

บทความวิจัย (Research Article)

การพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองด้วยความจริงเสริม แบบไร้จุดมาร์กเกอร์และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิก ด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน

ศราวิน ราชานิกรณ์¹, พรศักดิ์ ปริเลขา^{1,*}, พรรณเชษฐ ญ ลำพูน¹, ปิยะวัฒน์ จิระพงษ์สุวรรณ²,
รัฐวิชัย ญ ลำพูน³ และ ศุภณัฏฐ์ งามประภาวัฒน์⁴

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีดิจิทัลและสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

² ผู้บริหารประจำสำนัก สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

³ บริษัท อินเด็กซ์ อินเตอร์เนชั่นแนล กรุ๊ป จำกัด (มหาชน)

⁴ วิทยาลัยนานาชาติจีน สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: pornsakpree@pim.ac.th โทรศัพท์: 02-855-0340

(รับบทความ: 11 พฤษภาคม 2569; แก้ไขบทความ: 1 กรกฎาคม 2569; ตอรับบทความ: 14 กรกฎาคม 2569)

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง โดยใช้ความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ ร่วมกับแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน เพื่อแก้ไขข้อจำกัดของแนวทางที่ต้องใช้อุปกรณ์สวมใส่ และสนับสนุนการติดตามผลการบำบัดอย่างต่อเนื่องที่บ้าน ระบบใช้มีเดียไปป์ (MediaPipe) สำหรับการติดตามจุดสังเกตของมือจำนวน 21 จุด แบบเรียลไทม์จากกล้องเว็บแคมมาตรฐาน โดยป้อนข้อมูลเข้าสู่สถาปัตยกรรมปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน (Hybrid AI) ที่ผสานปัญญาประดิษฐ์แบบใช้กฎเกณฑ์ (Rule-Based AI) กับโมเดลภาษาขนาดใหญ่เพื่อสร้างข้อเสนอแนะและสรุปรายงานทางคลินิก ภายใต้กรอบกรอบแนวคิดและเครื่องมือในการประเมินการออกแบบซีเรียสเกม (Serious Game Design Assessment) และแนวคิดความยืดหยุ่นของระบบประสาท เปรียบวิธีวิจัยประกอบด้วยการเล่นเชิงวิศวกรรม การทดสอบด้วยชุดข้อมูลจำลอง 100 กรณีศึกษา และการทวนสอบโดยผู้เชี่ยวชาญ 9 ท่าน ผลการประเมินในสภาพแวดล้อมจำลองพบว่า ระบบมีอัตราการสูญเสียเฟรมเฉลี่ยร้อยละ 5.36 ความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่ 10.51 พิกเซล อัตราเฟรม 49.6–58.4 FPS และความหน่วง 45.2–68.7 มิลลิวินาที ส่วนการประเมินแดชบอร์ดปัญญาประดิษฐ์ ด้วยข้อมูลจำลอง 100 กรณี ศึกษาพบว่าความแม่นยำเท่ากับร้อยละ 92.00 และความสามารถในการตรวจจับ เท่ากับร้อยละ 89.36 ขณะที่ผู้เชี่ยวชาญประเมินความเหมาะสมของสถาปัตยกรรมและความสอดคล้องเชิงหน้าที่อยู่ในระดับมากที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.59–4.75) จุดเด่นของการศึกษานี้คือการบูรณาการความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และแดชบอร์ดคลินิกในระบบต้นแบบเดียว อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ในบทความนี้เป็นการประเมินต้นแบบในสภาพแวดล้อมจำลอง และการรับรองโดยผู้เชี่ยวชาญ จึงควรมีการศึกษาทางคลินิกเพิ่มเติมก่อนการนำไปใช้จริงในวงกว้าง

คำสำคัญ: ความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน การฟื้นฟูสมรรถภาพโรคหลอดเลือดสมอง แดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิก ซีเรียสเกมทางสุขภาพ

การอ้างอิงบทความ: ศราวิน ราชานิกรณ์, พรศักดิ์ ปริเลขา, พรรณเชษฐ ญ ลำพูน, ปิยะวัฒน์ จิระพงษ์สุวรรณ, รัฐวิชัย ญ ลำพูน และ ศุภณัฏฐ์ งามประภาวัฒน์, "การพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองด้วยความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน", "วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์", ปีที่ 4, ฉบับที่ 4, หน้า 95-109, 2569.

บทความวิจัย (Research Article)

Development of a Stroke Tele-Rehabilitation System Using Markerless Augmented Reality and a Hybrid AI-Based Clinical Decision Support Dashboard

Sarawin Rachanikorn¹, Pornsak Preelekha^{1,*}, Phannachet Na Lamphun¹, Piyawat Jirapongsuwan²,
Rathawit Na Lamphun³ and Supanut Ngamprapawat⁴

¹Department of Digital Technology and Information, Faculty of Engineering and Technology,
Panyapiwat Institute of Management

²Executive Officer for Academic Affairs, Panyapiwat Institute of Management

³Index International Group Public Company Limited

⁴International Chinese College, Panyapiwat Institute of Management

*Corresponding Author: pornsakpree@pim.ac.th, Tel: 02-855-0340

(Received: May 11, 2026; Revised: July 1, 2026; Accepted: July 14, 2026)

Abstract

This study aimed to develop a stroke tele-rehabilitation prototype integrating markerless augmented reality with a hybrid AI-based clinical decision support dashboard, in order to reduce the limitations of wearable-device-dependent rehabilitation and to support continuous home-based monitoring. The system employed MediaPipe for real-time tracking of 21 hand landmarks from a standard webcam and transmitted the extracted features to a Hybrid AI architecture that combines a rule-based engine with a large language model to generate feedback and clinical summaries under the Serious Game Design Assessment framework and the concept of neuroplasticity. The methodology consisted of engineering evaluation, simulated-data testing using 100 clinical cases, and expert validation by nine specialists. Evaluation in a simulated environment showed a frame drop rate of 5.36%, a spatial error of 10.51 pixels, a frame rate of 49.6–58.4 FPS, and a latency of 45.2–68.7 ms. For AI performance, the dashboard achieved 92.00% accuracy and 89.36% recall on 100 simulated clinical cases, while expert evaluation rated the system architecture and functional appropriateness at the highest level (mean = 4.59–4.75). The key contribution of this work lies in the integration of Markerless AR, Hybrid AI, and a clinical dashboard into a single prototype. However, the findings are limited to prototype evaluation in a simulated environment and expert-based validation; therefore, further clinical studies are required before real-world deployment.

Keywords: Markerless Augmented Reality, Hybrid Artificial Intelligence, Stroke Rehabilitation, Clinical Decision Support Dashboard, Healthcare Serious Games

Please cite this article as: S. Rachanikorn, P. Preelekha, P. Na Lamphun, P. Jirapongsuwan, R. Na Lamphun and S. Ngamprapawat, "Development of a Stroke Tele-Rehabilitation System Using Markerless Augmented Reality and a Hybrid AI-Based Clinical Decision Support Dashboard," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 4, pp. 95-109, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

โรคหลอดเลือดสมองและภาวะสมองเสื่อมเป็นปัญหาสาธารณสุขสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการทำกิจกรรมประจำวัน และคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุ การฟื้นฟูสมรรถภาพทางกาย และปรีชาอย่างต่อเนืองจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการช่วยให้ผู้ป่วยกลับมาพึ่งพาตนเองได้ อย่างไรก็ตามการกายภาพบำบัดแบบดั้งเดิมยังเผชิญข้อจำกัดหลายประการ เช่น การขาดแรงจูงใจของผู้ป่วย และปัญหาด้านการเดินทาง เป็นต้น ซึ่งส่งผลให้การรักษาขาดความต่อเนื่อง [1] ด้วยเหตุนี้แนวคิดการฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกล (Tele-Rehabilitation) จึงได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากช่วยให้ผู้ป่วยสามารถฝึกฝนตนเองที่บ้านได้สะดวกและต่อเนื่อง แม้ที่ผ่านมาจะมีการนำเทคโนโลยีโลกเสมือนจริง และอุปกรณ์สวมใส่มาใช้งานฟื้นฟู แต่เทคโนโลยีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดสำคัญ ได้แก่ ต้นทุนฮาร์ดแวร์สูง ความซับซ้อนในการติดตั้ง และความไม่สะดวกในการใช้งาน โดยเฉพาะในผู้สูงอายุ นอกจากนี้การติดตามและประเมินผลยังมักอาศัยการสังเกตของนักกายภาพบำบัดเป็นหลัก ทำให้เกิดภาระงานสูงและขาดความต่อเนื่องของข้อมูลระยะยาว [1]

จากข้อจำกัดดังกล่าวจึงมีความจำเป็นในการพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพที่เข้าถึงได้ง่ายผ่านอุปกรณ์พื้นฐาน และสามารถบูรณาการการรักษาเข้ากับการประเมินผลได้อย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้จึงมุ่งประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการติดตามการเคลื่อนไหวแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ร่วมกับความจริงเสมือน เพื่อให้ผู้ป่วยสามารถโต้ตอบกับระบบผ่านกล้องเว็บแคมมาตรฐานโดยไม่ต้องสวมอุปกรณ์บนร่างกาย พร้อมทั้งนำแนวคิดปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกมาใช้ในการติดตาม วิเคราะห์ และสรุปผลการฟื้นฟูอย่างเป็นระบบ [2-6]

อย่างไรก็ตามจากการทบทวนวรรณกรรม และข้อจำกัดของแนวทางเดิม ยังขาดระบบต้นแบบสำหรับการฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองที่บูรณาการติดตามการเคลื่อนไหวแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ การวิเคราะห์ผลด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกไว้ในแพลตฟอร์มเดียวอย่างเป็นระบบ จากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นเหตุผลสำคัญของการพัฒนางานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบต้นแบบสำหรับการฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง โดยบูรณาการเทคโนโลยีความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกเข้าด้วยกัน ทั้งนี้เพื่อประเมินสมรรถนะเชิงวิศวกรรม ความแม่นยำของการวิเคราะห์ และความเหมาะสมของระบบในมุมมองของผู้เชี่ยวชาญ

2. ทบทวนวรรณกรรม

การฟื้นฟูสมรรถภาพผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการฟื้นคืนความสามารถในการทำกิจกรรมประจำวันและคุณภาพชีวิตของผู้ป่วย โดยกรอบแนวคิดในการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของร่างกาย การทำกิจกรรม และการมีส่วนร่วม [5] ในเชิงทฤษฎี กระบวนการฟื้นฟูอาศัยหลักการสำคัญของทฤษฎีความยืดหยุ่นของระบบประสาท ซึ่งอธิบายว่าสมองสามารถปรับเปลี่ยนโครงสร้างและหน้าที่ของตนเองได้จากประสบการณ์และการฝึกซ้ำ [7] ควบคู่กับทฤษฎีการเรียนรู้การเคลื่อนไหวที่เน้นการฝึกอย่างเฉพาะเจาะจงและต่อเนื่องเพื่อให้เกิดการฟื้นตัวของทักษะการเคลื่อนไหว [8] ขณะเดียวกัน ทักษะการจัดการขั้นสูงของสมองยังมีบทบาทต่อการฟื้นฟูทางกายและปรีชาในผู้ป่วยที่ต้องกลับไปใช้ชีวิตประจำวัน [9] ในช่วง

บทความวิจัย (Research Article)

หลายปีที่ผ่านมา แนวทางการฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลได้รับความสนใจมากขึ้น เนื่องจากช่วยลดข้อจำกัดด้านการเดินทางและเพิ่มโอกาสในการฝึกอย่างต่อเนื่องที่บ้าน งานวิจัยของ Moldoveanu et al. [1] ชี้ให้เห็นว่าเทคโนโลยีเกมและโลกเสมือนจริงสามารถช่วยเพิ่มแรงจูงใจ และการมีส่วนร่วมของผู้ป่วยหลังโรคหลอดเลือดสมองได้ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านการใช้งานจริง ความต่อเนื่องของการรักษา และต้นทุนอุปกรณ์ขณะเดียวกันงานของ Weissbluth and Nissim [10] ยังสะท้อนว่าเทคโนโลยีโลกเสมือนจริงอาจก่อให้เกิดความไม่สบายตัวหรือข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพการใช้งานในผู้ใช้บางกลุ่ม จึงเห็นได้ว่าแม้แนวทางเทคโนโลยีเสมือนจริงและอุปกรณ์สวมใส่จะมีศักยภาพในเชิงฟื้นฟู แต่ความซับซ้อนของอุปกรณ์และความสะดวกในการใช้งานยังเป็นอุปสรรคต่อการนำไปใช้จริงในวงกว้าง ภายใต้ข้อจำกัดดังกล่าว เทคโนโลยีการติดตามการเคลื่อนไหวแบบไร้จุดมาร์กเกอร์จึงได้รับความสนใจมากขึ้น เพราะช่วยลดภาระจากการใช้อุปกรณ์สวมใส่และเอื้อต่อการประยุกต์ใช้ผ่านฮาร์ดแวร์พื้นฐาน เช่น กล้องเว็บแคม มีเดียไปป์เป็นหนึ่งในเฟรมเวิร์กสำคัญที่รองรับ กระบวนการประมวลผลข้อมูลประสาทสัมผัสแบบต่อเนื่อง [2] และต่อยอดสู่การตรวจจับแบบเรียลไทม์ผ่านระบบตรวจจับมือ [11] ในมุมมองของการประยุกต์ใช้การฟื้นฟูของ Rasetto et al. [3] และ Karthik et al. [12] แสดงให้เห็นว่าระบบติดตามมือแบบไม่ใช้มาร์กเกอร์สามารถสนับสนุนการฝึกฟื้นฟูมือ และการรู้จำท่าทางได้ในระดับที่น่าสนใจ ขณะที่งานวิจัยของ Faux-Nightingale et al. [13] และ Hsu et al. [14] ยืนยันว่าเทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน และระบบจับการเคลื่อนไหวแบบไม่ใช้มาร์กเกอร์ มีศักยภาพต่อการเพิ่มการเข้าถึงบริการฟื้นฟู แม้หลักฐานเชิงประสิทธิผลทางคลินิกยังต้องการการศึกษาที่เป็นระบบมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยเดิมจึงชี้ให้เห็นทั้งโอกาสและข้อจำกัดกล่าวคือ เทคโนโลยีช่วยลดข้อจำกัดของการฟื้นฟูแบบ

ใช้อุปกรณ์สวมใส่ได้ แต่ยังขาดการบูรณาการเข้าสู่ระบบทางคลินิกที่ครบวงจร เพื่อเพิ่มแรงจูงใจและความต่อเนื่องของการฝึก แนวคิดเกมบำบัด และซีเรียสเกมจึงถูกนำมาใช้ร่วมกับการออกแบบระบบฟื้นฟูอย่างกว้างขวางโดยกรอบซีเรียสเกมของ Mitgutsch and Alvarado [15] ช่วยอธิบายว่าเกมสามารถสนับสนุนเป้าหมายได้อย่างไร ขณะที่ทฤษฎีการกำหนดตนเอง ภาวะสิ้นไหว และการเสริมแรงบวก [16-18] ช่วยอธิบายกลไกที่ทำให้ผู้ใช้เกิดแรงจูงใจและฝึกซ้ำอย่างต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาร่วมกับงานวิจัยด้านเกมเพื่อการฟื้นฟู [1] จะเห็นได้ว่าเกมมีบทบาทสำคัญต่อการลดปัญหาการไม่ปฏิบัติตามแผนการรักษา แต่ในหลายงานที่ผ่านมา เกมยังถูกใช้เพื่อเพิ่มแรงจูงใจเป็นหลัก มากกว่าการเชื่อมโยงกับระบบประเมินผลและการตัดสินใจทางคลินิก

ในอีกด้านหนึ่งปัญญาประดิษฐ์ได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้นอย่างชัดเจนในระบบสุขภาพ งานของ Jiang et al. [4] อธิบายภาพรวมของการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์ในบริบทสุขภาพ ส่วน Shortliffe [19] แสดงให้เห็นจุดแข็งของระบบอิงกฎในด้านความโปร่งใสและการตรวจสอบย้อนกลับได้ ขณะเดียวกัน งานล่าสุดในช่วงปี 2023–2024 ชี้ให้เห็นว่าโมเดลภาษาขนาดใหญ่ (Large Language Model : LLMs) มีศักยภาพในการสังเคราะห์ข้อมูล การร่างเอกสาร และการช่วยงานเชิงความรู้ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความน่าเชื่อถือและบริบทการใช้งาน เมื่อนำจุดเด่นของระบบอิงกฎ และโมเดลภาษาขนาดใหญ่ มาพิจารณาร่วมกัน จึงเกิดความเหมาะสมของแนวคิดปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน ซึ่งนำความสามารถด้านการตรวจสอบย้อนกลับของชุดเงื่อนไข และเหตุผลเข้ากับความรู้ด้านด้านการสังเคราะห์ภาษาธรรมชาติของโมเดลภาษาขนาดใหญ่ เพื่อให้เหมาะกับบริบทการใช้งานทางคลินิก [20-22] นอกจากการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว การนำเสนอผลลัพธ์ในรูปแบบที่ใช้งานได้จริงสำหรับบุคลากรทาง

บทความวิจัย (Research Article)

การแพทย์ก็เป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิก (Clinical Decision Support: CDS) งานของ Zou et al. [6] สนับสนุนบทบาทของแดชบอร์ดในการรวบรวมข้อมูลหลายมิติและสรุปผลเพื่อช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานด้านสุขภาพตีความข้อมูลได้สะดวกยิ่งขึ้น ขณะที่ Bischof et al. [23], Hekman et al. [24] และ Dullabh et al. [25] แสดงให้เห็นว่าแดชบอร์ดสามารถสรุปข้อมูลเชิงคลินิกที่ดีช่วยเชื่อมข้อมูล การตีความ และกระบวนการทำงาน การตัดสินใจทางคลินิก ซึ่งไม่ใช่เพียงแสดงค่าทางสถิติเท่านั้น และยังมีความสำคัญต่อการออกแบบระบบเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจ

จากการสังเคราะห์วรรณกรรมทั้งหมดพบข้อจำกัด 3 ประการ ได้แก่ 1) งานวิจัยศึกษาองค์ประกอบแต่ละด้านแยกส่วน เช่น มุ่งเฉพาะเกมฟื้นฟู การติดตามการเคลื่อนไหว หรือแดชบอร์ดเพียง

ด้านใดด้านหนึ่ง 2) การบูรณาปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสานเพื่อสนับสนุนการฟื้นฟูและการติดตามผลเชิงคลินิกในแพลตฟอร์มเดียวมีจำนวนจำกัด และ 3) ยังขาดการเชื่อมโยงระหว่างผลการฝึกของผู้ป่วยกับเครื่องมือสนับสนุนการตัดสินใจของบุคลากรทางการแพทย์อย่างเป็นระบบ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนานวัตกรรมต้นแบบสำหรับการฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลของผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง โดยบูรณาการความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ ซีเรียสเกม ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกเข้าด้วยกันเพื่อปิดจำกัดดังกล่าว และยกระดับศักยภาพของการฟื้นฟูทางไกลอย่างยั่งยืน

ดังนั้นผู้วิจัยได้สังเคราะห์และเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเชิงเทคโนโลยี ข้อจำกัด และช่องว่างของงานเดิม ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปการสังเคราะห์และเปรียบเทียบงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กลุ่มงานวิจัย	เทคโนโลยีหลัก	ข้อจำกัดของงานเดิม	ช่องว่างที่งานวิจัยนี้เติมเต็ม
เกม/เทคโนโลยีความเป็นจริงเสมือน เพื่อการฟื้นฟู	VR, Gamified Rehabilitation	ใช้งานจริงยากและอุปกรณ์ซับซ้อน	ใช้ความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ที่เข้าถึงง่ายกว่า
Markerless Motion Capture / Hand Tracking	MediaPipe, Hand Tracking	เน้นติดตามท่าทาง แต่ยังไม่เชื่อมระบบสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิก	เชื่อมการติดตามเข้ากับปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และแดชบอร์ด
AI / LLMs in Medicine	Rule-based AI, LLMs	ใช้รายส่วน ขาดบริบทฟื้นฟูครบวงจร	ใช้ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน เพื่อสรุปผลในงานฟื้นฟู
Clinical Dashboard / CDS	Narrative Dashboard, ML-CDS Dashboard	เน้นข้อมูลเชิงระบบ แต่ยังไม่เฉพาะ โรค Stroke Tele-rehabilitation	ออกแบบแดชบอร์ดสำหรับติดตามผลฟื้นฟูทางไกล

บทความวิจัย (Research Article)

จากตารางที่ 1 พบว่างานวิจัยเดิมยังขาดการบูรณาการความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกไว้ในแพลตฟอร์มเดียวอย่างเป็นระบบ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้พัฒนาเพิ่มเติมปรับปรุงข้อจำกัดของระบบเดิม

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้เป็นการวิจัยและพัฒนาเชิงวิศวกรรมระบบเพื่อพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน โดยประยุกต์ใช้วงจรการพัฒนาระบบแบบเอจิล (Agile) เพื่อให้สามารถปรับปรุงต้นแบบได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ การประเมินต้นแบบในงานวิจัยฉบับนี้ ประกอบด้วยการทดสอบเชิงวิศวกรรม

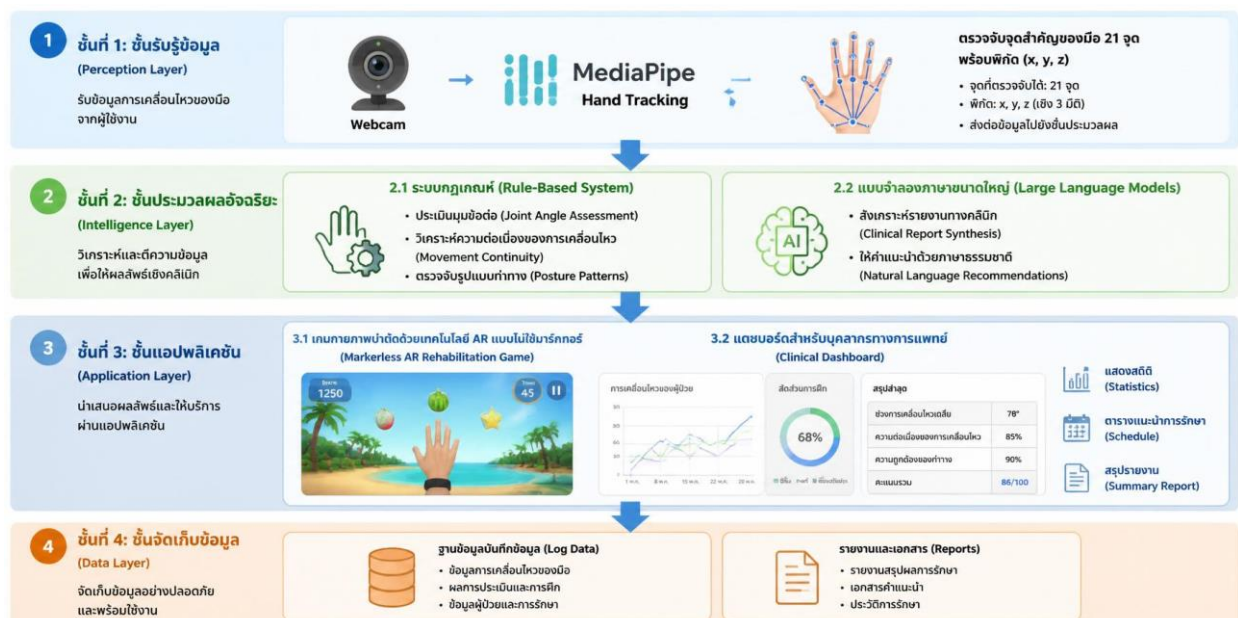
การทดสอบด้วยข้อมูลจำลองและการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ โดยยังไม่ครอบคลุมการทดลองกับผู้ป่วยจริง

3.1 รูปแบบการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานแบ่งออกเป็น 3 ระยะ ได้แก่ การวิเคราะห์และออกแบบสถาปัตยกรรม การพัฒนาระบบ และการทดสอบประสิทธิภาพของต้นแบบแสดงดังรูปที่ 1

3.1.1 ในระยะที่ 1

ผู้วิจัยออกแบบสถาปัตยกรรมระบบโดยบูรณาการ 4 ชั้นหลัก ได้แก่ ชั้นการรับรู้ ชั้นประมวลผลอัจฉริยะ ชั้นแอปพลิเคชัน และชั้นข้อมูล โดยในชั้นการรับรู้ระบบรับสัญญาณภาพจากกล้องเว็บแคมเข้าสู่มีเดียไปป์ เพื่อสกัดจุดพิคตบนมือจำนวน 21 จุด ซึ่งเป็นจุดสังเกตเฉพาะของมือและนิ้วมือ ไม่ได้ครอบคลุมข้อต่อของร่างกายส่วนอื่น



รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมระบบและการไหลของข้อมูลที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ศรวิน ราชานิกรณ และคณะ, การพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองด้วยความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน

บทความวิจัย (Research Article)

ข้อมูลที่ได้อยู่ในรูปพิกัด x , y และ z เชิงสัมพันธ์ และนำไปใช้คำนวณองศาข้อต่อและรูปแบบการเคลื่อนไหวแบบสัมพันธ์ แทนการวัดระยะทางเชิงกายภาพแบบสมบูรณ์ เพื่อช่วยลดผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของระยะระหว่างผู้ใช้กับกล้อง 2 มิติ พร้อมทั้งมีการปรับเทียบตำแหน่งเริ่มต้นก่อนใช้งานแต่ละรอบ เพื่อให้ระบบตอบสนองได้เสถียรมากขึ้นแม้ระยะห่างจากกล้องเปลี่ยนแปลงไป ในชั้นประมวลผลของปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสานทำงานเป็นลำดับขั้นดังนี้

1) ข้อมูลจุดพิกัดบนมือจากมีเดียไปป์ถูกส่งเข้าสู่ระบบที่ขับเคลื่อนด้วยกฎเพื่อประเมินเงื่อนไขเชิงวิกลศาสตร์ เช่น องศาการงอข้อนิ้ว ความต่อเนื่องของการเคลื่อนไหว และรูปแบบท่าทางที่ควรเฝ้าระวัง

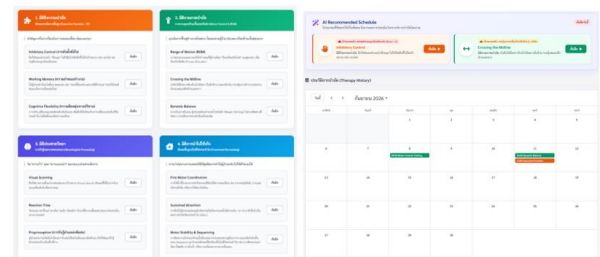
2) ผลลัพธ์เชิงปริมาณและผลการตีความเบื้องต้นจะถูกส่งต่อไปยังโมเดลภาษาขนาดใหญ่เพื่อสังเคราะห์เป็นข้อความสรุป รายงานทางคลินิก และข้อเสนอแนะเชิงภาษาธรรมชาติ

3) ผลลัพธ์สุดท้ายถูกส่งไปยังชั้นแอปพลิเคชันเพื่อแสดงผลในรูปแบบเกมฟื้นฟู และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิก พร้อมบันทึกข้อมูลลงชั้นข้อมูล ในรูปแบบข้อมูลบันทึกประวัติการทำงาน และรายงานผลเพื่อใช้ติดตามย้อนหลังในภายหลัง การออกแบบดังกล่าวช่วยให้โมเดลภาษาขนาดใหญ่ไม่ได้ทำหน้าที่ตัดสินใจโดยลำพัง แต่ทำหน้าที่สังเคราะห์ผลบนพื้นฐานข้อมูลที่ผ่านการตรวจสอบจากระบบอิงกฎแล้ว จึงเพิ่มความสามารถในการตรวจสอบย้อนกลับ และลดความเสี่ยงจากการสังเคราะห์ข้อมูลที่เผลอคล้อยกับบริบททางคลินิก

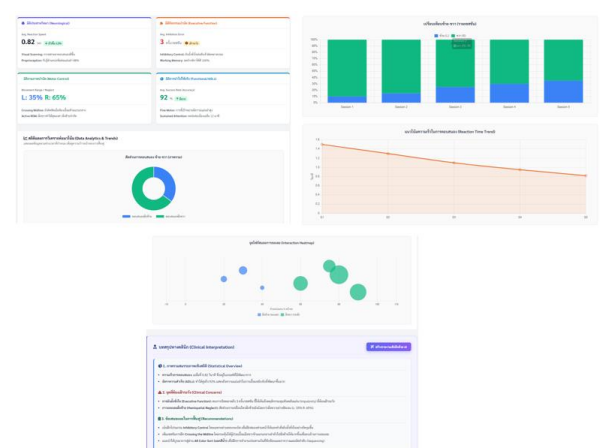
3.1.2 ในระยะที่ 2

ผู้วิจัยพัฒนาสภาพแวดล้อม ความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์สำหรับกิจกรรมฟื้นฟู และพัฒนาแดชบอร์ดคลินิกภายใต้หลักการออกแบบที่เน้นผู้ใช้เป็นศูนย์กลาง โดยมุ่งให้การแสดงผลสถิติ ตารางแนะนำ

การบำบัด และรายงานสรุปทางคลินิกมีความเข้าใจง่ายต่อผู้เชี่ยวชาญทางการแพทย์และเอื้อต่อการตัดสินใจใช้งานจริง ทั้งนี้ต้นแบบแดชบอร์ดได้รับการประเมินความเหมาะสม และการยอมรับในการใช้งานเบื้องต้นร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านเวชศาสตร์ฟื้นฟู และสาขาที่เกี่ยวข้องในรูปแบบการทดสอบการยอมรับโดยผู้ใช้หรือการประเมินแบบฮิวริสติก (Heuristic Evaluation) เพื่อพิจารณาประโยชน์ของข้อมูลที่แสดงและความเหมาะสมของส่วนติดต่อผู้ใช้ก่อนนำไปทดสอบในระยะประเมินผล แสดงดังรูปที่ 2-4



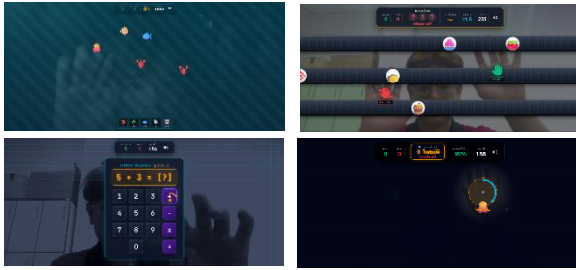
รูปที่ 2 โปรแกรมเกมเพื่อการบำบัด และระบบ AI แนะนำตารางการบำบัดเฉพาะบุคคล



รูปที่ 3 แดชบอร์ดแสดงผลการวิเคราะห์ และรายงานบทสรุปทางคลินิกที่วิเคราะห์

ศรวิน ราชานิกรณ และคณะ, การพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองด้วยความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์และแดชบอร์ดสนับสนุนการตัดสินใจทางคลินิกด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 4 หน้าจอแสดงส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ของ
ซีเรียสเกมบำบัดด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมแบบไร้

3.1.3 ในระยะที่ 3

ผู้วิจัยทดสอบและประเมินประสิทธิภาพต้นแบบ
โดยครอบคลุมสมรรถนะเชิงวิศวกรรม ความน่าเชื่อถือ
ของปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และความ
เหมาะสมของแดชบอร์ดจากมุมมองผู้เชี่ยวชาญ

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา

เครื่องมือหลักของระบบประกอบด้วย มีเดียไปป์
และไลบรารีสำหรับการประมวลผลภาพ และติดตาม
การเคลื่อนไหวแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ สถาปัตยกรรม
ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสานที่ใช้กฎเกณฑ์ ตรรกะ
การตัดสินใจเชิงเงื่อนไขร่วมกับโมเดลภาษาขนาดใหญ่
และเว็บเฟรมเวิร์ก สำหรับพัฒนาเกมฟื้นฟูและแดช
บอร์ดเชิงโต้ตอบ โดยเครื่องมือทั้งหมดถูกออกแบบให้
รองรับการใช้งานผ่านอุปกรณ์พื้นฐานและเว็บแคม
มาตรฐาน เพื่อเพิ่มความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้
ในบริบทการฟื้นฟูทางไกล

3.3 ประชากร กลุ่มตัวอย่าง และแหล่งข้อมูล

ข้อมูลที่ใช้ในการประเมินระบบแบ่งออกเป็น 2
ส่วน ได้แก่ 1) ชุดข้อมูลจำลองสำหรับทดสอบระบบ

ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และ 2) กลุ่ม
ผู้เชี่ยวชาญ

1) ชุดข้อมูลจำลองสำหรับทดสอบใช้ชุดข้อมูล
ทางคลินิกจำลองจำนวน 100 กรณีศึกษา เพื่อทดสอบ
การวิเคราะห์ของแดชบอร์ดระบบปัญญาประดิษฐ์
แบบผสมผสาน โดยกำหนดการกระจายของคลาส
อย่างสมดุล ได้แก่ กลุ่มการเคลื่อนไหวปกติ 50 กรณี
และกลุ่มการเคลื่อนไหวผิดปกติที่ต้องเฝ้าระวัง
50 กรณี ข้อมูลแต่ละกรณีศึกษาประกอบด้วยตัวแปร
ด้านการเคลื่อนไหว เช่น รูปแบบการใช้งานมือ ความ
สมมาตรของการเคลื่อนไหว เวลาในการตอบสนอง
และค่าคะแนนจากกิจกรรมภายในระบบ ในการศึกษา
นี้ ใช้การจำแนกประเภทข้อมูลกรณีที่มีลักษณะความ
ผิดปกติ หรือความเสี่ยงที่ควรได้รับการแจ้งเตือน ส่วน
ความผิดพลาดแบบไม่แจ้งเตือน (False Negative)
กับกรณีที่ระบบพลาดการตรวจจับการจำแนก
ประเภทข้อมูล และรายงานออกมาว่าเป็นปกติ ซึ่งถือ
เป็นความคลาดเคลื่อนที่มีนัยสำคัญต่อความปลอดภัย
ของระบบ

2) กลุ่มผู้เชี่ยวชาญ ใช้วิธีเลือกแบบเจาะจง
จำนวน 9 ท่าน จาก 3 สาขา ได้แก่ ด้านเทคโนโลยี
สารสนเทศ ด้านสื่อประสม และด้านเวชศาสตร์ฟื้นฟู
หรือด้านกิจกรรมบำบัด เพื่อประเมินสถาปัตยกรรม
ระบบ ความเหมาะสมของกิจกรรมบำบัด ความเข้าใจ
ได้ของแดชบอร์ด และประโยชน์เชิงคลินิกของต้นแบบ

3.4 กระบวนการทดสอบและเครื่องมือประเมินผล

การประเมินระบบประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่

1) การทดสอบความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์ก
เกอร์ ใช้ประเมินสมรรถนะเชิงวิศวกรรมของระบบ
ติดตามการเคลื่อนไหวแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ โดย
บันทึกอัตราการสูญเสียเฟรม (Frame Drop Rate)
ความแม่นยำเชิงพื้นที่ (Spatial Accuracy) ความหน่วง

บทความวิจัย (Research Article)

ของการตอบสนอง (Latency) และอัตราเฟรม (Frame Rate) เพื่อพิจารณาความต่อเนื่องของการแสดงผล และความเหมาะสมของการโต้ตอบแบบเรียลไทม์

2) การตรวจสอบความถูกต้องของเกมเชิงโต้ตอบ เป็นการประเมินความสอดคล้องของกลไกการโต้ตอบในเกมกับหลักการฟื้นฟูเชิงหน้าที่ ผ่านการทดลองใช้งานระบบในสถานการณ์จำลองและการรับรองโดยผู้เชี่ยวชาญด้านเวชศาสตร์ฟื้นฟูและกิจกรรมบำบัด

3) การทดสอบความน่าเชื่อถือของปัญญาประดิษฐ์ ใช้ชุดข้อมูลจำลอง 100 กรณีเพื่อสร้างตารางความสับสน (Confusion Matrix) และประเมินค่าความแม่นยำ ความเที่ยง ความไว และอัตราการพลาดตรวจจับในกลุ่มการจำแนกประเภทข้อมูลโดยให้ความสำคัญกับการลดความผิดพลาดแบบไม่แจ้งเตือน

4) การประเมินระบบแบบฮิวริสติก เป็นการประเมินการใช้งานระบบโดยรวมผ่านการสาธิตระบบ การสัมภาษณ์เชิงลึก และแบบประเมินจากผู้เชี่ยวชาญเพื่อรวบรวมข้อเสนอแนะด้านการออกแบบ การใช้งาน และประโยชน์ต่อการติดตามและตัดสินใจในทางคลินิก

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1) ข้อมูลเชิงปริมาณ ใช้สำหรับวิเคราะห์สมรรถนะเชิงวิศวกรรมของระบบและความสามารถของปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสานโดยรายงานค่าจากอัตราการสูญเสียเฟรม ความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่ อัตราเฟรม ความหน่วงของการตอบสนอง และตารางความสับสน ได้แก่ ความเชื่อมั่น ความถูกต้อง ความไว และ F1-Score รวมทั้งช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในตัวชี้วัดหลัก และวิเคราะห์ข้อมูลประเมินการใช้งานต้นแบบด้วยสถิติเชิงพรรณนา เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2) ข้อมูลเชิงคุณภาพ ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อเสนอแนะจากผู้เชี่ยวชาญ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เนื้อหาตาม 4 ขั้นตอน ได้แก่ การถอดความ การลงรหัส การจัดกลุ่มประเด็น และการสรุปผลเชิงตารางตามรูปแบบที่กำหนดใช้เทคนิคการตรวจสอบแบบสามเส้า (Investigator Triangulation) และกำหนดให้ค่าความสอดคล้องของผู้ลงรหัสไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ก่อนสรุปผลร่วมกัน

4. ผลการดำเนินการศึกษา

การประเมินประสิทธิภาพของระบบฟื้นฟูสมรรถภาพผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมองด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ร่วมกับปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน ได้ผ่านการตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหาของเครื่องมือวิจัย (IOC = 0.67–1.00) โดยผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ 3 มิติหลัก ได้แก่ สมรรถนะเชิงวิศวกรรมของระบบ ความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ ความแม่นยำของสถาปัตยกรรมปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และการประเมินความเหมาะสมของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ

4.1 สมรรถนะเชิงวิศวกรรมเทคโนโลยีความจริงเสริม

ผลการทดสอบอัลกอริทึมการติดตามการเคลื่อนไหวในสภาพแวดล้อมจำลอง 3 รูปแบบ พบว่าระบบมีความเสถียรในระดับดี โดยมีอัตราการสูญเสียเฟรมเฉลี่ยร้อยละ 5.36 (ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อยู่ระหว่าง 4.8–5.9) และมีความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่ เท่ากับ 10.51 พิกเซล (ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อยู่ระหว่าง 9.8–11.2 พิกเซล) แม้ในสถานะที่มีการบดบังหรือแสงน้อย ระบบยังสามารถรักษาอัตราเฟรมในการแสดงผลได้ที่ 49.6–58.4 FPS และมี

บทความวิจัย (Research Article)

ความหน่วงของระบบอยู่ที่ 45.2–68.7 มิลลิวินาที (ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อยู่ระหว่าง 42.1–70.3 มิลลิวินาที) เมื่อพิจารณาเชิงเปรียบเทียบกับแนวทางที่ใช้อุปกรณ์สวมใส่ ระบบความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ มีข้อได้เปรียบด้านความสะดวกสบาย และลดการสวมใส่อุปกรณ์ขณะที่สมรรถนะด้านการตอบสนองยังอยู่ในระดับที่สนับสนุนการโต้ตอบแบบเรียลไทม์ได้ อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบนี้ยังเป็นการเปรียบเทียบเชิงอ้างอิงจากวรรณกรรม และยังไม่ได้เป็นการทดสอบแบบคู่ขนานกับอุปกรณ์มาตรฐานภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ดังนั้นจึงควรตีความว่าเป็นข้อมูลเชิงศักยภาพ มากกว่าข้อสรุปเชิงยืนยันว่าระบบสามารถทดแทนอุปกรณ์สวมใส่ได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้แดชบอร์ดยังสามารถประมวลผลและสังเคราะห์รายงานทางคลินิกได้ภายใน 1.85 วินาที ซึ่งสะท้อนว่าระบบมีศักยภาพในการประมวลผลข้อมูลและส่งกลับผลลัพธ์ในเวลาที่เหมาะสมต่อการใช้งานแบบโต้ตอบ

4.2 ความแม่นยำของสถาปัตยกรรมปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน

ผลการทดสอบแดชบอร์ด ด้วยชุดข้อมูลทางคลินิกจำลองจำนวน 100 กรณีศึกษาพบว่าสถาปัตยกรรมแบบผสมผสานระหว่างระบบอิงกฎและโมเดลภาษาขนาดใหญ่ มีค่าความแม่นยำ ร้อยละ 92.00 (ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อยู่ระหว่าง 88.5–95.5) ค่าความเที่ยง ร้อยละ 93.33 ค่าความไว ร้อยละ 89.36 (ช่วงความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อยู่ระหว่าง 84.2–94.5) และค่า F1-Score ร้อยละ 91.30

ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสานสามารถจำแนกกรณีที่มีความผิดปกติได้ในระดับที่น่าพอใจ โดยเฉพาะค่าความไวที่อยู่ในระดับสูง ซึ่งบ่งชี้ว่าระบบมีแนวโน้มการตรวจจับกรณีที่ต้องเฝ้าระวังในสัดส่วนที่ผิดพลาดค่อนข้างต่ำ

อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ในส่วนนี้มาจากข้อมูลจำลอง ไม่ใช่ข้อมูลจากผู้ป่วยจริง ดังนั้นจึงยังไม่ควรสรุปโดยตรงถึงประสิทธิภาพเชิงคลินิกในสถานการณ์ใช้งานจริง แต่สามารถใช้เป็นหลักฐานเชิงต้นแบบที่สนับสนุนศักยภาพการใช้ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสานในการเฝ้าระวัง และสรุปผลข้อมูลเบื้องต้นได้

4.3 การประเมินและการรับรองระบบโดยผู้เชี่ยวชาญ

การประเมินจากกลุ่มผู้เชี่ยวชาญแบบ สหวิทยาการ 9 ท่าน ได้แก่ ด้านวิศวกรรมซอฟต์แวร์และปัญญาประดิษฐ์ ด้านเทคโนโลยีเกมสื่อประสม และด้านเวชศาสตร์ฟื้นฟู ให้ผลลัพธ์เชิงบวกในระดับสูง โดยด้านสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์ มีความเหมาะสมระดับมากที่สุด (Mean = 4.75, S.D. = 0.46) และด้านความสอดคล้องเชิงหน้าที่ ของเกมมีความเหมาะสมระดับมากที่สุด (Mean = 4.59, S.D. = 0.49)

ผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าแนวคิดการใช้ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสานช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์ โดยเฉพาะในแง่ของการลดความเสี่ยงจากการให้คำตอบที่ผิดของปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และทำให้โครงสร้างการรายงานผลสามารถตรวจสอบย้อนกลับได้มากขึ้น ขณะเดียวกันกลไกของซีเรียสเกมและรูปแบบการโต้ตอบในระบบยังมีความสอดคล้องกับการเคลื่อนไหวเชิงหน้าที่ของผู้ใช้ในระดับที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในบริบทฟื้นฟู

แม้ผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญจะสนับสนุนศักยภาพของระบบอย่างชัดเจน แต่ข้อสรุปในฐานะการประเมินเชิงความเหมาะสมของต้นแบบ ไม่ใช่ข้อมูลการยืนยันผลลัพธ์ทางคลินิกโดยตรง ทั้งนี้ผู้เชี่ยวชาญยังเสนอว่าควรมีการปรับปรุงการจัดการระบบเบื้องหลัง และการออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้ให้เหมาะสมยิ่งขึ้นกับบริบทของผู้สูงอายุในระยะต่อไป

บทความวิจัย (Research Article)

ซึ่งสามารถสรุปภาพรวมผลสัมฤทธิ์ของระบบและตัวชี้วัดทางสถิติที่พัฒนาขึ้นเพื่อการศึกษาวิจัย

เมื่อพิจารณาผลการประเมินโดยรวม พบว่าเครื่องมือวิจัยมีความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหาอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยมีค่าดัชนีความสอดคล้อง (IOC) อยู่ระหว่าง 0.67–1.00 แสดงว่าเครื่องมือที่ใช้ในการประเมินมีความเหมาะสมและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในด้านสมรรถนะของระบบความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์มีเสถียรภาพในระดับที่ดี โดยมีอัตราการสูญเสียเฟรมเฉลี่ยร้อยละ 5.36 และมีความคลาดเคลื่อนเชิงพื้นที่เท่ากับ 10.51 พิกเซล ขณะที่อัตราเฟรมต่อวินาทีอยู่ในช่วง 49.6–58.4 และความหน่วงของระบบอยู่ในช่วง 45.2–68.7 มิลลิวินาที ซึ่งสะท้อนว่าระบบสามารถตอบสนองได้ในระดับที่เหมาะสมต่อการโต้ตอบแบบเรียลไทม์ สำหรับความแม่นยำของสถาปัตยกรรม พบว่าระบบมีค่าความแม่นยำ ร้อยละ 92.00 ซึ่งสะท้อนความถูกต้องโดยรวมของการจำแนกผลลัพธ์ ค่าความเที่ยงตรง ร้อยละ 93.33 แสดงว่าการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบมีความถูกต้องสูง ขณะที่ค่าความไวร้อยละ 89.36 สะท้อนว่าระบบสามารถตรวจจับกรณีที่เกิดผิดปกติจริงได้ในสัดส่วนสูง และค่า F1-Score ร้อยละ 91.30 บ่งชี้ว่าระบบมีความสมดุลที่ดีระหว่างความถูกต้องของการแจ้งเตือนและความสามารถในการตรวจจับความผิดปกติ

ในด้านการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ พบว่าด้านสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์และปัญญาประดิษฐ์มีค่าเฉลี่ย 4.75 และด้านความสอดคล้องทางการแพทย์และซีเรียสเกมมีค่าเฉลี่ย 4.59 ซึ่งอยู่ในระดับมากที่สุดทั้งสองด้าน แสดงให้เห็นว่าผู้เชี่ยวชาญมองว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมีความเหมาะสมทั้งในเชิงเทคนิคและเชิงการประยุกต์ใช้ในบริบทการฟื้นฟูสมรรถภาพ

โดยสรุประบบต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีจุดเด่นใน 3 ด้าน ได้แก่ 1) สมรรถนะเชิงวิศวกรรมของความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์อยู่ในระดับที่รองรับการโต้ตอบแบบเรียลไทม์ 2) ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสานให้ผลการจำแนกข้อมูลจำลองในระดับที่น่าพอใจ และมีความไวสูงซึ่งเหมาะต่อบทบาทการเฝ้าระวัง และ 3) ผู้เชี่ยวชาญประเมินว่าระบบมีความเหมาะสมในระดับสูงทั้งด้านโครงสร้างระบบและความสอดคล้องเชิงฟังก์ชัน อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ทั้งหมดนี้ยังอยู่ภายใต้ขอบเขตของการประเมินต้นแบบในสภาพแวดล้อมจำลองและการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญจึงควรมีการศึกษาต่อผู้ป่วยจริงในอนาคต

5. สรุปและอภิปรายผล

การพัฒนาระบบฟื้นฟูสมรรถภาพทางไกลสำหรับผู้ป่วยโรคหลอดเลือดสมอง แสดงให้เห็นศักยภาพของการบูรณาการความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ ปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และแนวคิดซีเรียสเกมในระบบต้นแบบเดียว โดยผลการประเมินชี้ว่าระบบสามารถรองรับการโต้ตอบแบบเรียลไทม์ในระดับที่น่าพอใจ และมีคุณสมบัติที่เอื้อต่อการใช้งานผ่านอุปกรณ์พื้นฐาน

ในด้านสมรรถนะเชิงวิศวกรรม ระบบสามารถรักษาอัตราเฟรม และความหน่วงได้ในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้งานแบบโต้ตอบ ซึ่งสะท้อนว่าการใช้มีเดียไปป์ และโครงสร้างประมวลผลที่ค่อนข้างเบาช่วยให้ระบบสามารถทำงานผ่านกล้องเว็บแคมทั่วไปได้โดยไม่เกิดความหน่วงมากเกินไป เมื่อพิจารณาในเชิงการประยุกต์ใช้ จุดเด่นของความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ คือ การลดภาระการสวมใส่อุปกรณ์และความยุ่งยากในการติดตั้ง อย่างไรก็ตามยังไม่สามารถสรุปว่าระบบสามารถทดแทนอุปกรณ์สวมใส่อุปกรณ์ได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากยังไม่มีทดสอบเปรียบเทียบแบบคู่ขนาน

บทความวิจัย (Research Article)

ในด้านการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์ให้ผลลัพธ์ในระดับที่น่าพอใจจากชุดข้อมูลจำลอง โดยค่าความไวที่อยู่ในระดับสูงสนับสนุนว่าระบบมีศักยภาพต่อการลดการพลาดตรวจจับกรณีที่ควรเฝ้าระวัง เหตุผลสำคัญคือการใช้ชุดกฎเกณฑ์ และตรรกะเป็นกลไกคัดกรองเชิงตรรกะก่อนส่งต่อให้โมเดลภาษาขนาดใหญ่ สังเคราะห์ผล ช่วยลดความเสี่ยงจากการให้คำอธิบายที่ไม่สอดคล้องกับข้อมูลเชิงตัวเลข และทำให้ผลลัพธ์สามารถตรวจสอบย้อนกลับได้มากกว่าการใช้โมเดลภาษาขนาดใหญ่เพียงอย่างเดียว

ในด้านการออกแบบเชิงฟังก์ชัน การประเมินจากผู้เชี่ยวชาญสะท้อนว่าระบบมีความเหมาะสมทั้งในส่วนของการสร้างซอฟต์แวร์ และการออกแบบกลไกเกมพื้นฟูภายใต้กรอบการออกแบบซีเรียสเกมร่วมกับการตอบสนองเชิงโต้ตอบ สามารถช่วยเพิ่มแรงจูงใจ และส่งเสริมการฝึกซ้ำได้ อย่างไรก็ตามการตรวจสอบความถูกต้องโดยผู้เชี่ยวชาญยังไม่ใช้ข้อมูลเชิงผลลัพธ์จากผู้ป่วยจริง

จุดเด่นของการพัฒนาระบบเน้นการบูรณาการซึ่งเชื่อมการติดตามการเคลื่อนไหวแบบไร้จุดมาร์กเกอร์ การวิเคราะห์ด้วยปัญญาประดิษฐ์แบบผสมผสาน และการนำเสนอผ่านแดชบอร์ดไว้ในแพลตฟอร์มเดียว เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการวิจัยทางคลินิกในระยะยาว

5.1 ข้อจำกัดของงานวิจัย

สำหรับการพัฒนาระบบในครั้งนี้พบว่า ค่าความแม่นยำและค่าความเร็วของแดชบอร์ด ได้มาจากการทดสอบด้วยข้อมูลทางคลินิกจำลองจำนวน 100 กรณีศึกษา แม้ระบบจะสามารถแยกแยะความผิดปกติได้ดี แต่ยังไม่ได้ถูกนำไปประเมินผลเชิงปริมาณกับพฤติกรรมการเคลื่อนไหวที่ซับซ้อนของผู้ป่วยจริง ซึ่งประสิทธิภาพของความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์นั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของกล้องเว็บแคม และสภาพแวดล้อมของผู้ใช้งาน หากใช้งานในห้องที่มีแสง

สว่างไม่เพียงพอ ย้อนแสง หรือมีสิ่งของบดบังบริเวณฉากหลัง อาจทำให้อัตราการสูญเสียเฟรมเพิ่มขึ้นและความแม่นยำลดลง

งานวิจัยนี้ยังขาดการทดสอบเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนกับอุปกรณ์มาตรฐาน เช่น การจับการเคลื่อนไหว หรือเซนเซอร์แบบสวมใส่ จึงยังไม่สามารถสรุปเชิงยืนยันได้ว่าระบบมีประสิทธิภาพเทียบเท่าอุปกรณ์มาตรฐาน

ผลการประเมินในบทความนี้อยู่ในระดับต้นแบบ โดยอาศัยข้อมูลจำลอง และการรับรองจากผู้เชี่ยวชาญเป็นหลัก ดังนั้นจึงยังไม่ควรสรุปถึงประสิทธิภาพเชิงคลินิกโดยตรง

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

ควรนำระบบไปทดสอบกับกลุ่มตัวอย่างผู้ป่วยจริงในระยะเวลานานขึ้น และใช้รูปแบบการวิจัยที่มีเครื่องมือประเมินมาตรฐานทางคลินิก เช่น แบบประเมินความบกพร่องของระบบประสาท (Fugl-Meyer Assessment) และแบบประเมินการทรงตัวขณะทำกิจกรรม (Berg Balance Scale) เพื่อยืนยันผลลัพธ์อย่างเป็นระบบควรทดสอบเปรียบเทียบกับแนวทางมาตรฐาน เช่น เซนเซอร์แบบสวมใส่ หรือการตรวจจับการเคลื่อนไหว เพื่อยืนยันข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของระบบความจริงเสริมแบบไร้จุดมาร์กเกอร์อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

ดังนั้นควรต่อยอดกลไกซีเรียสเกมและแดชบอร์ดให้รองรับกลุ่มผู้ป่วยทางระบบประสาทอื่น เช่น โรคพาร์กินสัน หรือภาวะสมองเสื่อม รวมถึงพัฒนาเครื่องมือที่ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจของบุคลากรทางการแพทย์

บทความวิจัย (Research Article)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Moldoveanu et al., “Gamified virtual reality in post-stroke neurorehabilitation: A systematic review,” *Frontiers in Virtual Reality*, vol. 7, Art. no. 1737482, 2026, doi: 10.3389/frvir.2026.1737482.
- [2] C. Lugaresi et al., “MediaPipe: A framework for building perception pipelines,” *arXiv preprint arXiv:1906.08172*, 2019, doi: 10.48550/arXiv.1906.08172.
- [3] S. Rasetto et al., “ReHAB Playground: A DL-based framework for game-based hand rehabilitation,” *Future Internet*, vol. 17, no. 11, Art. no. 522, 2025, doi: 10.3390/fi17110522.
- [4] F. Jiang et al., “Artificial intelligence in healthcare: Past, present and future,” *Stroke and Vascular Neurology*, vol. 2, no. 4, pp. 230-243, 2017, doi: 10.1136/svn-2017-000101.
- [5] World Health Organization, *International Classification of Functioning, Disability and Health (ICF)*. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2001.
- [6] R. Zou et al., “MIND: Empowering mental health clinicians with multimodal data insights through a narrative dashboard,” in *Proc. CHI Conf. Human Factors in Computing Systems (CHI)*, 2026, doi: 10.1145/3772318.3790529.
- [7] J. A. Kleim and T. A. Jones, “Principles of experience-dependent neural plasticity: Implications for rehabilitation after brain damage,” *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, vol. 51, no. 1, pp. 225-239, 2008, doi: 10.1044/1092-4388(2008/018).
- [8] C. M. Meira Jr. and M. Massa, “Genetic and environmental influences on perceptual-motor abilities,” *Psychology*, vol. 8, pp. 1669-1678, 2017, doi: 10.4236/psych.2017.811110.
- [9] A. Diamond, “Executive functions,” *Annual Review of Psychology*, vol. 64, pp. 135-168, 2013, doi: 10.1146/annurev-psych-113011-143750.
- [10] E. Weissblueth and Y. Nissim, “The contribution of virtual reality to social and emotional learning in pre-service teachers,” *Creative Education*, vol. 9, pp. 1551-1564, 2018, doi:10.4236/ce.2018.910114.
- [11] F. Zhang et al., “MediaPipe Hands: On-device real-time hand tracking,” *arXiv preprint arXiv:2006.10214*, 2020, doi: 10.48550/arXiv.2006.10214.
- [12] S. Karthik, S. Bhaggiaraj, E. S. Soji, L. S. Deve, S. S. Priscila, and S. S. Rajest, “Real-time hand gesture recognition for stroke rehabilitation using deep learning approach,” *AVE Trends in Intelligent Computing Systems*, vol. 1, no. 3, pp. 157-172, 2024.
- [13] A. Faux-Nightingale et al., “Exploring stroke survivors’ and physiotherapists’

บทความวิจัย (Research Article)

- perspectives of the potential for markerless motion capture technology in community rehabilitation,” *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 21, Art. no. 168, 2024, doi: 10.1186/s12984-024-01467-x.
- [14] P. Y. Hsu et al., “The evolution of augmented reality to augment physical therapy: A scoping review,” *Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering*, vol. 11, Art. no. 20556683241252092, 2024, doi: 10.1177/20556683241252092.
- [15] K. Mitgutsch and N. Alvarado, “Purposeful by design?: A serious game design assessment framework,” in *Proc. International Conference on the Foundations of Digital Games (FDG)*, 2012, pp. 121–128, doi: 10.1145/2282338.2282364.
- [16] E. L. Deci and R. M. Ryan, “The ‘what’ and ‘why’ of goal pursuits: Human needs and the self-determination of behavior,” *Psychological Inquiry*, vol. 11, no. 4, pp. 227–268, 2000, doi: 10.1207/S15327965PLI1104_01.
- [17] K. Hayase, “Concerns involving the self: What is the real target of anxiety, regret, or worry, when things do not go right for you? More evidence from Sweden and the United States,” *Psychology*, vol. 9, pp. 1475–1515, 2018, doi: 10.4236/psych.2018.96090.
- [18] B. F. Skinner, *The Behavior of Organisms: An Experimental Analysis*. New York, NY, USA: Appleton-Century, 1938.
- [19] E. H. Shortliffe, *Computer-Based Medical Consultations: MYCIN*. New York, NY, USA: Elsevier, 1976.
- [20] A. J. Thirunavukarasu et al., “Large language models in medicine,” *Nature Medicine*, vol. 29, no. 8, pp. 1930–1940, 2023, doi: 10.1038/s41591-023-02448-8.
- [21] X. Meng et al., “The application of large language models in medicine: A scoping review,” *iScience*, vol. 27, Art. no. 109713, 2024, doi: 10.1016/j.isci.2024.109713.
- [22] J. Long, “Large language model guided tree-of-thought,” *arXiv preprint arXiv:2305.08291*, 2023, doi: 10.48550/arXiv.2305.08291.
- [23] A. Y. Bischof et al., “A collection of components to design clinical dashboards incorporating patient-reported outcome measures: Qualitative study,” *Journal of Medical Internet Research*, vol. 26, Art. no. e55267, 2024, doi: 10.2196/55267.
- [24] D. J. Hekman et al., “Dashboarding to monitor machine-learning-based clinical decision support interventions,” *Applied Clinical Informatics*, vol. 15, pp. 164–169, 2024, doi: 10.1055/a-2219-5175.
- [25] P. Dullabh et al., “Advancing patient-centered clinical decision support in

บทความวิจัย (Research Article)

today's health care ecosystem: Key
themes from the Clinical Decision
Support Innovation Collaborative's 2023
Annual Meeting," *JAMIA Open*, vol. 7, no.
4, Art. no. ooae109, 2024, doi:
10.1093/jamiaopen/ooae109.