

SAC-01-012

การพัฒนาระบบประเมินสมดุลท่านั่งเชิงปริมาณโดยอาศัยเซนเซอร์และการวิเคราะห์ท่าทาง ด้วยคอมพิวเตอร์วิทัศน์

Development of a Quantitative Sitting Balance Assessment System Using Sensors and Computer Vision-Based Posture Analysis

เกียรตินิสิน กาญจนวนิชกุล^{1*} ภัทรพล พิมลย์² กัลยารัตน์ วงษ์ธรรม³ และอัญญา ซาครันท์⁴

Kiattisin Kanjanawanishkul^{1*} Puttharapol Pimol² Kanyarat Wongtham³ and Anpatcha Sakhornkha⁴

หน่วยวิจัยการออกแบบกระบวนการและควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม^{1,2,3}

แผนกกายภาพบำบัด โรงพยาบาลโกสุมพิสัย⁴

Research Unit of Process Design and Automation, Faculty of Engineering, Mahasarakham University^{1,2,3}

Physical Therapy Department, Kosumphisai Hospital⁴

kiattisin.k@msu.ac.th¹, 65010310259@msu.ac.th², 65010310532@msu.ac.th³, tuk919@hotmail.com⁴

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินความเป็นไปได้ของระบบต้นแบบสำหรับการประเมินสมดุลท่านั่งเชิงปริมาณ โดยอาศัยการผสานข้อมูลจากโหลดเซลล์สำหรับวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักขณะนั่ง และการประมวลผลภาพด้วย MediaPipe สำหรับวิเคราะห์ท่าทางจากวิดีโอแบบเรียลไทม์ ข้อมูลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์โดยอ้างอิงกรอบแนวคิดของ Sitting Balance Scale (SBS) ซึ่งเป็นเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในการประเมินสมดุลท่านั่งทางคลินิก เพื่อออกแบบตัวชี้วัดเชิงปริมาณที่สอดคล้องกับรายการประเมินในบางข้อของ SBS การทดลองในระดับห้องปฏิบัติการถูกดำเนินการในลักษณะการทดสอบแนวคิดและความเป็นไปได้ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ควบคุม เพื่อประเมินความสามารถของระบบในการตรวจจับการเอียงของลำตัว รูปแบบการถ่ายน้ำหนัก และการเอื้อนแขนไปยังทิศทางต่าง ๆ ขณะนั่ง ผลการทดลองเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถตรวจวัดตัวแปรด้านสมดุลได้อย่างสอดคล้องกับท่าทางที่เกิดขึ้นจริง และสามารถแปลงพฤติกรรมทางกายภาพให้เป็นข้อมูลเชิงตัวเลขที่มีความต่อเนื่องและทำซ้ำได้ ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของระบบในฐานะเครื่องมือเสริมสำหรับการประเมินสมดุลท่านั่งเชิงกายวิสัย ซึ่งสามารถสนับสนุนการประเมินด้วย SBS แบบดั้งเดิม และเอื้อต่อการติดตามความเปลี่ยนแปลงของสมรรถภาพการทรงตัวในระยะยาว

คำสำคัญ: สมดุลท่านั่ง เครื่องมือประเมินผลทางคลินิก แบบประเมินสมดุลท่านั่ง กายภาพบำบัด

Abstract

This study aimed to develop and evaluate the feasibility of a prototype system for quantitative sitting balance assessment by integrating load cell data for analyzing weight distribution during sitting and image processing using MediaPipe for real-time posture analysis from video recordings. The collected data were analyzed based on the framework of the Sitting Balance Scale (SBS), a standard clinical tool for sitting balance assessment, to design quantitative indicators corresponding to selected SBS assessment items. Laboratory-based experiments were conducted as a proof-of-concept and feasibility study under controlled conditions to evaluate the system's ability to detect trunk inclination, weight-shifting patterns, and reaching in different directions while sitting. Preliminary results demonstrated that the system could accurately measure balance-related variables in accordance with actual postural behaviors and convert sitting balance performance into continuous and reproducible numerical data. These findings highlight the potential of the proposed system as an objective tool for quantitative sitting balance assessment, which can complement traditional SBS-based evaluations and facilitate long-term monitoring of changes in postural control and balance performance.

Keywords: Sitting balance, Clinical assessment tool, Sitting Balance assessment, Physical therapy

บทนำ

ความสามารถในการรักษาสถิตของร่างกายในท่านั่งถือเป็นปัจจัยสำคัญที่สะท้อนสมรรถภาพการควบคุมการเคลื่อนไหวและการทำงานของลำตัว โดยเฉพาะในกลุ่มผู้ป่วยที่มีความผิดปกติทางระบบประสาทและการเคลื่อนไหว เช่น ผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง ผู้ป่วยอัมพฤกษ์-อัมพาต ตลอดจนผู้สูงอายุที่มีความเสี่ยงต่อการสูญเสียความสามารถในการทรงตัว (Li et al., 2019) การมีสมถิตในท่านั่งที่ดีย่อมส่งผลต่อการปฏิบัติกิจกรรมในชีวิตประจำวัน ความสามารถในการเคลื่อนย้ายร่างกาย และคุณภาพชีวิตโดยรวม ดังนั้น การประเมินสมถิตในท่านั่งจึงเป็นขั้นตอนสำคัญสำหรับการวินิจฉัย วางแผนการรักษา และติดตามผลการฟื้นฟูสมรรถภาพทางกาย

ปัจจุบัน การประเมินสมถิตในท่านั่งทางคลินิกนิยมใช้เครื่องมือมาตรฐานหลายรูปแบบ ได้แก่ Sitting Balance Scale (SBS) Modified Functional Reach Test (mFRT) และ Trunk Impairment Scale (TIS) ซึ่งได้รับการยอมรับว่า สามารถสะท้อนระดับความสามารถในการควบคุมการทรงตัวของผู้ป่วยได้อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตาม เครื่องมือประเมินเหล่านี้ส่วนใหญ่อาศัยการสังเกตและการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญเป็นสำคัญ ทำให้ผลการประเมินอาจได้รับอิทธิพลจากประสบการณ์และความชำนาญของผู้ประเมิน อีกทั้งผลลัพธ์มักอยู่ในรูปแบบคะแนนเชิงลำดับซึ่งไม่สามารถสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของสมรรถภาพการทรงตัวในเชิงปริมาณได้อย่างละเอียดและต่อเนื่อง

ด้วยข้อจำกัดดังกล่าว เทคโนโลยีการวัดและประเมินสมถิตร่างกายที่อาศัยข้อมูลจากเซนเซอร์จึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากสามารถสนับสนุนการประเมินในเชิงปริมาณ ลดอิทธิพลจากการตัดสินใจอัตวิสัยของผู้ประเมิน และเพิ่มความละเอียดในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของสมรรถภาพการทรงตัวของผู้ป่วยได้อย่างเป็นระบบ (Nadeem et al., 2024) ปัจจุบัน เทคโนโลยีสมัยใหม่ อาทิ ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) เซนเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหวประเภท Inertial Measurement Unit (IMU) และเทคนิคคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านสุขภาพและการฟื้นฟูสมรรถภาพอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะงานประเมินการควบคุมท่าทาง การเคลื่อนไหว และความสามารถในการรักษาสถิตของร่างกาย

ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์และประเมินท่านั่งเชิงปริมาณมีหลายรูปแบบ ทั้งการใช้เซนเซอร์วัดแรงกด กล้องตรวจจับการเคลื่อนไหว และเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ ตัวอย่างเช่น Anvary และคณะ (2021) ได้นำเสนอระบบอัตโนมัติสำหรับติดตามและแสดงผลท่านั่งแบบเรียลไทม์ โดยพัฒนาแผ่นเซนเซอร์วัดแรงกดบนที่นั่ง (Sitting Pressure Sensor: SPS) เพื่อเก็บข้อมูลการกระจายน้ำหนักบนพื้นผิวเก้าอี้ ข้อมูลที่ได้ถูกส่งไปยังระบบคลาวด์และประมวลผลด้วยตัวจำแนกแบบอิงกฎ (Rule-based classifier) เพื่อประเมินระดับความไม่สมถิตของท่านั่งและแจ้งเตือนระยะเวลาการนั่งแก่ผู้ใช้งาน ด้านการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก Kulikajavas และคณะ (2021) ได้เสนอแบบจำลอง Deep Recurrent Hierarchical Network (DRHN) ที่พัฒนาจาก MobileNetV2 โดยใช้ข้อมูลลำดับภาพ RGB-Depth เพื่อสร้างตัวแทนของสถานะท่าทางที่มีความหมายเชิงสัญญาณวิทยา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สามารถจำแนกท่าทางการนั่งได้ด้วยความแม่นยำ 91.47% ที่อัตรา 10 เฟรมต่อวินาที สำหรับการประเมินสมถิตในท่านั่ง Bartlett และคณะ (2023) ได้พัฒนาซอฟต์แวร์ที่ใช้ข้อมูลจากกล้อง RGB-D เพื่อติดตามการเคลื่อนไหวของร่างกายระหว่างการทดสอบสมถิต โดยผลการทดลองพบว่า ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการวัดมุมร่างกายอยู่ที่ 2.19 ± 2.29 องศา และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการวัดระยะเอวไปข้างหน้าอยู่ที่ 0.1 ± 0.25 นิ้ว

ในด้านการรู้จำท่านั่ง Tsai และคณะ (2023) ได้ระบุจุดสำคัญบนพื้นผิวเก้าอี้ที่สามารถสะท้อนลักษณะเด่นของท่านั่ง และนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องหลายรูปแบบ เพื่อจำแนกท่านั่งที่พบบ่อยจำนวน 10 ประเภท โดยระบบสามารถจำแนกท่านั่งได้ด้วยความแม่นยำ 99.1% เมื่อไม่นานมานี้ Odesola และคณะ (2025) ได้พัฒนาเก้าอี้อัจฉริยะที่ติดตั้งแผ่นเซนเซอร์วัดแรงกดขนาด 32×32 จำนวนสองแผ่นภายในเก้าอี้สำนักงาน เพื่อบันทึกข้อมูลการกระจายน้ำหนักและลักษณะท่านั่งของผู้ใช้งาน ข้อมูลที่เก็บได้ถูกนำมาฝึกด้วยอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง 5 รูปแบบ ได้แก่ Decision Tree, Random Forest, Support Vector Machine (SVM), K-Nearest Neighbors (KNN) และ Convolutional Neural Network (CNN) สำหรับจำแนกท่านั่งจำนวน 19 รูปแบบ โดย CNN ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดด้วยความแม่นยำ 98.29%

นอกจากการใช้เซนเซอร์และระบบวัดแรงกดแล้ว เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์วิทัศน์ร่วมกับไลบรารี MediaPipe ยังได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในการประเมินการเคลื่อนไหวและสมรรถภาพทางกาย เนื่องจากสามารถตรวจจับตำแหน่งข้อต่อของร่างกายจากภาพวิดีโอได้แบบเรียลไทม์ โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์สวมใส่บนร่างกาย ส่งผลให้การประเมินมีความสะดวก ตัวอย่างเช่น Tsai และคณะ (2024) ได้พัฒนาระบบอัตโนมัติสำหรับการประเมินการทดสอบลุก-นั่ง (Sit-to-Stand: STS) โดยผสาน MediaPipe เข้ากับเว็บแอปพลิเคชันเพื่อวัดมุมของข้อต่อสำคัญแบบเรียลไทม์และตรวจนับจำนวนครั้งของการลุก-นั่ง ระบบใช้ข้อมูลมุมที่เกิดจากหัวไหล่ สะโพก และเข่า ในการระบุสถานะการนั่งและการยืน ซึ่งสามารถติดตามและนับจำนวนรอบการทดสอบได้อย่างแม่นยำภายในระยะเวลา 60 วินาที อีกแนวทางหนึ่งคือการใช้ MediaPipe ร่วมกับแบบจำลองทางชีวกลศาสตร์ เพื่อวิเคราะห์ท่าทางมนุษย์ในระดับสามมิติ โดย

Kim และคณะ (2023) ได้พัฒนาวิธีผสมผสานข้อมูลการประมาณท่าทางแบบสองมิติกับแบบจำลองร่างกายมนุษย์และอัลกอริทึมการปรับเหมาะ เพื่อสร้างข้อมูลท่าทางสามมิติและคำนวณมุมข้อต่อสำหรับการประเมินความเสี่ยงต่อการหกล้มในผู้สูงอายุ

นอกจากนี้ MediaPipe ยังถูกนำไปใช้ร่วมกับการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมชีวการแพทย์เพื่อสนับสนุนการออกแบบอุปกรณ์ฟื้นฟูและอุปกรณ์ช่วยเหลือทางกายภาพ โดย Wei (2025) ได้นำข้อมูลการรู้จำท่าทางจาก MediaPipe มาใช้สร้างแบบจำลองสามมิติของร่างกายร่วมกับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis: FEA) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกล้ามเนื้อ กระดูก และข้อต่อภายใต้สภาวะการนั่ง ผลการศึกษาพบว่า วิธีดังกล่าวสามารถช่วยปรับปรุงการออกแบบอุปกรณ์ฟุ้งตามหลักสรีรศาสตร์ ลดความเค้นที่เกิดขึ้นกับหมอนรองกระดูกสันหลัง และช่วยลดความผิดปกติของแนวกระดูกสันหลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แม้ว่างานวิจัยในช่วงที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่สนับสนุนการประเมินทางกายภาพบำบัด แต่การศึกษาส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการใช้แหล่งข้อมูลหรือเทคโนโลยีเพียงประเภทเดียว เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนไหวหรือการวิเคราะห์ภาพ ซึ่งอาจไม่สามารถสะท้อนลักษณะการทรงตัวและการควบคุมร่างกายของผู้ป่วยได้อย่างครอบคลุม อีกทั้งยังมีข้อจำกัดด้านต้นทุน อุปกรณ์ ความซับซ้อนของการติดตั้งและการใช้งาน ตลอดจนความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้จริง ทั้งในสถานพยาบาลและการติดตามผู้ป่วยนอกสถานพยาบาล ด้วยเหตุนี้ แนวคิดการบูรณาการข้อมูลจากแหล่งตรวจวัดที่แตกต่างกันจึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถผสมผสานข้อมูลเชิงกายภาพจากเซนเซอร์เข้ากับข้อมูลเชิงภาพจากระบบวิเคราะห์วิดีโอ ทำให้การวิเคราะห์สมดุลในท่ายืนมีความครอบคลุม ละเอียด และแม่นยำมากยิ่งขึ้น อันจะเป็นประโยชน์ต่อการตัดสินใจทางคลินิกและการติดตามผลการฟื้นฟูผู้ป่วยอย่างต่อเนื่อง

อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยที่นำกรอบแนวคิดของ Sitting Balance Scale (SBS) มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์และการวิเคราะห์ภาพเพื่อสร้างตัวชี้วัดเชิงปริมาณยังมีอยู่ค่อนข้างจำกัด ส่งผลให้ยังขาดเครื่องมือที่สามารถเชื่อมโยงผลการประเมินเชิงปริมาณเข้ากับเกณฑ์การประเมินทางคลินิกที่ได้รับการยอมรับอย่างเป็นระบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาระบบต้นแบบต้นทุ่นสำหรับการประเมินสมดุลร่างกายในท่ายืน โดยผสมผสานข้อมูลจากเซนเซอร์วัดแรงกดเข้ากับการวิเคราะห์ภาพด้วยเทคนิคคอมพิวเตอร์วิทัศน์ภายใต้กรอบแนวคิดของ SBS เพื่อสร้างตัวชี้วัดเชิงปริมาณที่สามารถสะท้อนความสามารถในการควบคุมการทรงตัวได้อย่างเป็นกาววิสัยและละเอียดมากขึ้น ระบบที่พัฒนาขึ้นคาดว่าจะช่วยลดข้อจำกัดของการประเมินที่อาศัยการสังเกตเพียงอย่างเดียว เพิ่มความสามารถในการติดตามการเปลี่ยนแปลงของสมรรถภาพการทรงตัวในระยะยาว และสนับสนุนการวางแผนการรักษาและการฟื้นฟูผู้ป่วยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาและประเมินความเป็นไปได้ของระบบต้นแบบสำหรับการประเมินสมดุลร่างกายในท่ายืนเชิงปริมาณ โดยอาศัยการผสมผสานข้อมูลจากโพลีเซลล์สำหรับวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักขณะนั่ง และการประมวลผลภาพด้วย MediaPipe สำหรับวิเคราะห์ท่าทางจากวิดีโอแบบเรียลไทม์

วิธีดำเนินการวิจัย

Sitting Balance Scale (SBS) (Medley & Thompson, 2011) เป็นเครื่องมือที่ได้รับการยอมรับแพร่หลายในการประเมินความสามารถในการทรงตัวในท่ายืน เนื่องจากมีขั้นตอนการประเมินที่ไม่ซับซ้อนและสามารถสะท้อนความสามารถในการควบคุมลำตัวและการรักษาสมดุลของผู้ป่วยได้อย่างเหมาะสม โดยครอบคลุมภารกิจสำคัญ เช่น การนั่งโดยไม่ใช้มือพยุง การควบคุมลำตัวขณะเคลื่อนไหว และการเอื้อมแขนในทิศทางต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม SBS อาศัยการให้คะแนนในช่วง 0 – 4 ในรูปแบบเชิงลำดับ (Ordinal Scoring) จากการสังเกตของผู้ประเมินเป็นหลัก ซึ่งอาจได้รับอิทธิพลจากประสบการณ์และดุลยพินิจส่วนบุคคล ส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของผลการประเมินได้

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาและประเมินความเป็นไปได้ของระบบต้นแบบสำหรับการประเมินสมดุลร่างกายในท่ายืนเชิงปริมาณ ภายใต้กรอบแนวคิดของ SBS โดยอาศัยการบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์และการวิเคราะห์ภาพด้วยเทคนิคคอมพิวเตอร์วิทัศน์เพื่อสนับสนุนการประเมินทางคลินิกด้วยข้อมูลเชิงวัตถุวิสัยที่สามารถวัดและติดตามการเปลี่ยนแปลงของสมรรถภาพการทรงตัวได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยในระยะเริ่มต้นที่มุ่งเน้นการพัฒนาและประเมินความเป็นไปได้ของระบบภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการควบคุม โดยยังไม่ครอบคลุมการทดสอบกับผู้ป่วยจริงในบริบททางคลินิก ผลการศึกษาจึงมุ่งแสดงศักยภาพของแนวทางที่เสนอในเชิงเทคนิค เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาและประเมินประสิทธิผลของระบบในงานทางคลินิกต่อไปในอนาคต

1. ส่วนประกอบทางฮาร์ดแวร์

ระบบต้นแบบประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่

1.1 ระบบตรวจวัดแรงกดได้รับการออกแบบโดยติดตั้งโหลดเซลล์จำนวน 2 ตำแหน่งใต้แผ่นรองนั่งบริเวณด้านซ้ายและด้านขวา เพื่อเก็บข้อมูลแรงกดที่เกิดขึ้นระหว่างการนั่งและใช้เป็นตัวแทนของการกระจายน้ำหนักของร่างกาย หลักการทำงานของระบบอาศัยการแปลงแรงทางกลเป็นสัญญาณไฟฟ้าผ่านโหลดเซลล์ ก่อนส่งเข้าสู่วงจร HX711 เพื่อขยายและแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบดิจิทัล ข้อมูลที่ได้จะถูกอ่านผ่าน Arduino Mega 2560 และส่งต่อไปยัง Raspberry Pi 5 เพื่อดำเนินการวิเคราะห์การกระจายน้ำหนักของร่างกายและคำนวณตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงกด (Center of Pressure: CoP) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการประเมินสมดุลร่างกายในท่านั่ง

1.2 ระบบวิเคราะห์ภาพประกอบด้วย Raspberry Pi Camera Module ซึ่งทำหน้าที่บันทึกข้อมูลวิดีโอของอาสาสมัครระหว่างการทดสอบสมดุลในท่านั่ง โดยติดตั้งกล้องในตำแหน่งที่สามารถบันทึกภาพร่างกายของอาสาสมัครได้อย่างครบถ้วนตลอดช่วงการทดสอบ เพื่อให้เหมาะสมต่อการวิเคราะห์ท่าทางและการเคลื่อนไหว นอกจากนี้ ได้ดำเนินการสอบเทียบกล้อง (Camera Calibration) ด้วยแผ่น Checkerboard เพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดในภาพและขนาดจริงของวัตถุ ช่วยเพิ่มความถูกต้องในการคำนวณระยะทาง มุม และพารามิเตอร์เชิงกายภาพที่ได้จากการประมวลผลภาพ

1.3 ระบบประมวลผลและแสดงผลใช้ Raspberry Pi 5 เป็นหน่วยประมวลผลหลัก ทำหน้าที่รวบรวมข้อมูลจากระบบเซนเซอร์และระบบวิเคราะห์ภาพ จากนั้น ดำเนินการประมวลผลข้อมูลแบบเรียลไทม์ เพื่อประเมินลักษณะการทรงตัวในท่านั่ง โดยอาศัยไลบรารี MediaPipe Pose ในการตรวจจับจุดสำคัญของร่างกาย (Body Landmarks) จากภาพวิดีโอและคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมท่าทาง เช่น มุมเอียงของลำตัว การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของร่างกาย และรูปแบบการกระจายน้ำหนักที่ได้จากเซนเซอร์ ผลการวิเคราะห์จะถูกแสดงผลผ่านส่วนติดต่อผู้ใช้งาน เพื่อสนับสนุนการประเมินสมดุลร่างกายในท่านั่งและการติดตามการเปลี่ยนแปลงของผู้ถูกประเมิน

2. การประเมินเชิงปริมาณบนพื้นฐานของ SBS

ความสัมพันธ์ระหว่างรายการประเมินของ SBS และตัวชี้วัดเชิงปริมาณที่ได้จากระบบต้นแบบแสดงไว้ในตารางที่ 1 โดยพบว่า รายการประเมินทุกข้อสามารถเชื่อมโยงกับพารามิเตอร์เชิงปริมาณที่ได้จากข้อมูลแรงกด (โดยใช้โหลดเซลล์) และข้อมูลท่าทางของร่างกาย (โดยใช้ MediaPipe) ได้อย่างเป็นระบบ ทั้งนี้ แนวทางดังกล่าวยังคงรักษาโครงสร้างและหลักการประเมินเดิมของ SBS ไว้ ขณะเดียวกันก็ช่วยเพิ่มความละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการประเมินสมดุลร่างกายในท่านั่ง โดยมีรายละเอียดของตัวชี้วัดในแต่ละรายการดังต่อไปนี้

2.1 การวัดเสถียรภาพการนั่งและการถ่ายน้ำหนัก

สำหรับรายการประเมินของ SBS ที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการรักษาสมดุลขณะนั่ง โดยไม่ใช้มือพยุงและการควบคุมลำตัวในสภาวะอยู่นิ่ง ระบบใช้ข้อมูลแรงกดที่ได้จากโหลดเซลล์ ซึ่งติดตั้งบริเวณฐานรองนั่งในการคำนวณตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงกด (Center of Pressure: CoP) ในแนวซ้าย-ขวา (Medio-Lateral Direction) โดยพารามิเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์ประกอบด้วยตำแหน่งเฉลี่ยของ CoP การกระจายตัวของ CoP และการเปลี่ยนแปลงของ CoP ในช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดเชิงปริมาณของความมั่นคงในการนั่งและประสิทธิภาพในการควบคุมสมดุลของร่างกาย นอกจากนี้ ระบบยังประยุกต์ใช้ MediaPipe ในการตรวจจับจุดสำคัญของร่างกายจากภาพวิดีโอ เพื่อคำนวณมุมเอียงของลำตัว ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนความสามารถในการรักษาแนวการทรงตัวและการควบคุมลำตัวขณะนั่ง การผสานข้อมูลจากการวิเคราะห์แรงกดและข้อมูลท่าทางดังกล่าวช่วยให้สามารถประเมินความสามารถในการทรงตัวได้อย่างครอบคลุมมากขึ้น และสนับสนุนการแปลงผลการประเมินเชิงคุณภาพของ SBS ให้เป็นตัวชี้วัดเชิงปริมาณ

2.2 การประเมินการเอื้อมแขนและการทำกิจกรรมเชิงหน้าที่

สำหรับรายการประเมินของ SBS ที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการเอื้อมแขนในทิศทางต่าง ๆ เช่น การเอื้อมไปด้านหน้าและด้านข้าง ระบบใช้ข้อมูลตำแหน่งข้อต่อของร่างกายที่ได้จาก MediaPipe โดยอาศัยจุดอ้างอิงบริเวณหัวไหล่ ข้อศอก ข้อมือ และปลายนิ้วมือ เพื่อคำนวณระยะการเอื้อมของแขนในรูปแบบเชิงปริมาณทั้งในแนวด้านหน้าและแนวด้านข้าง นอกจากนี้ ระบบยังใช้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงกด (Center of Pressure: CoP) ที่ได้จากโหลดเซลล์ เพื่อติดตามรูปแบบการถ่ายน้ำหนักระหว่างการเอื้อมแขน โดยข้อมูลดังกล่าวช่วยยืนยันว่า การเคลื่อนไหวเกิดขึ้นภายใต้การควบคุมสมดุลที่เหมาะสม การผสานข้อมูลจากการวิเคราะห์ท่าทางและการกระจายน้ำหนักจึงช่วยให้สามารถประเมินความสามารถในการทรงตัวเชิงพลวัตและการควบคุมลำตัวระหว่างการเอื้อมแขนได้อย่างครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 1

ความสอดคล้องระหว่างแบบประเมินสมดุลท่าทาง SBS และตัวชี้วัดเชิงปริมาณ

รายการประเมินตาม SBS	คำอธิบายเชิงหน้าที่ตาม SBS	ตัวชี้วัดเชิงปริมาณ
1. การนั่งโดยไม่พุง	ความสามารถในการนั่งทรงตัวโดยไม่ใช้มือหรือพนักพิง	ค่าเบี่ยงเบนของ CoP
2. การรักษาสมดุลขณะอยู่นิ่ง	เสถียรภาพของท่าทางเมื่อไม่มี การเคลื่อนไหว	ระยะเวลาที่รักษาท่าทางได้โดยไม่สูญเสียสมดุล
3. การควบคุมลำตัวขณะโน้มตัวไปด้านหน้า	ความสามารถในการเคลื่อนลำตัวไปด้านหน้าโดยไม่ล้ม	พื้นที่การแกว่งของ CoP
4. การควบคุมลำตัวขณะโน้มตัวไปด้านข้าง	การควบคุมสมดุลเมื่อถ่ายน้ำหนักซ้าย/ขวา	การเคลื่อนของ CoP ในทิศหน้า การคืนสู่ตำแหน่งสมดุล
5. การเอื้อมแขนไปด้านหน้า	ความสามารถในการเอื้อมโดยไม่สูญเสียสมดุล	การกระจายน้ำหนักซ้าย-ขวา
6. การเอื้อมแขนไปด้านข้าง	การเอื้อมในแนวด้านข้าง	ขอบเขต CoP
7. การหยิบหรือเคลื่อนไหวแขนร่วมกับลำตัว	การประสานงานลำตัว-แขน	ระยะการเอื้อมจริง
8. การกลับสู่ท่าทางสมดุล	ความสามารถในการคืนสู่ท่ากลาง	การเปลี่ยนตำแหน่ง CoP ระหว่างการเอื้อม
		ระยะการเอื้อมด้านข้าง
		การถ่ายน้ำหนักด้านเดียว
		ความต่อเนื่องของ trajectory
		เวลาที่ใช้คืนสู่ CoP กลาง

อย่างไรก็ตาม แก้อัปเดตแบบที่ใช้ในการทดสอบ ได้ติดตั้งโหลดเซลล์เฉพาะฝั่งด้านซ้ายและด้านขวา ในการวิเคราะห์ CoP จะได้เฉพาะทางแกน x (ซ้าย-ขวา) ในอนาคต คณะผู้วิจัยได้มีแนวทางพัฒนาเพิ่มเติมโดยติดตั้งโหลดเซลล์ 4 ชุด คือ ซ้าย ขวา หน้า หลัง เพื่อคำนวณหา CoP ทั้งแกน x และ แกน y

ผลการวิจัย

ภาพที่ 1 แสดงระบบต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งประกอบด้วยเก้าอี้ที่มีการติดตั้งโหลดเซลล์ด้านซ้ายและขวา Raspberry Pi ติดตั้งในกล่องควบคุม และมีกล้องถูกติดตั้งในตำแหน่งที่สามารถมองเห็นอาสาสมัครได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 1 ระบบต้นแบบสำหรับการประเมินสมดุลท่าทางเชิงปริมาณ
(ก) แก้อัปเดตที่มีการติดตั้งโหลดเซลล์ (ข) กล้อง (ค) การติดตั้งระบบเพื่อทดสอบ

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการกระจายน้ำหนักและการวัดระยะการเอื้อม หลังจากได้สอบเทียบทั้งโพลดเซลล์และ MediaPipe ผลการทดลองเป็นดังตาราง 2 และตารางที่ 3 ตามลำดับ ซึ่งพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของโพลดเซลล์ ไม่เกิน 5% ในขณะที่ระยะเอื้อมของปลายนิ้ว ถ้าระยะเอื้อมสั้นความคลาดเคลื่อนจะสูง แต่ถ้าระยะเอื้อมยาวมากขึ้น ความคลาดเคลื่อนจะลดลง เนื่องจากเป็นผลจากทิศทางของมุมกล้อง

ตารางที่ 2

ความถูกต้องของโพลดเซลล์

ลำดับที่	ค่าจากโพลดเซลล์ (kg)	น้ำหนักจริง (kg)	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	4.75	5	5.00
2	9.57	10	4.30
3	14.38	15	4.13
4	16.41	17	3.47
5	19.23	20	3.85

ตารางที่ 3

ความถูกต้องของระยะเอื้อม

ลำดับที่	ระยะเอื้อมจาก MediaPipe (cm)	ระยะเอื้อมจริง (cm)	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	6.12	5	22.40
2	10.80	10	8.00
3	15.98	15	6.53
4	20.52	20	2.60
5	25.50	25	2.00

ในการทดสอบ เพื่อประเมินความถูกต้องของระบบต้นแบบ คณะผู้วิจัยได้ใช้อาสาสมัครที่มีอายุระหว่าง 18 - 22 ปี จำนวน 5 คน สุขภาพสมบูรณ์เป็นกลุ่มควบคุม งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบระบบในระดับแนวคิด โดยไม่ใช่ข้อมูลผู้ป่วยและไม่เกี่ยวข้องกับข้อมูลสุขภาพส่วนบุคคล การทดลองดำเนินการคำนึงถึงความปลอดภัยและความเป็นส่วนตัวของอาสาสมัครเป็นสำคัญ ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากอาสาสมัครนั่งบนเก้าอี้ที่ติดตั้งโพลดเซลล์และติดตั้งกล้องมองด้านข้าง เพื่อบันทึกภาพท่าทางและวิเคราะห์ด้วย MediaPipe อาสาสมัครจะปฏิบัติตามภารกิจที่สอดคล้องกับรายการประเมินของ SBS ดังนี้

1. นั่งกอดอกแบบไม่หลับตา 60 วินาที โดยอาสาสมัครนั่งบนเก้าอี้ โดยพิจารณาให้คะแนน 0-4 ดังภาพที่ 2 โดยใช้หลักเกณฑ์โดยอาศัยกรอบการให้คะแนนตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4

การให้คะแนนตามหลักเกณฑ์ของ SBS กรณีการนั่งกอดอกโดยไม่หลับตาเป็นเวลา 60 วินาที

ระดับคะแนน SBS	เกณฑ์เชิงปริมาณ
0	ไม่สามารถทำภารกิจได้ หรือน้อยกว่า 10 วินาที
1	ทำได้เล็กน้อย หรือนั่งได้น้อยกว่า 30 วินาที
2	ทำได้บางส่วน ไม่เสถียร นั่นคือ นั่งได้นานขึ้น เกิน 30 วินาที
3	ทำได้เกือบสมบูรณ์ แต่มีการแกว่งของการกระจายน้ำหนักและลำตัว
4	นั่งได้อย่างมั่นคง ครบตามกำหนดเวลา



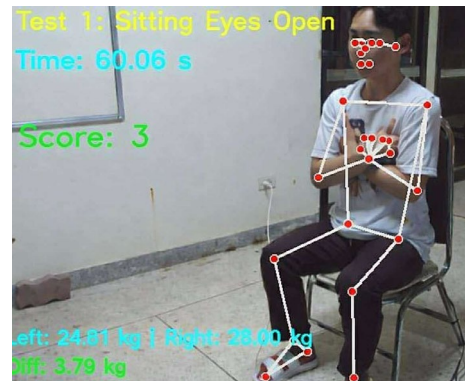
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

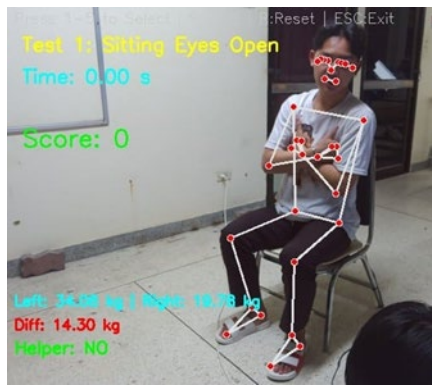
ภาพที่ 2 ผลการทดสอบการนั่งกอดอกแบบไม่หลับตา (ก) คะแนน 0 (ข) คะแนน 1 (ค) คะแนน 2 (ง) คะแนน 3 (จ) คะแนน 4

2. นั่งกอดอกแบบหลับตา 30 วินาที เพื่อทำการทดสอบการทรงตัว โดยจะให้คะแนน 0-4 ดังภาพที่ 3 โดยอาศัยกรอบการให้คะแนนตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5

การให้คะแนนตามหลักเกณฑ์ของ SBS กรณีการนั่งกอดอกแบบหลับตา 30 วินาที

ระดับคะแนน SBS	เกณฑ์เชิงปริมาณ
0	ไม่สามารถทำภารกิจได้ นั่งได้น้อยกว่า 3 วินาที
1	ทำได้เล็กน้อย นั่งได้ไม่เกิน 10 วินาที
2	ทำได้บางส่วน ไม่เสถียร นั่งได้นานขึ้น แต่ไม่ครบ 30 วินาที
3	ทำได้เกือบสมบูรณ์ แต่มีการแกว่งของการกระจายน้ำหนักและลำตัว
4	นั่งได้อย่างมั่นคง ครบตามกำหนดเวลา



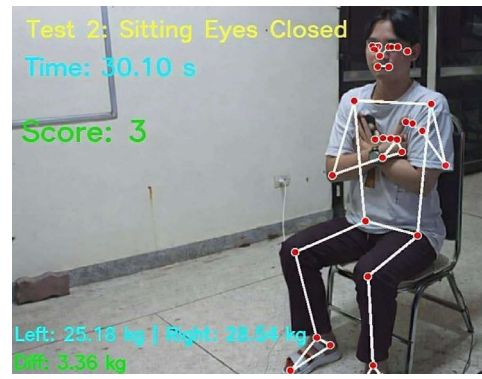
(ก)



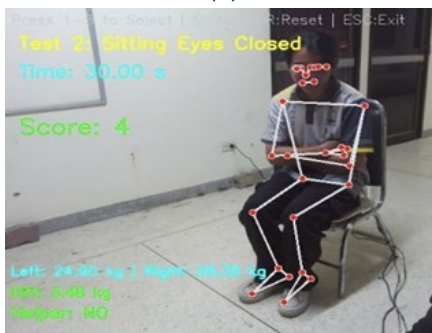
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

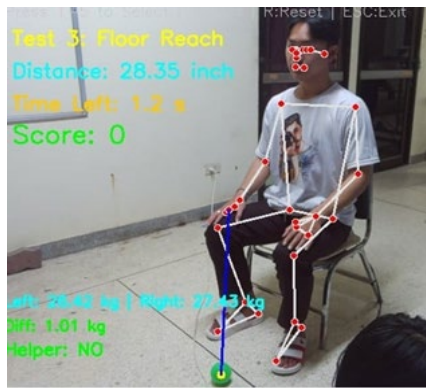
ภาพที่ 3 ผลการทดสอบการนั่งกอดดอกแบบหลังตา (ก) คะแนน 0 (ข) คะแนน 1 (ค) คะแนน 2 (ง) คะแนน 3 (จ) คะแนน 4

3. เอื้อมหยิบลูกบอลจากพื้น เพื่อทดสอบการทรงตัวและวัดระยะที่ยึดแขนได้ โดยจะทำการให้คะแนน 0-4 ดังภาพที่ 4 โดยอาศัยกรอบการให้คะแนนตามตารางที่ 6

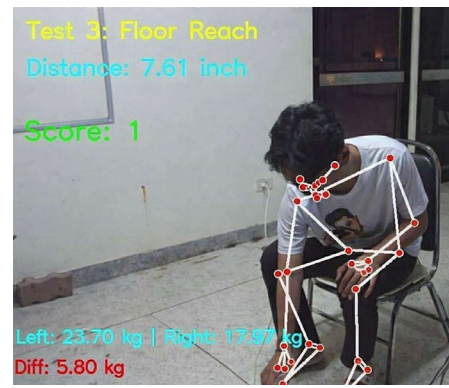
ตารางที่ 6

การให้คะแนนตามหลักเกณฑ์ของ SBS กรณีการเอื้อมหยิบลูกบอลจากพื้น

ระดับคะแนน SBS	เกณฑ์เชิงปริมาณ
0	ไม่สามารถทำภารกิจได้ นั่นคือ ระยะเอื้อมสั้นมาก หรือมีแนวโน้มจะหกล้ม
1	ระยะเอื้อมได้มากขึ้น แต่ยังคงเอื้อมหยิบไม่ถึง
2	เอื้อมได้ถึงลูกบอล แต่การกระจายน้ำหนักสูง
3	สามารถหยิบลูกบอลขึ้นมาได้ แต่การเคลื่อนที่ยังไม่ต่อเนื่อง
4	ทำภารกิจได้สำเร็จ ควบคุมการกระจายน้ำหนักได้ดี



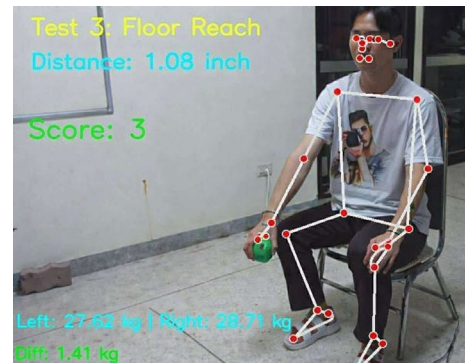
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

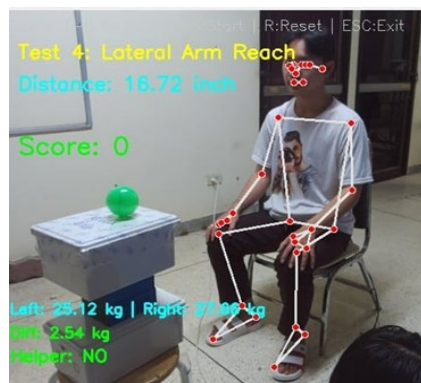
ภาพที่ 4 ผลการทดสอบการเอื้อมหยิบสิ่งของจากพื้น (ก) คะแนน 0 (ข) คะแนน 1 (ค) คะแนน 2 (ง) คะแนน 3 (จ) คะแนน 4

4. เอื้อมหยิบลูกบอลจากด้านหน้า เพื่อทำการทดสอบการทรงตัวและวัดระยะที่ยึดแขนได้ โดยจะทำการให้คะแนน 0-4 ดังภาพที่ 5 โดยอาศัยกรอบการให้คะแนนตามตารางที่ 7

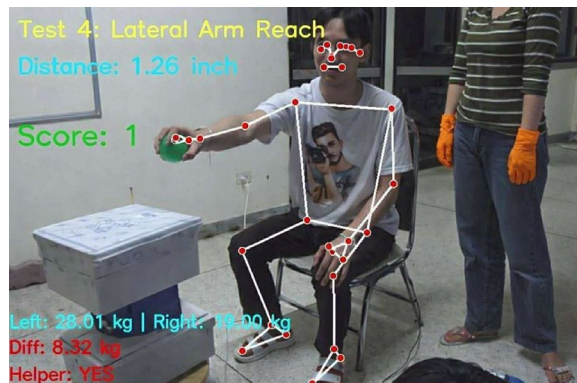
ตารางที่ 7

การให้คะแนนตามหลักเกณฑ์ของ SBS กรณีการเอื้อมหยิบลูกบอลจากด้านหน้า

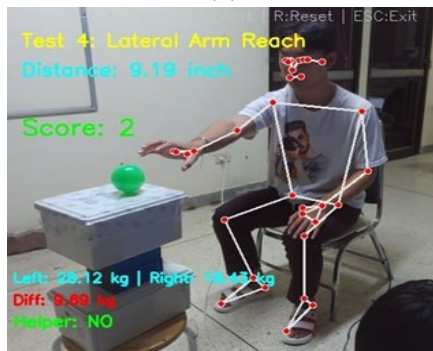
ระดับคะแนน SBS	เกณฑ์เชิงปริมาณ
0	ไม่สามารถทำภารกิจได้ นั่นคือ ระยะเอื้อมสั้นมาก หรือสูญเสียการทรงตัว
1	ระยะเอื้อมได้มากขึ้น แต่ยังคงเอื้อมหยิบไม่ถึง อาจจะต้องอาศัยผู้ช่วย
2	ระยะเอื้อมได้มากกว่า 5 เซนติเมตร แต่ไม่ถึง 10 เซนติเมตร และยังสามารถรักษาการทรงตัวได้
3	ระยะเอื้อมได้มากกว่า 10 เซนติเมตร แต่ไม่ถึง 20 เซนติเมตร และยังสามารถรักษาการทรงตัวได้
4	ระยะเอื้อมได้มากกว่า 20 เซนติเมตร และยังสามารถรักษาการทรงตัวได้ดี



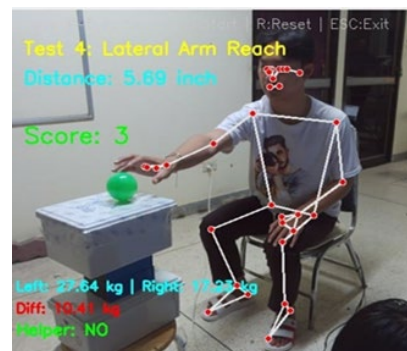
(ก)



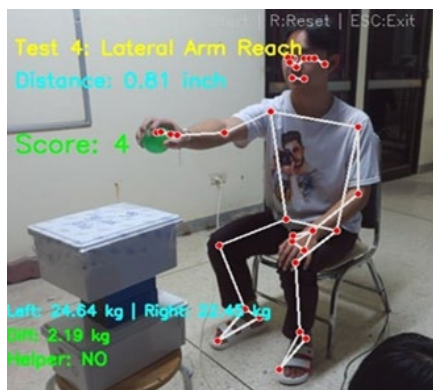
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

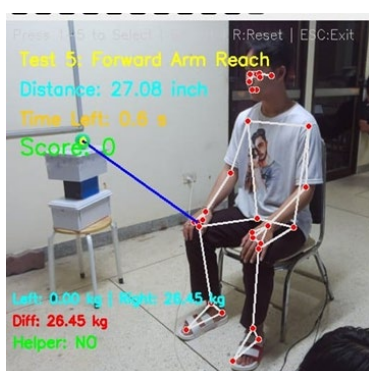
ภาพที่ 5 ผลการทดสอบการเอื้อมหยิบลูกบอลจากด้านหน้า (ก) คะแนน 0 (ข) คะแนน 1 (ค) คะแนน 2 (ง) คะแนน 3 (จ) คะแนน 4

5. เอื้อมหยิบลูกบอลจากด้านข้าง เพื่อทำการทดสอบการทรงตัวและวัดระยะที่ยึดแขนได้ โดยจะทำการให้คะแนน 0-4 ดังภาพที่ 6 โดยอาศัยกรอบการให้คะแนนตามตารางที่ 8

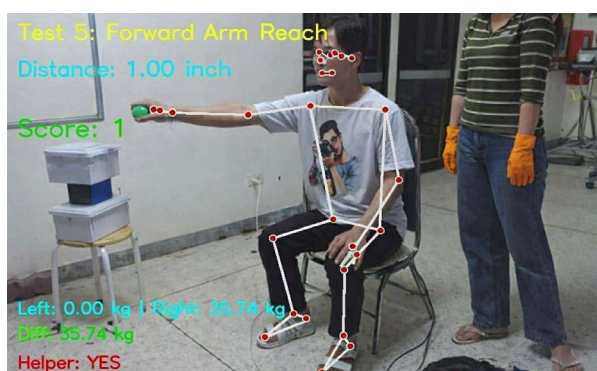
ตารางที่ 8

การให้คะแนนตามหลักเกณฑ์ของ SBS กรณีการเอื้อมหยิบลูกบอลจากด้านหน้า

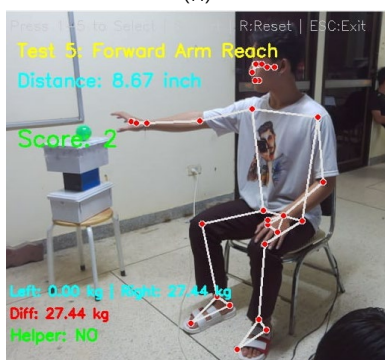
ระดับคะแนน SBS	เกณฑ์เชิงปริมาณ
0	ไม่สามารถทำภารกิจได้ นั่นคือ ระยะเอื้อมสั้นมาก หรือสูญเสียการทรงตัว
1	ระยะเอื้อมได้มากขึ้น แต่ยังคงเอื้อมหยิบไม่ถึง อาจจะต้องอาศัยผู้ช่วย
2	ระยะเอื้อมได้มากกว่า 5 เซนติเมตร แต่ไม่ถึง 10 เซนติเมตร และยังสามารถรักษาการทรงตัวได้
3	ระยะเอื้อมได้มากกว่า 10 เซนติเมตร แต่ไม่ถึง 20 เซนติเมตร และยังสามารถรักษาการทรงตัวได้
4	ระยะเอื้อมได้มากกว่า 20 เซนติเมตร และยังสามารถรักษาการทรงตัวได้ดี



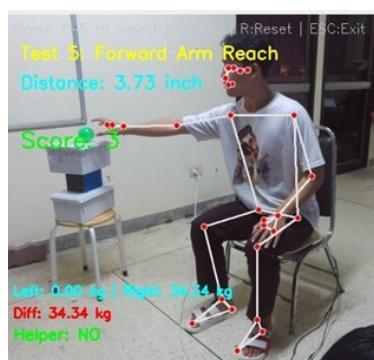
(ก)



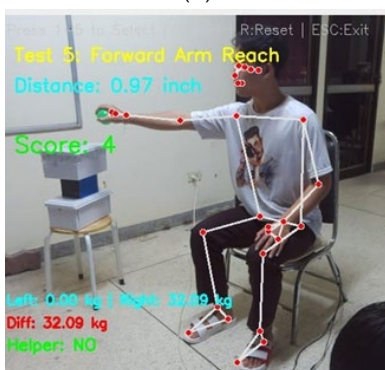
(ข)



(ค)



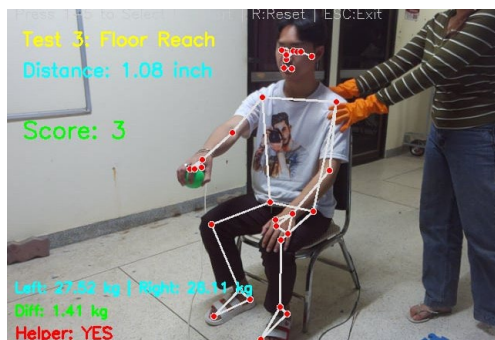
(ง)



(จ)

ภาพที่ 6 ผลการทดสอบการเอื้อมหยิบสิ่งของด้านข้าง (ก) คะแนน 0 (ข) คะแนน 1 (ค) คะแนน 2 (ง) คะแนน 3 (จ) คะแนน 4

ในทุกกรณี ถ้าหากมีการเข้าช่วยเหลือบางขณะ ก็จะมีการลดระดับคะแนนลง 1 ระดับ โดยใช้การตรวจจับสีของถุงมือ ถ้ามาสัมผัสกับอาสาสมัคร ดังตัวอย่างในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ตัวอย่างการเข้าช่วยเหลือจากผู้ดูแล

การอภิปรายผล

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ระบบประเมินสมดุลท่านั่งเชิงปริมาณที่พัฒนาขึ้นสามารถเสริมประสิทธิภาพการประเมินด้วย Sitting Balance Scale (SBS) ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยยังคงโครงสร้างและหลักการประเมินทางคลินิกเดิมไว้ครบถ้วน ประการแรก ระบบช่วยเพิ่มความแม่นยำของการประเมิน ซึ่งเดิมอาศัยการสังเกตและการให้คะแนนเชิงลำดับเป็นหลัก โดยข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น การแกว่งของ CoP มุมเอียงของลำตัว และระยะการเอื้อมที่วัดได้จริง ช่วยลดความคลุมเครือในการพิจารณาระดับคะแนน ประการที่สอง ระบบสามารถบันทึกและติดตามข้อมูลการทรงตัวอย่างต่อเนื่องตามเวลา (Continuous Monitoring) ซึ่งสะท้อนการเปลี่ยนแปลงของสมรรถภาพได้ละเอียดกว่าการประเมินเป็นรายครั้ง จึงเอื้อต่อการติดตามผลการฟื้นฟูสมรรถภาพในระยะยาว ประการที่สาม การประยุกต์ใช้ MediaPipe ทำให้สามารถวิเคราะห์การเคลื่อนไหวได้ โดยไม่ต้องติดตั้ง marker บนร่างกาย ลดภาระและความไม่สะดวกของผู้รับการประเมิน พร้อมทั้งเพิ่มความเป็นไปได้ในการนำระบบไปประยุกต์ใช้จริง ทั้งในคลินิกและสภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกับการดำเนินชีวิตประจำวัน

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบต้นแบบสำหรับการประเมินสมดุลท่านั่งเชิงปริมาณ โดยบูรณาการข้อมูลจากเซนเซอร์โพลีเดทัล ร่วมกับการวิเคราะห์ท่าทางด้วย MediaPipe ระบบได้รับการออกแบบให้สอดคล้องกับกรอบการประเมินของ Sitting Balance Scale (SBS) และสามารถแปลงผลการประเมินเชิงคุณภาพให้เป็นตัวชี้วัดเชิงปริมาณที่มีความต่อเนื่องและละเอียดมากขึ้น ผลการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถตรวจจับการเอียงลำตัว การถ่วงน้ำหนัก และพฤติกรรมการเอื้อมได้สอดคล้องกับการเคลื่อนไหวที่เกิดขึ้นจริง โดยทำหน้าที่เป็นเครื่องมือเสริมที่ช่วยสนับสนุนการประเมินทางคลินิก และเพิ่มข้อมูลประกอบการตัดสินใจสำหรับนักกายภาพบำบัด

ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการควบคุม และยังไม่ได้มีการทดสอบกับกลุ่มผู้ป่วยจริง ตัวชี้วัดเชิงปริมาณและแนวทางการแปลงผลเป็นระดับคะแนน SBS ที่นำเสนอ จึงยังคงอยู่ในระดับกรอบแนวคิด และยังไม่ได้รับการตรวจสอบด้านความเที่ยงตรง (validity) และความเชื่อถือได้ (reliability) สำหรับการพัฒนาในอนาคต จะมีการทดสอบระบบกับกลุ่มผู้ป่วยจริง เพื่อศึกษาความสอดคล้องกับผลการประเมิน SBS ทางคลินิก รวมทั้งประเมินความเที่ยงตรง และความเชื่อถือได้ของระบบ นอกจากนี้ จะเพิ่มจำนวนโพลีเดทัลเป็น 4 จุด เพื่อให้สามารถคำนวณตำแหน่ง CoP ได้ครบทั้งแกน x และแกน y ซึ่งจะช่วยเพิ่มความละเอียดในการวิเคราะห์การทรงตัว

เอกสารอ้างอิง

Anwary, A. R., Cetinkaya, D., Vassallo, M., & Bouchachia, H. (2021). Smart-Cover: A real time sitting posture monitoring system. *Sensors and Actuators A: Physical*, 317, Article 112451.
<https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112451>

- Bartlett, K. A., & Camba, J. D. (2023). An RGB-D sensor-based instrument for sitting balance assessment. *Multimedia Tools and Applications*, 82, 27245–27268. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-14518-7>
- Kim, J.-W., Choi, J.-Y., Ha, E.-J., & Choi, J.-H. (2023). Human pose estimation using MediaPipe pose and optimization method based on a humanoid model. *Applied Sciences*, 13(4), Article 2700. <https://doi.org/10.3390/app13042700>
- Kulikajevas, A., Maskeliunas, R., & Damaševičius, R. (2021). Detection of sitting posture using hierarchical image composition and deep learning. *PeerJ Computer Science*, Article 7: e442. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.442>
- Li, J., Zhong, D., Ye, J., He, M., Liu, X., Zheng, H., Jin, R., & Zhang, SL. (2019). Rehabilitation for balance impairment in patients after stroke: A protocol of a systematic review and network meta-analysis. *BMJ Open*, 9(7), Article e026844. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2018-026844>
- Medley, A., & Thompson, M. (2011). Development, reliability and validity of the sitting balance scale. *Physiotherapy Theory Practice*, 27(7), 471-481. <https://doi.org/10.3109/09593985.2010.531077>
- Nadeem, M., Elbasi, E., Zreikat, A. I., & Sharsheer, M. (2024). Sitting posture recognition systems: Comprehensive literature review and analysis. *Applied Sciences*, 14(18), Article 8557. <https://doi.org/10.3390/app14188557>
- Odesola, D. F., Kulon, J., Verghese, S., Partlow, A., & Gibson, C. (2025). A smart system for continuous sitting posture monitoring, assessment, and personalized feedback. *Sensors*, 25(18), Article 5610. <https://doi.org/10.3390/s25185610>
- Tsai, M.-C., Chu, E. T.-H., & Lee, C.-R. (2023). An automated sitting posture recognition system utilizing pressure sensors. *Sensors*, 23(13), Article 5894. <https://doi.org/10.3390/s23135894>
- Tsai, T.-Y., Smiley A., & Finkelstein, J. (2024). Automated assessment of sit-to-stand test using machine learning and image processing. In R. Paul & A. Kundu (Eds.), *Proceedings of the IEEE 15th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)* (pp. 306-311). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMCON62851.2024.11093518>
- Wei, W. (2025). Application of biomechanics in graphic design and ergonomic optimization. *Molecular & Cellular Biomechanics*, 22(2), Article 984. <https://doi.org/10.62617/mcb984>