC Address ของอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ผ่านจุดติดตั้ง โดยแสดงตัวอย่างและคำอธิบายข้อมูลที่เก็บได้จากอุปกรณ์ 6 คอลัมน์ ได้แก่ วันของสัปดาห์ เดือน วันที่ เวลาที่ตรวจจับอุปกรณ์ ปี และหมายเลข MAC Address ตามลำดับดังตารางที่ 2



รูปที่ 4 พื้นที่ทำการศึกษา

3.2 การจัดเตรียมข้อมูล (Pre-Processing)

3.2.1 การตรวจจับซ้ำ (Multiple Detection)

ขั้นตอนแรกในการจัดการกับข้อมูล คือการกรองข้อมูลที่ตรวจจับซ้ำกันมากกว่า 1 ครั้งออก โดยผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธี first-last คือการเลือก MAC Address ที่เวลาตรวจจับได้ครั้งแรกที่ต้นทางและตัวสุดท้ายที่จุดปลายทางในทุก ๆ 1 นาที เนื่องจากเลือกวิธีที่ใกล้ตำแหน่งกล้องที่นำมาใช้ตรวจสอบ

ความถูกต้องมากที่สุด ซึ่งหลังจากตัดค่าที่ซ้ำออกจะเหลือ MAC Address ที่ใช้อยู่ประมาณ 3-6% จากการตรวจจับอุปกรณ์บลูทูธทั้งหมด และทำการจัดระเบียบข้อมูลให้เรียบร้อยก่อนการจับคู่ MAC Address โดยทำการแปลงเวลา Timestamp ที่ตรวจจับได้เป็นหน่วยเวลา Unix Time ดังตารางที่ 3 เสียก่อนจึงทำการจับคู่



รูปที่ 5 ตำแหน่งติดตั้งเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ (ซ้าย) จุดต้นทาง (ขวา) จุดปลายทาง

ตารางที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลที่เก็บได้จากเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ

วัน	เดือน	วันที่	เวลาที่ตรวจจับได้	ปีค.ศ.	MAC Address
Fri	Jan	24	10:09:19	2020	58:6A:EF:92:98:1A
Fri	Jan	24	10:09:19	2020	58:6A:EF:92:98:1A
Fri	Jan	24	10:09:20	2020	63:20:2E:46:9E:65
Fri	Jan	24	10:09:20	2020	63:20:2E:46:9E:65

ตารางที่ 3 ข้อมูลก่อนการจับคู่ MAC Address

MAC Address	Date	Timestamp	Unix Time	Detector
74:42:6A:96:93:B2	2020-01-26	10:59:59	1580011199	BT1
34:F2:68:BE:13:AE	2020-01-28	10:59:58	1580183998	BT1
47:EB:6D:38:52:4C	2020-01-25	10:59:57	1579924797	BT2

**BT = เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ

3.2.2 การจับคู่ (Matching)

ทำการจับคู่ MAC Address หลังจากนั้นจึงนำค่า Unix Time ของเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธทั้งสองตัวมาลบกัน จะได้ค่าระยะเวลาเดินทางและจึงนำไปคำนวณหาความเร็วระหว่างจุดสองจุดต่อไปดังตารางที่ 4

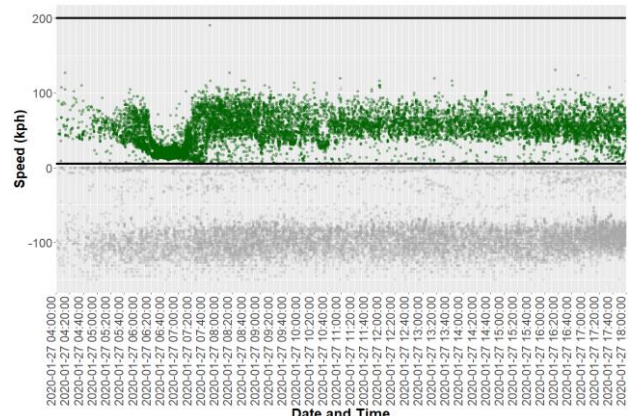
ตารางที่ 4 จำนวนข้อมูลหลังการจับคู่ MAC Address

MAC Address	Unix Time BT1	Unix Time BT2	Travel Time (sec)	Speed (km/hr)
5D:29:F9:D9:CF:C4	1579799667	1579799571	96	43.687
46:AF:4B:C6:CA:69	1579799700	1579799627	73	57.452
44:02:A1:1C:69:83	1579799722	1579799644	78	53.769

**Unix Time คือ มาตรฐานเวลาที่ถูกล็อกไว้เริ่มมาตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ค.ศ.1970

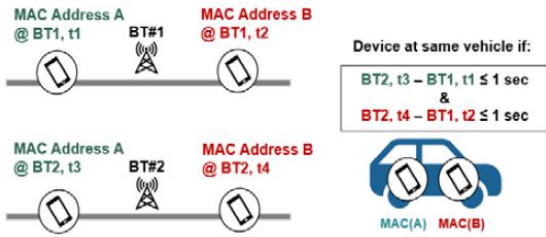
3.3 การคัดกรองข้อมูลที่ผิดปกติ (Outlier Filtering)

ในการวิเคราะห์ข้อมูล จำเป็นที่จะต้องคัดกรองข้อมูลที่ไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในการวิเคราะห์และข้อมูลที่ผิดพลาดออก ซึ่งขั้นตอนแรกจะเป็นการคัดกรองค่าระยะเวลาเดินทางที่มากเกินไป เนื่องจากตรวจจับได้วันถัดไป และค่าระยะเวลาเดินทางที่ติดลบเนื่องจากตรวจจับยานพาหนะอีกฝั่งของจราจร โดยเลือกกรองเฉพาะค่าที่อยู่ในช่วงความเร็วที่กำหนดแสดงตัวอย่างวันที่ 27 มกราคม 2563 เวลา 04:00-18:00 ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขั้นตอนการกรองข้อมูลความเร็วที่ผิดปกติ

จากกราฟจะเห็นว่าค่าความเร็วที่คัดกรองออกมีค่าความเร็วติดลบจำนวนมากประมาณ 50-60% ของปริมาณข้อมูลทั้งหมด คาดว่ามาจากสาเหตุที่เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธทั้งสองตัวได้ตรวจจับข้อมูล MAC Address บริเวณอีกฝั่งจราจร ทำให้จุดปลายทางและจุดต้นทางที่นำมาคำนวณหาระยะเวลาเดินทางสลับกันส่งผลให้มีค่าความเร็วติดลบ ขั้นตอนต่อไปคือการคัดกรองอุปกรณ์บลูทูธที่มากกว่าหนึ่งเครื่องในยานพาหนะเดียวกัน เพราะการที่ยานพาหนะหนึ่งคันมีอุปกรณ์บลูทูธหลายเครื่องและนำมาคำนวณโดยไม่ทำการคัดกรองออกเสียก่อน อาจส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ ผู้วิจัยได้ทำการกรองข้อมูลค่า MAC Address ที่คาดว่าอยู่ในยานพาหนะเดียวออกจากสมมุติฐานว่า ถ้าเวลาที่ตรวจจับ MAC Address ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันได้ที่เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธต้นทางห่างกันไม่เกิน 1 วินาที กับตรวจจับได้ที่เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธปลายทางห่างกันไม่เกิน 1 วินาทีด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นเวลาที่น้อยที่สุดที่คาดว่า จะเป็นไปได้ จะสมมุติว่า MAC Address นั้นอยู่ในยานพาหนะเดียวกัน ดังรูปที่ 7 โดยแสดงลำดับขั้นตอนการคัดกรองข้อมูลดังตารางที่ 5



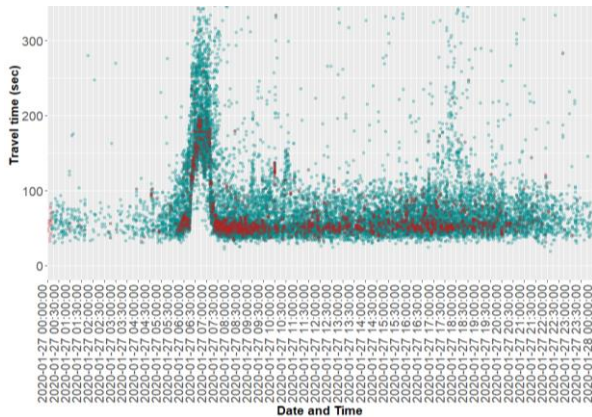
รูปที่ 7 ขั้นตอนการกรองข้อมูล MAC Address ในยานพาหนะเดียวกัน

ตารางที่ 5 ขั้นตอนการคัดกรองและข้อมูลที่เหลืออยู่

ขั้นตอน	การคัดกรอง	อุปกรณ์	MAC Address ที่เหลืออยู่ (record)	MAC Address ที่เหลืออยู่ (%)
0	ข้อมูลแรกเริ่มที่ตรวจจับได้	BT1	23M	-
		BT2	14M	-
1	จัดการข้อมูลแรกเริ่มที่ซ้ำกัน	BT1	508,060	-
		BT2	893,840	-
2	จับคู่ MAC Address ที่เหมือนกัน		478,821	100%
3	คัดกรอง $v < 5$ kph, $v > 200$ kph ออก		170,694	35%
4	คัดกรอง MAC Address ที่คาดว่าจะอยู่ในยานพาหนะเดียวกันออก		125,801	26%

**v = ความเร็ว (กิโลเมตร/ชั่วโมง)

วิธีคัดกรอง MAC Address ในยานพาหนะเดียวกันขั้นตอนที่ 4 นั้นได้กรองข้อมูลออกประมาณ 26% ซึ่งสามารถตีความได้ว่าเฉลี่ยยานพาหนะทุก ๆ 4 คัน จะมีอย่างน้อยหนึ่งคันที่มีอุปกรณ์บลูทูธ 2 อุปกรณ์แทนที่จะมีเพียง 1 อุปกรณ์เท่านั้น และแสดงกราฟขั้นตอนคัดกรองจำนวน MAC Address ที่อยู่ในยานพาหนะเดียวกันออก ตัวอย่างวันที่ 27 มกราคม 2563 เวลา 00:00-23:59 น. ดังรูปที่ 8

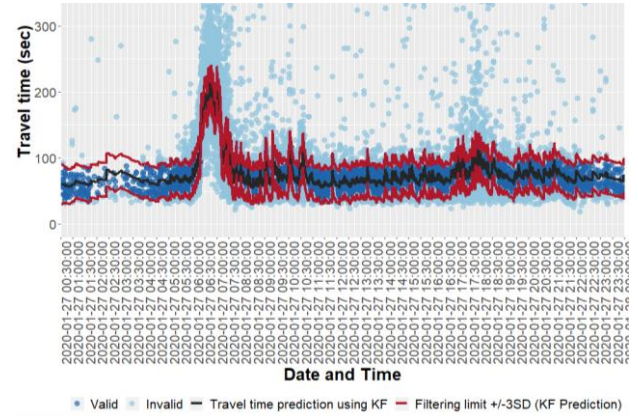


รูปที่ 8 การคัดกรองจำนวน MAC Address ที่อยู่ในยานพาหนะเดียวกันออก

หลังจากการคัดกรองข้อมูลออกตามขั้นตอนข้างต้นพบว่า ยังมีค่าระยะเวลาเดินทางที่ผิดปกติและค่าความแปรปรวนมาก

ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้วิธีตัวกรองคาลมานมาช่วยในการกรองข้อมูลผิดปกติออก โดยงานวิจัยในอดีตได้มีขั้นตอนการคัดกรองข้อมูลที่มี $+3SD$ ในกรณีการคัดกรองข้อมูลด้วยวิธีตัวกรองคาลมานจากเครื่องตรวจจับ

สัญญาณบลูทูธ เพื่อประมาณระยะเวลาเดินทางบนทางพิเศษการเลือกคัดกรองระยะเวลาเดินทางเฉพาะที่อยู่นอกช่วง ± 3 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของค่าระยะเวลาเดินทางที่ทำนายได้จากวิธีตัวกรองคาลมานออก [2] เพื่อกำจัดค่าระยะเวลาเดินทางที่มีความแปรปรวนมาก ก่อนที่จะนำข้อมูลไปวิเคราะห์ขั้นต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 9

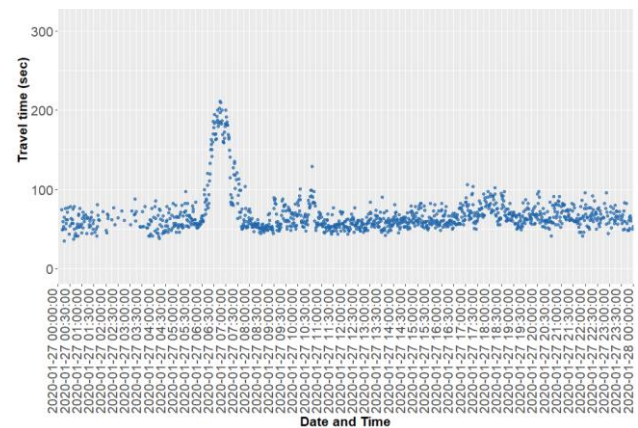


รูปที่ 9 การคัดกรองข้อมูลระยะเวลาเดินทางด้วยวิธีตัวกรองคาลมาน

จากการคัดกรองด้วยวิธีตัวกรองคาลมานเหลือข้อมูลคู่ MAC Address 86,889 คู่ซึ่งประมาณ 70% จากข้อมูลระยะเวลาเดินทางที่ผ่านการคัดกรองก่อนหน้านี้ และจะสังเกตเห็นว่าในช่วงเวลา 07:10 - 07:40 น. ในวันที่ 27 มกราคม 2563 จะมีค่าความแปรปรวนของข้อมูลมากกว่าช่วงเวลาอื่น ทำให้ช่วงในการคัดกรองระยะเวลาอยู่ในช่วงกึ่งกลาง ซึ่งอาจทำให้ดูเหมือนว่าไม่ได้คัดกรองข้อมูลในบริเวณที่เป็นค่าระยะเวลาเดินทางส่วนใหญ่

3.4 ผลลัพธ์ระยะเวลาเดินทาง (Output Travel Time)

หลังจากการคัดกรองข้อมูลผิดปกติออกทั้งหมดตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงเลือกค่าที่ตำแหน่ง 50th percentile หรือค่ากลางของข้อมูลทุก ๆ 1 นาที แสดงดังรูปที่ 10

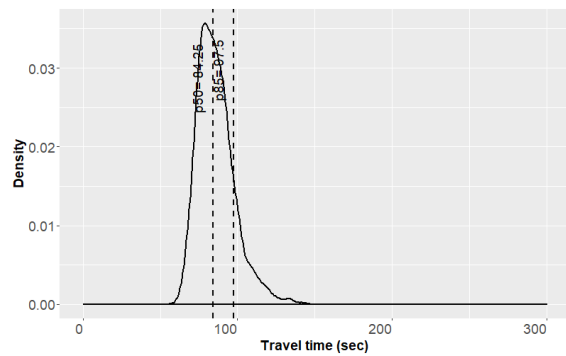
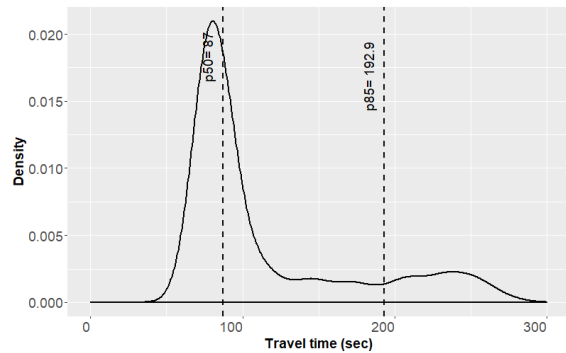


รูปที่ 10 ระยะเวลาเดินทางทุก ๆ 1 นาที

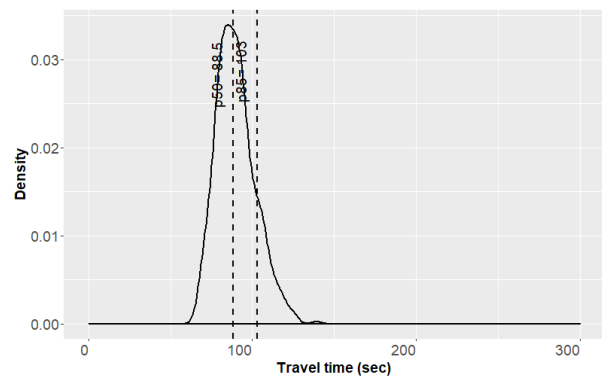
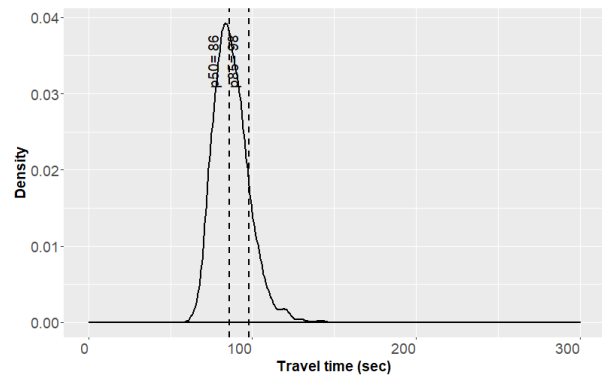
แผนภูมิแสดงการแจกแจงสะสม (Probability Density Function) แสดงการกระจายตัวของระยะเวลาเดินทางทางยกระดับอุดรธานี ระหว่างเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธสองจุด วันจันทร์-ศุกร์ ช่วงเวลา 06:00-

08:00 ระยะเวลาเดินทางต่ำสุด (Min) เท่ากับ 59 วินาที ค่ามัธยฐาน (Median) เท่ากับ 87 วินาที ค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 114.7 วินาที ค่าสูงสุด (Max) เท่ากับ 282.5 วินาที ช่วงเวลา 11:00-13:00 ระยะเวลาเดินทางต่ำสุด (Min) เท่ากับ 61 วินาที ค่ามัธยฐาน (Median) เท่ากับ 84.25 วินาที ค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 86.06 วินาทีค่าสูงสุด (Max) เท่ากับ 142 วินาที ช่วงเวลา 16:00-18:00 ระยะเวลาเดินทางต่ำสุด (Min) 64 วินาที เท่ากับ ค่ามัธยฐาน (Median) เท่ากับ 86 วินาที ค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 87.25 วินาที ค่าสูงสุด (Max) เท่ากับ 141.50 วินาที ช่วงเวลา 22:00-00:00 ระยะเวลาเดินทางต่ำสุด (Min) เท่ากับ 65 วินาที ค่ามัธยฐาน (Median) เท่ากับ 88.50 วินาที ค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 89.93 วินาที ค่าสูงสุด (Max) เท่ากับ 139 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 11 และ รูปที่ 12 ตามลำดับ

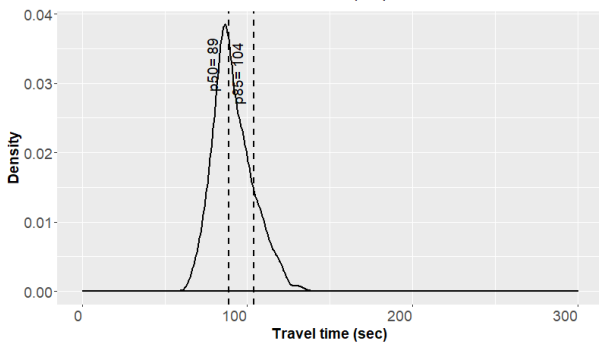
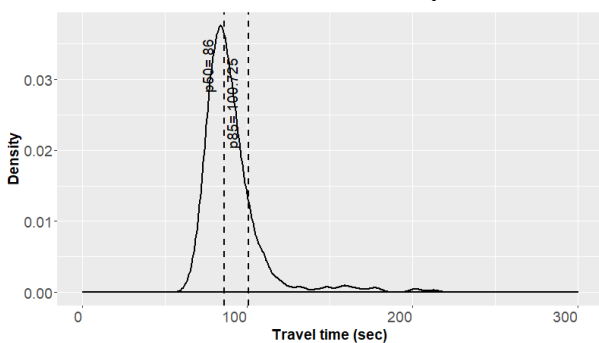
แผนภูมิแสดงการแจกแจงสะสม (Probability Density Function) แสดงการกระจายตัวของระยะเวลาเดินทางยกระดับอุตราภิมุข ระหว่างเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธสองจุด วันเสาร์-อาทิตย์ ช่วงเวลา 06:00-08:00 ระยะเวลาเดินทางต่ำสุด (Min) เท่ากับ 58.5 วินาที ค่ามัธยฐาน (Median) เท่ากับ 83 วินาที ค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 84.6 วินาทีค่าสูงสุด (Max) เท่ากับ 130 วินาที ช่วงเวลา 11:00-13:00 ระยะเวลาเดินทางต่ำสุด (Min) เท่ากับ 66.50 วินาที ค่ามัธยฐาน (Median) เท่ากับ 84 วินาที ค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 85.53 วินาที ค่าสูงสุด (Max) เท่ากับ 127.5 วินาที ช่วงเวลา 16:00-18:00 ระยะเวลาเดินทางต่ำสุด (Min) เท่ากับ 63 วินาที ค่ามัธยฐาน (Median) เท่ากับ 86 วินาที ค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 90.22 วินาที ค่าสูงสุด (Max) เท่ากับ 213 วินาที ช่วงเวลา 22:00-00:00 ระยะเวลาเดินทางต่ำสุด (Min) เท่ากับ 67 วินาที ค่ามัธยฐาน (Median) 89 วินาที เท่ากับ ค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ 91.4 วินาที ค่าสูงสุด (Max) เท่ากับ 131 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 13 และ



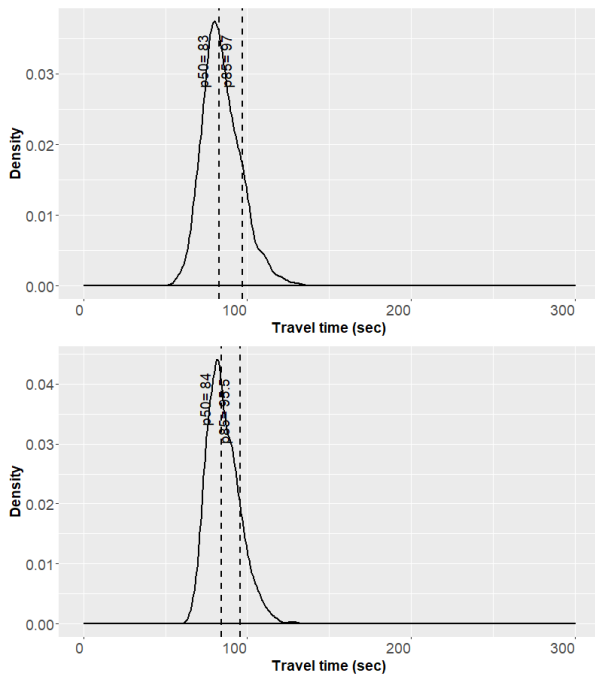
รูปที่ 11 การกระจายตัวของระยะเวลาเดินทางวันจันทร์-วันศุกร์
(บน เวลา 06:00-08:00 (ล่าง เวลา 11:00-13:00



รูปที่ 12 การกระจายตัวของระยะเวลาเดินทางวันจันทร์-วันศุกร์
(บน เวลา 16:00-18:00 (ล่าง เวลา 22:00-00:00

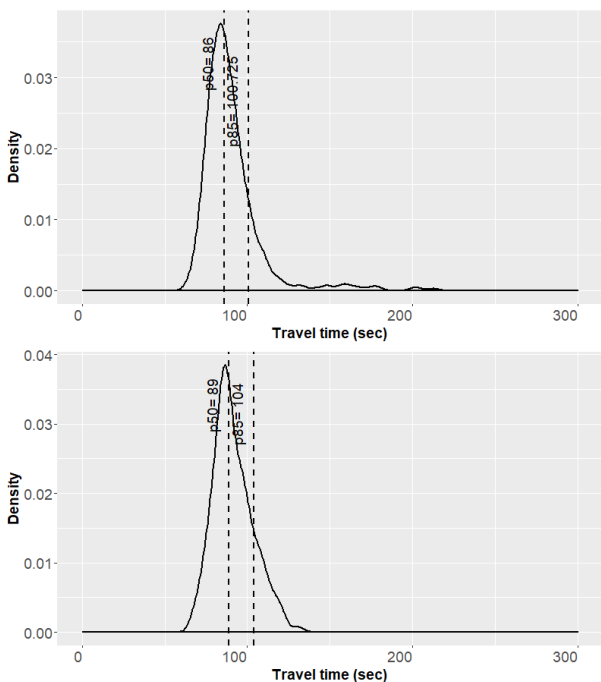


รูปที่ 14



รูปที่ 13 การกระจายตัวของระยะเวลาเดินทางวันเสาร์-วันอาทิตย์
(บน) เวลา 06:00-08:00 (ล่าง) เวลา 11:00-13:00

จากผลลัพธ์ข้อมูลระยะเวลาเดินทางช่วงเวลา 06:00-08:00 วันจันทร์-วันศุกร์ จะมีค่าระยะเวลาเดินทางเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 114.7 วินาที ในขณะที่ช่วงเวลาอื่น ๆ ของทั้งวันจันทร์-วันศุกร์ และวันเสาร์-อาทิตย์ มีค่าเฉลี่ยของระยะเวลาเดินทางที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 14 การกระจายตัวของระยะเวลาเดินทางวันเสาร์-วันอาทิตย์
(บน) เวลา 16:00-18:00 (ล่าง) เวลา 22:00-00:00

3.5 สัดส่วนยานพาหนะที่ตรวจจับได้ (Sampling Rate)

เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธตรวจจับเฉพาะยานพาหนะส่วนหนึ่งของกระแสจราจรเท่านั้น ผู้วิจัยได้ทำการคำนวณสัดส่วนจราจรที่เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธตรวจจับได้ โดยใช้ข้อมูลยานพาหนะจริงจากกล้องบันทึกวิดีโอบนทางยกระดับดังรูปที่ 15 วันที่ 27 มกราคม 2563 ช่วงเวลาเร่งด่วนเวลา 07:00-08:00 น. และนอกเวลาเร่งด่วนเวลา 12:00-13:00 น. เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธสามารถตรวจจับยานพาหนะได้มากกว่า 40% ของกระแสจราจรทั้งหมดในเวลาเร่งด่วนและนอกเวลาเร่งด่วนดังตารางที่ 6



รูปที่ 15 ภาพจากกล้องบันทึกวิดีโอที่ติดตั้งบนทางยกระดับ

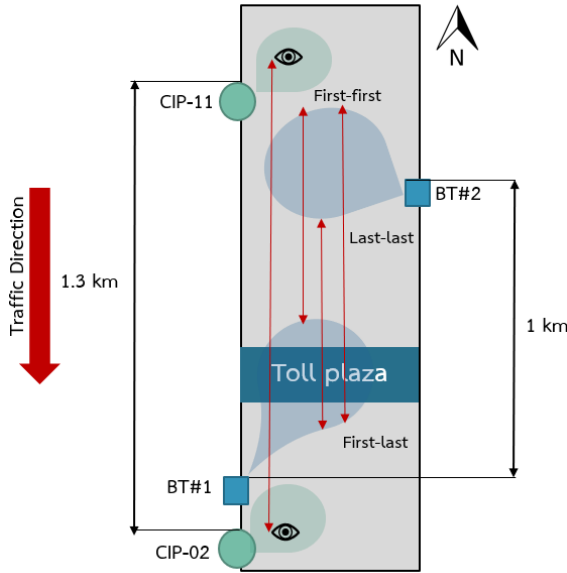
3.6 การเปรียบเทียบความถูกต้องของระยะเวลาเดินทาง

ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลจราจรจริงจากกล้องบันทึกวิดีโอบนทางยกระดับตอนเมือง (ยกเว้นรถยนต์ประเภทพิเศษ เช่น รถพยาบาล รถเจ้าหน้าที่บนทางพิเศษ เป็นต้น) ที่วิ่งผ่านบริเวณกล้องสองตัวที่อยู่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ วันที่ 27 มกราคม 2563 โดยตำแหน่งของกล้องบันทึกวิดีโอ และเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธมีความแตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 16

ตารางที่ 6 สัดส่วนจราจรที่เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธตรวจจับได้

ช่วงเวลาเร่งด่วน	จำนวนรถจากกล้องบันทึกวิดีโอ (คัน)	จำนวนรถจาก BT (คัน)	สัดส่วนรถที่ BT ตรวจจับได้
7:00-7:15	937	651	69%
7:15-7:30	700	434	62%
7:30-7:45	662	363	55%
7:45-8:00	593	329	55%
รวม	2892	1777	61%
ช่วงนอกเวลาเร่งด่วน	จำนวนรถจากกล้องบันทึกวิดีโอ (คัน)	จำนวนรถจาก BT (คัน)	สัดส่วนรถที่ BT ตรวจจับได้
12:00-12:15	238	106	45%
12:15-12:30	271	151	56%
12:30-12:45	260	141	54%
12:45-13:00	300	136	45%
รวม	1069	534	50%

**BT = เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ



รูปที่ 16 ตำแหน่งกล้องบันทึกวิดีโอและเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ

โดยแบ่งเป็น 4 ช่วงเวลาคือ ช่วงเร่งด่วนเช้าเวลา 07:00-08:00 น. ช่วงกลางวันเวลา 12:00-13:00 น. ช่วงเย็นเวลา 17:00-18:00 น. และช่วงกลางคืนเวลา 21:00-22:00 น. โดยเก็บข้อมูลยานพาหนะช่วงเวลาละ 40 คันโดยเลือกเก็บทุก ๆ 15 นาที ๆ ละ 10 คัน ซึ่งให้เป็นตัวแทนของจราจรในแต่ละช่วงเวลาของวันที่ 27 มกราคม 2563 ได้ผลดังรูปที่ 17 และแสดงระยะเวลาเดินทางในแต่ละวิธีการจับคู่ MAC Address ดัง

Reference source not found.

และทำการเปรียบเทียบความแม่นยำของระยะเวลาเดินทางด้วยค่า MAPE และ MAE กับระยะเวลาเดินทางที่เก็บได้จากเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ แต่เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนของระยะเวลาเดินทางก่อนนำมาเปรียบเทียบคือ

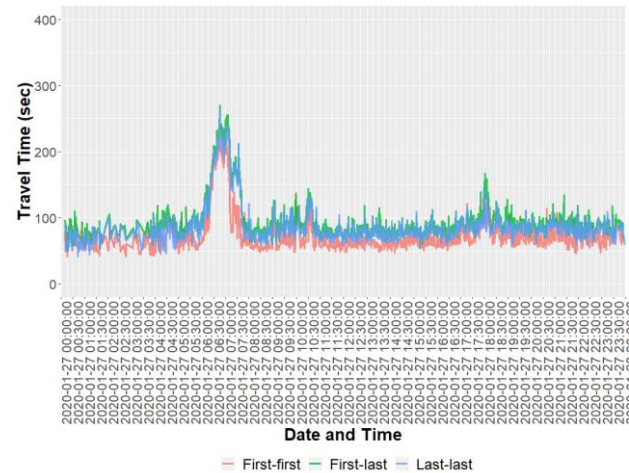
- ตำแหน่งการเก็บข้อมูลของกล้องบันทึกวิดีโอกับ Bluetooth Scanner ต่างกัน
- ไม่ทราบระยะเวลาเก็บข้อมูลของ Bluetooth Scanner ที่ชัดเจน
- ความเร็วที่มีค่าไม่เท่ากันทั้งช่วงทาง เนื่องจากความเร็วที่ออกจากด่านน้อยกว่าปกติ ส่งผลให้ระยะเวลาเดินทางจากกล้องบันทึกวิดีโอมากกว่า Bluetooth Scanner
- ช่วงเร่งด่วนเช้า แกวคยยาวถึงบริเวณกล้องที่จุดต้นทาง ส่งผลให้ระยะเวลาเดินทางที่กล้องบันทึกวิดีโอมากกว่า Bluetooth Scanner

จากสาเหตุข้างต้น ส่งผลทำให้ค่าระยะเวลาเดินทางที่ได้จากกล้องบันทึกวิดีโอ มีค่ามากกว่าเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธประมาณ 50%

ผู้วิจัยจึงทำการเลือกใช้วิธีการเลือก MAC Address แบบ First-last เพื่อให้ได้ระยะใกล้เคียงกับระยะของกล้องบันทึกวิดีโอมากที่สุด และลดระยะเวลาเดินทางของกล้องโดยการเทียบระยะทางระหว่างจุดสังเกตกับเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธที่ลดระยะทางเหลือ 800 เมตร เนื่องจากระยะการเก็บ

ข้อมูลของเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธของทั้งสองจุดมาคิดด้วยรวมเป็น โดยเฉพาะจุดหลังด่านเก็บเงินที่ติดอุปกรณ์ที่ความสูง 8 เมตร อาจส่งผลให้ระยะการเก็บข้อมูลกว้างขึ้น หลังจากนั้นจึงนำค่าระยะเวลาเดินทางที่ปรับแก้แล้วมาคำนวณหาค่าความถูกต้องดัง

ดัชนีวัดประสิทธิภาพ	วิธีเลือก MAC Address	07:00-08:00	12:00-13:00	17:00-18:00	21:00-22:00
		MAPE (%)			
	First-first	44.9	41.6	36.8	40.4
	Last-last	22.3	26.6	27.4	30.3
	First-last	21.1	24.4	22.3	23.5
MAE (sec)	First-first	84.9	42.3	45.1	48.1
	Last-last	38.3	27.1	33.7	36.1
	First-last	37.9	24.8	27.6	28.1



รูปที่ 17 ระยะเวลาเดินทางวันที่ 27 มกราคม 2563 ในแต่ละวิธี

จากผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธทั้งสามวิธีในวันที่ 27 มกราคม 2563 วิธี First-last จะคำนวณระยะเวลาเดินทางได้มากกว่าวิธี First-first เฉลี่ยประมาณ 19.8% และวิธี Last-last เฉลี่ยประมาณ 6.8% ตามลำดับและเมื่อเทียบกับระยะเวลาเดินทางจริงจากกล้องบันทึกวิดีโอบนทางยกระดับ ขาเข้าบริเวณด่านดอนเมืองทุก 4 ช่วงเวลาวิธี First-first ค่า MAPE เฉลี่ยรวมเท่ากับ 40.93 % ค่า MAE เฉลี่ยรวมเท่ากับ 55.1 วินาที ส่วนวิธี Last-last ค่า MAPE เฉลี่ยรวมทั้งวันเท่ากับ 26.65% ค่า MAE เฉลี่ยรวมทั้งวันเท่ากับ 33.8 วินาที และวิธี First-last ค่า MAPE เฉลี่ยรวมทั้งวันเท่ากับ 22.83% ค่า MAE เฉลี่ยรวมทั้งวันเท่ากับ 29.6 วินาที

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบความแม่นยำของเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ

4. อภิปรายผลการศึกษา

วิธีการเลือก MAC Address แบบ First-first มีค่า MAPE มากกว่าวิธีอื่น ซึ่งสาเหตุเกิดจากอุปกรณ์ที่จุดปลายทาง คือตำแหน่งของเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธที่จุดปลายทางติดตั้งอยู่ใกล้ด้าน และติดตั้งอยู่ที่ระดับความสูงที่มากพอสมควร ส่งผลให้ระยะเก็บข้อมูลมีการเก็บข้อมูลก่อนบริเวณที่รถจอดในด่านเก็บเงินโดยเฉพาะในช่วงเช้า ทำให้ระยะเวลาเดินทางที่คำนวณได้น้อยกว่าวิธีอื่น ค่าความคลาดเคลื่อนจึงมีค่ามากเมื่อนำมาเทียบกับกล้องบันทึกวิดีโอ และวิธี First-last กับวิธี Last-last มีความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกันถึงแม้ระยะห่างจากจุดสังเกตที่ต้นทางจะไม่เท่ากัน แต่ในช่วงชั่วโมงเร่งด่วนเช้าที่การจราจรติดขัดวิธีการเลือก MAC Address แบบ First-last จะให้ค่าระยะเวลาเดินทางที่ใกล้เคียงกับกล้องบันทึกวิดีโอมากกว่าวิธี Last-last เนื่องจากระยะทางระหว่างจุดสังเกตสองจุดที่มากกว่า และช่วงเช้าเกิดแถวคอยาวไปจนถึงกล้องที่จุดต้นทาง นอกจากนี้ยังมีสาเหตุที่ทำให้ค่าระยะเวลาเดินทางเมื่อเทียบกับกล้องบันทึกวิดีโอมีความคลาดเคลื่อนมากกว่าปกติ คือ ความเร็วที่ออกจากด่านไม่ใช่ความเร็วปกติ และช่วงเวลาเร่งด่วนเช้าเกิดแถวคอยาวขึ้นบริเวณหลังด่านทำให้รถหยุดเป็นเวลานานพอสมควร ส่งผลให้ระยะเวลาเดินทางที่กล้องบันทึกวิดีโอมากกว่าเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธมากยิ่งขึ้นโดยเฉพาะในช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาขั้นตอนการหาระยะเวลาเดินทางโดยใช้เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธที่ติดตั้งบนทางยกระดับ โดยใช้ขั้นตอนการคัดกรองข้อมูลเบื้องต้นใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น และใช้ตัวกรองคาลมานมาช่วยคัดกรองค่าที่ผิดปกติออก และใช้ข้อมูลจากกล้องบันทึกวิดีโอในการคำนวณหาระยะเวลาเดินทางจริงเพื่อวัดค่าความถูกต้องของเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ แสดงให้เห็นว่า วิธีการเลือก MAC Address แบบจับคู่ตัวแรกที่ต้นทางกับตัวสุดท้ายที่ปลายทางมีค่าใกล้เคียงความจริงมากที่สุดเพราะตำแหน่งกล้องที่ใช้ในการเปรียบเทียบอยู่ก่อนตำแหน่งของเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ และวิธีการเลือก MAC Address ที่ตรวจจับได้ครั้งสุดท้ายในการนำมาจับคู่จะได้ค่าระยะเวลาเดินทางที่ใกล้เคียงระยะเวลาเดินทางจริงรองลงมา ตามด้วยวิธีการเลือก MAC Address ที่ตรวจจับได้ครั้งแรกได้ค่าความถูกต้องที่ต่ำที่สุด และจากงานวิจัยยังพบว่าเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธตรวจจับยานพาหนะได้มากกว่า 40% ของกระแสรถจราจรทั้งในและนอกช่วงเวลาเร่งด่วน

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ ตำแหน่งที่ติดตั้งกล้องบันทึกวิดีโอและเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธอยู่ในตำแหน่งที่ต่างกัน ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากหลายปัจจัย และเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธจุดปลายทางได้ติดตั้งใกล้หลังด่านเก็บเงินมาก ทำให้ระยะเวลาเดินทางของทั้งเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธเมื่อเทียบกับกล้องบันทึกวิดีโอเกิดความคลาดเคลื่อนมากกว่าปกติ และการคำนวณระยะเวลาจากกล้องบันทึกวิดีโอ

เป็นการนับด้วยตัวเอง อาจเกิดความคลาดเคลื่อนเรื่องของระยะทางได้

ดัชนีวัดประสิทธิภาพ	วิธีเลือก MAC Address	07:00-08:00	12:00-13:00	17:00-18:00	21:00-22:00
MAPE (%)	First-first	44.9	41.6	36.8	40.4
	Last-last	22.3	26.6	27.4	30.3
	First-last	21.1	24.4	22.3	23.5
MAE (sec)	First-first	84.9	42.3	45.1	48.1
	Last-last	38.3	27.1	33.7	36.1
	First-last	37.9	24.8	27.6	28.1

และการปรับแก้ระยะเวลาเดินทางของเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธตามงานวิจัยนี้เป็นค่าที่คำนวณทางอ้อมซึ่งอาจจะไม่ใช่ค่าจริงจากอุปกรณ์ และค่าความถูกต้องของทุกวิธีมีข้อจำกัดเฉพาะตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ตามงานวิจัยนี้เท่านั้น และจากการตรวจจับยานพาหนะพบว่าเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธไม่เหมาะกับการใช้เก็บข้อมูลจราจรแบบเฉพาะช่องจราจร

สุดท้ายผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยนี้จะมีส่วนช่วยในการพัฒนาขั้นตอนในการประมาณระยะเวลาเดินทางโดยใช้เครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธในประเทศไทยให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณข้อมูลระยะเวลาเดินทางจากเครื่องตรวจจับสัญญาณบลูทูธ และกล้องบันทึกวิดีโอที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จากโครงการงานจ้างเหมาก่อสร้างและปรับปรุงระบบควบคุมจราจร และระบบเฝ้าระวังบนทางยกระดับอุตราภิมุข และการเอื้อเฟื้อสถานที่จากบริษัททางยกระดับดอนเมือง จำกัด (มหาชน)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Barceló Bugada J, Montero Mercadé L, Marqués L, Carmona Bautista C, editors. A Kalman-filter approach for dynamic OD estimation in corridors based on bluetooth and Wi-Fi data collection. 12th World Conference on Transportation Research WCTR, 2010; 2010.
- [2] Barceló J, Montero L, Bullejos M, Serch O, Carmona C. A kalman filter approach for exploiting bluetooth traffic data when estimating time-dependent od matrices. 2013;17(2):123-41.
- [3] Bhaskar A, Chung E. Fundamental understanding on the use of Bluetooth scanner as a complementary transport data. 2013;37:42-72.
- [4] Chan KS, Tam ML, Lam WH, editors. Using automatic vehicle identification data for estimating current travel times in Hong Kong. Proceedings of the 86th Transportation Research Board Annual Meeting {CD-ROM}, Washington, DC (January 21-25, 2007); 2007.

- [5] Chu L, Oh S, Recker W, editors. Adaptive Kalman filter based freeway travel time estimation. 84th TRB Annual Meeting, Washington DC; 2005: Citeseer.
- [6] Haghani A, Hamed M, Sadabadi KF, Young S, Tarnoff P. Data collection of freeway travel time ground truth with bluetooth sensors. 2010;2160(1):60-8.
- [7] JANG J. Short-Term Travel Time Prediction Using the Kalman Filter Combined with a Variable Aggregation Interval Scheme. 2013;10:1884-95.
- [8] Margreiter M, editor Fast and Reliable Determination of the Traffic State Using Bluetooth Detection on German Freeways. World Conference on Transport Research, Shanghai, China (submitted and accepted for publication); 2016.
- [9] Margreiter M, Busch F, Carstensen C, editors. The Evolution of Bluetooth Detection Rates. Transportation Research Board; 2019.
- [10] Moonam HM. Developing Sampling Strategies and Predicting Freeway Travel Time Using Bluetooth Data. 2016.
- [11] Porter JD, Kim DS, Magana ME. Wireless data collection system for real-time arterial travel time estimates. Oregon. Dept. of Transportation. Research Section; 2011.
- [12] Sharifi E, Hamed M, Haghani A, Sadrsadat H, editors. Analysis of vehicle detection rate for bluetooth traffic sensors: A case study in maryland and delaware. 18th World Congress on on Intelligent Transport Systems; 2011.
- [13] Sintonen H. Bluetooth based travel time estimation: literature review. 2012.
- [14] Sun L, Yang J, Mahmassani HJTRPAP, Practice. Travel time estimation based on piecewise truncated quadratic speed trajectory. 2008;42(1):173-86.
- [15] Turner SM, Eisele WL, Benz RJ, Holdener DJ. Travel time data collection handbook. United States. Federal Highway Administration; 1998.
- [16] Vanajakshi LD, Williams BM, Rilett LRJJoTE. Improved flow-based travel time estimation method from point detector data for freeways. 2009;135(1):26-36.
- [17] Wasson JS, PE; Sturdevant, James R, PE; Bullock, Darcy M, PE. Real-time travel time estimates using media access control address matching. 2008.
- [18] Xiao Y, Qom SF, Hadi M, Al-Deek H. Use of data from point detectors and automatic vehicle identification to compare instantaneous and experienced travel times. 2014;2470(1):95-104.