

การตรวจสอบความเสื่อมสภาพของผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตโดยใช้เซ็นเซอร์จากสมาร์ทโฟน Inspection of Asphalt Concrete Pavement Deterioration Using Smartphone-Based Sensors

พรเทพ พวงประโคน^{1,*} อสมา จิตจำนงค์เมต² วลัยรัตน์ บุญไทย³ และ ประกิจ เปรมธรรมกร⁴

^{1,2,3,4} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร

*Corresponding author; E-mail address: puangprakhon@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์จากสมาร์ทโฟนในการตรวจสอบความเสื่อมสภาพของผิวทาง โดยติดตั้งสมาร์ทโฟนบนยานพาหนะทดสอบเพื่อวัดสัญญาณจากเซ็นเซอร์ขณะขับขึ้นผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตที่มีความเสียหายแบบต่างๆ ในบทความมีการแสดงรายละเอียดวิธีการติดตั้ง เทคนิคการกรองและประมวลผลสัญญาณ รวมทั้งนำเสนอแนวทางในการประมาณความยาวของผิวทางที่เสื่อมสภาพ ผลการศึกษาพบว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถตรวจพบความเสียหายของผิวทางได้สอดคล้องกับตำแหน่งความเสียหายในสนามจริง ค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณความยาวของผิวทางที่เสียหายอยู่ในช่วง 9% ถึง 51% ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้ถือเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีตรวจสอบสภาพถนนที่ประหยัดและมีประสิทธิภาพ ช่วยเสริมความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของโครงข่ายถนน

คำสำคัญ: สมาร์ทโฟน, ความเสื่อมสภาพของผิวทาง, ความเสียหายของผิวทาง, ผิวทาง, เซ็นเซอร์

Abstract

This article presents the application of smartphone sensors for assessing pavement deterioration. A smartphone was mounted on a test vehicle to measure sensor signals while driving over asphalt concrete pavements with various types of damage. The study details the installation process, signal filtering and processing techniques, and an approach for estimating the length of deteriorated pavement. The findings indicate that the proposed method can accurately detect pavement damage in alignment with actual field conditions, with estimation errors for damaged pavement length ranging from 9% to 51%. The findings serve as preliminary data for the development of cost-effective and efficient road condition monitoring technologies, contributing to enhanced safety and reliability of road networks.

Keywords: Smartphone, Pavement Deterioration, Pavement Distress, Pavement, Sensor

1. บทนำ

สภาพผิวทางเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการใช้ถนน โดยทั่วไปการออกแบบผิวทางจะพิจารณาให้สามารถรองรับปริมาณการจราจรภายในอายุการใช้งานที่กำหนดได้อย่างเหมาะสม [1-2] อย่างไรก็ตามหลังจากมีการใช้งานถนนเป็นระยะเวลาหนึ่งผิวทางอาจเกิดความเสื่อมสภาพและเสียหายจากปัจจัยต่างๆ หลายประการ เช่น การบรรทุกน้ำหนักเกินกว่าที่ออกแบบ การมีน้ำซัง ผลกระทบจากสภาพแวดล้อมและพื้นที่ข้างเคียง การขาดการบำรุงรักษาที่เหมาะสม เป็นต้น ทำให้เกิดปัญหาด้านโครงสร้าง ความปลอดภัย และประสิทธิภาพการจราจร โดยความเสียหายของผิวทาง เช่น รอยแตกร้าว การเกิดร่องล้อ และการหลุดร่อนของวัสดุ จะลดความเรียบของพื้นผิว ทำให้ขับขี่ไม่สะดวกและเพิ่มความเสี่ยงต่ออุบัติเหตุ การเสื่อมสภาพของผิวทางยังอาจส่งผลให้การระบายน้ำลดลง ก่อให้เกิดน้ำขังและเพิ่มความลื่นของพื้นผิว ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน นอกจากนี้ผิวทางที่เสียหายอาจลดความเร็วของยานพาหนะ เพิ่มการใช้พลังงาน และส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม หากไม่มีการบำรุงรักษาที่เหมาะสม ความเสียหายอาจลุกลามส่งผลให้ต้นทุนการซ่อมแซมสูงขึ้นและกระทบต่ออายุการใช้งานของถนน ดังนั้น การตรวจสอบและบำรุงรักษาผิวทางอย่างเหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อรักษาประสิทธิภาพและความปลอดภัยของระบบจราจร

การเสื่อมสภาพและความเสียหายของผิวทางสามารถจำแนกออกเป็น 4 รูปแบบหลัก [3] ได้แก่ (1) รอยแตกร้าว (cracking) เช่น รอยแตกแบบหนึ่งจะเข้หรือจากความล้า รอยแตกร้าวตามแนวยาว เป็นต้น (2) การเสียรูปของผิวทาง (surface deformation) เช่น การเกิดร่องล้อ การเกิดลอนคลื่น เป็นต้น (3) การแตกหรือหลุดร่อนของวัสดุ (disintegration) เช่น หลุมบ่อ การปะซ่อม เป็นต้น และ (4) ความเสียหายของผิวทาง (surface defects) เช่น การหลุดร่อนของหินผิวหน้า การเยิ้มของแอสฟัลท์ เป็นต้น ในการบำรุงรักษาถนนและผิวทาง หน่วยงานที่เกี่ยวข้องจำเป็นต้องมีการเก็บรวบรวมข้อมูลสภาพผิวทางและรูปแบบของความเสียหายที่เกิดขึ้น เพื่อให้สามารถวางแผนการบำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตามเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการประเมินสภาพผิวทางมักมีความเฉพาะทาง

และราคาสูง อีกทั้งยังมีจำนวนจำกัดในบางหน่วยงาน ส่งผลให้การตรวจสอบล่าช้าและการบำรุงรักษาไม่ทั่วถึง ซึ่งอาจกระทบต่อประสิทธิภาพและความปลอดภัยของผู้ใช้ถนน

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีการศึกษาวิจัยจำนวนมากที่พิจารณาการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ในสมาร์ทโฟนเพื่อตรวจสอบสภาพผิวทาง เช่น Douangphachanh และ Oneyama [4] ใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่ง (accelerometer) และไจโรสโคป (gyroscope) ในสมาร์ทโฟนที่ติดตั้งบนยานพาหนะเพื่อประเมินค่าดัชนีความขรุขระสากล (International Roughness Index: IRI) ของถนนในประเทศไทย โดยข้อมูลที่ได้รับรวมได้ถูกแปลงเป็นโดเมนความถี่และนำไปพัฒนาเป็นสมการเพื่อทำนายค่า IRI ที่ความเร็วต่างๆ พร้อมเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ในภาคสนาม นอกจากนี้ Astarita และคณะ [5] ใช้แอปพลิเคชัน UNiQuALroad บนสมาร์ทโฟนเพื่อรวบรวมข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร่งและ GPS โดยพัฒนาเทคนิคการกรองสัญญาณในโดเมนเวลาเพื่อระบุจุดที่มีหลุมบ่อและลักษณะถนนในอิตาลี ส่วน Seraj และคณะ [6] ใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่ง ไจโรสโคป และ GPS ในสมาร์ทโฟนเพื่อตรวจสอบสภาพถนนในแอลเบเนียและเนเธอร์แลนด์ โดยประมวลผลข้อมูลในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ รวมถึงใช้การแปลงเวฟเล็ต (wavelet transformation) พร้อมนำเสนอวิธีการกรองข้อมูลและใช้ Support Vector Machines (SVM) เพื่อจำแนกประเภทของความเสียหาย รวมทั้งพัฒนาระบบตรวจสอบสภาพถนนแบบทันที (real time) Basavaraju และคณะ [7] ได้พัฒนาระบบตรวจจับและจำแนกความเสียหายของผิวทางโดยใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเร่ง ไจโรสโคป และ GPS ในสมาร์ทโฟนที่ติดตั้งบนยานพาหนะบนถนนในรัฐเท็กซัสสหรัฐอเมริกา โดยมีการกรองข้อมูลเบื้องต้นและพัฒนาแบบจำลองหลายประเภท ได้แก่ SVM, decision tree และโครงข่ายประสาทเทียม (neural networks) เพื่อจำแนกรูปแบบความเสียหายของผิวทาง Kim และ Kim [8] ได้นำเสนอวิธีการตรวจจับความเสียหายของถนนโดยใช้หลักการเก็บข้อมูลอัตโนมัติร่วมกับแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก (deep learning) เพื่อการตรวจสอบแบบทันที ระบบนี้ใช้ Convolutional Neural Network: CNN ในการจำแนกความผิดปกติของถนน เช่น หลุมบ่อ ฝาท่อ และหลุมบ่อ ซึ่งให้ความแม่นยำและประสิทธิภาพในการประมวลผลสูงกว่าวิธีการดั้งเดิม

การศึกษานี้ยังชี้ให้เห็นถึงศักยภาพและความเป็นไปได้ในการใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์สมาร์ทโฟนที่ติดตั้งบนยานพาหนะเพื่อพัฒนาระบบตรวจสอบสภาพผิวทางที่มีต้นทุนต่ำและสะดวกต่อการใช้งานในโครงข่ายถนนขนาดใหญ่ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการเบื้องต้นในการใช้เซ็นเซอร์ในสมาร์ทโฟนเพื่อประเมินความเสียหายของผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีต โดยพิจารณาการใช้เซ็นเซอร์วัดความเร่ง ร่วมกับ GPS ในการเก็บข้อมูลและระบุตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาระบบตรวจสอบและประเมินสภาพผิวทางแก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่อไป

2. วิธีการศึกษา

ขั้นตอนการดำเนินงานของการศึกษานี้ แสดงดังรูปที่ 1 เริ่มจากการคัดเลือกพื้นที่ศึกษาที่มีลักษณะความเสียหายของผิวทางที่แตกต่างกันจำนวน 5 แห่ง จากนั้นทำการติดตั้งสมาร์ทโฟนบนยานพาหนะและใช้แอปพลิเคชันเฉพาะในการบันทึกข้อมูลความเร่ง 3 แกนและตำแหน่งเชิงภูมิศาสตร์ระหว่างการขับผ่านพื้นที่ดังกล่าว ข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ โดยปรับแกนให้อยู่ในกรอบอ้างอิงสากลเพื่อลดผลของความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้ง จากนั้นจึงดำเนินการกรองสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดจากแรงสั่นสะเทือนตามธรรมชาติหรือพื้นผิวถนนที่อยู่ในสภาพปกติ เพื่อให้เหลือเฉพาะสัญญาณที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายของผิวทาง จากนั้นนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับข้อมูลในสนามจริงเพื่อประเมินระดับและตำแหน่งของความเสียหายที่เกิดขึ้น



รูปที่ 1 ขั้นตอนการศึกษา

2.1 พื้นที่ศึกษา

งานวิจัยนี้พิจารณาพื้นที่ศึกษาจำนวน 5 แห่ง บนผิวทางแอสฟัลท์คอนกรีตในบริเวณเขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร ที่มีรูปแบบความเสียหายของผิวทางแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2 และตารางที่ 1 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2 พื้นที่ศึกษาและความเสียหายรูปแบบต่างๆ

ตารางที่ 1 รายละเอียดความเสียหายของพื้นที่ศึกษา

พื้นที่	รูปแบบความเสียหาย	ความกว้าง (ซม.)	ความยาว (ซม.)	ความลึก/นูน (ซม.)
1	รอยแตกร้าวตามแนวยาว	105	5,560	10
2	ร่องล้อ	410	1,203	15
3-1	หลุมบ่อ	30	40	10
3-2	การปะซ่อมผิวทาง	70	105	2 (นูน)
4-1	การปะซ่อมผิวทาง (จุดที่ 1)	386	720	2 (นูน)
4-2	การปะซ่อมผิวทาง (จุดที่ 2)	386	500	2 (นูน)
5	การหลุดร่อนของวัสดุผิวทาง	198	1,043	15

พื้นที่ 1: ความเสียหายแบบรอยแตกร้าวตามแนวยาว มีขนาดกว้าง ยาว ลึก เท่ากับ 105, 5,560, และ 10 ซม. ตามลำดับ

พื้นที่ 2: ความเสียหายแบบร่องล้อ โดยมีขนาดกว้าง ยาว ลึก เท่ากับ 410, 1,203 ซม. และ 15 ซม. ตามลำดับ

พื้นที่ 3: ความเสียหายแบบหลุมบ่อและการปะซ่อมผิวทาง โดยหลุมบ่อมีขนาดกว้าง ยาว ลึก เท่ากับ 30, 40 ซม. และ 10 ซม. ตามลำดับ ต่อด้วยการปะซ่อมผิวทางที่มีขนาดกว้าง ยาว นูน เท่ากับ 70, 105 ซม. และ 2 ซม. ตามลำดับ ส่งผลให้ความยาวผิวทางที่เสียหายรวมเท่ากับ 145 ซม.

พื้นที่ 4: ความเสียหายแบบการปะซ่อมผิวทาง ประกอบด้วย การปะซ่อมสองตำแหน่งในบริเวณใกล้เคียงกัน โดยจุดแรกมีขนาดกว้าง ยาว นูน เท่ากับ 386, 720 ซม. และ 2 ซม. ตามลำดับ ส่วนจุดที่สองมีขนาดกว้าง ยาว นูน เท่ากับ 386, 500 และ 2 ซม. ตามลำดับ

พื้นที่ 5: ความเสียหายแบบการหลุดร่อนของวัสดุผิวทาง โดยมีขนาดกว้าง ยาว ลึก เท่ากับ 198, 1,043 และ 15 ซม. ตามลำดับ

2.2 การติดตั้งอุปกรณ์และวิธีการเก็บข้อมูล

งานวิจัยนี้ใช้สมาร์ทโฟน iPhone 12 ทำงานบนระบบปฏิบัติการ iOS เวอร์ชัน 16.4.1 ในการเก็บข้อมูล โดยติดตั้งบนรถยนต์ส่วนบุคคล Toyota Fortuner ใช้ยางขนาด 256/70R16 แรงดันลมยางของล้อทุกล้อเท่ากับ 35

psi ทำการยึดสมาร์ทโฟนกับตัวรถด้วยการยึดกับแผงคอนโซลหน้าของรถ ดังรูปที่ 3

ใช้แอปพลิเคชัน Phyphox (เวอร์ชัน 1.1.11) ติดตั้งบนสมาร์ทโฟน ในการเก็บข้อมูลความเร่งทั้ง 3 แกน และตำแหน่งของยานพาหนะ กำหนดความถี่ในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 100 Hz ใช้ความเร็วในการขับขี่ขณะทำการสำรวจประมาณ 30 กม./ชม. แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้นำมาทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งและระดับความเสียหายของผิวทางที่ตรวจวัดได้จริงในสนาม



รูปที่ 3 ยานพาหนะที่ใช้เก็บข้อมูลและการยึดสมาร์ทโฟนกับตัวรถ

2.3 การกรองและวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลดิบที่ได้จากเซ็นเซอร์ของสมาร์ทโฟน ที่ติดตั้งและเก็บข้อมูลตามวิธีการในหัวข้อ 2.2 จะยังไม่สามารถนำมาใช้ระบุความเสียหายของผิวทางได้ทันที จำเป็นต้องมีการกรองและประมวลผลเบื้องต้น งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการกรองและประมวลผลข้อมูลประกอบด้วยสามขั้นตอนดังต่อไปนี้:

- 1) การปรับแกนพิกัดให้อยู่ในกรอบอ้างอิงสากล (reorienting to a global frame of reference) เพื่อลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตำแหน่งและการติดตั้งสมาร์ทโฟน โดยข้อมูลความเร่งจากการสำรวจ จะถูกปรับแกนให้สอดคล้องกับกรอบอ้างอิงสากล
- 2) การกรองสัญญาณความเร่งแอมพลิจูดต่ำที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ออก โดยทำการนำสัญญาณที่แอมพลิจูดต่ำซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติในการสำรวจออกจากข้อมูลที่สำรวจได้
- 3) การกรองสัญญาณความเร่งบริเวณผิวทางปกติ (ไม่มีความเสียหาย) ออก โดยทำการนำสัญญาณที่เกิดจากผิวทางที่อยู่ในสภาพดีและไม่มีความเสียหายออกจากข้อมูลที่สำรวจได้เพื่อให้เหลือเพียงสัญญาณที่เกิดขึ้นบริเวณที่ผิวทางชำรุด

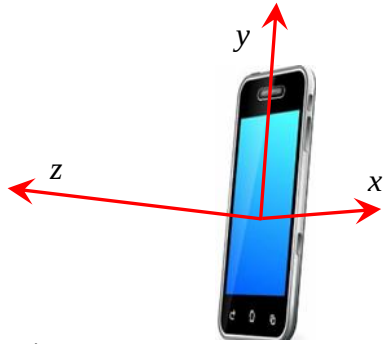
กระบวนการแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.3.1 การปรับแกนพิกัดให้อยู่ในกรอบอ้างอิงสากล

เซ็นเซอร์วัดความเร่งเป็นเซ็นเซอร์ที่ออกแบบมาเพื่อวัดความเร่งเชิงเส้นตามแนวแกน โดยทั่วไปเซ็นเซอร์วัดความเร่งที่ติดตั้งในสมาร์ทโฟนจะสามารถจะวัดความเร่งตามแนวแกน x y และ z ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนได้ ดังรูปที่ 4

ในทางทฤษฎี เมื่อทำการติดตั้งสมาร์ทโฟนบนยานพาหนะที่หยุดนิ่งบนพื้นราบในแนวระนาบ ค่าความเร่งที่วัดได้ในแต่ละแกนควรมีค่าประมาณ

ดังนี้: $a_x = 0 \text{ m/s}^2$, $a_y = 9.81 \text{ m/s}^2$ และ $a_z = 0 \text{ m/s}^2$ (โดยที่แกน y แสดงค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก) อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ อาจไม่สามารถติดตั้งสมาร์ตโฟนให้สอดคล้องกับกรอบอ้างอิงสากล (แนวแกนตามทฤษฎี) ได้อย่างสมบูรณ์ในทุกๆ ครั้ง ดังนั้นจึงต้องมีการคำนวณปรับค่าความเร่งจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งโดยมีแนวแกนไม่ตรงกับทฤษฎี ให้เข้าสู่กรอบอ้างอิงสากล



รูปที่ 4 ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนในการวัดความเร่งของโทรศัพท์ iPhone

การปรับแก้ดังกล่าวสามารถดำเนินการได้โดยใช้สมการที่ (1) ถึง (5) [5, 7] โดยที่ a_x , a_y และ a_z คือค่าความเร่งที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดความเร่งในโทรศัพท์มือถือ a'_x , a'_y และ a'_z เป็นค่าความเร่งที่อ้างอิงกับกรอบอ้างอิงสากล ขณะที่ α และ β คือมุมโรล (roll angle) และมุมพิทช์ (pitch angle) ตามลำดับ

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{a_z}{a_y} \right) \quad (1)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{-a_x}{\sqrt{(a_y)^2 + (a_z)^2}} \right) \quad (2)$$

$$a'_x = \cos(\beta)a_x + \sin(\beta)\sin(\alpha)a_z + \cos(\alpha)\sin(\beta)a_y \quad (3)$$

$$a'_y = -\sin(\beta)a_x + \cos(\beta)\sin(\alpha)a_z + \cos(\alpha)\cos(\beta)a_y \quad (4)$$

$$a'_z = \cos(\alpha)a_z - \sin(\alpha)a_y \quad (5)$$

2.3.2 การกรองสัญญาณความเร่งแอมพลิจูดต่ำที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ

ในสถานะที่ยานพาหนะดับเครื่องยนต์และหยุดนิ่ง ค่าความเร่งในแนวแกน x และ z ภายหลังจากปรับให้แกนพิกัดอยู่ในกรอบอ้างอิงสากลตามขั้นตอนก่อนหน้า ควรมีค่าเท่ากับ 0 ในขณะที่ความเร่งตามแนวแกน y ควรมีค่าประมาณ 9.81 m/s^2 อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติอุปกรณ์วัดจะตรวจพบสัญญาณที่มีความผันผวนขนาดเล็ก (low-amplitude fluctuations) แกว่งตัวรอบค่าตามทฤษฎี ความผันผวนเหล่านี้ อาจเกิดขึ้นเนื่องจากปัจจัยหลายประการ เช่น ความคลาดเคลื่อนจากความไม่สมบูรณ์แบบของอุปกรณ์วัด หรือ แรงสั่นสะเทือนจากสภาพแวดล้อมโดยรอบ เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ไม่ใช่ตัวบ่งชี้ความเสียหายของผิวถนน แต่เป็นสิ่งที่ปกติที่เกิด

ในกระบวนการวัด ดังนั้น เพื่อให้การวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไปเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษานี้จึงพิจารณากรองหรือลดทอนความผันผวนเหล่านี้ โดยใช้วิธีการตามที่แสดงในสมการ (6)

$$a_y = \begin{cases} \overline{a_{y,0}} & \text{if } a_{y,0,\min} \leq a_y \leq a_{y,0,\max} \\ a'_y & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

โดย $\overline{a_{y,0}}$ คือค่าความเร่งเฉลี่ยเมื่อยานพาหนะอยู่ในสถานะหยุดนิ่ง และดับเครื่องยนต์, $a_{y,0,\min}$ คือค่าความเร่งต่ำสุดตามแนวแกน y ซึ่งถูกบันทึกโดยเซ็นเซอร์วัดความเร่งเมื่อยานพาหนะอยู่ในสถานะหยุดนิ่งและดับเครื่องยนต์, และ $a_{y,0,\max}$ คือค่าความเร่งสูงสุดตามแนวแกน y ซึ่งถูกบันทึกโดยเซ็นเซอร์วัดความเร่งภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

2.3.3 การกรองสัญญาณความเร่งบริเวณผิวทางปกติ (ไม่มี ความเสียหาย) ออก

ขั้นตอนนี้เป็นการกรองสัญญาณความเร่งตามแนวแกน y ที่ตรวจวัดได้ ในช่วงที่ผิวทางมีสภาพปกติออก เพื่อให้เหลือเฉพาะสัญญาณที่ตรวจพบในช่วงที่ผิวทางมีความเสียหาย โดยสมมติฐาน คือ เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านถนนที่ผิวทางมีสภาพปกติแอมพลิจูดของความเร่งในแนวแกน y ที่สำรวจได้ จะมีค่าต่ำกว่าที่สำรวจได้ในช่วงที่ผิวทางมีความเสียหาย ดังนั้น ในขั้นตอนนี้ สัญญาณที่มีแอมพลิจูดต่ำกว่าช่วงความเร่งที่กำหนดจะถูกคัดกรองออก ดังสมการที่ (7)

$$a_y = \begin{cases} \overline{a_{y,0}} & \text{if } a_{y,t,\min} \leq a_y \leq a_{y,t,\max} \\ a'_y & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

โดย $a_{y,t,\min}$ คือ ค่าขอบเขตความเร่งต่ำสุด (Lower Threshold) ตามแนวแกน y ที่สำรวจได้ในช่วงผิวถนนปกติ ขณะที่ยานพาหนะกำลังเคลื่อนที่และเดินเครื่องยนต์อยู่ และ $a_{y,t,\max}$ คือค่าขอบเขตความเร่งสูงสุด (Upper Threshold) ตามแนวแกน y ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (8) และ (9)

$$a_{y,t,\min} = \overline{a_{y,t}} - (c \times \sigma_{y,t}) \quad (8)$$

$$a_{y,t,\max} = \overline{a_{y,t}} + (c \times \sigma_{y,t}) \quad (9)$$

โดย c คือ ค่าคงที่ ซึ่งกำหนดตามสภาพผิวถนนที่แตกต่างกัน หากกำหนดค่า c สูงขึ้น ช่วงของสัญญาณ (แอมพลิจูด) ที่ถูกกรองออกจะกว้างขึ้น ค่า $\overline{a_{y,t}}$ คือ ค่าความเร่งเฉลี่ยตามแนวแกน y บนผิวทางปกติ ส่วน $\sigma_{y,t}$ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความเร่งเฉลี่ยตามแนวแกน y บนผิวทางปกติ

3. ผลการศึกษา

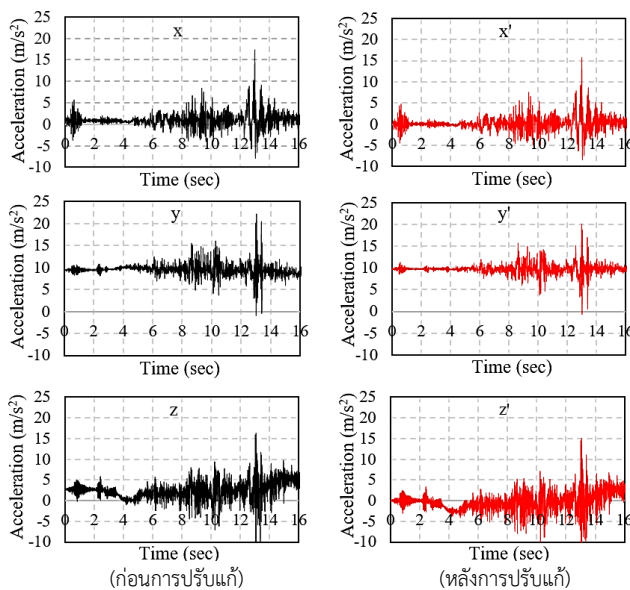
3.1 ผลการปรับแกนพิกัดให้อยู่ในกรอบอ้างอิงสากล

ผลการปรับแกนพิกัดให้อยู่ในกรอบอ้างอิงสากล หรือการปรับค่าความเร่งเนื่องจากการติดตั้งสมาร์ตโฟนไม่ตรงกับแนวแกนทางทฤษฎีอย่าง

สมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 5 จากรูปจะเห็นว่า ก่อนการปรับแก้ (รูปด้านซ้าย) ค่าความเร่งเฉลี่ยที่วัดได้ในแกน x และ z มีค่ามากกว่า 0 m/s² เล็กน้อย ขณะที่แกน y มีค่าความเร่งเฉลี่ยประมาณ 9.81 m/s² ซึ่งจำเป็นต้องมีการปรับให้ค่าความเร่งที่วัดได้ตรงกับแกนพิกัดในกรอบอ้างอิงสากล

หลังจากทำการปรับแก้ ตามสมการ (1) ถึง (5) (รูปด้านขวา) ค่าความเร่งที่วัดได้ในแต่ละแกนมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมากขึ้น โดยค่าความเร่งเฉลี่ยตามแกน x' และ z' มีค่าใกล้เคียง (เข้าสู่) 0 m/s² และค่าความเร่งตามแกน y' มีแนวโน้มเข้าสู่ 9.81 m/s²

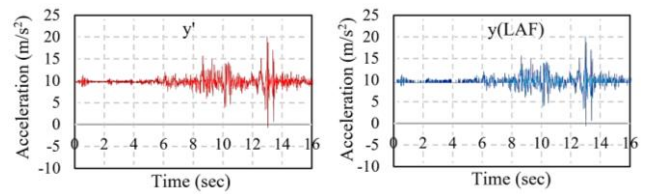
นอกจากนี้แอมพลิจูดของความเร่งในแต่ละแกนมีการเปลี่ยนแปลงหลังการปรับแก้ เช่น ในกรณีของแกน y ก่อนการปรับแก้ ค่าความเร่งสูงสุดเกิดขึ้นประมาณวินาทีที่ 13 โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 22 m/s² ขณะที่หลังจากการปรับแก้ ค่าความเร่งสูงสุดในช่วงเวลาเดียวกันลดลงเหลือประมาณ 20 m/s²



รูปที่ 5 ความเร่งในแนวแกน x y และ z ก่อนและหลังการปรับแกนให้อยู่ในกรอบอ้างอิงสากล

3.2 การกรองสัญญาณความเร่งแอมพลิจูดต่ำที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ

ผลการกรองสัญญาณความเร่งแอมพลิจูดต่ำซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติ และไม่ได้เกิดจากการซบซึ้งผ่านบริเวณที่ผิวถนนชำรุด แสดงดังรูปที่ 6 โดยรูปด้านซ้ายแสดงค่าความเร่งตามแนวแกน y ก่อนการกรองสัญญาณ ขณะที่รูปทางด้านขวาแสดงค่าความเร่ง หลังจากผ่านกระบวนการกรองสัญญาณความเร่งแอมพลิจูดต่ำ (Low-Amplitude Filtering: LAF)



รูปที่ 6 ความเร่งในแนวแกน y ก่อนและหลังการกรองสัญญาณความเร่งแอมพลิจูดต่ำที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ

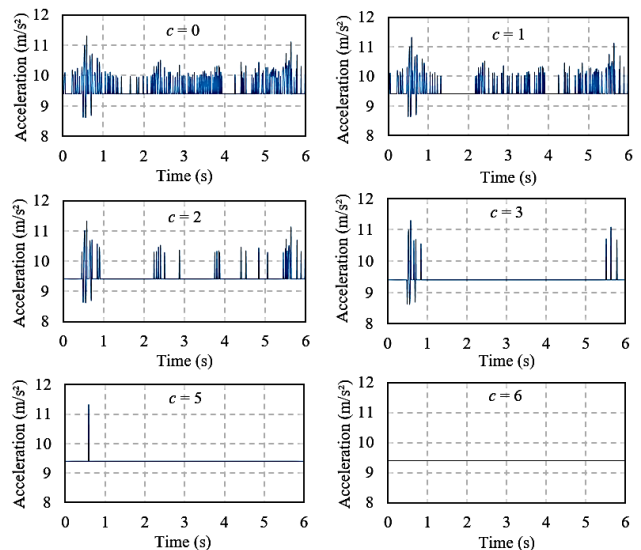
3.3 ผลการกรองสัญญาณความเร่งบริเวณผิวทางปกติออก

การกรองสัญญาณแอมพลิจูดต่ำที่เกิดจากผิวทางปกติออก (ขณะที่ยานพาหนะกำลังเคลื่อนที่) เป็นกระบวนการเพื่อคัดแยกสัญญาณความเร่งที่ตรวจวัดได้บนผิวทางที่ไม่มีความเสียหายออก ให้เหลือเพียงสัญญาณที่ตรวจพบบริเวณที่ผิวทางชำรุดเสียหาย

ขั้นตอนนี้ ใช้การกำหนดค่าคงที่ c ในสมการ (8) และ (9) เพื่อปรับช่วงกว้าง (ขอบเขตบน-ล่าง) ของแอมพลิจูดในการกรองผิวทางปกติออกเบื้องต้นอาจกำหนดค่า c=1 และหากพบว่าหลังผ่านการกรองแล้วยังคงพบสัญญาณที่มาจากช่วงผิวทางปกติอยู่ ให้ทำการปรับค่า c เพิ่มขึ้น จนกว่าจะไม่พบสัญญาณความเร่งที่สำรวจได้ในช่วงผิวทางปกติ

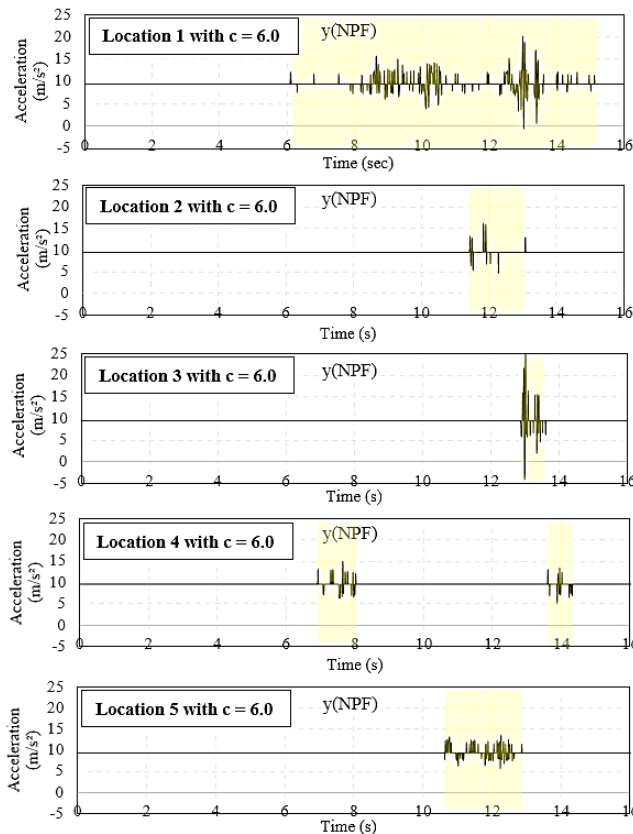
เมื่อค่า c เพิ่มขึ้น สัญญาณที่มีแอมพลิจูดต่ำจะถูกกรองออกมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าที่เหมาะสมของ c จะแตกต่างกันไป ขึ้นกับลักษณะของผิวทาง ประเภทยานพาหนะ อุปกรณ์ที่ใช้ การติดตั้ง และความเร็วที่ใช้ในระหว่างการเก็บข้อมูล

ตัวอย่างการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมของ c แสดงดังรูปที่ 7 โดยทดสอบวิ่งบนผิวทางปกติ จะเห็นว่า เมื่อ c=0 (ก่อนการกรอง) ตรวจพบสัญญาณความเร่งตามแนวแกน y เป็นจำนวนมากในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนผ่านผิวทางปกติ เมื่อเพิ่มค่า c ขึ้นเป็น 1, 2, 3 และ 5 จำนวนสัญญาณความเร่งที่ตรวจพบในช่วงผิวทางปกติลดลงเรื่อยๆ และเมื่อค่า c=6 ไม่พบสัญญาณความเร่งในช่วงผิวทางปกติอีกเลย ดังนั้นสำหรับกรณีนี้ จึงกำหนดค่า c=6 เพื่อใช้ในสมการ (8) และ (9)



รูปที่ 7 ความเร่งตามแนวแกน y บนผิวทางปกติเมื่อใช้ค่าคงที่ c ต่างๆ ในการกรองข้อมูล

ในการศึกษานี้พบว่า การกำหนดค่า $c=6$ สามารถกรองค่าความเร่งที่เกิดบนผิวทางปกติออกได้อย่างเหมาะสมในทุกพื้นที่ที่ทำการศึกษา รูปที่ 8 แสดงสัญญาณที่ผ่านการกรอง (Normal Pavement Filtering, NPF) บนพื้นที่ที่ทำการศึกษาทั้ง 5 แห่ง โดยจะสังเกตได้ว่าสัญญาณความเร่งที่มีแอมพลิจูดต่ำบนผิวทางปกติถูกรองออกไป เหลือเฉพาะค่าความเร่งที่เกิดขึ้นเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีความเสียหายของผิวทาง (พื้นที่แรเงาสีเหลือง)



รูปที่ 8 ค่าความเร่งตามแนวนอน y หลังการกรองสัญญาณความเร่งแอมพลิจูดต่ำที่เกิดขึ้นในช่วงผิวทางปกติออก

ในพื้นที่ 1, 2, 3 และ 5 พบว่ามีการตรวจพบจุดที่มีความเสียหายหนึ่งจุดในแต่ละพื้นที่ โดยมีความยาวของความเสียหายแตกต่างกัน ในขณะที่ตำแหน่งที่ 4 ตรวจพบความเสียหายสองจุด สอดคล้องกับสภาพความเสียหายจริงในพื้นที่ศึกษา

เมื่อนำค่าความเร่งที่ตรวจพบมาเปรียบเทียบกับประเภทของความเสียหายของผิวทาง พบว่าตำแหน่งที่ 3 ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีหลุมบ่อขนาดเล็กแต่ลึกและชัน ค่าความเร่งที่ตรวจพบมีค่าสูงกว่า 25 m/s^2 ซึ่งสูงกว่าความเสียหายในรูปแบบอื่นๆ เนื่องจากแรงกระแทกที่รุนแรงเมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านหลุมดังกล่าว ในทางตรงข้าม ตำแหน่งที่ 4 และ 5 ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการปะซ่อมผิวทาง (patching) และการหลุดร่อนของผิว (raveling) ตามลำดับ ค่าความเร่งที่ตรวจพบมีค่าต่ำกว่า 15 m/s^2 โดยค่าความเร่งที่ต่ำในบริเวณที่พบการปะซ่อมผิวทางอาจเป็นผลมาจากความแตกต่างของระดับผิวทางปกติและผิวทางที่ชำรุดมีค่าน้อย เมื่อเทียบกับ

ความเสียหายในรูปแบบอื่น ในขณะที่การหลุดร่อนของผิวทาง ซึ่งเป็นลักษณะของการเสื่อมสภาพแบบกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้ความเร่งที่เกิดขึ้นเมื่อยานพาหนะวิ่งผ่านมีค่าน้อย

3.4 การประมาณความยาวของผิวทางที่มีความเสียหาย

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการประมาณความยาวของผิวทางที่มีความเสียหายโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดความเร่งในสมาร์ตโฟน ดังสมการที่ (10)

$$L_d = (t \times v) - w \quad (10)$$

โดย L_d คือ ความยาวของช่วงผิวทางที่มีความเสียหาย (เมตร), t คือ ระยะเวลาที่ตรวจพบการสั่นสะเทือนผิดปกติ (แสดงในพื้นที่แรเงาสีเหลืองในรูปที่ 7 (วินาที), v คือ ความเร็วเฉลี่ยที่ใช้ในการขับเคลื่อนระหว่างการเก็บข้อมูล (เมตร/วินาที), w คือ ความยาวฐานล้อของยานพาหนะ ซึ่งในงานวิจัยนี้เท่ากับ 2.76 เมตร

ตารางที่ 2 การประมาณความยาวของผิวทางที่มีความเสียหาย

พื้นที่	ความยาวผิวทางที่เสียหาย (เมตร)		
	จากการประมาณ	จากการวัดในสนาม	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	72.32	55.60	30.08
2	10.91	12.03	9.34
3	1.91	1.45	31.49
4-1	6.41	7.20	-11.02
4-2	3.07	5.00	-38.53
5	15.82	10.43	51.71

ความยาวของผิวทางที่มีความเสียหายในแต่ละประเภทที่ได้จากการประมาณแสดงดังตารางที่ 2 จากการศึกษพบว่าสมการ (10) สามารถใช้ประมาณความยาวของผิวทางที่มีความเสียหายได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงในสนาม โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 9-51%

ทั้งนี้พบว่าผิวทางชำรุดแบบปะซ่อมผิว ซึ่งมีความรุนแรงเฉลี่ยประมาณ 2 ซม. จากผิวทางเดิม ค่าความยาวที่ประมาณได้ต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริง ส่วนความเสียหายแบบอื่นๆ ที่มีความลึกมากกว่า ค่าที่ประมาณได้จากสมการสูงกว่าค่าที่วัดได้จริง

4. สรุปผลการศึกษา

บทความนี้ทำการศึกษาศึกษาการประยุกต์ใช้เซ็นเซอร์ในสมาร์ตโฟนประกอบด้วยเซ็นเซอร์วัดความเร่งร่วมกับ GPS เพื่อใช้ตรวจสอบความเสียหายของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตรูปแบบต่างๆ ได้แก่ รอยแตก ร้าวตามแนวยาว ร่องล้อ หลุมบ่อ การปะซ่อมผิว และการหลุดร่อนของผิวทาง

ในการศึกษาใช้ข้อมูลความเร่งสามแกนร่วมข้อมูลพิกัดโดยวิเคราะห์ในโดเมนเวลา (time-domain analysis) มีการนำเสนอขั้นตอนการประมวลผลและกรองข้อมูลสามขั้นตอน ได้แก่ (1) การปรับแกนนพิกัดให้อยู่

ในกรอบอ้างอิงสากล (2) การกรองสัญญาณความเร่งแอมพลิจูดต่ำที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ และ (3) การกรองสัญญาณความเร่งบริเวณผิวทางปกติ (ไม่มี ความเสียหาย) ออก

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากระบวนการที่นำเสนอสามารถกรองสัญญาณความเร่งที่เกิดจากผิวทางปกติออกไปได้ ทำให้สามารถระบุตำแหน่งที่ผิวทางเสียหายได้อย่างถูกต้องสอดคล้องกับสภาพความเสียหายในภาคสนาม การศึกษานี้ยังได้เสนอวิธีประมาณความยาวของผิวทางที่มีความเสียหาย โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมาณอยู่ในช่วง 9% ถึง 51%

เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความครอบคลุมของการใช้เซ็นเซอร์จากสมาร์ทโฟนในการตรวจวัดความเสียหายของผิวทาง งานวิจัยในอนาคตอาจพิจารณาการผสมผสานข้อมูลความเร่งสามแกนร่วมกับเซ็นเซอร์อื่นๆ เช่น ไจโรสโคป (gyroscope) การใช้การวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ (frequency-domain analysis) การเพิ่มจำนวนชุดข้อมูล และการศึกษาความเสียหายในรูปแบบที่หลากหลายยิ่งขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการตรวจวัด นอกจากนี้เมื่อมีจำนวนข้อมูลที่มากเพียงพอการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) และ machine learning อาจช่วยเพิ่มความสามารถของแบบจำลองในการทำนายประเภทและปริมาณของความเสียหายของผิวทางได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ben-Edigbe, J., Ferguson, N. (2005). Extent of capacity loss resulting from pavement distress. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, vol:158, no:1, pp.27-32.
- [2] Aydin, M.M., Topal, A. (2016). Effect of road surface deformations on lateral lane utilization and longitudinal driving behaviours. *TRANSPORT*, 31(2), 192-201.
- [3] Adlinge, S.S., Gupta, A.K. (2013). Pavement deterioration and its causes. *International journal of innovative research and development*, 2, 437-450.
- [4] Douangphachanh, V., Oneyama, H. (2014). Exploring the use of smartphone accelerometer and gyroscope to study on the estimation of road surface roughness condition. *The 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO-2014)*, 783-787.
- [5] Astarita, V., Caruso, M.V., Danieli, G., Festa, D.C., Giofre, V.P., Luele, T., Vaiana, R. (2012). A mobile application for road surface quality control: UNiquALroad. *The 15th meeting of the EURO Working Group on Transportation*, 1135-1144.
- [6] Seraj, F., Zwaag, B.J., Dilo, A., Luarasi, T., Havinga, P.: RoADS (2016). *A road pavement monitoring system for anomaly detection using smart phones*. In: Atzmueller, M., Chin, A., Janssen, F., Schweizer, I., Trattner, C. (eds) *Big Data Analytics in the Social and Ubiquitous Context. SENSEML MUSE MSM 2015 2014 2014. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9546, pp. 128-146.
- [7] Basavaraju, A., Du, J., Zhou, F., Ji, J. (2020). A machine learning approach to road surface anomaly assessment using smartphone sensors. *IEEE Sensors Journal*, 20(5), 2635-2647.
- [8] Kim, G., Kim, S. (2024). A road defect detection system using smartphones. *Sensors*, 24(7), 1-21 (2024).