

Review Paper

The Role of Artificial Intelligence in Human Gait Biomechanics: A Systematic Review

Leila Saburi¹ , Ebrahim Piri² , *AmirAli Jafarnezhadgero²

1. Department of Sports Biomechanics, Faculty of Sports Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
2. Department of Sports Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.



Citation Saburi L, Piri E, Jafarnezhadgero AA. The Role of Artificial Intelligence in Human Gait Biomechanics: A Systematic Review. *Archives of Rehabilitation*. 2026; 27(1):16-33. <https://doi.org/10.32598/RJ.27.1.4128.2>

<https://doi.org/10.32598/RJ.27.1.4128.2>

ABSTRACT

Objective This systematic review explores the transformative role of artificial intelligence (AI) in gait biomechanics, aiming to categorize current methodologies and evaluate their clinical efficacy.

Materials & Methods By searching major databases including PubMed, Scopus, and Web of Science, the study analyzed research published between 2020 and 2025. Following rigorous selection criteria focusing on experimental studies of human gait using AI, wearable sensors, or motion capture 13 high-quality articles were selected and assessed via the Downs and Black scale.

Results The findings highlight that wearable sensors are the predominant data collection tool (53.8%), followed by markerless systems and deep learning frameworks. The synthesis of evidence indicates that integrating wearable technology with machine learning (ML) models specifically stack and support vector regression (SVR) is exceptionally effective for classifying gait episodes, achieving a high mean sensitivity of 0.961 and a mean absolute error (MAE) of under 2.1% for primary biomechanical parameters. Advanced architectural combinations also showed significant promise; for instance, the ResNet101 and Naïve Bayes hybrid proved highly reliable for posture classification (sensitivity 0.87). Similarly, long short-term memory (LSTM) networks demonstrated remarkable accuracy in short-term gait path prediction within virtual reality settings, though long-term forecasting remains dependent on multi-modal data, such as eye-tracking. Finally, the application of smart insoles paired with random forest (RF) algorithms suggests substantial potential for identifying digital biomarkers in conditions like sarcopenia.

Conclusion In conclusion, while AI-driven approaches offer high precision in gait analysis, current research is often limited by small sample sizes. Future studies should prioritize larger cohorts to validate these models and enhance their clinical translation. This review confirms that AI, particularly when paired with high-fidelity sensor data, represents a powerful frontier for diagnosing and managing diverse neurological and musculoskeletal pathologies.

Keywords Artificial intelligence (AI), Biomechanical analysis, Walking

Received: 03 Dec 2025

Accepted: 02 Feb 2026

Available Online: 01 Apr 2026

* Corresponding Author:

AmirAli Jafarnezhadgero, Associate Professor.

Address: Department of Sports Biomechanics, Faculty of Educational Sciences and Psychology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Tel: +98 (910) 5146214

E-Mail: amiralijafarnezhad@gmail.com



Copyright © 2026 The Author(s);
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

English Version

Introduction

Gait is one of the most fundamental human motor activities that plays a decisive role in neuromuscular health, balance, functional independence, and quality of life (QoL). Any change in gait patterns can indicate the occurrence or progression of motor disorders, increased risk of falls, and decreased ability to perform daily activities. Therefore, accurate and quantitative gait analysis is considered one of the key tools in assessing motor function, diagnosing neuroskeletal disorders, and monitoring the effectiveness of therapeutic and rehabilitation interventions [1-3]. Despite its clinical importance, traditional gait analysis methods are mainly limited to laboratory environments and rely on complex optical systems, expensive equipment, and time-consuming analyses that require specialized personnel to perform, limiting their generalizability and widespread use in real-world settings [4].

In recent years, significant advances in the field of artificial intelligence (AI) have had a significant impact on human movement analysis and sports biomechanics. The development of advanced computational methods and the reduction of data processing costs have made computer-based analyses more technically and economically feasible [5]. AI is increasingly being used in the fields of sport and movement sciences for performance analysis, movement pattern recognition, decision-making optimization, and prediction of movement behavior, and has revolutionized traditional approaches to evaluation and analysis. This technology has increased the accuracy of movement analysis, scoring, and prediction of athlete performance and even fan behavior, opening new horizons in understanding the complexity of human movement [6].

However, many existing studies have taken a largely descriptive approach, focusing more on demonstrating the general capabilities of AI than critically analyzing its role in specific problems such as human gait dynamics [7]. Along with the development of artificial intelligence, technological advances in small and lightweight wearable sensors, especially inertial measurement units, have enabled the recording of movement data over long periods of time and in natural conditions of daily life. These sensors have created new opportunities for researchers and clinicians to study gait outside of controlled laboratory environments and in real-world contexts. In contrast to classical gait indices, such as speed, stride length, and stride time, accelerometric and gyroscopic data allow the extraction of a wide range of advanced dynamic indices that describe features such as

variability, regularity, synchronization, symmetry, smoothness of movement, postural stability, and predictability of gait [8, 9]. In this regard, recent studies have shown that combining data from wearable sensors with artificial intelligence algorithms can be used as a digital biomarker for screening and early diagnosis of neurological diseases. In particular, changes in gait patterns have been proposed as a non-invasive and cost-effective indicator for identifying diseases such as dementia. The development of these digital biomarkers is expected to follow the development of clinical biomarkers; however, challenges, such as clinical validation, interpretation of results, and reliability of models remain [7].

On the other hand, machine learning (ML) and deep learning algorithms have been recognized as powerful tools for analyzing complex human movement data. Convolutional neural networks in processing image and video motion data, and recurrent neural networks (Recurrent neural network [RNN] and long short-term memory [LSTM]) in analyzing time-serial data, have enabled more accurate identification of gait patterns [10]. These models are able to extract subtle features such as step incoordination, postural imbalances, and body dynamic deviations from sensory or image data, thus playing an important role in the early diagnosis of neuroskeletal disorders [11]. In addition, the integration of multi-source data from wearable sensors and machine vision systems has enabled more comprehensive modeling of gait biomechanics, paving the way for continuous monitoring of gait status and prediction of the risk of falls or muscle injuries.

Despite the significant growth of studies on the application of AI in gait analysis, previous reviews have often examined algorithms or data types separately, with little attention paid to systematic and critical comparisons of different approaches, methodological limitations, challenges of clinical implementation, and the reliability of results. Therefore, the main research gap lies in the lack of a comprehensive and critical review that can comprehensively examine the application of AI algorithms in the biomechanical analysis of human gait and analyze the differences, advantages, and shortcomings of approaches based on wearable sensors and machine vision. The innovation of the present study lies in responding to this need; so that this study goes beyond a mere description of the technologies to critically evaluate the accuracy, reliability, and clinical applicability of AI-based methods and outlines future research directions and potential applications in sports medicine, rehabilitation, and movement sciences. Accordingly, the aim of the present study is a comprehensive and critical review of artificial intelligence approaches in the biomechanical analysis of human gait.

Materials and Methods

This study was a systematic review. A search for articles between 2020 and 2025 was conducted in the Web of Science citation databases, the [Center for Scientific Information and Academic Jihad \(SID\)](#), [Magiran](#), [Scopus](#), the [Islamic World Science Citation Database](#), [PubMed](#), and [Google Scholar](#) in both Persian and English. The search strategy included keywords related to artificial intelligence, machine learning, deep learning, walking, gait analysis, biomechanics, kinetics, and kinematics, and combined them with “AND” and “OR” operators. The inclusion criteria included experimental or applied studies using artificial intelligence in gait analysis, using real-world data from human populations (healthy individuals or neurological, muscular, or musculoskeletal patients), providing performance indicators of models (such as accuracy, sensitivity, specificity) or measurable biomechanical parameters, focusing on human gait with direct data recording or wearable/imaging sensors, and publication in Persian or English. Study designs included cross-sectional, algorithm validation, and clinical prediction/diagnostic studies. The exclusion

criteria included theoretical studies or literature reviews without data, editorials, case reports, animal studies or simulations without real human data, use of classical statistical methods without AI, articles with incomplete or duplicate access, conference proceedings, and studies with low methodological quality. As a result, of the total 85 identified articles, 53 articles were excluded due to lack of focus on walking or duplication, 19 articles were excluded due to review or lack of use of AI, and finally 13 articles were selected for the final analysis ([Table 1](#)) ([Figure 1](#)).

The quality of the articles was assessed using the Dunn and Black questionnaire [23]. In case of any discrepancy in the scoring between the authors, the items in question were reviewed individually, and disagreements were resolved through group consultation and discussion to minimize the possibility of errors in the evaluation process. Based on the results obtained, the average quality score of the articles reviewed in this study, according to the Dunn and Black questionnaire, was 20.67%. It is worth noting that the following relationship was used to calculate the percentage of quality of the articles in the

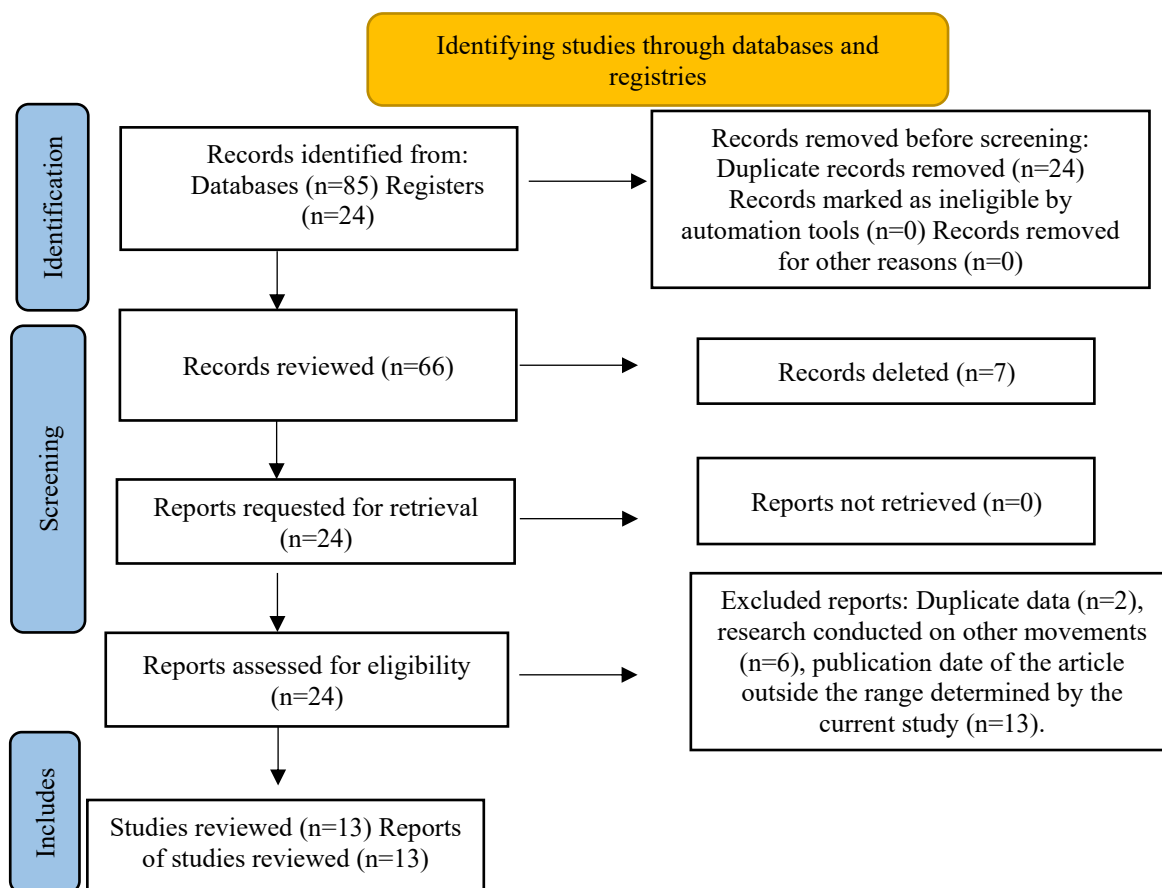


Figure 1. The process of reviewing and selecting articles

Table 1. Studies based on the use of artificial intelligence during walking

Author/ Year	Purpose	Sample	Protocol	Tools	Result
Schoenwether et al. 2025 [1]	Reliability of AI-based markerless motion capture in gait analysis of healthy adults	9 healthy adults	Gait	KinaTrax system	The KinaTrax markerless motion capture system provides reliable spatiotemporal measurements within and between sessions along with reliable kinematic measurements in the sagittal and frontal planes.
Ripic et al. 2023 [2]	Assessing the accuracy of spatiotemporal parameters in a marker-free system with an updated markerless model, coordinate-based gait events and speed on adults with Parkinson's disease	57 patients with Parkinson's disease	Gait	Markerless motion recording system	The interclass correlation coefficients showed excellent agreement between the markerless system and a marker-based reference system for all spatial parameters. The temporal variables were similar, except for oscillation time, which showed good agreement. The agreement correlation coefficients were similar for all items except oscillation time, which showed moderate to almost perfect agreement.
Peimankar et al. 2023 [3]	Development of a ML algorithm for analyzing accelerometer data and accurately classifying walking activity in patients with walking problems, especially dementia and Alzheimer disease.	20 participants with walking problems	Gait	Sensor (accelerometer installed on participants)	Experimental results confirmed that the proposed models (especially Stack) are capable of correctly classifying gait episodes despite the challenging placement of the sensor on the back of patients with gait disorders.
Obuchi et al. 2024 [4]	Feasibility study of linear acceleration and angular velocity analysis with the help of AI while walking	879 people without dementia	Gait	Sensor	The average sensitivity, specificity, and area under the curve of the models were 0.961, 0.643, and 0.833, respectively, in the 30 experimental data sets.
Galasso et al. 2023 [5]	Predicting physical activity level from kinematic gait data using ML techniques	37 healthy individuals (24 males and 13 females)	Gait	Sensor Treadmill - Wearable wireless Inertial measurement unit (IMU) sensors	Reducing the feature space increases performance for most of the classifiers considered. Analysis of the best performing classifiers (KNN, RF, and RSESLib KNN) showed the behavior of accuracy with varying the number of features considered,
Bauman et al. 2022 [6]	Development of a multi-class classifier for simultaneous detection of activity (normal walking, stair climbing, stair descending) and gait phase (stance and swing)	80 healthy people	Gait	Sensor: IMU data collected from thigh and shank	When the six-state model was used as a simple binary classifier (standing/swinging only, regardless of activity type), it achieved an accuracy of 97.1%, which may be sufficient for control in real-world lower limb exoskeletons.
Bacon et al. 2022 [7]	Association of gait metrics with mild unilateral knee pain while walking using ML	2066 people with unilateral pain when walking	Gait	Sensor	Sensors are effectively used to assess gait parameters. In particular, the reliability of data collection from locations such as the waist, thigh, and foot has been confirmed.
Gou et al. 2021 [8]	The main goal of this research was to design and validate a self-powered smart cane that, through TENG connected to leg movement, can simultaneously generate the energy necessary for its operation, and use deep learning algorithms to accurately and in real-time monitor the user's movement status, identity, and level of disability, providing vital information to help improve safety and clinical evaluation.	10 elderly people with mobility disabilities	Gait	TENG	The triboelectric dogs were able to self-supply the necessary energy from their slow steps and simultaneously, with an accuracy of over 95%, recognize the person's identity, assess motor disability, and movement status using deep learning models, demonstrating the system's success in self-powering and real-time data analysis as the user walked.

Author/ Year	Purpose	Sample	Protocol	Tools	Result
Zhang et al. 2020 [9]	Accurate analysis of walking and running strides using machine learning models	14 healthy people	Gait	Wearable Sensor: Custom-engineered smart shoe soles called sport sole that are equipped with sensors. ML model: SVR.	The SVR models showed excellent intraclass correlation coefficients (ICC) across all analyzed parameters. The MAE% for gait stride length, speed, and foot clearance distance were 1.37, 1.23, and 2.08 percent, respectively. These results demonstrate the high accuracy of this ML approach for improving the performance of wearable sensors.
Bremer et al. 2021 [10]	Predicting future position from natural gait and eye movements with ML	18 healthy people	Gait	ML model (gated recurrent unit [GRU] and LSTM)	The LSTM model using position and orientation data provides the best prediction in the short term (50 ms) with an error of 14.5 mm, while the best long-term prediction (2.5 s) with an error of 73.65 cm was achieved by the LSTM model that also included eye tracking data; these findings confirm that LSTM models are suitable for predicting walking paths in VR environments and that eye tracking data has a significant advantage, especially for long term predictions at short distances.
Lee et al. 2022 [11]	Identifying the body posture of young people in walking videos using a hybrid artificial intelligence method	35 healthy young adults	Gait	ML algorithms, mobile phone camera, non-invasive tracking devices	The proposed approach, which combines mobile phone camera recording, cloud storage, and fusion deep learning, successfully performed body posture estimation and classification. The maximum specificity and sensitivity obtained using the combination of ResNet101 model and Naïve Bayes classifier were 0.84 and 0.87, respectively.
Salami et al. 2025 [24]	Investigating the relationship between gait kinematics and joint torques by associating kinematic inputs with their corresponding output labels	622 patients with cerebral palsy	Gait	AI model - clinical labeling system (this system divides the results into three categories based on normalized root mean square error (nRMSE): Green: acceptable, yellow: cautiously acceptable, red: unacceptable)	The hip joint showed the highest population of green labels (84%), while the ankle joint had the lowest (50%). Regression differences in joint kinematic scores and gait profile were observed across all labels. The LDA (latent dirichlet allocation) model achieved an accuracy of 85.2% and an F-score of 92% for predicting green labels in hip joint torque. Furthermore, more severe patient conditions were associated with increased red label predictions.
Kim et al. 2023 [25]	Investigation of sarcopenia classification model for musculoskeletal patients using smart insoles and gait analysis with artificial intelligence	83 patients with sarcoidosis	Gait	Smart insole and motion analysis system with artificial intelligence	The convergence of precise sensor technologies (smart soles) with advanced image processing methods (body posture estimation), and their analysis by robust ML models, such as RF, provides a powerful approach to extract vital digital biomarkers, especially in key areas of the hip and ankle, paving the way for more effective diagnosis and management of physical disorders such as sarcopenia.

relevant column: $100 \times (31 / \text{total score}) = \text{article quality}$ (in percentage). According to Table 2, the quality of the articles was assessed using the Dunn and Black questionnaire [23]. This questionnaire consists of 27 questions, each question being scored between 0 and 1; with the exception of question 5, which is scored 0, 1, and 2 points, such that the number “1” indicates approval and the number “0” indicates rejection or absence of that feature in the article. It should be noted that only in question number 27, a score in the range of 0 to 5 is assigned. A score of 5 or close to it indicates a high statistical power of the article, and on the contrary, lower scores indicate a weaker statistical power of the article in the same field. To prevent the inclusion of duplicate studies, all articles identified in the screening stages were carefully reviewed in terms of the names of the authors, year

of publication, place of study, population studied, and study period. In cases where similarities were observed between the articles, their full texts were carefully compared to examine the possibility of using common data or population. Finally, it was determined that none of the articles included in the final review were duplicates and each study dealt with independent data or analyses.

Results

Based on the studies on the AI approach to walking, 13 articles were obtained according to the keywords and inclusion and exclusion criteria. In the field of using artificial intelligence during walking on healthy adults, 7 studies were obtained, and the number of participants in these studies was 1072 healthy individuals in general [1, 4-6, 9-11]. The

Table 2. Quality assessment of articles based on the Downs and Black questionnaire

Author(s), Year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	Quality Percentage	
Schoenwether et al. 2025 [1]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	4	77.41	
Ripic et al. 2023 [2]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	5	87.09	
Peimankar et al. 2023 [3]	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	83.87	
Obuchi et al. 2024 [4]	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	4	77.41	
Galasso et al. 2023 [5]	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	4	74.19	
Bauman et al. 2022 [6]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	5	90.32	
Bacon et al. 2022 [7]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	4	83.87
Gou et al. 2021 [8]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	93.54	
Zhang et al. 2020 [9]	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	5	80.64
Bremer et al. 2021 [10]	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	5	87.09	
Lee et al. 2022 [11]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	4	83.87
Salami et al. 2025 [24]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	4	80.64	
Kim et al. 2023 [25]	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	5	74.19	

studies that used artificial intelligence in adults with diseases were 6 studies, including patients with cerebral palsy [24], elderly people without dementia [4], people with Parkinson disease [2], people with walking problems [3], patients with sarcopenia [25], people with unilateral pain when walking [7], and people with motor disabilities. The statistical sample size of these studies was 3737 people. In these studies, 15.4% of the articles used a markerless motion recording system [1, 2], 53.8% of the articles used wearable sensors [3–9], 23.1% used ML [9–11], and 10% used a motion analysis system [25]. Studies using a markerless motion capture system concluded that the KinaTrax markerless motion capture system provided reliable spatiotemporal measurements within and between sessions, along with reliable kinematics in the sagittal and frontal planes; validation showed that intraclass correlation coefficients confirmed excellent agreement for all spatial parameters with the marker-based reference system, while temporal variables also showed good agreement, with the exception of oscillation time, where agreement was reported as moderate to almost perfect [1, 2].

Also, studies using wearable sensors concluded that the proposed AI models, especially the stack architecture, demonstrated a high ability to correctly classify gait episodes (mean sensitivity=0.961 and AUC=0.833), despite the challenges posed by the sensor placement on the back of patients with gait disorders. Furthermore, the reduction of the feature space helped improve the performance of most classifiers; also, the SVR models demonstrated excellent accuracy in parameter analysis with very low mean absolute errors (MAE%) (less than 1.2%) for key parameters such as speed and stride length. On the other hand, triboelectric sensors (TENG), with an accuracy of more than 95% in recognizing the identity of the person, assessing the motor disability and the movement status, were not only able to harvest the energy they needed from slow movements, but also enabled real-time analysis of the data, which, in general, comprehensively confirms the reliability and efficiency of the sensors for evaluating the walking parameters [3–9].

Studies on ML during walking also showed that approaches based on ML and deep learning showed high efficiency in assessing the movement status and predicting the walking path. In the field of body posture estimation and classification, a combined approach, including mobile phone video recording, cloud storage, and fusion deep learning achieved strong results; so that the combination of the ResNet101 model and the Naïve Bayes classifier achieved a sensitivity of 0.87 and a specificity of 0.84. Furthermore, in predicting walking path, LSTM models proved their superiority in virtual reality (VR) environments. The LSTM model based on position and

orientation data provided the best short-term prediction (50 ms) with an error of 14.5 mm, while the integration of eye-tracking data into long-term predictions (2.5 s) with an error of 73.65 cm showed a significant advantage in this time interval [9–11]. A study using a motion capture system also concluded that by combining smart insole data and estimating body posture by an RF (random forest) ML model, studies show that important digital biomarkers can be extracted with high accuracy by analyzing variables such as hip and ankle motion, which has significant potential for the development of more advanced diagnostic and therapeutic interventions, especially for the management of diseases such as sarcopenia [25].

Discussion

The present study aimed to review artificial intelligence approaches in human gait biomechanics. The results showed that wearable sensors achieved a sensitivity of 0.961 and an area under the receiver operating characteristic curve of 0.833, and support vector regression (SVR) models showed an average absolute percentage error of less than 1.2% for parameters such as speed and stride length; TENG also provided an accuracy of over 95% in recognizing individuals. In this study, the findings of researchers who used a marker-free gait recording system during gait showed that the markerless gait recording system can provide spatiotemporal and kinematic measurements in the sagittal and frontal planes, and its correlation coefficients for spatial parameters showed relatively good agreement with the reference system. However, only the oscillation time parameter in measuring temporal variables showed moderate to almost perfect agreement with the reference system, indicating its limitations compared to reference systems [1, 2].

The advantages of these studies include the use of patients with gait disorders, but the sample sizes of some studies were limited. Studies on marker less motion recording systems have shown that this markerless motion tracking system provides reliable spatial measurements, but its direct clinical application still requires further validation. Studies using gait sensors have shown that wearable sensors, especially TENG, when combined with advanced ML methods, can analyze gait parameters, classify activities, and detect the movement status of individuals [3–9]. These systems have shown acceptable performance in laboratory conditions, but results may vary in real-world settings and with different patients. The main advantages include the accuracy of parameter estimation with relatively low errors, the self-sufficiency of energy of TENG, and the high performance in identifying and detecting movement disabilities.

Disadvantages and limitations include fluctuations in feature performance under difficult mounting conditions (such as on the patient's back, which reached 0.643) and dependence on careful optimization of the ML model and feature selection, which requires tuning for each specific application scenario. Studies using ML have shown that combining video recording with a mobile phone camera, cloud storage, and deep learning fusion allow for body pose estimation and classification, and have achieved relatively successful results. The combination of a deep convolutional neural network model and a naive Bayes classifier has shown acceptable performance in hand classification; long-term memory models have also been suitable for predicting walking paths in a virtual reality environment. In short-term predictions (50 ms), the error was 14.5 mm, and in longer-term predictions (2.5 s), the error was reduced to 73.65 cm [9-11]. The advantages of this approach include the ease of data collection with a mobile phone camera and the use of cloud storage; however, the disadvantages include potential delays in data transfer and heavy processing of deep learning models and the dependence on image quality in different environments.

Limitations of the present study include the limited number of existing studies on the use of AI in gait analysis, the lack of examination of athletic and elderly populations, the focus of some studies on small samples or specific groups, and the lack of standardization in methods. Therefore, generalizations of the findings should be made with caution, and direct clinical application of these technologies still requires larger and more comprehensive studies. Future studies should be conducted with larger and more diverse clinical populations and evaluate the performance of AI algorithms in real-world settings. Also, the development of standardized frameworks for data collection and model interpretation could improve the clinical application of these technologies.

Conclusion

The findings of this review show that the use of artificial intelligence and ML methods plays an effective role in improving the accuracy, reliability, and interpretability of data obtained from wearable sensors and markerless motion recording systems in human gait analysis. The results indicate that these approaches can largely compensate for the inherent limitations of traditional sensors and methods and enable the extraction of reliable spatiotemporal and kinematic parameters. Despite promising performance in laboratory conditions and some clinical populations, the available evidence suggests that studies with larger sample sizes, standardized

designs, and evaluation in real-world settings are necessary for the generalizability of the results and widespread clinical application.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

All ethical principles were considered in this study. This is a systematic review study. No experiments were conducted on human or animal samples. Accordingly, there was no need for an ethical code.

Funding

This research did not receive any grant from funding agencies in the public, commercial, or non-profit sectors.

Authors' contributions

Conceptualization, methodology, writing the original draft: Leila Sabouri and Ebrahim Piri; Validation and visualization: Ebrahim Piri; Research and analysis: Leila Sabouri; Sources for writing the draft: Leila Sabouri and Ebrahim Piri; Review, editing and final approval: All authors; Supervision and project management: AmirAli Jafarnejadgro.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interest.

This Page Intentionally Left Blank



مقاله مروری

نقش هوش مصنوعی در بیومکانیک راه رفتن انسان: یک مطالعه مروری نظام مند

لیلا صبوری^۱، ابراهیم پیری^۲، امیرعلی جعفرنژادگرو^۲

۱. گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم ورزشی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

۲. گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.



Citation Saburi L, Piri E, Jafarnezhadgero AA. The Role of Artificial Intelligence in Human Gait Biomechanics: A Systematic Review. *Archives of Rehabilitation*. 2026; 27(1):16-33. <https://doi.org/10.32598/RJ.27.1.4128.2>

doi <https://doi.org/10.32598/RJ.27.1.4128.2>

حکده

هدف هوش مصنوعی با توانایی تحلیل داده‌های پیچیده و شناسایی الگوهای پنهان، به‌ویژه در حوزه بیومکانیک راه رفتن، تحولی چشمگیر ایجاد کرده است. هدف این مطالعه، مرور و طبقه‌بندی رویکردهای مختلف هوش مصنوعی در تحلیل بیومکانیکی راه رفتن بود.

روش بررسی پژوهش حاضر یک مطالعه مروری نظام مند بود. جست‌وجو در پایگاه‌های وب‌آوساینس، پایگاه مرکز اطلاعات علمی و جهاد دانشگاهی، اسکوپوس، مگیران، پایگاه استنادی علوم جهان اسلام، پابمد، گوگل اسکالر بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ و به دو زبان فارسی و انگلیسی انجام گرفت. معیارهای ورود شامل مطالعات تجربی یا کاربردی با هوش مصنوعی در تحلیل راه رفتن انسان، شامل داده‌های افراد سالم یا بیماران عصبی، عضلانی یا اسکلتی-عضلانی؛ ارائه شاخص‌های عملکرد مدل‌ها (دقت، حساسیت، ویژگی) یا پارامترهای بیومکانیکی قابل اندازه‌گیری؛ استفاده از ثبت مستقیم یا حسگرهای پوشیدنی/تصویری؛ طراحی مقطعی، اعتبارسنجی الگوریتم یا پیش‌بینی/تشخیص بالینی بود. معیارهای خروج شامل مطالعات نظری، مرور ادبیات بدون داده، سرمقاله، گزارش موردی، پژوهش حیوانی یا شبیه‌سازی بدون داده انسانی، استفاده صرف از روش‌های آماری کلاسیک بدون هوش مصنوعی، مقالات با داده ناقص یا دسترسی محدود، مطالعات روی فعالیت‌های غیر از راه رفتن و کیفیت روش‌شناسی پایین بود. از ۸۵ مقاله شناسایی شده، ۱۳ مطالعه واجد شرایط انتخاب شدند. کیفیت مطالعات با پرسش‌نامه بلک و داوانارزیابی شد.

یافته‌ها با بررسی ۱۳ مطالعه در زمینه هوش مصنوعی و راه رفتن (شامل ۷ مطالعه بر روی افراد سالم و ۷ مطالعه بر روی بیماران)، مشخص شد که بیش از نیمی از مطالعات (۸/۵۳ درصد) از حسگرهای پوشیدنی، حدود ۱/۲۳ درصد از سیستم‌های بدون نشانگر مانند KinaTrax، ۲۳ درصد از روش‌های یادگیری ماشین/عمیق و ۱۰ درصد از سیستم‌های تحلیل حرکت مرسوم استفاده کرده‌اند. تحلیل تجمعی نشان داد حسگرهای پوشیدنی، به‌ویژه در ترکیب با مدل‌های یادگیری ماشین مانند SVR و Stack، توانایی بالایی در طبقه‌بندی ایزوودهای راه رفتن دارند (میانگین حساسیت ۹۶/۱۰ و MAE% کمتر از ۱/۲ درصد برای پارامترهای کلیدی)، که نشان‌دهنده دقت نسبتاً بالای این رویکردها است. در مطالعات استفاده‌کننده از یادگیری ماشین، ترکیب ResNet101 و Naïve Bayes عملکرد خوبی در طبقه‌بندی وضعیت بدن (حساسیت ۸۷/۱۰) نشان داد و مدل‌های LSTM نیز در پیش‌بینی مسیر در محیط VR به‌ویژه در کوتاه‌مدت، نتایج قابل توجهی ارائه کردند (خطای ۵/۱۴ میلی‌متر)، هرچند دقت در پیش‌بینی‌های بلندمدت نیازمند داده‌های اضافی مانند ردیابی چشم بود. همچنین، استفاده از کفی هوشمند همراه با الگوریتم RF نشان داد که استخراج بیمارگرهای دیجیتال برای مدیریت بیماری‌هایی نظیر سارکوپنی امکان‌پذیر است، اگرچه تعداد مطالعات محدود و حجم نمونه کوچک بود.

نتیجه‌گیری تحقیقات حاضر نشان می‌دهند ترکیب حسگرهای پوشیدنی، به‌ویژه نوع تریبولکترونیک خودتأمین انرژی، با روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق (مانند ResNet101، SVR، و LSTM) توانایی قابل توجهی در تحلیل پارامترهای بیومکانیکی راه رفتن و پیش‌بینی مسیر حرکت در محیط‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده مانند VR دارد. با این حال، شواهد موجود محدود به نمونه‌های کوچک و شرایط کنترل شده است و مطالعات کمی بر روی بیماران واقعی یا در محیط‌های بالینی انجام شده است. بنابراین، هرگونه کاربرد بالینی یا توانبخشی مبتنی بر این فناوری‌ها هنوز نیازمند تحقیقات بیشتر و اعتبارسنجی در محیط‌های واقعی است.

کلیدواژه‌ها هوش مصنوعی، تحلیل بیومکانیکی، راه رفتن

تاریخ دریافت: ۱۲ آذر ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳ بهمن ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۱۲ فروردین ۱۴۰۵

* نویسنده مسئول:

دکتر امیرعلی جعفرنژادگرو

نشانی: اردبیل، دانشکده علوم تربیتی و روانشناسی، گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی.

تلفن: +۹۸ (۹۱۰) ۵۱۴۶۲۱۴

رایانامه: amiralijafarnezhad@gmail.com



Copyright © 2026 The Author(s);

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

مقدمه

ویژگی‌هایی مانند تغییرپذیری، نظم، همگام‌سازی، تقارن، نرمی حرکت، پایداری موضعی و پیش‌بینی‌پذیری راه‌رفتن را توصیف می‌کنند [۸، ۹]. در همین راستا، مطالعات اخیر نشان داده‌اند ترکیب داده‌های حاصل از حسگرهای پوشیدنی با الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌تواند به‌عنوان یک نشانگر زیستی دیجیتال برای غربالگری و تشخیص زودهنگام بیماری‌های عصبی مورد استفاده قرار گیرد. به‌ویژه، تغییرات در الگوهای راه‌رفتن به‌عنوان شاخصی غیرتهاجمی و مقرون‌به‌صرفه برای شناسایی بیماری‌هایی نظیر زوال عقل مطرح شده‌اند. انتظار می‌رود توسعه این نشانگرهای زیستی دیجیتال همگام با توسعه نشانگرهای زیستی بالینی انجام شود؛ با این حال، چالش‌هایی همچون اعتبارسنجی بالینی، تفسیر نتایج و قابلیت اعتماد مدل‌ها همچنان به قوت خود باقی است [۷].

از سوی دیگر، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق به‌عنوان ابزارهایی توانمند برای تحلیل داده‌های پیچیده حرکتی انسان شناخته شده‌اند. شبکه‌های عصبی کانولوشنی^۲ (CNN) در پردازش داده‌های تصویری و ویدئویی حرکت و شبکه‌های عصبی بازگشتی^۳ (RNN) و شبکه‌های حافظه بلندمدت^۴ (LSTM) در تحلیل داده‌های زمانی-سریالی، امکان شناسایی دقیق‌تر الگوهای راه‌رفتن را فراهم کرده‌اند [۱۰]. این مدل‌ها قادرند ویژگی‌های ظریفی نظیر ناهماهنگی گام‌ها، اختلالات تعادل وضعیتی و انحرافات دینامیکی بدن را از داده‌های حسگری یا تصویری استخراج کنند و بدین ترتیب، نقش مهمی در تشخیص زودهنگام اختلالات عصبی و اسکلتی ایفا نمایند [۱۱].

افزون‌براین، تلفیق داده‌های چندمنبعی حاصل از حسگرهای پوشیدنی و سامانه‌های بینایی ماشین، امکان مدل‌سازی جامع‌تری از بیومکانیک راه‌رفتن را فراهم کرده و مسیر را برای پیش‌مدام وضعیت حرکتی و پیش‌بینی خطر سقوط یا آسیب‌های عضلانی هموار ساخته است. با وجود رشد قابل توجه مطالعات در زمینه کاربرد هوش مصنوعی در تحلیل راه‌رفتن، مرورهای پیشین غالباً به بررسی مجزای الگوریتم‌ها یا انواع داده‌ها پرداخته و کمتر به مقایسه نظام‌مند و انتقادی رویکردهای مختلف، محدودیت‌های روش‌شناختی، چالش‌های پیاده‌سازی بالینی و میزان قابلیت اعتماد نتایج توجه کرده‌اند.

از این‌رو، شکاف پژوهشی اصلی در فقدان یک مرور جامع و انتقادی است که بتواند به‌صورت یکپارچه، کاربرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی در تحلیل بیومکانیکی راه‌رفتن انسان را بررسی کرده و تفاوت‌ها، مزایا و کاستی‌های رویکردهای مبتنی بر حسگرهای پوشیدنی و بینایی ماشین را تحلیل کند. نوآوری پژوهش حاضر در پاسخ به این نیاز نهفته است؛ به‌طوری‌که این مطالعه فراتر از توصیف صرف فناوری‌ها، به ارزیابی انتقادی دقت، قابلیت اعتماد و

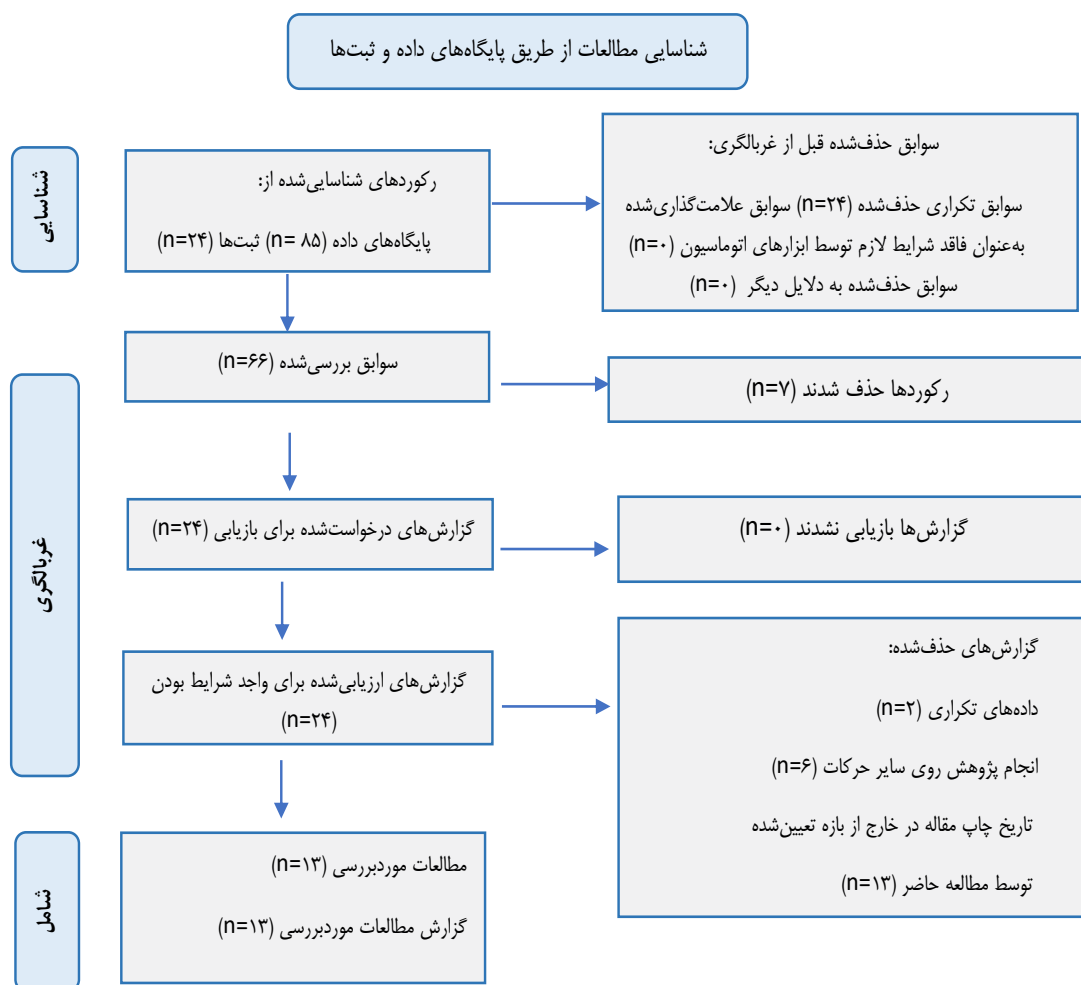
راه‌رفتن یکی از بنیادی‌ترین فعالیت‌های حرکتی انسان است که نقش تعیین‌کننده‌ای در سلامت عصبی-عضلانی، تعادل، استقلال عملکردی و کیفیت زندگی ایفا می‌کند. هرگونه تغییر در الگوهای راه‌رفتن می‌تواند نشان‌دهنده بروز یا پیشرفت اختلالات حرکتی، افزایش خطر سقوط و کاهش توانایی انجام فعالیت‌های روزمره باشد. از این‌رو، تحلیل دقیق و کمی راه‌رفتن به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در ارزیابی عملکرد حرکتی، تشخیص اختلالات عصبی-اسکلتی و پیش‌اثربخشی مداخلات درمانی و توانبخشی مطرح است [۱-۳]. با وجود اهمیت بالینی این موضوع، روش‌های سنتی آنالیز راه‌رفتن عمدتاً به محیط‌های آزمایشگاهی محدود بوده و متکی بر سیستم‌های اپتیکی پیچیده، تجهیزات پرهزینه و تحلیل‌های زمان‌بر هستند که اجرای آن‌ها نیازمند نیروی متخصص بوده و قابلیت تعمیم و استفاده گسترده در محیط‌های واقعی را با محدودیت مواجه می‌سازد [۴].

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه هوش مصنوعی^۱ تأثیر قابل توجهی بر تحلیل حرکت انسان و بیومکانیک ورزشی داشته است. توسعه روش‌های محاسباتی پیشرفته و کاهش هزینه‌های پردازش داده موجب شده است تحلیل‌های مبتنی بر رایانه از نظر فنی و اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر شوند [۵]. هوش مصنوعی به‌طور فزاینده‌ای در حوزه ورزش و علوم حرکتی برای تحلیل عملکرد، شناسایی الگوهای حرکتی، بهینه‌سازی تصمیم‌گیری و پیش‌بینی رفتار حرکتی به کار گرفته می‌شود و موجب تحول در رویکردهای سنتی ارزیابی و تحلیل شده است. این فناوری دقت تحلیل حرکات، امتیازدهی، پیش‌بینی عملکرد ورزشکاران و حتی رفتار هواداران را افزایش داده و افق‌های جدیدی در درک پیچیدگی حرکت انسان گشوده است [۶]. با این حال، بسیاری از مطالعات موجود رویکردی عمدتاً توصیفی داشته و تمرکز آن‌ها بیشتر بر نمایش قابلیت‌های کلی هوش مصنوعی بوده است تا تحلیل انتقادی نقش آن در مسائل خاصی مانند دینامیک راه‌رفتن انسان [۷].

هم‌زمان با توسعه هوش مصنوعی، پیشرفت‌های فناورانه در زمینه حسگرهای پوشیدنی کوچک و سبک، به‌ویژه واحدهای اندازه‌گیری اینرسی امکان ثبت داده‌های حرکتی در بازه‌های زمانی طولانی و در شرایط طبیعی زندگی روزمره را فراهم کرده است. این حسگرها فرصت‌های جدیدی را برای پژوهشگران و متخصصان بالینی ایجاد کرده‌اند تا راه‌رفتن را خارج از محیط‌های کنترل‌شده آزمایشگاهی و در زمینه‌های واقعی مورد بررسی قرار دهند. برخلاف شاخص‌های کلاسیک راه‌رفتن مانند سرعت، طول گام و زمان گام، داده‌های شتابسنجی و ژيروسکوپی امکان استخراج مجموعه‌ای گسترده از شاخص‌های پیشرفته دینامیکی را فراهم می‌کنند که

2. Convolutional Neural Networks (CNN)
3. Recurrent Neural Networks (RNN)
4. Long Short-Term Memory (LSTM)

1. Artificial Intelligence



توانبخشی

تصویر ۱. فرآیند بررسی و انتخاب مقالات

گوگل اسکالر^{۱۱} و به دو زبان فارسی و انگلیسی انجام شد. استراتژی جست‌وجو شامل کلیدواژه‌های مرتبط با هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، راه‌رفتن، تحلیل راه‌رفتن، بیومکانیک، کینماتیک و کینماتیک و ترکیب آن‌ها با عملگرهای «AND» و «OR» بود.

معیارهای ورود شامل مطالعات تجربی یا کاربردی با استفاده از هوش مصنوعی در تحلیل راه‌رفتن، استفاده از داده‌های واقعی جمعیت انسانی (افراد سالم یا بیماران عصبی، عضلانی یا اسکلتی-عضلانی)، ارائه شاخص‌های عملکردی مدل‌ها (مانند دقت، حساسیت، ویژگی) یا پارامترهای بیومکانیکی قابل اندازه‌گیری، تمرکز بر راه‌رفتن انسان با ثبت داده‌های مستقیم یا حسگرهای پوشیدنی/تصویری و انتشار به زبان فارسی یا انگلیسی بود. طراحی مطالعات شامل مقطعی، اعتبارسنجی الگوریتم و مطالعات پیش‌بینی/تشخیص بالینی بود.

11. Google Scholar

کاربردپذیری بالینی روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی می‌پردازد و مسیرهای آینده پژوهش و کاربردهای بالقوه در پزشکی ورزشی، توانبخشی و علوم حرکتی را ترسیم می‌کند. براین اساس، هدف تحقیق حاضر مروری جامع و انتقادی بر رویکردهای هوش مصنوعی در تحلیل بیومکانیکی راه‌رفتن انسان است.

روش‌شناسی

این مطالعه از نوع مروری نظام‌مند بود. جست‌وجوی مقالات بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ در پایگاه‌های داده استنادی وب‌آوساینس^۵، پایگاه مرکز اطلاعات علمی و جهاد دانشگاهی^۶، اسکوپوس^۷، مگیران^۸، پایگاه استنادی علوم جهان اسلام^۹، پابمد^{۱۰}،

5. Web of Science
6. Scientific Information Database (SID)
7. Scopus
8. Magran
9. Islamic World Science & Technology Monitoring and Citation Institute (ISC)
10. PubMed

جدول ۱. مطالعات مبتنی بر استفاده از هوش مصنوعی طی راه رفتن.

نویسنده/سال	هدف	نمونه	پروتکل	ابزار	نتیجه
شونودر و همکاران ۲۰۲۵ [۱]	قابلیت اطمینان ثبت حرکت بدون نشانگر مبتنی بر هوش مصنوعی در تحلیل های راه رفتن بزرگسالان سالم	۹ بزرگسال سالم	راه رفتن	سیستم kina trax	سیستم ثبت حرکت بدون نشانگر KinaTrax، اندازه گیری های مکانی-زمانی قابل اعتمادی را در داخل و بین جلسات همراه با اندازه گیری های سینماتیکی قابل اعتماد در صفحه ساجیتال و فرونتال ارائه می دهد.
ریبیک و همکاران ۲۰۲۳ [۲]	ارزیابی دقت پارامترهای مکانی-زمانی در سیستم بدون نشانگر با یک مدل بدون نشانگر به روز شده، رویدادهای راه رفتن مبتنی بر مختصات و سرعت بر بزرگسالان مبتلا به بیماری پارکینسون	۵۷ بیمار مبتلا به بیماری پارکینسون	راه رفتن	سیستم ثبت حرکت بدون نشانگر	ضرایب همبستگی بین کلاسی، توافق عالی بین سیستم بدون نشانگر و یک سیستم مرجع مبتنی بر نشانگر را برای همه پارامترهای مکانی نشان داد. متغیرهای زمانی مشابه بودند، به جز زمان نوسان که توافق خوبی را نشان داد. ضرایب همبستگی تطابق با همه موارد به جز زمان نوسان مشابه بودند که تطابق متوسط تا تقریباً کاملی را نشان می دادند.
پیمانکار و همکاران ۲۰۲۳ [۳]	وسعه یک الگوریتم یادگیری ماشین (ML) برای تحلیل داده های شتاب سنج و طبقه بندی دقیق فعالیت راه رفتن در بیماران مبتلا به مشکلات راه رفتن به ویژه دمانس و آلزایمر.	۲۰ شرکت کننده دارای مشکلات راه رفتن	راه رفتن	حسگر (شتاب سنج که روی شرکت کنندگان نصب شد)	تایج تجربی تأیید کردند که مدل های پیشنهادی (به ویژه Stack) با وجود قرارگیری چالش برانگیز حسگر روی پشت بیماران مبتلا به اختلالات راه رفتن، توانایی طبقه بندی صحیح اپیزودهای راه رفتن را دارند.
اوبوچی و همکاران ۲۰۲۴ [۴]	بررسی امکان سنتزی تحلیل شتاب خطی و سرعت زاویه ای با کمک هوش مصنوعی (AI) در حین راه رفتن	۸۷۹ نفر بدون زوال عقل	راه رفتن	حسگر	میانگین حساسیت، ویژگی و مساحت زیر منحنی مدل ها به ترتیب در ۳۰ مجموعه داده آزمایشی (۰/۹۶۱، ۰/۶۴۳ و ۰/۸۳۳) بود.
گالاسو و همکاران ۲۰۲۳ [۵]	پیش بینی سطح فعالیت بدنی از داده های راه رفتن سینماتیکی با استفاده از تکنیک های یادگیری ماشین	۳۷ فرد سالم (۲۴ مرد و ۱۳ زن)	راه رفتن	تردمیل حسگر دار-حسگرهای واحد اندازه گیری اینرسی بی سیم پوشیدنی	کاهش فضای ویژگی، عملکرد را برای اکثر طبقه بندی کننده های مورد بررسی افزایش می دهد. تجزیه و تحلیل طبقه بندی کننده های با بهترین عملکرد (KNN، جنگل تصادفی و RSesLib KNN) رفتار دقت را با تغییر تعداد ویژگی های مورد بررسی نشان داد.
باومن و همکاران ۲۰۲۲ [۶]	توسعه یک طبقه بندی کننده چند کلاسه برای تشخیص همزمان فعالیت (راه رفتن عادی، بالا رفتن از پله، پایین آمدن از پله) و فاز راه رفتن (ایستادن/ Stance و نوسان / Swing)	۸۰ فرد سالم	راه رفتن	حسگر: داده های واحد اندازه گیری اینرسی (IMU) که از ران (Thigh) و ساق پا (Shank) جمع آوری شده است.	هنگامی که مدل شش حالتی به عنوان یک طبقه بندی کننده دودویی ساده (فقط ایستادن/نوسان، بدون در نظر گرفتن نوع فعالیت) استفاده شد، دقتی معادل ۹۷/۱ درصد کسب کرد که برای کنترل در آگزواسکلتون های اندام تحتانی در دنیای واقعی ممکن است کافی باشد.
بیکن و همکاران ۲۰۲۲ [۷]	ارتباط معیارهای راه رفتن با درد خفیف یک طرفه زانو هنگام راه رفتن با استفاده از یادگیری ماشین	۲۰۶۶ فرد با درد یک طرفه هنگام راه رفتن	راه رفتن	حسگر	حسگرها به طور مؤثر برای ارزیابی پارامترهای راه رفتن استفاده می شوند. به طور خاص، قابلیت اطمینان جمع آوری داده ها از مکان هایی مانند کمر، ران و پا مورد تأیید قرار گرفته است.
گو و همکاران ۲۰۲۱ [۸]	هدف اصلی این پژوهش طراحی و اعتبارسنجی یک عصای هوشمند خودتأمین انرژی بوده است که از طریق حسگرهای تریبولکترونیک (TENG) متصل به حرکت پا بتواند همزمان با ایجاد انرژی لازم برای عملکرد خود، با استفاده از الگوریتم های یادگیری عمیق، وضعیت حرکتی، هویت کاربر و سطح ناتوانی او را به طور دقیق و بلادرنگ (Real-Time) پایش کرده و اطلاعات حیاتی را برای کمک به بهبود ایمنی و ارزیابی بالینی فراهم سازد.	۱۰ نفر سالمندان دچار ناتوانی حرکتی	راه رفتن	حسگرهای تریبولکترونیک	سگرهای تریبولکترونیک توانستند به طور خودتأمین انرژی لازم را از گام های آهسته ای آن ها برداشت کرده و همزمان، با دقت بالای ۹۵ درصد، هویت فرد ارزیابی ناتوانی حرکتی و وضعیت حرکت را با استفاده از مدل های یادگیری عمیق تشخیص دهند که نشان دهنده موفقیت سیستم در تأمین برق خود و تحلیل بلادرنگ داده ها هنگام راه رفتن کاربر بود.
ژانگ و همکاران ۲۰۲۰ [۹]	تحلیل دقیق گام برداشتن در راه رفتن و دوییدن با استفاده از مدل های یادگیری ماشین	۱۴ فرد سالم	راه رفتن	حسگر پوشیدنی: کفی های کفش هوشمند سفارشی مهندسی شده با عنوان SportSole که مجهز به حسگر هستند. ماشین: رگرسیون ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Regression - SVR).	مدل های SVR در تمام پارامترهای تحلیل شده، ضرایب همبستگی درون کلاسی (ICC) عالی را نشان دادند. میانگین خطاهای مطلق درصدی (MAE) برای راه رفتن در طول گام، سرعت و فاصله پاکسازی پا به ترتیب ۱/۳۷، ۱/۲۳، ۲/۰۸ درصد بود. این نتایج نشان دهنده دقت بالای این رویکرد یادگیری ماشین برای بهبود عملکرد حسگرهای پوشیدنی است.

نویسنده/سال	هدف	نمونه	پروتکل	ابزار	نتیجه
برمر و همکاران ۲۰۲۱ [۱۰]	پیش‌بینی موقعیت آینده از روی راه‌رفتن طبیعی و حرکات چشم با یادگیری ماشینی	۱۸ فرد سالم	راه‌رفتن	مدل یادگیری متاشین (LSTM و GRU)	مدل LSTM با استفاده از داده‌های موقعیت و جهت‌گیری بهترین پیش‌بینی را در کوتاه‌مدت (۵۰ میلی‌ثانیه) با خطای ۵/۱۴ میلی‌متر ارائه می‌دهد، درحالی‌که بهترین پیش‌بینی بلندمدت (۲/۵ ثانیه) با خطای ۶۵/۷۳ سانتی‌متر توسط مدل LSTM که شامل داده‌های ردیابی چشم نیز بود، حاصل شد؛ این یافته‌ها تأیید می‌کند که مدل‌های LSTM برای پیش‌بینی مسیر راه‌رفتن در محیط‌های VR مناسب هستند و داده‌های ردیابی چشم به‌طور خاص برای پیش‌بینی‌های بلندمدت در فواصل کوتاه، مزیت قابل‌توجهی دارند
لی و همکاران ۲۰۲۲ [۱۱]	شناسایی وضعیت بدن جوانان در ویدیوهای راه‌رفتن با استفاده از یک روش هوش مصنوعی ترکیبی	۳۵ بزرگسال جوان سالم	راه‌رفتن	الگوریتم‌های یادگیری ماشین، دوربین تلفن همراه، دستگاه‌های ردیابی غیرتهاجمی	رویکرد پیشنهادی که ترکیبی از ضبط با دوربین تلفن همراه، فضای ذخیره‌سازی ابری (Cloud Storage) و یادگیری عمیق ادغامی (Fusion Deep Learning) است، با موفقیت تخمین و طبقه‌بندی وضعیت بدن را انجام داد. حداکثر ویژگی‌زایی (Specificity) و حساسیت (Sensitivity) به‌دست‌آمده با استفاده از ترکیب مدل ResNet ۱۰۱ و طبقه‌بندی‌کننده Naive Bayes به ترتیب ۰/۸۴ و ۰/۸۷ بود.
سلامی و همکاران ۲۰۲۵ [۳۴]	بررسی رابطه بین سینماتیک راه‌رفتن و گشتاورهای مفصلی را با مرتبط کردن ورودی‌های سینماتیک با برچسب‌های خروجی مربوطه آن‌ها	۶۳۲ بیمار مبتلا به فلج مغزی	راه‌رفتن	مدل هوش مصنوعی - سیستم برچسب‌گذاری بالینی (این سیستم نتایج را براساس nRMSE به سه دسته تقسیم می‌کند: سبز (Green): قابل قبول، زرد (Yellow): با احتیاط قابل قبول، قرمز (Red): غیرقابل قبول)	مفصل ران بیشترین جمعیت برچسب‌های سبز (۸۴ درصد) را نشان داد، درحالی‌که مفصل مچ پا کمترین (۵۰ درصد) را داشت. تفاوت‌های رگرسیونی در نمرات سینماتیک مفصل و پروفاایل راه‌رفتن در تمام برچسب‌ها مشاهده شد. مدل LDA به دقت ۸۵/۲ درصد و امتیاز F ۹۲/۰ برای پیش‌بینی برچسب سبز در گشتاور مفصل ران دست یافت. علاوه‌براین، شرایط شدیدتر بیمار با افزایش پیش‌بینی‌های برچسب قرمز همراه بود
کیم و همکاران ۲۰۲۳ [۲۵]	بررسی مدل طبقه‌بندی سارکوپنی برای بیماران اسکلتی-عضلانی با استفاده از کفی هوشمند و آنالیز راه‌رفتن یا هوش مصنوعی	۸۳ بیمار مبتلا به سارکوپنی	راه‌رفتن	کفی هوشمند و سیستم آنالیز حرکت با هوش مصنوعی	همگرایی فناوری‌های حسگر دقیق (کفی هوشمند) با روش‌های پردازش تصویر پیشرفته (تخمین وضعیت بدن)، و تحلیل آن‌ها توسط مدل‌های یادگیری ماشینی قوی مانند RF، یک رویکرد قدرتمند برای استخراج بیومارکرهای دیجیتال حیاتی، به‌خصوص در نواحی کلیدی لگن و مچ پا، فراهم می‌آورد که راه را برای تشخیص و مدیریت مؤثرتر اختلالات فیزیکی مانند سارکوپنی هموار می‌سازد.

توانبخشی

ارزیابی کیفیت مقالات با استفاده از پرسش‌نامه دان و بلک انجام شد [۲۳]. در صورت بروز هرگونه اختلاف در نمره‌دهی میان نویسندگان، موارد موردنظر به‌صورت جداگانه بررسی، و اختلاف‌نظرها از طریق مشورت و بحث گروهی برطرف گردید تا احتمال بروز خطا در فرآیند ارزیابی به حداقل برسد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، میانگین امتیاز کیفیت مقالات بررسی‌شده در این مطالعه، طبق پرسش‌نامه دان و بلک، برابر با ۲۰/۶۷ درصد بود. برای محاسبه درصد کیفیت مقالات در ستون مربوطه، از فرمول شماره ۱ استفاده شد:

$$۱۰۰۰ \times (۳۱ / \text{نمره کل}) = \text{کیفیت مقالات (بر حسب درصد)}$$

معیارهای خروج شامل مطالعات نظری یا مرور ادبیات بدون داده، سرمقاله‌ها، گزارش موردی، پژوهش‌های حیوانی یا شبیه‌سازی بدون داده واقعی انسان، استفاده صرف از روش‌های آماری کلاسیک بدون هوش مصنوعی، مقالات با دسترسی ناقص یا تکراری، گزارش‌های کنفرانسی و مطالعات با کیفیت روش‌شناسی پایین بود.

در نتیجه، از مجموع ۸۵ مقاله شناسایی شده، ۵۳ مقاله به‌دلیل عدم تمرکز بر راه‌رفتن یا تکراری بودن حذف شدند، ۱۹ مقاله به‌دلیل مرور بودن یا عدم استفاده از هوش مصنوعی از مطالعه خارج شدند و در نهایت ۱۳ مقاله برای تجزیه و تحلیل نهایی انتخاب شدند (جدول شماره ۱) (تصویر شماره ۱).

جدول ۲. کیفیت‌سنجی مقالات براساس پرسش‌نامه دان و بلک.

نویسندگان	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	درصد کیفیت
شونودر و همکاران [۱] ۲۰۲۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۷۷/۴۱
رینیک و همکاران [۲] ۲۰۲۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۸۷/۰۹
پیمانکار و همکاران [۳] ۲۰۲۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۸۳/۸۷
اوبوچی و همکاران [۴] ۲۰۲۴	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۷۷/۴۱
کالاسو و همکاران [۵] ۲۰۲۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۷۴/۱۹
باومن و همکاران [۶] ۲۰۲۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۹۰/۳۲
بیکن و همکاران [۷] ۲۰۲۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۸۳/۸۷
گو و همکاران [۸] ۲۰۲۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۹۳/۵۴
ژانگ و همکاران [۹] ۲۰۲۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۸۰/۶۴
برمر و همکاران [۱۰] ۲۰۲۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۸۷/۰۹
لی و همکاران [۱۱] ۲۰۲۲	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۸۳/۸۷
سلامی و همکاران [۳۴] ۲۰۲۵	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۸۰/۶۴
کیم و همکاران [۲۵] ۲۰۲۳	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۷۴/۱۹

توانبخشی

مطالعه به‌دقت بررسی شدند. در مواردی که شباهت‌هایی میان مقالات مشاهده شد، متن کامل آن‌ها به‌طور دقیق مقایسه گردید تا احتمال استفاده از داده‌ها یا جمعیت مشترک بررسی شود. در نهایت، مشخص شد هیچ‌یک از مقالات وارد شده در مرور نهایی تکراری نبوده و هر مطالعه به داده‌ها یا تحلیل‌های مستقل پرداخته است.

یافته‌ها

براساس مطالعات صورت‌گرفته در زمینه رویکرد هوش مصنوعی در راه‌رفتن تعداد ۱۳ مقاله با توجه به کلیدواژه‌ها و معیارهای ورود و خروج به دست آمد. در زمینه استفاده از هوش مصنوعی طی راه‌رفتن بر بزرگسالان سالم تعداد ۷ مطالعه به دست آمد و تعداد نمونه‌های شرکت‌کننده در این مطالعات به‌طور کلی ۱۰۷۲ نفر فرد سالم بودند [۱، ۴، ۶-۹، ۱۱]. مطالعاتی که از هوش مصنوعی

براساس جدول شماره ۲، ارزیابی کیفیت مقالات با استفاده از پرسش‌نامه دان و بلک انجام شد [۲۳]. این پرسش‌نامه شامل ۲۷ سؤال است که برای هر سؤال، نمره‌ای بین (۰) و (۱) در نظر گرفته می‌شود؛ به استثنای سؤال ۵ که ۰، ۱ و ۲ امتیازی می‌باشد به‌گونه‌ای که عدد «۱» نشان‌دهنده تأیید و عدد «۰» بیانگر رد یا نبود آن ویژگی در مقاله است. تنها در سؤال شماره ۲۷، امتیازی در بازه (۰) تا (۵) اختصاص می‌یابد. کسب امتیاز ۵ یا نزدیک به آن، بیانگر قدرت آماری بالای مقاله بوده و در مقابل، امتیازهای پایین‌تر نشان‌دهنده قدرت آماری ضعیف‌تر مقاله در همین زمینه است.

به‌منظور جلوگیری از ورود مطالعات تکراری، تمامی مقالات شناسایی‌شده در مراحل غربالگری از نظر نام نویسندگان، سال انتشار، محل انجام مطالعه، جمعیت موردبررسی و بازه زمانی

عمیق ادغامی^{۱۱} موفق به کسب نتایج قوی شد؛ به طوری که ترکیب مدل ResNet101 و طبقه‌بندی‌کننده Naïve Bayes به حساسیت ۰/۸۷ و ویژگی‌زایی ۰/۸۴ دست یافت. علاوه بر این، در پیش‌بینی مسیر راه‌رفتن، مدل‌های LSTM برتری خود را در محیط‌های واقعیت مجازی (VR) ثابت کردند؛ مدل LSTM مبتنی بر داده‌های موقعیت و جهت‌گیری، بهترین پیش‌بینی کوتاه‌مدت (۵۰ میلی ثانیه) را با خطای ۵/۱۴ میلی‌متر ارائه داد، در حالی که ادغام داده‌های ردیابی چشم در پیش‌بینی‌های بلندمدت (۲/۵ ثانیه) با خطای ۶۵/۷۳ سانتی‌متر، مزیت قابل توجهی را در این بازه زمانی نشان داد [۹-۱۱].

در یکی از مطالعاتی که از سیستم ثبت حرکت استفاده شده بود، پژوهشگران گزارش کردند که با ترکیب داده‌های کفی هوشمند و تخمین وضعیت بدن به کمک یک مدل یادگیری ماشین مانند جنگل تصادفی (RF) می‌توان با دقت بالایی بیومارکرهای دیجیتال مهم را استخراج کرد. این بیومارکرها از طریق تحلیل متغیرهای بیومکانیکی نظیر حرکت لگن و مچ پا به دست می‌آیند. چنین رویکردی ظرفیت قابل توجهی برای توسعه روش‌های تشخیصی و مداخلات درمانی پیشرفته‌تر دارد و می‌تواند به‌ویژه در پایش و مدیریت بیماری‌هایی مانند سارکوپنی کاربردی باشد [۲۵].

بحث

هدف از مطالعه حاضر، مروری بر رویکردهای هوش مصنوعی در بیومکانیک راه‌رفتن انسان بود. نتایج نشان داد حسگرهای پوشیدنی به حساسیت ۰/۹۶۱ و مساحت زیر منحنی مشخصه عملکرد گیرنده برابر با ۰/۸۳۳ دست یافتند و مدل‌های رگرسیون بردار پشتیبان، خطای درصدی مطلق میانگین کمتر از ۲/۱ درصد را برای پارامترهایی مانند سرعت و طول گام نشان دادند؛ همچنین حسگرهای تریوالکتریک دقت بالای ۹۵ درصد را در تشخیص هویت فرد ارائه کردند.

در این مطالعه، یافته‌های محققانی که از سیستم ثبت حرکت بدون نشاگر طی راه‌رفتن استفاده کرده بودند، نشان داد سیستم ثبت حرکت بدون نشاگر می‌تواند اندازه‌گیری‌های مکانی-زمانی و سینماتیک در صفحات ساجیتال و فرونتال را ارائه دهد و ضرایب همبستگی آن برای پارامترهای فضایی با سیستم مرجع، توافق نسبتاً خوبی نشان داد. با این حال، تنها پارامتر زمان نوسان در اندازه‌گیری متغیرهای زمانی، توافقی متوسط تا تقریباً کامل با سیستم مرجع داشت که نشان‌دهنده محدودیت آن در مقایسه با سیستم‌های مرجع است [۱، ۲]. از مزیت‌های این مطالعات می‌توان به انجام پژوهش روی بیماران با اختلالات راه‌رفتن اشاره کرد، اما حجم نمونه برخی مطالعات محدود بود. مطالعات بر روی سیستم ثبت حرکت بدون نشاگر نشان دادند این سیستم ردیابی حرکت بدون نشاگر، اندازه‌گیری‌های مکانی معتبر ارائه می‌دهد، اما کاربرد مستقیم بالینی آن هنوز نیازمند تأیید بیشتر است.

در بزرگسالان دارای بیماری استفاده کرده بودند ۶ مطالعه بود که شامل بیماران مبتلا به فلج مغزی [۲۴]، سالمندان بدون زوال عقل [۴]، افراد مبتلا به بیماری پارکینسون [۲]، افراد دچار مشکلات راه‌رفتن [۳]، بیماران مبتلا به سارکوپنی [۲۵]، افراد دچار درد یک طرفه هنگام راه‌رفتن [۷] و افراد دارای ناتوانی حرکتی بودند. تعداد نمونه آماری این مطالعات ۳۷۳۷ نفر بودند. در این مطالعات ۱۵/۴ درصد مقالات از سیستم ثبت حرکت بدون مارکر استفاده کرده بودند [۱، ۲]. ۵۳/۸ درصد مقالات از حسگرهای پوشیدنی [۳-۹] استفاده کرده بودند و ۲۳/۱ از یادگیری ماشین [۹-۱۱] و ۱۰ درصد مقالات از سیستم آنالیز حرکت [۲۵] استفاده کرده بودند.

مطالعاتی که از سیستم ثبت حرکت بدون مارکر استفاده کرده بودند نتیجه گرفتند سیستم ثبت حرکت بدون نشاگر KinaTrax اندازه‌گیری‌های مکانی-زمانی قابل‌اعتمادی را در داخل و بین جلسات، همراه با سینماتیک قابل‌اعتماد در صفحات ساجیتال و فرونتال ارائه می‌دهد؛ اعتبارسنجی نشان داد ضرایب همبستگی درون کلاسی، توافق عالی را برای همه پارامترهای مکانی با سیستم مرجع مبتنی بر نشاگر تأیید می‌کنند، در حالی که متغیرهای زمانی نیز تطابق خوبی دارند، به‌استثنای زمان نوسان که تطابق آن متوسط تا تقریباً کامل گزارش شده است [۱، ۲].

همچنین، مطالعاتی که از حسگرهای پوشیدنی استفاده کرده بودند، نتیجه گرفتند مدل‌های پیشنهادی هوش مصنوعی، به‌ویژه معماری Stack، علی‌رغم چالش‌های ناشی از محل قرارگیری حسگر بر روی پشت بیماران مبتلا به اختلالات راه‌رفتن، توانایی بالایی در طبقه‌بندی صحیح اپیزودهای راه‌رفتن از خود نشان دادند (میانگین حساسیت ۰/۹۶۱ و AUC برابر با ۰/۸۳۳).

علاوه بر این، کاهش فضای ویژگی به بهبود عملکرد اکثر طبقه‌بندی‌کننده‌ها کمک کرد؛ همچنین، مدل‌های SVR دقت عالی در تحلیل پارامترها را با میانگین خطاهای مطلق درصدی (MAE%) بسیار پایین (کمتر از ۲/۱ درصد) برای پارامترهای کلیدی مانند سرعت و طول گام به نمایش گذاشتند. از سوی دیگر، حسگرهای تریوالکتریک با دستیابی به دقت بیش از ۹۵ درصد در تشخیص هویت فرد، ارزیابی ناتوانی حرکتی و وضعیت حرکت، نه تنها توانستند انرژی موردنیاز خود را از حرکات آهسته برداشت کنند، بلکه امکان تحلیل بلادرنگ (Real-Time) داده‌ها را نیز فراهم ساختند که در مجموع، قابلیت اطمینان و کارایی حسگرها برای ارزیابی پارامترهای راه‌رفتن را به‌طور جامع تأیید می‌کند [۳-۹].

مطالعات انجام‌شده روی یادگیری ماشین طی راه‌رفتن نیز نشان دادند رویکردهای مبتنی بر یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، کارایی بالایی در ارزیابی وضعیت حرکتی و پیش‌بینی مسیر راه‌رفتن نشان دادند. در زمینه تخمین و طبقه‌بندی وضعیت بدن، یک رویکرد ترکیبی شامل ضبط ویدئویی با تلفن همراه، ذخیره‌سازی ابری و یادگیری

12. Fusion Deep Learning

محدودیت‌های مطالعه حاضر شامل تعداد محدود مطالعات موجود در زمینه به‌کارگیری هوش مصنوعی در تحلیل راه رفتن، عدم بررسی جمعیت‌های ورزشکار و سالمند، تمرکز برخی پژوهش‌ها بر نمونه‌های کوچک یا گروه‌های خاص و کمبود استانداردهای در روش‌ها است. بنابراین، تعمیم یافته‌ها باید با احتیاط صورت گیرد و کاربرد مستقیم بالینی این فناوری‌ها همچنان نیازمند مطالعات گسترده‌تر و جامع‌تر است. پژوهش‌های آینده باید با جمعیت‌های بالینی بزرگ‌تر و متنوع‌تر انجام شود و عملکرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی در محیط‌های واقعی ارزیابی گردد. همچنین، توسعه چارچوب‌های استاندارد برای جمع‌آوری داده‌ها و تفسیر مدل‌ها می‌تواند کاربرد بالینی این فناوری‌ها را بهبود بخشد.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این مقاله مرور نظام‌مند می‌باشد که بر روی نمونه‌های انسانی و حیوانی انجام نشده است. براین اساس نیاز به کد اخلاق نبود و تمام قوانین اخلاق در پژوهش رعایت شده است.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه کمک مالی از سازمانی‌های دولتی، خصوصی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، منابع و نگارش پیش‌نویس: لیلا صبوری و ابراهیم پیری؛ اعتبارسنجی و بصری‌سازی: ابراهیم پیری؛ تحلیل و تحقیق و بررسی: لیلا صبوری؛ نظارت و مدیریت پروژه: امیرعلی جعفرنژاد گرو؛ ویراستاری و نهایی‌سازی نوشته: همه نویسندگان.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

مطالعات استفاده‌کننده از حسگر طی راه رفتن نشان دادند حسگرهای پوشیدنی، به‌ویژه نوع تریبولکترونیک، در ترکیب با روش‌های پیشرفته یادگیری ماشین، امکان تحلیل پارامترهای راه رفتن، طبقه‌بندی فعالیت‌ها و تشخیص وضعیت حرکتی افراد را فراهم می‌کنند [۳-۹]. این سیستم‌ها عملکرد قابل‌قبولی در شرایط آزمایشگاهی نشان دادند، اما نتایج ممکن است در محیط‌های واقعی و با بیماران متفاوت، تغییر کند. مزایای اصلی شامل دقت تخمین پارامترها با خطاهای نسبتاً پایین، قابلیت خودتأمین انرژی سنسورهای تریبولکترونیک و عملکرد بالا در تشخیص هویت و ناتوانی حرکتی است. معایب و محدودیت‌ها شامل نوسان در عملکرد ویژگی در شرایط نصب سخت (مانند روی پشت بیمار که به ۶۴۳/۰ رسید) و وابستگی به بهینه‌سازی دقیق مدل یادگیری ماشین و انتخاب ویژگی‌ها است که نیازمند تنظیم برای هر سناریوی کاربردی خاص می‌باشد.

مطالعات استفاده‌کننده از یادگیری ماشین نشان دادند ترکیب ضبط ویدئویی با دوربین تلفن همراه، ذخیره‌سازی ابری و یادگیری عمیق ادغامی امکان تخمین و طبقه‌بندی وضعیت بدن را فراهم می‌کند و به نتایج نسبتاً موفقی دست یافته‌اند. ترکیب مدل بکه عصبی کانولوشنی عمیق و طبقه‌بندی‌کننده بیز ساده عملکرد قابل‌قبولی در طبقه‌بندی دست نشان داد؛ همچنین مدل‌های حافظه بلندمدت برای پیش‌بینی مسیر راه رفتن در محیط واقعیت مجازی مناسب بودند. در پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت (۵۰ میلی‌ثانیه) خطای ۱۴/۵ میلی‌متر و در پیش‌بینی‌های بلندمدت‌تر (۲/۵ ثانیه) با استفاده از داده‌های ردیابی چشم، خطا به ۶۵/۷۳ سانتی‌متر کاهش یافت [۹-۱۱]. مزایای این رویکرد شامل سهولت جمع‌آوری داده‌ها با دوربین تلفن همراه و استفاده از ذخیره‌سازی ابری است؛ با این حال، معایب شامل تأخیر بالقوه در انتقال داده‌ها و پردازش سنگین مدل‌های یادگیری عمیق و وابستگی به کیفیت تصاویر در محیط‌های مختلف است.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این مرور نشان می‌دهد به‌کارگیری روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، نقش مؤثری در بهبود دقت، قابلیت اطمینان و تفسیرپذیری داده‌های حاصل از حسگرهای پوشیدنی و سیستم‌های ثبت حرکت بدون نشانگر در تحلیل راه رفتن انسان دارد. نتایج حاکی از آن است که این رویکردها قادرند محدودیت‌های ذاتی حسگرها و روش‌های سنتی را تا حد زیادی جبران کرده و امکان استخراج پارامترهای مکانی-زمانی و سینماتیکی معتبر را فراهم سازند. با وجود عملکرد امیدوارکننده در شرایط آزمایشگاهی و برخی جمعیت‌های بالینی، شواهد موجود نشان می‌دهد برای تعمیم‌پذیری نتایج و کاربرد بالینی گسترده، انجام مطالعات با حجم نمونه بزرگ‌تر، طراحی‌های استاندارد و ارزیابی در محیط‌های واقعی ضروری است.

References

- [1] Schoenwether B, Ricip Z, Nienhuis M, Signorile JF, Best TM, Eltoukhy M. Reliability of artificial intelligence-driven markerless motion capture in gait analyses of healthy adults. *PloS One*. 2025; 20(1):e0316119. [DOI:10.1371/journal.pone.0316119] [PMID] [PMCID]
- [2] Ricip Z, Signorile JF, Best TM, Jacobs KA, Nienhuis M, Whitelaw C, et al. Validity of artificial intelligence-based markerless motion capture system for clinical gait analysis: Spatiotemporal results in healthy adults and adults with Parkinson's disease. *Journal of Biomechanics*. 2023; 155:111645. [DOI:10.1016/j.jbiomech.2023.111645] [PMID]
- [3] Pecimankar A, Winther TS, Ebrahimi A, Will UK. A machine learning approach for walking classification in elderly people with gait disorders. *Sensors*. 2023; 23(2):679. [DOI:10.3390/s23020679] [PMID] [PMCID]
- [4] Obuchi SP, Kojima M, Suzuki H, Garbalosa JC, Imamura K, Ihara K, et al. Artificial intelligence detection of cognitive impairment in older adults during walking. *Alzheimer's & dementia*. 2024; 16(3):e70012. [DOI:10.1002/dad2.70012] [PMID] [PMCID]
- [5] Galasso S, Baptista R, Molinara M, Pizzocaro S, Calabrò RS, De Nunzio AM. Predicting physical activity levels from kinematic gait data using machine learning techniques. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023; 123:106487. [DOI:10.1016/j.engappai.2023.106487]
- [6] Bauman VV, Brandon SCE. Gait phase detection in walking and stairs using machine learning. *Journal of Biomechanical Engineering*. 2022; 144(12):121007. [PMID] [DOI:10.1115/1.4055504] [PMID]
- [7] Bacon KL, Felson DT, Jafarzadeh SR, Kolachalama VB, Hausdorff JM, Gazit E, et al. Relation of gait measures with mild unilateral knee pain during walking using machine learning. *Scientific Reports*. 2022; 12(1):22200. [DOI:10.1038/s41598-022-21142-2] [PMID] [PMCID]
- [8] Guo X, He T, Zhang Z, Luo A, Wang F, Ng EJ, et al. Artificial intelligence-enabled caregiving walking stick powered by ultra-low-frequency human motion. *ACS Nano*. 2021; 15(12):19054-69. [DOI:10.1021/acsnano.1c04464] [PMID]
- [9] Zhang H, Guo Y, Zanutto D. Accurate ambulatory gait analysis in walking and running using machine learning models. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2019; 28(1):191-202. [DOI:10.1109/TNSRE.2019.2958679] [PMID]
- [10] Bremer G, Stein N, Lappe M. Predicting future position from natural walking and eye movements with machine learning. paper presented: international conference on artificial intelligence and virtual reality (AIVR). 15 Nov 2021; Taichung, Taiwan. [DOI:10.1109/AIVR52153.2021.00013]
- [11] Lee P, Chen TB, Liu CH, Wang CY, Huang GH, Lu NH. Identifying the posture of young adults in walking videos by using a fusion artificial intelligent method. *Biosensors*. 2022; 12(5):295. [DOI:10.3390/bios12050295] [PMID] [PMCID]
- [12] Grosboillot N, Gallou-Guyot M, Lamontagne A, Bonnyaud C, Perrot A, Allali G, et al. Towards a comprehensive framework for complex walking tasks: Characterization, behavioral adaptations, and clinical implications in ageing and neurological populations. *Ageing Research Reviews*. 2024; 101:102458. [DOI:10.1016/j.arr.2024.102458] [PMID]
- [13] Piri E, Barghamadi M, Farzizade R. [Comparison of the effects of immediate and long-term water and thera band exercises on loading rate, impulse, and free moment in people with pronate foot during walking: A clinical trial (Persian)]. *Journal of Gorgan University of Medical Sciences*. 2022; 24(4):10-19. [Link]
- [14] Barghamadi M, Piri E, Behboodi Z, Allahverdidost H, Nosrati-hashai A, Imani F. [Effects of the immediate and long-term water and thera band exercises on ground reaction forces in people with pronate foot during walking (Persian)]. *Journal of Paramedical Sciences & Rehabilitation*. 2023; 12(1):7-19. [DOI:10.22038/jpsr.2023.68577.2440]
- [15] Semaan MB, Wallard L, Ruiz V, Gillet C, Leteneur S, Simoneau-Buessinger E. Is treadmill walking biomechanically comparable to overground walking? A systematic review. *Gait & posture*. 2022; 92:249-57. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2021.11.009] [PMID]
- [16] Molavian R, Fatahi A, Abbasi H, Khezri D. Artificial intelligence approach in biomechanics of gait and sport: A systematic literature review. *Journal of Biomedical Physics & Engineering*. 2023; 13(5):383-402. [DOI:10.31661/jbpe.v0i0.2305-1621]
- [17] Nadikattu RR. Implementation of new ways of artificial intelligence in sports. *Journal of Xidian University*. 2020; 14(5):5983-97. [DOI:10.37896/jxu14.5/649]
- [18] Zhou H, Park C, Shahbazi M, York MK, Kunik ME, Naik AD, et al. Digital biomarkers of cognitive frailty: The value of detailed gait assessment beyond gait speed. *Gerontology*. 2022; 68(2):224-33. [DOI:10.1159/000515939] [PMID] [PMCID]
- [19] Zhou Y, Romijnders R, Hansen C, Campen Jv, Maetzler W, Hortobágyi T, et al. The detection of age groups by dynamic gait outcomes using machine learning approaches. *Scientific Reports*. 2020; 10(1):4426. [DOI:10.1038/s41598-020-61423-2] [PMID] [PMCID]
- [20] Kosse NM, Vuillerme N, Hortobágyi T, Lamothe CJ. Multiple gait parameters derived from iPod accelerometry predict age-related gait changes. *Gait & posture*. 2016; 46:112-7. [DOI:10.1016/j.gaitpost.2016.02.022] [PMID]
- [21] Harris EJ, Khoo IH, Demircan E. A survey of human gait-based artificial intelligence applications. *Frontiers in Robotics and AI*. 2022; 8:749274. [DOI:10.3389/frobt.2021.749274] [PMID] [PMCID]
- [22] Mondal S, Das S, Vrana VG. How to bell the cat? A theoretical review of generative artificial intelligence towards digital disruption in all walks of life. *Technologies*. 2023; 11(2):44. [DOI:10.3390/technologies11020044]
- [23] Downs SH, Black N. The feasibility of creating a checklist for the assessment of the methodological quality both of randomised and non-randomised studies of health care interventions. *Journal of Epidemiology & Community Health*. 1998; 52(6):377-84. [DOI:10.1136/jech.52.6.377] [PMID] [PMCID]
- [24] Salami F, Ozates ME, Arslan YZ, Wolf SI. Can we use lower extremity joint moments predicted by the artificial intelligence model during walking in patients with cerebral palsy in the clinical gait analysis? *PloS one*. 2025; 20(4):e0320793. [DOI:10.1371/journal.pone.0320793] [PMID] [PMCID]
- [25] Kim S, Kim HS, Yoo JI. Sarcopenia classification model for musculoskeletal patients using smart insole and artificial intelligence gait analysis. *Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle*. 2023; 14(6):2793-803. [DOI:10.1002/jcsm.13356] [PMID] [PMCID]