การพัฒนาวิธีคอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการตรวจวัดการทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์

Development of Computer Vision Method for Monitoring a Dynamic Pile Loading Test

ปรัชญา มาคำ[1,*] และ สมโพธิ อยู่ไว[1]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

Corresponding author; E-mail address: prachya.m@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ได้พัฒนาวิธีคอมพิวเตอร์วิทัศน์ เพื่อตรวจวัดพฤติกรรมของเสาเข็มขณะทดสอบกำลังรับน้ำหนัก เปรียบเทียบกับกำลังที่ได้จากการทดสอบแบบพลศาสตร์ซึ่งวิเคราะห์ด้วย Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) การตรวจวัดใช้เป้าชนิด ArUco ซึ่งสามารถวัดระยะห่างจากกล้องในแนว 3 มิติ ติดบนตุ้มน้ำหนักและหัวเสาเข็มทดสอบ นำมาวิเคราะห์ผ่านโค้ด OpenCV ที่พัฒนาขึ้นด้วยภาษาไพธอน การเคลื่อนที่ของเป้าที่ตรวจวัดได้จะแปลงเป็นแรงและความเร็ว เพื่อคำนวณหากำลังรับน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีของเคส ผลการศึกษาพบว่า การใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการตรวจจับเป้า ระยะห่างระหว่างกล้องกับเป้ามีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการวัดระยะทางเนื่องจากเป้ามีขนาดพิกเซลที่เล็กลงเมื่อตั้งกล้องห่างจากเป้าไกลขึ้น ความเร็วที่วัดได้ในช่วงเวลาเดียวกันกับการทดสอบแบบพลศาสตร์มีความใกล้เคียงกัน ส่วนการวัดแรงในเสาเข็มจะมีความคลาดเคลื่อนพอสมควรจากความผิดพลาดสะสมของการคำนวณความเร็วจากระยะทาง รวมถึงหากประมาณค่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็มผิดพลาด งานวิจัยนี้ได้แสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการตรวจวัดผลจากการทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์

คำสำคัญ: การทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มแบบพลศาสตร์, คอมพิวเตอร์วิทัศน์, ArUco Marker, Python

Abstract

This study develops a computer vision method for monitoring pile behaviors during pile load tests compared to dynamic pile load test and Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP). The detection was carried out by the use of ArUco markers attached to the rammer and the head of the pile. The markers can be used to measure the distance in 3-D between the camera lens and itself. The ArUco recorded videos were analyzed by developed code with OpenCV library in Python. The Markers movement at rammer and pile head will be analyzed to obtain force and velocity. The pile capacity was estimated by the Case method. The accuracy of the measured displacement depends on the distance between the camera and the markers. The smaller the pixel of the markers, the greater the error. The calculated velocity is similar to DLT results. However, there was significant error for calculated forces due to cumulative marker movement and velocity detection error, including misjudging wave speed and pile

เต็มรูปแบบ โมเดลคอมพิวเตอร์วิทัศน์จะสามารถทำการรับรู้วัตถุ ตรวจจับและจดจำบุคคล หรือแม้กระทั่งติดตามการเคลื่อนไหวได้ เมื่อสามารถระบุวัตถุที่ต้องการได้แล้วเราจะสามารถตรวจสอบการเคลื่อนที่ของวัตถุได้ หลักการนี้สามารถนำมาใช้ในการวัดการเสียรูปของสิ่งก่อสร้างในงานวิศวกรรมโยธาได้ [3] ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมามีการนำเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์วิทัศน์มาประยุกต์ใช้ในการก่อสร้างอย่างแพร่หลายมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็น การใช้เฝ้าสังเกตการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรในกระบวนการก่อสร้าง ทั้งการใช้กล้องวิเคราะห์ [4] และการติดตั้งเป้าจับ [5] การติดตามการเปลี่ยนแปลงของความเครียดที่เกิดขึ้นในวัสดุและโครงสร้าง [6][7][8] การตรวจจับความผิดปกติทางกายภาพที่เกิดขึ้น เช่น การทรุดตัวของโครงสร้างแบบตามเวลาจริง [9] การทรุดตัวของโครงสร้างในระยะยาว [10] ความสมบูรณ์ของเสาคอนกรีตหล่อในที่ [11][12] รวมถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเทคนิคธรณี [13] เนื่องจากการพัฒนาของการประมวลผลภาพในอุปกรณ์พกพาเชิงพาณิชย์มีประสิทธิภาพและราคาถูกมากขึ้น

การศึกษานี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาวิธีคอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการตรวจวัดพฤติกรรมของเสาเข็มเปรียบเทียบกับการทดสอบแบบพลศาสตร์ โดยประเมินจากการทรุดตัว ความเร็ว ความเร่ง ที่เกิดขึ้นขณะตอกทดสอบ ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถลดการใช้ช่างเทคนิคในการติดตั้งอุปกรณ์ การเตรียมพื้นที่ติดตั้งบริเวณมาตรวัด รวมถึงความเสี่ยงในการเสียหายของอุปกรณ์มาตรวัดจากแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในการทดสอบแบบพลศาสตร์

2. วิธีการศึกษา

การศึกษานี้เก็บข้อมูลการทดสอบแบบพลศาสตร์ ซึ่งจะวิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักบรรทุกจากวิธีจับคู่สัญญาณ (Signal Matching) ด้วย Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP) ตามมาตรฐาน ASTM D 4945 โดยเข็มทดสอบจะติดเป้าชนิด ArUco ที่ตุ้มน้ำหนักและหัวเสาเข็ม และบันทึกวิดีโอขณะปล่อยตุ้มทดสอบด้วยกล้องแอคชั่น และพัฒนาโค้ดโปรแกรมด้วยภาษาไพธอนสำหรับตรวจจับการเคลื่อนที่ของเป้า ArUco [14] จากวิดีโอ ด้วยไลบรารี่ OpenCV [4] ซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์หากำลังรับแรงของเสาเข็มจากแรงและความเร็ว ด้วยวิธีของเคส (Case Method) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบแบบพลศาสตร์

2.1 [illegible]

การทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์ใช้อุปกรณ์ทดสอบรุ่น PDA 8G ซึ่งอุปกรณ์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์การตอกเสาเข็ม (Pile Driving Analyzer, PDA) อุปกรณ์ส่งสัญญาณไร้สาย มาตรวัดความเครียดวงจรชนิด Full Wheatstone Bridge พิสัย 3,000 με และมาตรวัดความเร่งชนิด Piezoelectric (PE) ซึ่งมีการสอบเทียบมาตรวัดและอุปกรณ์ก่อนใช้ในการทดสอบ ทดสอบในเสาเข็มตอกคอนกรีตอัดแรง ภาคตัดขวางรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสตัน จำนวน 27 ต้น ไม่มีการต่อเสาเข็ม ทดสอบแบบหลังการติดตั้งเสาเข็ม (Restrike Drive Test, RDT) ในบริเวณอาคารเดียวกัน โดยเสาเข็มทดสอบมีคุณสมบัติได้จากการสอบเทียบ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเสาเข็มทดสอบ

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ขนาดหน้าตัด (ม.)	0.30 x 0.30
ความยาว (ม.)	8.00
หน่วยน้ำหนัก (ตัน/ลบ.ม.)	2.4
โมดูลัสยืดหยุ่น, E (ตัน/ตร.ม.)	3,726,670
ความเร็วคลื่น (ม./วินาที)	3,900
ความหนาวัสดุรองหัวเสาเข็ม (ม.)	0.03

ปลายเสาเข็มทดสอบอยู่ในชั้นดินทรายปนดินเหนียว (SC) เสาเข็มติดตั้งในพื้นที่จังหวัดบึงกาฬ แล้วเสร็จก่อนการทดสอบ 30 วัน ผลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบพลศาสตร์เทียบกับผลทดสอบแบบสถิตยศาสตร์ในโครงการเดียวกันให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

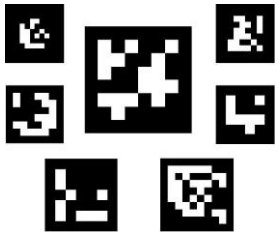
การทดสอบจะติดตั้งมาตรความเครียด (Strain Gauge) และมาตรความเร่ง (Accelerometers) ในสองด้านตรงข้ามกัน ที่ระดับ 60 เซนติเมตรจากหัวเสาเข็ม ซึ่งต้องเป็นระยะไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของความกว้างเสาเข็ม พื้นที่ติดตั้งเรียบ สะอาด ไม่มีรอยแตกร้าว เชื่อมต่อมาตรวัดกับเครื่องวิเคราะห์การตอกเสาเข็ม ให้พลังงานโดยปั้นจั่นแบบตุ้มปล่อยกระแทก น้ำหนัก 5.5 ตัน ใช้วัสดุป้องกันหัวเสาเข็มด้วยหมวกครอบเสริมด้วยไม้อัด

2.2 [illegible]

ประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์กับความจริงเสมือน (Augmented Reality) โดยใช้เป้าสังเคราะห์ (Fiducial Marker) ชนิด ArUco ในการประมาณพิกัดตำแหน่งของวัตถุในภาพ ซึ่งต้องใช้ความสัมพันธ์ของจุดอ้างอิงของวัตถุในภาพกับจุดในความเป็นจริง จึงสามารถจับพิกัดตำแหน่งของวัตถุจากเป้าได้ทั้งแนว 2 มิติหรือ 3 มิติ ตามชนิดของเทคนิคการตรวจจับ [10]

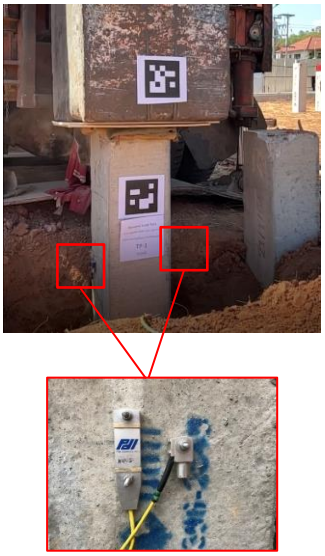
Romeo-Ramirez ได้เปรียบเทียบความเร็วในการตรวจจับเป้าสังเคราะห์ชนิด AprilTags, ArUco, ArToolKit+ และ Chilltags [14] ด้วยความละเอียดภาพและเฟรมเรต (Frame Rate) ต่างๆ พบว่า จะตรวจพบและประมวลผลเป้าชนิด ArUco ได้เร็วกว่าชนิดอื่น

เป้าชนิด ArUco จะมีรูปแบบการสร้างบล็อกไบนารี่สี่เหลี่ยมสีดำและสีขาวที่มีลักษณะเฉพาะในแต่ละไอดี ประกอบด้วยดิกชันนารี่ขนาด 4x4, 5x5, 6x6 และ 7x7 สามารถปรับขนาดเป้าให้เข้ากับวัตถุหรือฉากที่ต้องการตรวจจับได้หลายขนาด ตัวอย่างของเป้า ArUco ไอดีต่างๆแสดงในรูปที่ 1



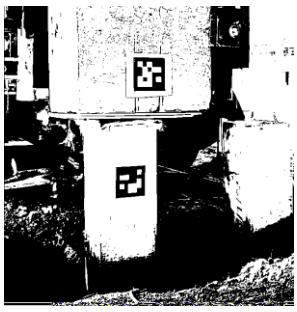
รูปที่ 1 เป้าชนิด ArUco

การศึกษานี้ ใช้เป้าที่มีดิกชันนารี่ขนาด 5x5 ความกว้างเป้า 150 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมกับการติดบนด้านของเสาเข็มทดสอบและตุ้มน้ำหนัก และสามารถพิมพ์บนกระดาษขาวขนาด A4 โดยยังมีพื้นหลังขอบกระดาษขาวเหลือล้อมรอบให้สามารถตรวจจับได้ง่าย โดยใช้เป้าไอดี 0 ติดที่ตุ้มน้ำหนัก และเป้าไอดี 1 ติดที่เสาเข็มในด้านเดียวกันทั้ง 2 เป้า ด้วยวัสดุเทปกาวสองหน้าชนิดหนาในบริเวณที่ทำความสะอาดเศษวัสดุแล้ว ให้สนิทและเรียบกับพื้นผิวเสาเข็มและตุ้มน้ำหนัก ลักษณะการติดตั้งคู่กับมาตรวัดการทดสอบแบบพลศาสตร์ แสดงดังรูปที่ 2



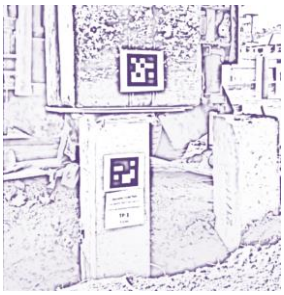
รูปที่ 2 การติดเป้า ArUco ร่วมกับมาตรวัด DLT

การตรวจจับและระบุไอดีของเป้า ใช้ฟิลเตอร์กรองภาพดั้งเดิมเป็นภาพขาวดำแล้วแบ่งส่วน (Segmentation) เปรียบเทียบค่าความเข้มเฉลี่ยของสีในแต่ละพิกเซล เนื่องจากเป้ามีบล็อกสีดำด้านนอกล้อมรอบช่องว่างสีขาวภายใน จึงสามารถพบเส้นขอบได้จากวิธีปรับแก้นี้ [14] ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การปรับแก้รูปภาพเพื่อกำหนดของเขตเป้า

ใช้อัลกอรีทึมของ Suzuki และ Abe [14] แยกรูปทรงและคอนทัวร์ของภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4 เพื่อกรององค์ประกอบที่ไม่เกี่ยวข้องออกจากกลุ่มของคอนทัวร์จากภาพที่กำหนดขอบเขตแล้ว เช่นคอนทัวร์ขนาดเล็กรูปทรงที่เหลือจากการกรองที่มีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมโพลิกอน (Polygon) จะวิเคราะห์ด้วยอัลกอรีทึมของ Douglas และ Peucker [14] ให้เหลือเฉพาะโพลิกอนที่มีลักษณะคล้ายมีสี่มุมสำหรับใช้เป็นรูปทรงคัดเลือกประมวลผลต่อไป

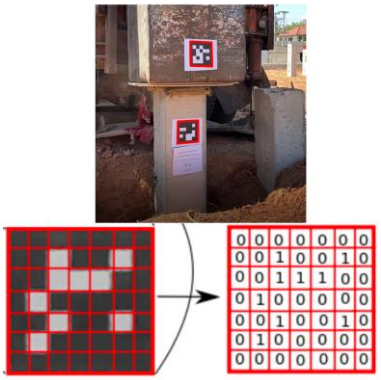


รูปที่ 4 การแยกรูปทรงและคอนทัวร์ของภาพ

รูปทรงคัดเลือกที่นำมาประมวลผล จะใช้สำหรับการแยกโค้ดไบนารี่ว่าส่วนใดเป็นเป้าที่ถูกต้อง ด้วยวิธีการเอาภาพฉายเปอร์สเปคทีฟออกด้วยโฮโมกราฟีเมทริกซ์ ตามอัลกอรีทึมของ Otsu [14] แบ่งรูปภาพออกเป็นตารางกริด ซึ่งใช้เอเลเม้นท์ส่วนใหญ่ในเซลล์ที่แบ่งเป็นตัวกำหนดค่าไบนารี่เพื่อพิจารณาว่าโพลิกอนสี่มุมนั้นมีลักษณะตรงกับเป้าไอดีใดหรือไม่ โดยสามารถหมุนเปรียบเทียบทั้ง 4 ด้าน การแยกโค้ดไบนารี่ดังแสดงในรูปที่ 5

ขั้นตอนสุดท้าย เป็นการประมาณตำแหน่งของมุมจากพิกเซลย่อย (Subpixel) โดยใช้การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) จากรูปทรงเส้นขอบ หรืออีกนัยหนึ่งคือการใช้จุดตัดแต่ละด้านของรูปทรงคอนทัวร์เป็นมุมของเป้า

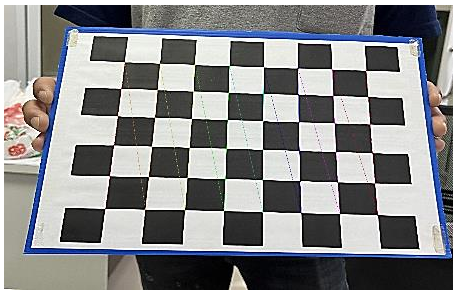
เมื่อตรวจจับเป้าได้จากวิดีโอ พิกัดจากมุมทั้ง 4 ของเป้าซึ่งอ้างอิงตามพิกัดภาพจะใช้ระบุตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างเป้ากับกล้องในแนวสามมิติฉายภาพกลับมาอ้างอิงกับตำแหน่งจริงที่กล้อง ในการบันทึกวิดีโอ ใช้กล้องแอคชั่นที่มีคุณสมบัติ 240 เฟรมต่อวินาที (Frame Per Second, FPS) และมีความละเอียด (Resolution) 2,704 พิกเซล ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีในกล้องเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน ในการศึกษานี้ ใช้กล้อง GoPro Hero 10 ยึดแน่นบนขาตั้งกล้องเพื่อป้องกันการสั่นสะเทือนขณะทำการทดสอบ ตั้งกล้องห่างจากเป้าระยะไม่มากกว่า 2 เมตร ไม่มีวัตถุใดบดบังระหว่างเป้าและกล้องตลอดการบันทึกวิดีโอ การบันทึกวิดีโอมีความสามารถในการเก็บข้อมูลได้ 4 มิลลิวินาทีต่อเฟรมจากคุณสมบัติของกล้อง



รูปที่ 5 การแยกโค้ดไบนารี่จากภาพที่ใช้ประมวลผล [14]

อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มักจะมีความเพี้ยนสำหรับกล้องที่มีเลนส์ขนาดเล็ก เช่น กล้องฟิชอาย (Fish Eye) และไม่ได้รับการสอบเทียบ เพื่อให้การประมวลผลหาตำแหน่งวัตถุในภาพถ่ายมีความแม่นยำ กล้องต้องได้รับการสอบเทียบหาค่าสัมประสิทธิ์การบิดเบือน (Distortion Coefficient) และเมทริกซ์ของกล้อง (Camera Matrix) ก่อน เนื่องจากเลนส์ของกล้องแต่ละตัวจะมีค่าเหล่านี้เป็นเอกลักษณ์เฉพาะ

การสอบเทียบจะใช้ตารางชนิดกริดหมากรุกขนาด 9x7 ช่อง ขนาดช่องละ 30 มิลลิเมตร ถ่ายภาพทำมุมกับกล้องในองศาต่างๆ จำนวน 50 ภาพ มุมของตารางในภาพทั้งหมดจะใช้เพื่อหาความบิดเบือนทั้งในแนวเรเดียนท์และแทนเจนต์ จากความไม่ต่อเนื่องกันของเส้นในแนวระนาบของภาพ เช่น เกิดการโค้งเว้าของกริดตารางจากเลนส์ ในรูปแบบเมทริกซ์ความสัมพันธ์ของ Rotation Vector และ Translation Vector การสอบเทียบใช้อัลกอริทึมในไพธอนเพื่อเก็บไฟล์ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้สำหรับใช้กับโค้ดอื่นต่อไป ลักษณะการประมวลผลภาพสอบเทียบกล้องดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การสอบเทียบกล้องด้วยตารางกริดหมากรุก

นำค่าสัมประสิทธิ์การบิดเบือน และเมทริกซ์ของกล้องที่ได้จากการสอบเทียบ มาใช้ในโค้ดสำหรับทดสอบความแม่นยำในการจับระยะการเคลื่อนที่ของเป้าที่ระยะห่างระหว่างกล้องต่างๆ โดยบันทึกวิดีโอเป้าที่เคลื่อนที่ลงเป็นระยะ 100 มิลลิเมตร ที่ระยะห่าง 0.5, 0.75, 1.00, 2.00 และ 3.00 เมตร จากกล้อง เพื่อหาขนาดพิกเซลที่เหมาะสมที่สามารถตรวจจับได้โดยยังคงมีความแม่นยำในการวัดระยะการเคลื่อนที่ ระยะการเคลื่อนที่ที่ตรวจวัดได้จากวิดีโอแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความคลาดเคลื่อนในการวัดที่ระยะต่างๆ

ระยะห่างจากกล้อง (เมตร)	ขนาดเป้า (พิกเซล)	ระยะจริง* (มิลลิเมตร)	ระยะที่บันทึกได้* (มิลลิเมตร)
0.50	358	100	100.80
0.75	255	100	101.82
1.00	192	100	102.62
2.00	95	100	103.70
3.00	64	100	105.30

*

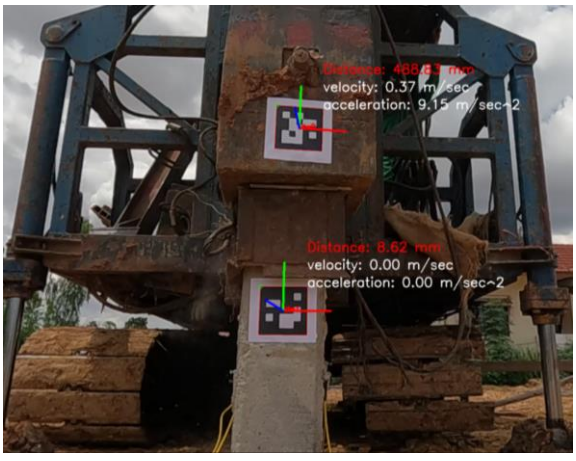
2.3

ในการทดสอบกำลังรับน้ำหนักแบบพลศาสตร์ จะให้พลังงานโดยปล่อยตุ้มน้ำหนักลงบนหัวเสาเข็ม เครื่องวิเคราะห์การตอกเสาเข็มจะแปลงสัญญาณจากมาตรวัดความเร่งและมาตรวัดความเครียด ไปเป็นแรง (Force) และความเร็ว (Velocity) เทียบกับคลื่นเวลา สำหรับวิเคราะห์หากำลังบรรทุกของเสาเข็มขณะทดสอบด้วยวิธีจับคู่สัญญาณ (Signal Matching) ด้วย CAPWAP

การจำลองเสาเข็มในการวิเคราะห์ของ CAPWAP แรงต้านทานของดินคิดเป็นแบบ Passive และสมมติแรงต้านทานของดินว่าเป็นส่วนประกอบของแรงสถิตแบบ Elasto-Plastic และแรงพลวัตแบบ Linear-Viscous การวิเคราะห์เริ่มจากการสมมติค่าคงที่ต่างๆของดิน (Soil Constants) ลงในแบบจำลองบนคอมพิวเตอร์ ในการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์นี้ ส่วนของตุ้มน้ำหนักซึ่งเป็นตัวแปร จะถูกแทนที่ด้วยค่าความเร็วและแรงที่วัดได้จากหัวเสาเข็มในการทดสอบ จากนั้น CAPWAP จะคำนวณค่าแรงที่ทำให้ใกล้เคียงกับค่าแรงที่วัดได้ หากค่าที่วัดและค่าที่คำนวณได้ยังไม่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จะเริ่มทำการวิเคราะห์ซ้ำใหม่โดยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่างๆของดิน จนกระทั่งค่าที่คำนวณได้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งกำหนดโดยค่า Match Quality [15]

สำหรับการใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ จะนำวิดีโอที่บันทึกในช่วงทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์ เฉพาะขณะที่เริ่มมีการปล่อยตุ้มน้ำหนักจนตกกระแทกเสาเข็มและหยุดนิ่งมาเพื่อวิเคราะห์โดยโค้ดโปรแกรมไพธอนที่ได้พัฒนาขึ้น

โค้ดจะใช้ไลบรารี่ OpenCV ในการตรวจจับมุมจากเป้าทั้ง 2 ไอดีที่ติดอยู่ที่ตุ้มน้ำหนักและเสาเข็ม ออกมาเป็นพิกเซลเทียบกับขนาดของเป้า เพื่อคำนวณหาระยะจริง เป็นเวกเตอร์ที่เคลื่อนตัว ฉายกลับมาเป็นสเกลาร์ระหว่างกล้อง จะได้ระยะเคลื่อนตัวจริงในหน่วยมิลลิเมตร ซึ่งจะใช้ระยะการเคลื่อนตัวนี้เพื่อหาความเร็วของวัตถุและแรงต่อไป การตรวจจับเป้าที่เกิดขึ้นจะแสดงผลเป็นภาพขณะวิเคราะห์ค่าความเร็วและแรงทีละเฟรมจนจบความยาวของวิดีโอ ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 วิเคราะห์วิดีโอด้วยโค้ดที่พัฒนาจากไลบรารี่ OpenCV

สำหรับแรงที่ตุ้มน้ำหนักกระทำเมื่อตกกระทบเสาเข็ม Pile Dynamic Inc ได้ทดสอบติดอุปกรณ์มาตรวัด เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นจากตุ้มน้ำหนักและบริเวณหัวเสาเข็ม พบว่ามีความใกล้เคียงและสอดคล้องกัน [15] ดังแสดงในรูปที่ 8

รูปที่ 8 การเปรียบเทียบแรงที่วัดได้จากตุ้มน้ำหนักและเสาเข็ม [15]

ค่าที่บันทึกได้ตลอดความยาววิดีโอ โค้ดจะตัดแบ่งเฉพาะแรงและความเร็วของเสาเข็มในช่วงที่ตุ้มตกกระทบเสาเข็ม เพื่อใช้คำนวณหากำลังรับน้ำหนักบรรทุกด้วยวิธีของเคส ซึ่งช่วงตกกระทบนี้จะเป็นช่วงที่ใกล้เคียงกับสัญญาณจากการทดสอบแบบพลศาสตร์ ตัวอย่างช่วงสัญญาณที่นำมาวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 9

รูปที่ 9 ช่วงของแรงและความเร็วของเสาเข็มที่ใช้วิเคราะห์

คำนวณหาแรงและความเร็วในเสาเข็มได้จาก ขณะเสาเข็มถูกกระแทกที่ส่วนบน บริเวณส่วนบนของเสาเข็มจะถูกกด แรงกดทำให้เกิดความเครียด ε (Strain) และเกิดแรงตามสมการที่ (1) ตัน

$$F = \varepsilon AE \quad (1)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของเสาเข็มและ E คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็ม จากนั้นแรง F จะไปกดส่วนอื่นๆ ของเสาเข็มต่อเนื่องกันไป มวลของเสาเข็มจะถูกกดต่อกันเป็นช่วงๆ เกิดความเร็วอนุภาค V (Particle Velocity) ในเสาเข็ม ความเร็วอนุภาคจะเกิดขึ้นกับมวลของเสาเข็ม (Pile Mass) ในแต่ละส่วนของเสาเข็มที่เกิดการยุบตัว ∂ เมตร ในระยะเวลา Δt วินาที โดยที่ ε (Strain) เกิดขึ้นจากระยะยุบตัวหารด้วยระยะทาง ΔL เมตร ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$\varepsilon = \frac{\partial}{\Delta L} \quad (2)$$

คลื่นจะเคลื่อนจากตำแหน่งที่หยุดนิ่งในช่วงเวลา Δt วินาที เป็นระยะทาง $\Delta L = (\Delta t)C$ เมตร แทนค่า ΔL จะได้ดังสมการที่ (3)

$$\varepsilon = \frac{\partial}{(\Delta t)C} \quad (3)$$

ตำแหน่งเคลื่อนที่เป็นระยะทาง ∂ ในระหว่างเวลา Δt ซึ่งเรียกว่าความเร็วอนุภาค V (Particle Velocity) ดังสมการที่ (4)

$$V = \frac{\partial}{\Delta t} \quad (4)$$

ใช้ค่า V ในสมการที่ (3) จะได้ดังสมการที่ (5)

$$\varepsilon = \frac{V}{C} \quad (5)$$

ความเครียด, ε ที่ตำแหน่งใดๆ ในเสาเข็มจะเป็นอัตราส่วนกับความเร็วอนุภาค, V ที่ตำแหน่งเดียวกัน และมีความสัมพันธ์ไปถึงค่าความเค้น, σ ดังสมการที่ (6)

$$\sigma = \frac{VE}{C} \quad (6)$$

ดังนั้น แรง, F จะได้ดังแสดงในสมการที่ (7)

$$F = \frac{VEA}{C} \quad (7)$$

การคำนวณกำลังรับน้ำหนักบรรทุกโดยวิธีของเคส ดังสมการที่ (8)

$$RTL = \frac{1}{2}(F_{t1}+F_{t2}) + \frac{1}{2}(V_{t1}-V_{t2})\frac{MC}{L} \quad (8)$$

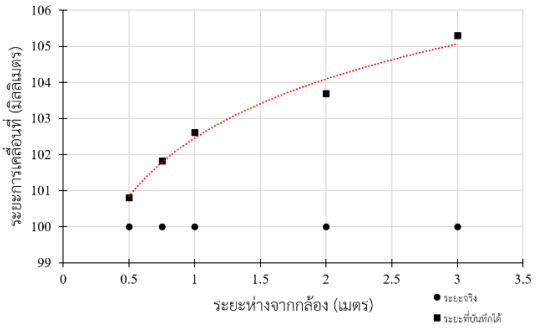
เมื่อ RTL คือ แรงต้านทานทั้งหมด (ตัน), F_{t1} คือ แรงที่เวลาt_1 (ตัน), F_{t2} 3

แรงท (ตัน)

โดยที่ t_1 คือเวลาที่แรงเคลื่อนลงผ่านหัวเสาเข็ม และ t_2 คือแรงเคลื่อนขึ้นสะท้อนกลับมาถึงหัวเสาเข็ม เป็นระยะเวลา t_1+2L/C วินาที

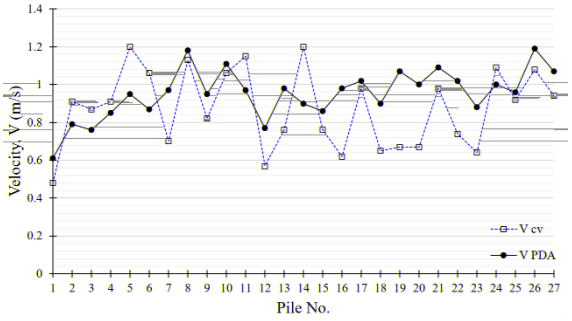
3. วิเคราะห์ผลการทดสอบ

การทดสอบระยะห่างระหว่างเป้าและกล้อง จะมีความผิดพลาดในการวัดระยะการเคลื่อนที่ของวัตถุสูงขึ้นเมื่อเป้ามีขนาดพิกเซลที่เล็กลง หรือมีระยะห่างที่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error, MAE) ของตัวอย่างทดสอบเท่ากับ 2.848 มิลลิเมตร จากตารางที่ 2 จึงควรให้ขนาดเป้าไม่เล็กกว่า 100 พิกเซล ซึ่งกล้องที่ใช้ในการทดสอบนี้มีความละเอียด 2,704 พิกเซล ระยะที่เหมาะสมสำหรับการวัดการทรุดตัวของเสาเข็มจึงมีระยะการตั้งกล้องไม่ไกลกว่า 2 เมตรจากเป้า



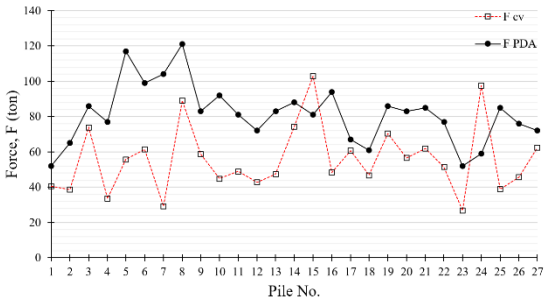
รูปที่ 11 ความคลาดเคลื่อนในการวัดการเคลื่อนที่เทียบกับขนาดของเป้า

จากผลการเปรียบเทียบความเร็วของเสาเข็มทั้ง 27 ต้นเทียบกับความเร็ว ณ เวลาเดียวกันจากการทดสอบแบบพลศาสตร์ มีค่า MAE เท่ากับ 0.1756 เมตรต่อวินาที ซึ่งมีความใกล้เคียงกัน การเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 12 ความผิดพลาดของค่าความเร็วของเสาเข็มเกิดจากการวัดระยะการเคลื่อนที่ที่คลาดเคลื่อน ซึ่งคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงระยะทางต่อเวลา สัมพันธ์กับค่าความผิดพลาดในการวัดระยะที่ทดสอบจากระยะห่างของการตั้งกล้อง สอดคล้องกับการศึกษาของ Wang [18] ซึ่งได้ค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ 2.5 เปอร์เซ็นต์ จากการหาระยะการเคลื่อนที่ของเป้า ArUco ที่มีระยะตั้งแต่ 40 ถึง 200 เซนติเมตร และจากผลการวิจัยของ Lee [19] ก็พบว่าความเร็วที่ได้จากการวัดด้วยคอมพิวเตอร์วิทัศน์มีความใกล้เคียงอย่างมากกับการทดสอบแบบพลศาสตร์



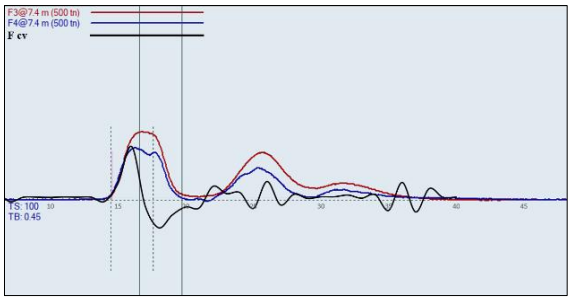
รูปที่ 12 ความเร็วที่ได้จากคอมพิวเตอร์วิทัศน์และการทดสอบแบบพลศาสตร์

ใช้การคำนวณหาแรงตามสมการที่ (7) เปรียบเทียบกับผลการทดสอบแบบพลศาสตร์ที่ได้แรงจากมาตรวัดความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 13 มีค่า MAE เท่ากับ 29.97 ตัน ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนพอสมควร เปรียบเทียบกับ Lee ซึ่งได้หาอัตราส่วนการส่งพลังงานในตุ้มตอกแบบโดนัทสำหรับการทดสอบทะลวงมาตรฐาน [19] พบว่า พลังงานที่วัดจะเบี่ยงเบนเป็นอย่างมาก จากคลื่นสะท้อนกลับที่เวลา t_1+2L/C วินาที ซึ่งสามารถได้รับผลกระทบจากทั้งความยาวของท่อนส่ง (Rod) ที่ทำให้เวลาของการสะท้อนกลับเปลี่ยนแปลง รวมถึงค่า SPT-N ซึ่งเมื่อแรงต้านจากดินมากขึ้น ตุ้มและแท่นรองกระแทก (Anvil) จะแยกออกจากกันหลังกระแทกและกระแทกกลับอีกครั้ง มีผลกระทบต่อการส่งพลังงาน และPile Dynamic Inc. [15] พบว่า การประมาณค่าความเร็วคลื่นและโมดูลัสยืดหยุ่นที่ผิดพลาด จะให้ผลของแรง ความเครียด พลังงาน และการคำนวณกำลังรับน้ำหนักที่ได้จากการทดสอบผิดพลาด

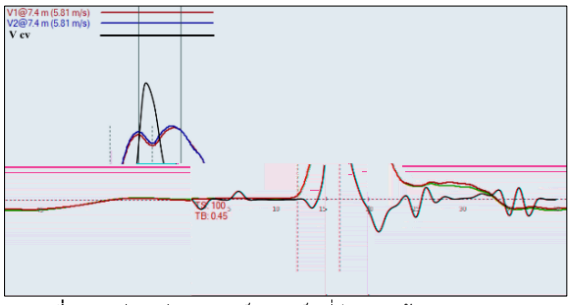


รูปที่ 13 แรงที่ได้จากคอมพิวเตอร์วิทัศน์และการทดสอบแบบพลศาสตร์

ตัวอย่างการเปรียบเทียบแรงและความเร็วในช่วงที่วิเคราะห์กำลังรับน้ำหนักของคอมพิวเตอร์วิทัศน์และการทดสอบแบบพลศาสตร์ จากเสาเข็มต้นหมายเลข 15 ดังแสดงในรูปที่ 14 และ 15 ตามลำดับ ช่วงเวลา t_1 ความเร็วมีความต่างกัน 33.33 เปอร์เซ็นต์ และแรงมีขนาดต่างกัน 15.57 เปอร์เซ็นต์ แนวโน้มของพฤติกรรมการเกิดแรงและความเร็วมีความสอดคล้องกันในช่วงเวลา 40 มิลลิวินาทีสำหรับการทดสอบนี้ ซึ่งช่วงเวลาจะยาวขึ้นหากมีการเพิ่มความยาวของเสาเข็มทดสอบ

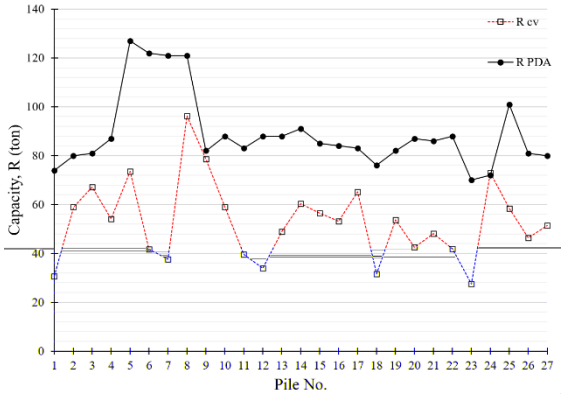


รูปที่ 14 เปรียบเทียบแรงของเสาเข็มที่ช่วงเวลาตุ้มตกกระทบ



รูปที่ 15 เปรียบเทียบความเร็วของเข็มที่ช่วงเวลาตุ้มตกกระทบ

แรงและความเร็วที่ได้ ใช้เพื่อคำนวณหากำลังรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มด้วยวิธีของเคสตามสมการที่ (8) เปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก CAPWAP ดังแสดงในรูปที่ 16 ซึ่งมีค่า MAE เท่ากับ 36.30 ตัน



รูปที่ 16 กำลังที่ได้จากคอมพิวเตอร์วิทัศน์และการทดสอบแบบพลศาสตร์

ความผิดพลาดในการคำนวณกำลังรับน้ำหนักเกิดขึ้นจากการวัดแรงและความเร็วที่เวลา t_2 มีช่วงที่สั้น ซึ่งจากคุณสมบัติของเสาเข็มทดสอบนี้ คลื่นขึ้นจะสะท้อนกลับมาถึงหัวเสาเข็มในเวลา 4 มิลลิวินาที เท่ากันกับความสามารถในการจับภาพต่อเฟรมของกล้องที่ใช้ 1 เฟรม หากคลื่นสะท้อนกลับเกิดก่อนหรือหลัง นอกเหนือจากช่วงที่จับภาพได้นี้ จะประมาณแรงและความเร็วคลาดเคลื่อนกับค่าที่ได้จากการทดสอบแบบพลศาสตร์ที่มาตรวัดสามารถบันทึกได้ทุกช่วงมิลลิวินาที [19] รวมถึงการใช้วิธีของเคสยังมีการประมาณที่หยาบเมื่อเทียบกับวิธีจับคู่สัญญาณ [16] เปรียบเทียบกับการใช้วิธีปัญญาประดิษฐ์ [17][20] ในการทำนายกำลังรับน้ำหนัก พบว่าผลการศึกษาให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการทดสอบ มีความคล้ายคลึงของสัญญาณคลื่นความเค้น เนื่องจากใช้พฤติกรรมของเสาเข็ม จากทั้งแรง ความเร็ว การทรุดตัว จากการทดสอบก่อนหน้าเป็นข้อมูลในการเรียนรู้ของปัญญาประดิษฐ์

จากผลการเปรียบการตรวจวัดพฤติกรรมของเสาเข็มโดยใช้เป้า ArUco พบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้ในการตรวจวัดพฤติกรรมการทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์ ในการทดสอบพบว่าพบว่าความเร่งและความเร็วของเสาเข็มมีผลใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดแต่ค่าแรงในเสาเข็มยังมีความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับแรงที่วัดโดยตรงจาก Strain Gauge ดังนั้นการประเมินแรงในเสาเข็มน่าจะต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยอาจจะใช้ Recurrent Neural Network มาช่วยในการประมาณแรงที่เกิดขึ้นในเสาเข็มเพื่อให้สามารถใช้วิธีการคอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการประเมินแรงและกำลังของเสาเข็มได้โดยไม่ต้องติดตั้ง Strain Gauge หรือ Load Cell ในเสาเข็ม

4. สรุปผลการทดสอบ

จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. งานวิจัยนี้แสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการตรวจวัดผลจากการทดสอบเสาเข็มแบบพลศาสตร์

2. การใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการตรวจจับเป้าที่วัตถุ ระยะความห่างของกล้องกับเป้า มีผลต่อความคลาดเคลื่อนในการวัดระยะทาง โดยหากเป้ามีขนาดพิกเซลที่เล็กลงหรือตั้งกล้องห่างจากเป้าไกลขึ้น

3. การวัดความเร็วของเสาเข็มระหว่างทดสอบโดยใช้วิธีคอมพิวเตอร์วิทัศน์ได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในสนามเมื่อเทียบกับช่วงเวลาเดียวกันกับการทดสอบแบบพลศาสตร์

4. การวัดแรงในเสาเข็มจะมีความคลาดเคลื่อนพอสมควร จากความผิดพลาดสะสมจากการคำนวณความเร็วจากระยะทางที่คลาดเคลื่อน รวมถึงหากประมาณค่าความเร็วในการเดินทางของคลื่นและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเสาเข็มผิดพลาด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท ขอนแก่น ซอยล์ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด สำหรับข้อมูลการทดสอบกำลังรับน้ำหนักบรรทุกเสาเข็มที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Chen R., Hu Y. and Chen Y. (2001). Determining driving resistance with rebound of pile-top during pile driving. *Journal of Zhejiang University*, 2, pp. 179-185.

[2] สุขสันต์ หอพิบูลย์สุข (2561). [illegible] . สำนักพิมพ์ท้อป, หน้า 129-139.

[3] Lecun Y., Bengio Y. and Hinton G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521, pp. 436-444.

[4] Soltani M., Zhu Z. and Hammad A. (2016). Automated annotation for visual recognition of construction resources using synthetic images. *Automation in construction*, 62, pp. 14-23.

[5] Azar E. (2016). Construction equipment identification using marker-based recognition and an active zoom camera. *Journal of computing in civil engineering*, 30(3), 04015033.

[6] Verma A., Aggarwal S. and Srivastava S. (2013). Strain measurement using image processing. *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol2 issue2.

[7] Amodi D., Broggiato G., Campana E., et al. (2003). Digital speckle correlation for strain measurement by image analysis. *Society for experimental mechanics*, 43, pp. 396-402.

[8] Wei K., Karupanan S. and Abdul Latif M. (2013). Development of an optical strain measurement method using digital image correlation. *Asian journal of scientific research*, 6(3), pp. 411-422.

[9] Ma Z., Choi J. and Sohn H. (2021). Real-time structural displacement estimation by fusing asynchronous acceleration and computer vision measurements. *Computer-aided civil and infrastructure engineering*, 1-16.

[10] Chen I., Ho S. and Su M. (2020). Computer vision application programming for settlement monitoring in a drainage tunnel. *Automation in construction*, 110.

[11] Zhu Z., Asce S., Brilakis I., et al. (2010). Concrete column