

The Application of Artificial Intelligence in Analyzing Central and Peripheral Mechanisms in Gait Adaptation During Aging

Roya. Khosropour¹ , Sasan. Bahrehmand^{1*} 

¹ Department of Physical Education and Sport Science, Ma.C., Islamic Azad University, Mashhad, Iran

* Corresponding author email address: sasanbahrehmand@institution.edu

Article Info

Article type:

Review Article

How to cite this article:

Khosropour, R., & Bahrehmand, S. (2025). The Application of Artificial Intelligence in Analyzing Central and Peripheral Mechanisms in Gait Adaptation During Aging. *Longevity*, 3(2), 1-20.

<https://doi.org/10.61838/kman.longevity.57>



© 2025 the authors. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License.

ABSTRACT

To investigate the role of artificial intelligence in analyzing central and peripheral mechanisms involved in gait adaptation among the elderly. This study employed a narrative review design using descriptive analysis. A systematic search was conducted across international databases from 2015 to 2025 to identify relevant studies on the use of AI in gait analysis in older adults. Extracted data were categorized based on data types (motion, neural, muscular, wearable) and the AI algorithms applied. The results indicate that AI algorithms have effectively identified abnormal gait patterns in older adults and modeled interactions between brain activity, muscle coordination, and joint dynamics. The use of multimodal data, such as EEG, EMG, fNIRS imaging, and wearable sensors, has enabled early prediction of pathological gait changes. Algorithms such as neural networks, Random Forest, and SVM demonstrated high performance in processing these datasets. Artificial intelligence, through its capacity to process complex data and detect hidden patterns, serves as a powerful tool in the analysis of gait mechanisms in aging. Despite challenges such as data quality dependency and interpretability issues, AI can play a vital role in early diagnosis, personalized rehabilitation planning, and enhancing mobility independence in older adults.

Keywords: *Artificial intelligence, aging, gait, machine learning, central and peripheral mechanisms*

Introduction

Age-related changes in the neuromuscular and cognitive systems significantly influence gait patterns and stability in older adults, often resulting in a higher risk of falls, reduced independence, and a lower quality of life. Gait is a complex, dynamic process involving not only biomechanical and muscular systems but also high-level neural coordination between central and peripheral mechanisms. With age, central mechanisms such as cortical motor planning and sensorimotor integration deteriorate, making gait control more dependent on compensatory strategies (Al-Yahya et al., 2019). Simultaneously, peripheral mechanisms, including muscle strength, proprioception, and joint coordination, are compromised, contributing to gait irregularities (Wallard et al., 2018).

In recent years, artificial intelligence (AI) has emerged as a transformative approach in the analysis of gait, offering advanced tools to handle the multidimensional and nonlinear nature of gait-related data. Machine learning algorithms, particularly deep learning models, have demonstrated strong potential in classifying gait patterns, predicting fall risk, and modeling neural control of locomotion (Sun et al., 2023). The application of AI in this domain is supported by its capacity to process large-scale, heterogeneous data—including motion capture, electromyography (EMG), brain imaging, and wearable sensor data—simultaneously and extract meaningful features for precise modeling (Kim et al., 2023b).

AI-based systems are also used to explore the cortical underpinnings of gait control. Neuroimaging data from functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) and electroencephalography (EEG) have been employed to understand how prefrontal and motor cortices are engaged during dual-task walking in older adults (Sui et al., 2022). These studies suggest that aging leads to increased reliance on frontal brain regions during locomotion, possibly as a compensatory response to deficits in automatic motor control (Holtzer et al., 2015). Wearable sensors, which can capture spatiotemporal gait parameters in real-world environments, have further enabled continuous, non-invasive monitoring and real-time feedback generation (Nocera et al., 2019).

Despite the vast potential, the use of AI in gait analysis faces challenges, including data quality dependence, risks of overfitting in models, difficulties in model interpretability, and ethical concerns related to the privacy of older adults' physiological data (Clarke et al., 2021; Marcus et al., 2019). Nonetheless, AI provides a promising path toward personalized, predictive, and preventive gait assessment and rehabilitation strategies for aging populations.

This study aims to provide a comprehensive narrative review of how AI technologies are being utilized to analyze central and peripheral mechanisms involved in gait adaptation during aging. By synthesizing recent empirical findings and technological innovations, the paper explores the types of data employed, the modeling strategies used, and the implications of AI-based gait analysis in clinical and rehabilitation contexts.

Methods and Materials

This narrative review was conducted using a descriptive analysis approach to synthesize current literature on the use of artificial intelligence in understanding gait mechanisms among the elderly. A structured search strategy was applied to international databases including PubMed, Scopus, IEEE Xplore, and Web of Science, focusing on studies published between 2015 and 2025. Studies included in this review

focused on AI applications in gait analysis related to central nervous system activity, peripheral biomechanics, and multimodal data integration.

Studies were selected based on relevance to elderly gait adaptation, use of AI-based modeling (machine learning or deep learning), and utilization of data such as motion capture, EMG, EEG/fNIRS, or wearable sensors. Data extraction focused on the type of algorithm used, data modality, analytical goals (e.g., classification, prediction, modeling), and key findings. Analysis was descriptive, focusing on recurring themes and patterns across studies.

Findings and Results

The findings of this review indicate that AI algorithms have been effectively employed to identify abnormal gait patterns in elderly individuals, using a wide array of data types. Machine learning models such as Random Forest and Support Vector Machines (SVM) have been applied to motion capture and inertial measurement unit (IMU) data to classify gait irregularities and predict fall risk with high accuracy. Deep learning models, including convolutional and recurrent neural networks (CNN, RNN), have been particularly effective in processing time-series data from wearable sensors and EMG.

Neuroimaging data from EEG and fNIRS have been used to model central mechanisms of gait control, revealing increased engagement of prefrontal regions during dual-task walking in older adults. These models have identified functional connectivity changes and alterations in cortical activation patterns associated with cognitive-motor interference.

Peripheral mechanisms, such as muscle coordination and joint kinematics, have been modeled using AI to reveal compensatory strategies employed by elderly individuals during gait. For example, EMG-based models have demonstrated shifts in muscle activation timing, while motion capture data combined with AI have illustrated altered joint dynamics across gait phases.

The review also found that AI is being used for early detection of pathological gait changes. Algorithms trained on multimodal datasets have identified subtle deviations in gait that precede clinical symptoms, enabling proactive interventions. Wearable-based models have been deployed for real-time gait monitoring and fall detection, offering practical applications in home and community settings.

Despite these advancements, challenges persist in data standardization, synchronization of multimodal inputs, and the interpretability of model outputs. Several studies have emphasized the need for explainable AI to improve clinical trust and utility.

Conclusion

The use of artificial intelligence in analyzing gait adaptation among older adults marks a paradigm shift in how researchers and clinicians approach mobility assessment. Traditional biomechanical analysis often relies on isolated measures and assumes linear relationships among variables. In contrast, AI enables the integration of diverse datasets and the identification of nonlinear, complex interdependencies between neural, muscular, and biomechanical systems.

By leveraging AI, researchers have gained deeper insight into how aging affects central and peripheral mechanisms involved in gait control. For instance, the discovery that prefrontal cortex engagement increases during walking among older adults suggests a shift from automatic to cognitively

mediated locomotion. Similarly, the ability to model and quantify muscular compensation strategies allows for a more individualized understanding of motor adaptation.

Moreover, AI systems facilitate the early detection of subtle gait anomalies that might not be observable through conventional assessments. This capability is crucial in preventative healthcare, as it opens the door to timely interventions before gait deterioration results in functional loss or injury. Wearable technologies powered by AI offer continuous monitoring in real-world settings, supporting the transition toward personalized and adaptive rehabilitation strategies.

However, the implementation of AI in this context is not without limitations. Data quality remains a critical concern, particularly when dealing with noisy sensor inputs or small sample sizes. Overfitting remains a technical hurdle, especially in deep learning models trained on limited data. Furthermore, the opacity of some AI models poses challenges for clinical decision-making, where transparency and explainability are paramount.

Ethical considerations also warrant attention. As AI systems increasingly rely on physiological and behavioral data, ensuring the privacy and informed consent of older adults becomes imperative. Trust in AI tools can only be achieved through robust ethical frameworks and clear communication of how data is used, stored, and protected.

In conclusion, artificial intelligence holds substantial promise for advancing our understanding of gait mechanisms in aging. It enables multidimensional analysis of movement patterns, uncovers previously hidden neural and biomechanical relationships, and paves the way for smarter, more individualized interventions. Moving forward, interdisciplinary collaboration between engineers, clinicians, neuroscientists, and ethicists will be essential to harness the full potential of AI in promoting healthy aging and mobility preservation.

Conflict of Interest

There is no conflict of interest in conducting the present study.

Acknowledgments

None.

Authors' Contributions

All authors contributed equally to the writing of this article.

Ethical Considerations

This study was conducted in full compliance with ethical principles in writing and publishing scientific articles.

Data Transparency

The data and sources used in this study will be made available upon request from the corresponding author, in compliance with copyright regulations.

Funding

This research received no financial support.

کاربرد هوش مصنوعی در تحلیل مکانیسم‌های مرکزی و محیطی در سازگاری راه رفتن در فرآیند سالمندی

رویا خسروپور^۱، ساسان بهره‌مند^{۱*}

۱. گروه تربیت بدنی و علوم ورزشی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

*ایمیل نویسنده مسئول: sasanbahrehmand@institution.edu

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله

مروری

نحوه استناد به این مقاله:

خسروپور، رویا، و بهره‌مند، ساسان. (۱۴۰۴). کاربرد هوش مصنوعی در تحلیل مکانیسم‌های مرکزی و محیطی در سازگاری راه رفتن در فرآیند سالمندی. *طول عمر*، ۳(۲)، ۱-۲۰.



© ۱۴۰۴ تمامی حقوق انتشار این مقاله متعلق به نویسنده است. انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با گواهی (CC BY-NC 4.0) صورت گرفته است.

بررسی نقش هوش مصنوعی در تحلیل مکانیسم‌های مرکزی و محیطی مرتبط با سازگاری راه رفتن در سالمندان. این پژوهش به صورت مروری روایی با رویکرد تحلیل توصیفی انجام شده و با مرور نظام‌مند منابع علمی بین‌المللی بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵، مطالعات مرتبط با به کارگیری هوش مصنوعی در تحلیل راه رفتن سالمندان بررسی شده است. داده‌ها از پایگاه‌های علمی معتبر استخراج و بر اساس نوع داده (حرکتی، عصبی، عضلانی، پوشیدنی) و الگوریتم‌های مورد استفاده طبقه‌بندی و تحلیل شده‌اند. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که الگوریتم‌های هوش مصنوعی توانسته‌اند الگوهای اختلالی راه رفتن سالمندان را با دقت بالا شناسایی کرده و ارتباط بین فعالیت مغزی، عضلانی و دینامیک مفاصل را مدل‌سازی کنند. همچنین استفاده از داده‌های چندمنبعی مانند EEG، EMG، تصویربرداری fNIRS و حسگرهای پوشیدنی امکان پیش‌بینی تغییرات پاتولوژیک را در مراحل اولیه فراهم کرده است. الگوریتم‌هایی مانند شبکه‌های عصبی، Random Forest و SVM عملکرد مطلوبی در تحلیل این داده‌ها نشان داده‌اند. هوش مصنوعی با توانایی پردازش داده‌های پیچیده و استخراج الگوهای پنهان، ابزار مؤثری برای تحلیل مکانیسم‌های راه رفتن در سالمندان محسوب می‌شود. علی‌رغم چالش‌هایی مانند وابستگی به داده‌های با کیفیت و مسائل تفسیرپذیری، این فناوری می‌تواند در تشخیص زودهنگام، برنامه‌ریزی توانبخشی شخصی‌سازی شده، و ارتقاء استقلال حرکتی سالمندان نقشی کلیدی ایفا کند.

کلیدواژه‌گان: هوش مصنوعی، سالمندی، راه رفتن، یادگیری ماشین، مکانیسم‌های مرکزی و محیطی

مقدمه

با افزایش سن، سیستم‌های عصبی مرکزی دچار تغییراتی در ساختار و عملکرد می‌شوند که بر برنامه‌ریزی و کنترل حرکتی تأثیرگذار است. به‌عنوان مثال، شواهد تصویربرداری عملکردی نشان داده‌اند که فعالیت مناطق پیش‌پیشانی مغز هنگام راه رفتن در سالمندان بیشتر از جوانان است، که احتمالاً به‌منظور جبران کاهش کارایی ساختارهای تحت‌قشری صورت می‌گیرد (Holtzer et al., 2015). همچنین، اختلال در هماهنگی سیستم‌های بینایی، دهلیزی و حس عمقی در مغز می‌تواند بر دقت و تطبیق حرکتی تأثیر بگذارد، امری که در سالمندان شایع‌تر است (Gimmon et al., 2017). این اختلالات در سطح مرکزی اغلب همراه با کندی حرکات، طول گام کمتر، و افزایش نوسانات تنه در حین راه رفتن است که پایداری حرکتی را کاهش می‌دهد (Monfort et al., 2019).

در کنار تغییرات مرکزی، سازوکارهای محیطی شامل عضلات، مفاصل، و بازخوردهای حسی نیز تحت تأثیر سالمندی قرار می‌گیرند. کاهش قدرت عضلات اندام تحتانی، به‌ویژه در عضلات همسترینگ و چهارسر، یکی از عوامل اصلی ناتوانی حرکتی در سالمندان است (Huang et al., 2017). تحلیل دینامیک مفاصل زانو، مچ پا و لگن نیز نشان می‌دهد که سالمندان برای حفظ تعادل بیشتر از راهبردهای جبرانی بهره می‌برند که ممکن است کارایی کلی حرکت را کاهش دهد (Wallard et al., 2018). اختلال در عملکرد گیرنده‌های حسی پا و کاهش حس فشار و موقعیت نیز از جمله عواملی هستند که واکنش‌های اصلاحی در برابر لغزش یا زمین خوردن را کندتر می‌سازند (Kim et al., 2023a). فراتر از تغییرات فیزیولوژیک، راه رفتن در سالمندان تحت تأثیر عوامل شناختی نیز قرار دارد. مفهومی به نام "تداخل شناختی-حرکتی" به وضعیت‌هایی اشاره دارد که در آن فرد هم‌زمان با راه رفتن، باید وظایف شناختی مانند محاسبه یا تصمیم‌گیری را انجام دهد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که سالمندان در چنین شرایطی بیشتر مستعد بی‌تعادلی و لغزش هستند، زیرا پردازش شناختی و حرکتی آن‌ها رقابت بیشتری برای منابع عصبی ایجاد می‌کند (Al-Yahya et al., 2019). تحلیل این مکانیسم‌های چندوجهی نیازمند ابزارهایی است که بتوانند داده‌های پیچیده را هم‌زمان پردازش کرده و الگوهای پنهان در تعامل سیستم‌ها را شناسایی نمایند.

در چنین بستری، هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری نوین با قابلیت تحلیل داده‌های حجیم، شناسایی الگوهای پنهان، و پیش‌بینی رفتارهای آینده، پتانسیل بالایی در تحلیل مکانیسم‌های حرکتی سالمندان دارد. برخلاف روش‌های سنتی که معمولاً بر تحلیل‌های میانگین و مقایسه گروهی تمرکز دارند، الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند الگوهای فردی، غیراستاندارد، یا پاتولوژیک را شناسایی کرده و حتی در غیاب علائم بالینی هشدارهایی ارائه دهند (Sui et al., 2022). به‌طور خاص، در بررسی راه رفتن، داده‌هایی مانند نوسانات تنه، زاویه مفاصل، زمان تماس کف پا با زمین، الگوی فشار کف پا و حتی داده‌های مغزی از طریق EEG یا fNIRS می‌توانند وارد مدل‌های هوش مصنوعی شده و ساختارهای پیچیده عصبی و عضلانی دخیل در راه رفتن را مدل‌سازی کنند (Clarke et al., 2021).

در حوزه‌های اخیر، استفاده از الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری عمیق در تحلیل الگوهای حرکتی رشد چشمگیری داشته است. برای نمونه، مدل‌های convolutional neural network (CNN) و recurrent neural network (RNN) در تحلیل داده‌های حرکتی پوشیدنی‌ها و سنسورها عملکرد بسیار خوبی داشته‌اند (Zhang, 2025). این مدل‌ها قادر به تمایز الگوهای راه رفتن سالم از پاتولوژیک، تشخیص زود هنگام افت عملکرد حرکتی، و حتی پیش‌بینی واکنش به توانبخشی یا تمرینات حرکتی هستند (Sun et al., 2023). افزون بر این، کاربرد هوش مصنوعی در تحلیل فعالیت مغز حین راه رفتن نیز رشد کرده است؛ به‌عنوان مثال، پردازش سیگنال‌های fNIRS برای سنجش هم‌زمان فعالیت قشر پیش‌پیشانی و حرکات پا می‌تواند بینش‌های جدیدی در مورد نحوه تعامل سیستم‌های عصبی مرکزی و محیطی فراهم کند (Sui et al., 2022).

در مطالعات دیگری نیز نشان داده شده که استفاده از هوش مصنوعی در طراحی سیستم‌های توانبخشی واقعیت مجازی یا رابط‌های مغز-ماشین می‌تواند تجربه درمانی سالمندان را به شکل معناداری بهبود بخشد (Bouzar et al., 2022). همچنین در محیط‌های شبیه‌سازی شده با واقعیت مجازی، امکان مطالعه دقیق‌تر الگوهای راه رفتن در شرایط پیچیده‌تر (نظیر راه رفتن همراه با تصمیم‌گیری یا اجتناب از موانع) فراهم شده است، که در مطالعات سنتی محدودیت زیادی داشت (Marcus et al., 2019).

با توجه به این زمینه‌ها، هدف از مقاله حاضر، بررسی نقش و کارکرد هوش مصنوعی در تحلیل مکانیسم‌های مرکزی و محیطی سازگارکننده راه رفتن در فرآیند سالمندی است.

روش پژوهش

در نگارش این مطالعه مروری روایی با رویکرد تحلیل توصیفی، هدف اصلی بررسی کاربردهای نوین هوش مصنوعی در تحلیل سازوکارهای مرکزی و محیطی مرتبط با راه رفتن در فرآیند سالمندی بوده است. به منظور دستیابی به یک دید جامع و به‌روز از وضعیت موجود در این حوزه، روش کار مبتنی بر مرور سیستماتیک منابع علمی معتبر و تحلیل توصیفی محتوای آن‌ها انتخاب شد. بدین منظور، مراحل جستجو، انتخاب، تحلیل و طبقه‌بندی اطلاعات در قالب روش‌شناسی مشخصی دنبال گردید.

فرآیند جستجوی منابع در پایگاه‌های داده بین‌المللی شامل PubMed، Scopus، Web of Science و IEEE Xplore انجام شد. همچنین پایگاه‌های تخصصی در حوزه علوم اعصاب، بیومکانیک و هوش مصنوعی مانند ScienceDirect، SpringerLink و Google Scholar نیز به صورت مکمل مورد استفاده قرار گرفت. دامنه زمانی جستجو به گونه‌ای تنظیم شد که فقط مقالات منتشر شده از ژانویه ۲۰۱۵ تا آوریل ۲۰۲۵ را شامل شود. کلیدواژه‌های ترکیبی به زبان انگلیسی شامل عبارت‌هایی مانند "gait"، "artificial intelligence"، "adaptation"، "aging"، "central nervous system"، "peripheral nervous system"، "wearable sensors"، "machine learning"، "biomechanics" و "deep learning" بودند. از راهبرد جستجوی منطقی بولی (AND، OR) برای ترکیب واژه‌ها و محدود کردن نتایج استفاده شد.

در مرحله پالایش، ابتدا عنوان و چکیده مقالات بررسی شد و مقالات تکراری یا نامرتب حذف گردیدند. سپس مقالاتی که به صورت مستقیم به کاربرد هوش مصنوعی در تحلیل مکانیسم‌های مرتبط با راه رفتن در سالمندان پرداخته بودند، وارد تحلیل نهایی شدند. ملاک‌های ورود شامل مقالات مروری یا تجربی با داده‌های کمی یا کیفی قابل تفسیر، انتشار در مجلات دارای داوری همتا، و تمرکز بر یکی از محورهای اصلی شامل مکانیسم‌های عصبی مرکزی، مکانیسم‌های محیطی یا فناوری‌های پوشیدنی در سالمندان بودند. مقالات صرفاً نظری یا فاقد داده‌های تجربی نیز در صورت برخورداری از چارچوب مفهومی مرتبط مورد بررسی قرار گرفتند.

برای استخراج داده‌ها، از روش تحلیل محتوای توصیفی استفاده شد. محتوای اصلی مقالات منتخب شامل اهداف، نوع داده‌ها، ابزارهای اندازه‌گیری، نوع الگوریتم‌های هوش مصنوعی، نتایج تحلیل‌های حرکتی، و پیامدهای بالینی در سالمندان، به صورت نظام‌مند کدگذاری شد. سپس یافته‌ها در سه محور اصلی شامل سازوکارهای عصبی مرکزی، سازوکارهای محیطی و کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین دسته‌بندی گردیدند. در این مرحله، مقالاتی که هم‌زمان به بیش از یک محور اشاره داشتند، در هر دسته تحلیل شدند تا هم‌پوشانی‌های محتوایی نیز پوشش داده شود.

در کنار تحلیل محتوای متون، یک مرحله اعتبارسنجی منابع نیز صورت گرفت تا از اعتبار علمی مقالات منتخب اطمینان حاصل شود. مقالات با ضریب تأثیر پایین، یا مقالاتی که فاقد شفافیت در روش‌شناسی و گزارش یافته‌ها بودند، از فرآیند تحلیل حذف شدند. همچنین

برای پوشش جامع‌تر موضوع، برخی مقالات کلیدی از طریق روش snowballing (ارجاعات مقالات منتخب) شناسایی و وارد تحلیل نهایی شدند.

در گام نهایی، تحلیل‌ها با هدف ترسیم روندهای اصلی، شناسایی خلأهای پژوهشی، و تعیین قابلیت‌های کاربردی الگوریتم‌های هوش مصنوعی در تحلیل مکانیسم‌های راه رفتن در سالمندان، در چارچوبی توصیفی و مقایسه‌ای گزارش شدند. برای افزایش دقت تحلیلی، برخی مقایسه‌ها بین الگوریتم‌های مورد استفاده در مطالعات مختلف، ابزارهای گردآوری داده‌ها (مانند حسگرهای پوشیدنی، EEG، EMG، و fMRI)، و نوع مکانیسم هدف (مرکزی یا محیطی) نیز صورت گرفت.

مبانی نظری و فیزیولوژیکی سازگاری راه رفتن در سالمندی

عملکرد راه رفتن یکی از نمودهای تعامل سیستم‌های حرکتی، عصبی، و شناختی در بدن انسان است. راه رفتن را نمی‌توان صرفاً مجموعه‌ای از انقباضات عضلانی دانست؛ بلکه حرکتی هماهنگ و پویا است که بر پایه تعامل لحظه‌به‌لحظه سیستم‌های عصبی مرکزی و محیطی، اطلاعات حسی، تصمیم‌گیری شناختی و تطبیق مداوم با شرایط محیطی استوار است. در واقع، عملکرد راه رفتن ترکیبی از توانایی تولید نیرو، هماهنگی بین‌عضلانی، حفظ تعادل، پردازش اطلاعات حسی، و تنظیم بازخورد حرکتی است. این فرایند به گونه‌ای طراحی شده که حتی در شرایط چالش‌برانگیز نظیر زمین ناهموار یا تداخلات شناختی، بتواند ثبات و کارایی حرکتی را حفظ کند. در سطح مرکزی، مغز و نخاع نقش اساسی در تولید، تنظیم و اصلاح حرکات گام‌برداری دارند. گره‌های عصبی در ساقه مغز، به‌ویژه در ناحیه مشبک، کنترل الگوی پایه راه رفتن را بر عهده دارند و با سایر ساختارها نظیر عقده‌های قاعده‌ای، مخچه و قشر حرکتی ارتباط تنگاتنگی دارند (Holtzer et al., 2015). از سوی دیگر، نخاع نیز از طریق شبکه‌ای از الگوهای مرکزی حرکتی موسوم به Central Pattern Generators (CPG) قادر به تولید حرکت گام‌برداری ریتمیک و مستقل از قشر مغز است (Wang et al., 2017). این الگوها می‌توانند در شرایط خاص بدون ورودی حسی نیز فعالیت داشته باشند، اما برای تطبیق با محیط، نیازمند اصلاح از سوی بازخوردهای حسی و ساختارهای بالادستی هستند.

فرایند کنترل حرکتی راه رفتن نیز به‌شدت متأثر از سامانه‌های حس عمقی، بینایی و دهلیزی است. به‌عنوان مثال، اختلال در پردازش دهلیزی مرکزی می‌تواند هماهنگی بین نیم‌کره‌های مغز را بر هم زند و به ناپایداری در راه رفتن بینجامد (Gimmon et al., 2017). مطالعات تصویربرداری عملکردی نشان داده‌اند که هنگام راه رفتن، افزایش فعالیت در نواحی پیش‌پیشانی مغز در سالمندان وجود دارد، که نشان‌دهنده نقش بیشتر کنترل شناختی در این گروه سنی است (Holtzer et al., 2015). این در حالی است که در افراد جوان، ساختارهای تحت‌قشری نقش غالب‌تری در تنظیم حرکت دارند. چنین تغییراتی می‌تواند نشانه‌ای از سازگاری جبرانی سیستم عصبی در مواجهه با کاهش کارایی ساختارهای اولیه کنترل حرکتی باشد.

عقده‌های قاعده‌ای و مخچه نیز در پالایش و زمان‌بندی حرکات نقش کلیدی دارند. آسیب یا کاهش کارایی این ساختارها در سالمندی می‌تواند منجر به بی‌نظمی در ریتم گام‌برداری، لرزش، یا دشواری در تطبیق با تغییرات محیطی شود (Nocera et al., 2019). افزون بر این، عملکرد کورتکس حرکتی اولیه و نواحی مجاور آن در پیش‌بینی و آماده‌سازی حرکات بعدی مؤثر است و اختلال در این نواحی، بر دقت و سرعت پاسخ حرکتی اثر می‌گذارد (Monfort et al., 2019).

در بعد محیطی، عملکرد عضلات، مفاصل، و گیرنده‌های حسی پایه‌ای‌ترین عناصر در تولید حرکت محسوب می‌شوند. عضلات اندام تحتانی نه‌تنها باید توانایی تولید نیرو برای حرکت رو به جلو را داشته باشند، بلکه باید پایداری بدن را در هر گام حفظ کنند. با افزایش سن، کاهش حجم و قدرت عضلات (به‌ویژه عضلات چهارسر ران و ساق پا) به‌صورت چشمگیری دیده می‌شود که به کاهش سرعت راه رفتن، طول

گام کمتر، و زمان طولانی‌تر تماس کف پا با زمین می‌انجامد (Huang et al., 2017). همچنین، تغییر در ترکیب فیبرهای عضلانی از نوع تند انقباض به کند انقباض، باعث کاهش توانایی واکنش سریع به اختلالات تعادلی می‌شود (Mitchell et al., 2018).

از سوی دیگر، مفاصل زانو، لگن و مچ پا با پدیده‌هایی نظیر کاهش دامنه حرکت، سفتی ساختارهای لیگامانی، و فرسایش غضروف مواجه می‌شوند. این تغییرات مکانیکی، منجر به محدود شدن حرکت و افزایش بار وارده به عضلات می‌شود. تحلیل کینماتیک نشان داده است که سالمندان معمولاً با زاویه خم‌شدگی بیشتر در مفاصل و استفاده از گام‌های کوتاه‌تر حرکت می‌کنند تا پایداری بیشتری داشته باشند (Wallard et al., 2018). این راهبرد جبرانی هرچند تا حدی ایمنی حرکتی را افزایش می‌دهد، اما می‌تواند به خستگی عضلانی زودرس و کاهش بهره‌وری انرژی منجر شود.

گیرنده‌های حسی محیطی نیز در سازگاری حرکتی نقش اساسی دارند. گیرنده‌های فشار، لرزش و حس عمقی در کف پا و عضلات، به سیستم عصبی اطلاعات حیاتی درباره وضعیت بدن در فضا می‌دهند. در سالمندان، کاهش تراکم گیرنده‌های حسی یا کاهش حساسیت آن‌ها، باعث تأخیر در پاسخ‌های اصلاحی و افزایش احتمال زمین‌خوردن می‌شود (Kim et al., 2023a). به‌ویژه، اختلال در حس موقعیت مفصل مچ پا می‌تواند موجب اختلال در کنترل تعادل شود و منجر به تغییر در الگوی بارگذاری وزن روی پاها گردد (Klöcker et al., 2016). در سطح عملکردی، تحلیل‌های دوگانه شناختی-حرکتی نیز نشان می‌دهند که در سالمندان، اجرای هم‌زمان یک وظیفه شناختی در حین راه رفتن (مانند شمارش معکوس یا توجه به محرک‌های دیداری) باعث کاهش پایداری، کندی حرکت، و افزایش نوسانات تنه می‌شود (Al-Yahya et al., 2019). این پدیده تحت عنوان تداخل شناختی-حرکتی مطرح می‌شود و نشان می‌دهد که منابع شناختی در مغز سالمندان برای کنترل حرکات ساده‌ای چون راه رفتن نیز درگیر می‌شوند (Clarke et al., 2021).

از سوی دیگر، با توجه به اینکه سیستم‌های عصبی مرکزی و محیطی یکپارچه عمل می‌کنند، آسیب به یکی از آن‌ها می‌تواند بر عملکرد کلی تأثیرگذار باشد. برای نمونه، در برخی موارد دیده شده است که افراد با ضایعات محیطی، به دلیل افت عملکرد گیرنده‌های حسی، افزایش فعالیت در قشرهای مغزی مرتبط با حرکت را تجربه می‌کنند که نشانه‌ای از تلاش جبرانی سیستم عصبی مرکزی است (Marcus et al., 2019). همچنین پس از آسیب‌های محیطی مانند نوروپاتی محیطی، الگوهای جدیدی از راه رفتن مشاهده می‌شود که از طریق بازسازمان‌دهی نورونی در مغز ایجاد شده‌اند (Simon et al., 2016).

مطالعات حیوانی نیز در تبیین سازوکارهای محیطی و مرکزی در راه رفتن کمک شایانی کرده‌اند. برای مثال، در مدل‌های آسیب نخاعی یا عصب محیطی در جوندگان، از تحلیل خودکار گام‌برداری برای ارزیابی بازیابی عملکرد استفاده شده است (Heinzel et al., 2020). این نوع تحلیل‌ها نشان می‌دهند که پس از آسیب، جانوران با ایجاد مسیرهای جدید عصبی یا تقویت اتصالات موجود، سعی در بازیابی کنترل حرکتی دارند که مشابه فرایندهای جبرانی در انسان سالمند است.

در نهایت، مفهوم سازگاری حرکتی در سالمندان نباید صرفاً به معنای زوال در نظر گرفته شود، بلکه فرایندی فعال و تطبیقی است که در آن سیستم‌های مختلف برای حفظ عملکرد و ایمنی، الگوهای جدیدی ایجاد می‌کنند. برای مثال، برخی سالمندان برای جبران ضعف عضلانی از راهبردهایی مانند افزایش زمان تماس پا با زمین یا کاهش سرعت استفاده می‌کنند که می‌تواند در کوتاه‌مدت پایداری را افزایش دهد، اما در درازمدت موجب خستگی بیشتر می‌شود (Chang & Mei, 2018). این سازگاری‌ها، هرچند گاه ناکارآمد به نظر می‌رسند، اما حاصل تلاش سیستم عصبی-عضلانی برای پاسخ به تغییرات وابسته به سن هستند.

در مجموع، عملکرد راه رفتن در سالمندی تابعی از تعامل پیچیده بین مکانیسم‌های مرکزی، محیطی و شناختی است که با افزایش سن دچار دگرگونی‌هایی می‌شوند. درک این سازوکارها، نه تنها از منظر علمی اهمیت دارد، بلکه پایه‌ای برای طراحی مداخلات درمانی، توانبخشی، و ابزارهای فناورانه برای حفظ استقلال حرکتی در سالمندان خواهد بود.

معرفی هوش مصنوعی و کاربرد آن در علوم زیستی و حرکتی

هوش مصنوعی، به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخه‌های علوم کامپیوتر، به طراحی سیستم‌هایی اشاره دارد که قادر به انجام وظایفی مشابه انسان مانند یادگیری، استدلال، تصمیم‌گیری و درک الگوها هستند. در حوزه‌های زیستی و حرکتی، هوش مصنوعی ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی پدیده‌های پیچیده‌ای چون راه رفتن، کنترل تعادل، و تعامل سیستم‌های عصبی و عضلانی محسوب می‌شود. در این میان، یادگیری ماشین به عنوان زیرمجموعه‌ای از هوش مصنوعی، بر الگوریتم‌هایی تمرکز دارد که بدون برنامه‌نویسی صریح، از داده‌ها الگو می‌آموزند و تصمیم‌گیری می‌کنند. یادگیری عمیق نیز زیرشاخه‌ای از یادگیری ماشین است که از شبکه‌های عصبی با لایه‌های متعدد برای پردازش داده‌های پیچیده، غیرخطی و چندبعدی بهره می‌برد.

در سیستم‌های زیستی، برخلاف بسیاری از حوزه‌های مهندسی، داده‌ها معمولاً پرنویز، پویا و غیرخطی هستند. به همین دلیل، الگوریتم‌هایی که بتوانند از حجم زیادی از داده‌ها ویژگی‌های معنادار استخراج کنند، اهمیت زیادی دارند. یکی از الگوریتم‌های پرکاربرد در تحلیل‌های زیستی و حرکتی، شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Networks یا ANN) هستند. این شبکه‌ها با الهام از ساختار نورونی مغز انسان طراحی شده‌اند و قابلیت بالایی در تشخیص الگوها و پیش‌بینی رفتارهای پیچیده دارند (Zhang, 2025). برای مثال، در حوزه راه رفتن، از ANN برای پیش‌بینی ناپایداری، شناسایی گام‌های غیرطبیعی و طبقه‌بندی الگوهای حرکتی استفاده شده است. علاوه بر شبکه‌های عصبی، الگوریتم Random Forest نیز یکی دیگر از روش‌های پرکاربرد در تحلیل داده‌های بیومکانیکی است. این الگوریتم از ترکیب چندین درخت تصمیم‌گیری مستقل بهره می‌برد و از طریق رای‌گیری نهایی به تصمیمی کلی می‌رسد. Random Forest نسبت به نویز مقاوم است و توانایی زیادی در دسته‌بندی داده‌های پیچیده دارد. در مطالعات اخیر، از این روش برای تمایز بین الگوهای راه رفتن سالم و پاتولوژیک استفاده شده است، به‌ویژه زمانی که داده‌های چندحسی مانند حس عمقی، فشار کف پا، و داده‌های بینایی ترکیب می‌شوند (Sun et al., 2023).

روش Support Vector Machine یا SVM نیز در مطالعات حرکتی کاربرد زیادی دارد. این الگوریتم با یافتن مرز تصمیم‌گیری بهینه در فضای چندبعدی، داده‌ها را به‌طور دقیق دسته‌بندی می‌کند. در مواردی که داده‌ها به‌صورت غیرفلزین توزیع شده‌اند، از نگاشت کرنلی برای افزایش دقت استفاده می‌شود. در پژوهش‌های مرتبط با تحلیل راه رفتن، SVM برای تشخیص مراحل مختلف گام‌برداری، شناسایی ناهنجاری‌های حرکتی، و تحلیل داده‌های پوشیدنی‌ها به‌کار رفته است (Lv et al., 2020).

کاربرد هوش مصنوعی در تحلیل حرکت و راه رفتن، تنها به طبقه‌بندی یا پیش‌بینی محدود نمی‌شود؛ بلکه در مدل‌سازی‌های عملکردی نیز نقش مهمی دارد. برای نمونه، در پژوهشی، با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق، حرکات یک ربات شش‌پایی در مواجهه با زمین‌های مختلف به‌صورت خودسازمان‌یافته تنظیم شد، که شباهت زیادی به الگوی تطبیقی انسان در شرایط محیطی مختلف دارد (Sun et al., 2023). این نوع مدل‌سازی‌ها می‌تواند برای درک بهتر مکانیسم‌های کنترل عصبی-عضلانی انسان نیز مفید باشد.

در حیطه کنترل عصبی-عضلانی، مدل‌سازی پیچیدگی‌های موجود میان قشر حرکتی، مخچه، نخاع و عضلات نیازمند ابزارهایی است که بتوانند روابط غیرخطی و تعاملی را در زمان واقعی پردازش کنند. پژوهشگران با طراحی فریم‌ورک‌های مبتنی بر هوش مصنوعی توانسته‌اند

این فرایندها را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کنند. برای نمونه، در مطالعه‌ای، مدلی برای شبیه‌سازی کنترل عصبی-عضلانی در راه رفتن طراحی شد که هم مکانیسم‌های بازخوردی و هم پیش‌خور (feedforward) را شامل می‌شد (Shushtari et al., 2021). این مدل‌ها برای بررسی واکنش‌های سریع بدن به اختلالات محیطی مانند لغزش یا تکانه ناگهانی بسیار مفید هستند.

یکی دیگر از حوزه‌های کلیدی کاربرد هوش مصنوعی، تحلیل داده‌های ثبت‌شده از حسگرهای پوشیدنی و سیستم‌های تصویربرداری عصبی است. در بسیاری از مطالعات، از EEG، fMRI یا fNIRS برای ثبت فعالیت‌های مغزی در حین راه رفتن استفاده می‌شود. این داده‌ها معمولاً پیچیده و چندبعدی هستند و تحلیل آن‌ها با روش‌های سنتی دشوار است. اما با بهره‌گیری از یادگیری ماشین، می‌توان تغییرات فعالیت قشر پیش‌پیشانی یا عقده‌های قاعده‌ای را هنگام راه رفتن، تداخل شناختی یا مواجهه با مانع تحلیل کرد (Sui et al., 2022). در مطالعه‌ای دیگر، نشان داده شد که فعالیت مغزی حین راه رفتن در سالمندان با ناهنجاری‌هایی همراه است که با استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی دقیق‌تر شناسایی می‌شوند (Holtzer et al., 2015).

افزون بر این، کاربرد هوش مصنوعی در تشخیص افتادن (fall detection) و پیش‌بینی آن، یکی از فعال‌ترین زمینه‌های پژوهشی است. با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده از سنسورهای شتاب‌سنج وژیروسکوپ، می‌توان الگوهای حرکتی مشکوک را به‌موقع شناسایی و به سالمند یا مراقب هشدار داد. این سامانه‌ها غالباً از ترکیب الگوریتم‌های طبقه‌بندی و خوشه‌بندی بهره می‌برند. برای مثال، شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) و نسخه‌های توسعه‌یافته آن مانند LSTM برای تحلیل توالی زمانی داده‌های حرکتی بسیار مؤثر عمل کرده‌اند (Kim et al., 2023b).

از سوی دیگر، مطالعاتی که در محیط‌های واقعیت مجازی انجام شده‌اند، نشان می‌دهند که ادغام نمایش‌های پیرامونی (peripheral display) با هوش مصنوعی می‌تواند شناخت بهتری از رفتار راه رفتن در شرایط چندوظیفه‌ای به‌دست دهد. در این محیط‌ها، هوش مصنوعی به تشخیص دقیق‌تر تغییرات حرکتی کمک می‌کند و می‌توان از آن برای سنجش بار شناختی افراد در حین راه رفتن استفاده کرد (Bouzar et al., 2022). این نوع مطالعات به درک بهتر تداخل شناختی-حرکتی در سالمندان کمک می‌کند و بستر مناسبی برای توسعه ابزارهای توانبخشی واقعیت مجازی فراهم می‌آورد.

در مطالعات مربوط به توانبخشی نیز هوش مصنوعی نقش فزاینده‌ای یافته است. از مدل‌های تطبیقی برای تنظیم شدت تمرینات و پاسخ‌گویی در زمان واقعی استفاده می‌شود. در برخی از پروژه‌ها، از الگوریتم‌های یادگیری تقویتی (Reinforcement Learning) برای ایجاد راهبردهای حرکتی جدید پس از آسیب عصبی استفاده شده است (Chang & Mei, 2018). در این رویکردها، سیستم هوشمند با دریافت بازخورد از محیط، رفتار حرکتی خود را بهینه می‌کند و الگویی بسیار نزدیک به یادگیری حرکتی در مغز انسان را بازسازی می‌کند. همچنین استفاده از هوش مصنوعی در تحلیل داده‌های حاصل از مدل‌سازی عضلات و اسکلت بدن به کمک نرم‌افزارهایی مانند OpenSim یا AnyBody نیز رواج یافته است. این نرم‌افزارها اطلاعات فراوانی درباره گشتاور مفاصل، طول عضلات، و نیروهای تاندونی ارائه می‌دهند که می‌تواند به الگوریتم‌های یادگیری ماشین داده شود تا الگوهای ناهنجار یا جبرانی را در سالمندان شناسایی کنند (Heinzel et al., 2020).

در مجموع، هوش مصنوعی با توانمندی در پردازش داده‌های بزرگ، تحلیل الگوهای پیچیده، و پیش‌بینی وقایع آینده، ابزار مناسبی برای تحلیل عملکرد حرکتی و عصبی در انسان به‌ویژه در شرایط پاتولوژیک مانند سالمندی فراهم کرده است. کاربرد این فناوری‌ها نه تنها به شناسایی دقیق‌تر سازوکارهای راه رفتن کمک می‌کند، بلکه می‌تواند نقش مهمی در توسعه ابزارهای ارزیابی بالینی، طراحی پروتکل‌های توانبخشی شخصی‌سازی‌شده، و پیشگیری از افت عملکرد حرکتی ایفا کند.

کاربردهای خاص هوش مصنوعی در تحلیل مکانیسم‌های راه رفتن سالمندان

کاربرد هوش مصنوعی در حوزه تحلیل عملکرد حرکتی سالمندان، به‌ویژه در شناسایی و مدل‌سازی مکانیسم‌های راه رفتن، تحولی بنیادین در فهم اختلالات حرکتی و طراحی مداخلات توانبخشی ایجاد کرده است. یکی از مهم‌ترین کارکردهای هوش مصنوعی در این زمینه، شناسایی الگوهای اختلالی در راه رفتن است. راه رفتن سالمندان اغلب تحت تأثیر عواملی چون افت عملکرد عضلات، کاهش اطلاعات حسی، اختلال در برنامه‌ریزی عصبی، و تداخل وظایف شناختی قرار می‌گیرد. به کمک الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توان از داده‌های چندمنبعی مانند سیگنال‌های اینرسی، فشار کف پا، و نوسانات تنه در حین راه رفتن استفاده کرد و الگوهای غیرنرمال یا پاتولوژیک را شناسایی نمود. در مطالعه‌ای که به بررسی دقت هوش مصنوعی در تشخیص اختلالات راه رفتن در شرایط دوطرفه‌ای پرداخت، مشخص شد که الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند Random Forest و SVM قادر به تفکیک دقیق بین الگوهای سالم و مختل حرکتی هستند (Sui et al., 2022). همچنین استفاده از شبکه‌های عصبی بازگشتی برای تحلیل توالی‌های زمانی حرکت، به‌ویژه در پیش‌بینی افتادن، کارایی بالایی نشان داده است (Kim et al., 2023b).

شناسایی اختلالات راه رفتن در سالمندان نیازمند تحلیل پیچیده‌تری نسبت به جمعیت‌های عمومی است، چراکه تغییرات ناشی از پیری اغلب تدریجی و ترکیبی هستند. در این راستا، الگوریتم‌های هوشمند می‌توانند از طریق تحلیل چندمتغیره ویژگی‌هایی همچون مدت زمان فازهای گام، طول گام، نوسان مرکز جرم، و پایداری تنه را بررسی کرده و با مقایسه با داده‌های مرجع، به شناسایی انحرافات عملکردی کمک کنند (Wallard et al., 2018). یکی از مهم‌ترین مزایای این الگوریتم‌ها، توانایی آن‌ها در یادگیری از داده‌های فردمحور و ایجاد مدل‌های شخصی‌سازی شده برای هر سالمند است که در تحلیل‌های سنتی کمتر امکان‌پذیر است.

در کنار شناسایی الگوهای اختلالی، یکی از زمینه‌های پرکاربرد هوش مصنوعی، مدل‌سازی مکانیسم‌های مرکزی مرتبط با راه رفتن است. سیستم عصبی مرکزی، از جمله قشر حرکتی، عقده‌های قاعده‌ای، مخچه، و سیستم بینایی-دهلیزی، در کنترل الگوهای حرکتی نقش بنیادینی ایفا می‌کند. در مطالعات جدید، از داده‌های حاصل از fNIRS و EEG برای ثبت فعالیت مغزی هنگام راه رفتن استفاده می‌شود و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای استخراج الگوهای عصبی از این داده‌ها به کار می‌روند. برای نمونه، در مطالعه‌ای که به بررسی فعالیت قشر پیش‌پیشانی مغز هنگام راه رفتن در شرایط دوطرفه‌ای پرداخت، مشخص شد که افزایش بار شناختی با تغییرات در الگوی اکسیژناسیون قشر مغز همراه است و الگوریتم‌های طبقه‌بندی مبتنی بر شبکه عصبی توانستند این تغییرات را به دقت تشخیص دهند (Sui et al., 2022).

از طرف دیگر، اتصال عملکردی نواحی مختلف مغز در حین راه رفتن نیز با استفاده از مدل‌سازی‌های یادگیری عمیق مورد تحلیل قرار گرفته است. برای مثال، ارتباط بین ناحیه پیش‌پیشانی و نواحی حرکتی اولیه در سالمندان با خطر افتادن در ارتباط است و الگوریتم‌هایی مانند CNN توانسته‌اند با دقت بالا الگوهای مرتبط با این اختلالات را استخراج کنند (Holtzer et al., 2015). همچنین در بررسی داده‌های تصویربرداری مغزی fMRI، مشخص شده است که سالمندان برای حفظ عملکرد حرکتی از نواحی بیشتری از مغز استفاده می‌کنند که نشانگر استراتژی‌های جبرانی عصبی است. تحلیل این داده‌ها با کمک الگوریتم‌های هوش مصنوعی به‌ویژه در فهم سازوکارهای تطبیقی در مغز سالمندان مفید بوده است (Clarke et al., 2021).

در سطح محیطی نیز هوش مصنوعی نقش مؤثری در تحلیل مکانیسم‌های عضلانی و اسکلتی ایفا می‌کند. کاهش قدرت عضلات، تغییر در زاویه مفاصل، و اختلال در الگوهای بارگذاری وزن همگی از جمله عواملی هستند که در راه رفتن سالمندان تأثیرگذارند. با استفاده از داده‌های حاصل از سیستم‌های ثبت کینماتیک، الکترومایوگرافی (EMG)، و حسگرهای فشار، می‌توان به کمک مدل‌های یادگیری ماشین به

تحلیل دقیق‌تری از دینامیک عضلات و مفاصل دست یافت. برای مثال، در مطالعه‌ای که به تحلیل عملکرد مفاصل زانو و مچ پا در سالمندان پرداخت، الگوریتم Random Forest توانست با دقت بالا تفاوت‌های حرکتی بین سالمندان با سابقه افتادن و گروه کنترل را شناسایی کند (Bouzar et al., 2022).

در برخی مطالعات از الگوریتم‌های یادگیری تقویتی برای شبیه‌سازی فرآیندهای یادگیری حرکتی پس از آسیب عضلانی یا عصبی استفاده شده است. در این مدل‌ها، سیستم با دریافت بازخورد از محیط به تدریج راهبردهای حرکتی مؤثرتر را انتخاب می‌کند. چنین الگوریتم‌هایی در شبیه‌سازی سازگاری عضلانی-اسکلتی در سالمندان در پاسخ به مداخلات فیزیوتراپی یا تمرینات تقویتی بسیار کاربردی بوده‌اند (Chang & Mei, 2018). همچنین در مدل‌سازی دینامیک عضلات با استفاده از نرم‌افزارهایی نظیر OpenSim، داده‌های خروجی مانند گشتاور مفاصل و نیروهای تاندونی می‌توانند به الگوریتم‌های هوش مصنوعی وارد شده و روند تغییرات آن‌ها در شرایط مختلف حرکتی تحلیل شوند (Heinzel et al., 2020).

تشخیص زودهنگام تغییرات پاتولوژیک در الگوی راه رفتن، یکی از حیاتی‌ترین اهداف در کاربرد هوش مصنوعی در سالمندان است. بسیاری از تغییرات در راه رفتن در مراحل ابتدایی فاقد علائم بالینی آشکار هستند اما الگوریتم‌های هوشمند قادرند با تحلیل دقیق داده‌ها، نشانه‌های اولیه اختلال را شناسایی کرده و هشدارهای زودهنگام ارائه دهند. در یکی از مطالعات کلینیکی، داده‌های مربوط به الگوی گام‌برداری در محیط واقعی با استفاده از پوشیدنی‌های هوشمند ثبت و وارد مدل‌های SVM و ANN شد. این مدل‌ها توانستند تغییرات خفیف در طول گام، توزیع وزن، و زمان‌بندی فازهای گام را که معمولاً به چشم نمی‌آید، شناسایی کنند و به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده خطر افتادن مورد استفاده قرار گیرند (Nocera et al., 2019).

در مطالعات مرتبط با بازماندگان آسیب‌های مغزی یا حرکتی نیز مشخص شده که هوش مصنوعی قادر است با تحلیل الگوهای حرکتی پس از توانبخشی، میزان بهبود عملکرد را پیش‌بینی کرده و حتی در طراحی برنامه‌های توانبخشی نقش داشته باشد (Monfort et al., 2019). همچنین مدل‌هایی طراحی شده‌اند که قادرند روند افت عملکرد حرکتی در سالمندان را با دقت بالا پیش‌بینی کنند. برای نمونه، در پژوهشی با استفاده از داده‌های چند ساله گام‌برداری سالمندان و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، پیش‌بینی شد که کدام افراد در آینده در معرض کاهش عملکرد راه رفتن خواهند بود (Kim et al., 2023a).

از دیگر کاربردهای قابل توجه هوش مصنوعی، طراحی سیستم‌های هشداردهنده پوشیدنی برای محیط زندگی سالمندان است. این سیستم‌ها با تحلیل لحظه‌ای داده‌های حرکتی از طریق سنسورهای تعبیه‌شده در کفش یا لباس، در صورت شناسایی الگویی خطرناک مانند لغزش، نوسان شدید تنه، یا بی‌تعادلی، هشدار ارسال می‌کنند. الگوریتم‌هایی مانند شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) و LSTM به دلیل توانایی تحلیل داده‌های ترتیبی و وابسته به زمان، در این سیستم‌ها بسیار پرکاربرد هستند (Simon et al., 2016).

در مجموع، هوش مصنوعی در تحلیل مکانیسم‌های راه رفتن در سالمندان، نه تنها ابزار تشخیص اختلالات است، بلکه به درک عمیق‌تری از تعامل بین مغز، عضلات و محیط منجر می‌شود. الگوریتم‌های پیشرفته در حوزه یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، به پژوهشگران و متخصصان توانبخشی امکان می‌دهند تا با دقت بیشتری به تحلیل رفتار حرکتی پرداخته، روند سالمندی را بهتر درک کنند و برای ارتقاء کیفیت زندگی سالمندان، مداخلات مبتنی بر داده طراحی نمایند. استفاده گسترده از این فناوری‌ها می‌تواند به کاهش بار اقتصادی، افزایش استقلال حرکتی، و پیشگیری از آسیب‌های ناشی از زمین‌خوردگی در سالمندان بینجامد.

انواع داده‌های مورد استفاده در مطالعات راه رفتن بر محور هوش مصنوعی

تحلیل دقیق و جامع راه رفتن به‌ویژه در سالمندان نیازمند بهره‌گیری از داده‌هایی متنوع و چندوجهی است که بتوانند ابعاد مختلف عملکرد عصبی، عضلانی و اسکلتی بدن را پوشش دهند. در مطالعات هوش مصنوعی محور که با هدف مدل‌سازی و پیش‌بینی الگوهای راه رفتن انجام می‌شود، انواع مختلفی از داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که هر کدام بازتاب‌دهنده بخشی از سیستم حرکتی انسان هستند. تلفیق این داده‌ها با الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، امکان کشف الگوهای پنهان، تشخیص اختلالات اولیه و طراحی مداخلات پیشگیرانه را فراهم می‌سازد.

یکی از رایج‌ترین انواع داده‌ها در این حوزه، داده‌های حرکتی حاصل از سیستم‌های ضبط حرکت (Motion Capture) است. این داده‌ها شامل پارامترهایی مانند طول گام، سرعت قدم زدن، مدت زمان فازهای مختلف چرخه گام (stance و swing)، زاویه مفاصل لگن، زانو و مچ، و مرکز جرم بدن در هر لحظه از حرکت هستند. این اطلاعات به‌ویژه در تحلیل دینامیک و کینماتیک گام‌برداری نقش کلیدی دارند. برای مثال، در مطالعه‌ای که با هدف شناسایی تغییرات جبرانی در سالمندان انجام شد، استفاده از داده‌های حرکتی ثبت‌شده از طریق دوربین‌های مادون قرمز و مارکرهای نوری توانست تغییرات جزئی در حرکت لگن و زانو را که معمولاً با چشم غیرمسلح قابل مشاهده نیستند، آشکار کند (Wallard et al., 2018). در تحقیق دیگری، الگوهای حرکتی ثبت‌شده در طی چند فاز راه رفتن وارد مدل یادگیری ماشین Random Forest شدند تا تمایز بین سالمندان با و بدون سابقه زمین‌خوردن مشخص شود (Bouzar et al., 2022). این داده‌ها همچنین پایه‌ای برای مدل‌سازی‌های عضلانی و اسکلتی در نرم‌افزارهای تحلیل بیومکانیکی هستند که از خروجی آن‌ها می‌توان در آموزش مدل‌های هوشمند استفاده کرد (Heinzel et al., 2020).

دسته مهم دیگر داده‌ها در مطالعات مرتبط با راه رفتن، داده‌های الکترومایوگرافی (EMG) هستند که نشان‌دهنده فعالیت الکتریکی عضلات در زمان‌های مختلف چرخه گام هستند. این داده‌ها اطلاعات دقیقی از زمان‌بندی، شدت، و الگوی فعال‌سازی عضلات مختلف از جمله چهارسر ران، همسترینگ، عضلات پشت ساق و عضلات ثبات‌دهنده لگن ارائه می‌دهند. در سالمندان، معمولاً شاهد کاهش هماهنگی بین عضلات آگونیست و آنتاگونیست هستیم که به ناپایداری حرکتی و افزایش تلاش عضلانی منجر می‌شود (Mitchell et al., 2018). پژوهش‌هایی که از داده‌های EMG برای آموزش مدل‌های شبکه عصبی استفاده شده‌اند، مشخص شد که الگوریتم‌های یادگیری عمیق می‌توانند به‌دقت الگوهای غیرعادی فعال‌سازی عضلانی را شناسایی کرده و به پیش‌بینی اختلالات احتمالی کمک کنند (Chang & Mei, 2018). همچنین در مطالعات توانبخشی مبتنی بر تحریک الکتریکی عملکردی (FES)، استفاده از EMG به‌عنوان داده ورودی به سیستم‌های تطبیقی هوشمند، در بهینه‌سازی پارامترهای تحریک نقش مؤثری ایفا کرده است (Shushtari et al., 2021).

در تحلیل مکانیسم‌های مرکزی کنترل راه رفتن، داده‌های تصویربرداری مغزی نظیر fMRI، EEG و PET جایگاه ویژه‌ای دارند. این داده‌ها امکان بررسی فعالیت قشر مغز، نواحی تحت‌قشری، و مسیرهای ارتباطی بین‌مغزی را در حین حرکت فراهم می‌کنند. در بسیاری از مطالعات راه رفتن سالمندان، استفاده از EEG در محیط‌های نیمه‌واقعی مانند تردمیل یا مسیرهای شبیه‌سازی‌شده، منجر به کشف تغییرات در ریتم‌های مغزی مرتبط با کنترل توجه و تعادل شده است (Holtzer et al., 2015). همچنین در بررسی‌های مبتنی بر fMRI، تغییر در الگوی اکسیژناسیون قشر پیش‌پیشانی هنگام مواجهه با چالش‌های حرکتی، به‌عنوان شاخصی برای تداخل شناختی-حرکتی مورد استفاده قرار گرفته است (Sui et al., 2022). این داده‌ها معمولاً به الگوریتم‌هایی مانند SVM، CNN و RNN داده می‌شوند تا ارتباطات عملکردی بین نواحی مغزی در وضعیت‌های مختلف حرکتی استخراج شود (Clarke et al., 2021).

از سوی دیگر، در سال‌های اخیر، داده‌های به‌دست‌آمده از حسگرهای پوشیدنی (Wearables) به‌عنوان ابزارهای کم‌هزینه، در دسترس، و قابل استفاده در شرایط واقعی زندگی، جایگاه ویژه‌ای در مطالعات AI محور یافته‌اند. این حسگرها شامل شتابسنج

(Accelerometer)، ژيروسکوپ (Gyroscope)، حسگر فشار، و حسگرهای نوری هستند که در کفش، لباس، مچ پا یا تنه تعبیه می‌شوند و به‌صورت مداوم اطلاعاتی درباره نوسان مرکز جرم، جهت حرکت، شتاب لحظه‌ای و نیروی وارده به زمین ارائه می‌دهند. در پژوهشی که از داده‌های حسگرهای پوشیدنی برای آموزش مدل‌های LSTM استفاده کرده بود، مشخص شد که این مدل‌ها قادر به تشخیص لحظه‌ای شروع عدم تعادل و پیش‌بینی احتمال زمین‌خوردن بودند (Kim et al., 2023b). همچنین در مطالعات کلینیکی، استفاده از این حسگرها به پزشکان کمک کرده تا الگوی راه رفتن بیماران را در طول شبانه‌روز ثبت و تحلیل کرده و از این داده‌ها برای برنامه‌ریزی مداخلات استفاده کنند (Nocera et al., 2019).

در برخی از مطالعات پیشرفته، ترکیبی از داده‌های حرکتی، عضلانی، مغزی و حسگرهای محیطی برای آموزش مدل‌های چندمنبعی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مدل‌ها که تحت عنوان multimodal learning شناخته می‌شوند، قادرند داده‌های مختلف را به‌صورت هم‌زمان پردازش کرده و تصمیم‌گیری دقیق‌تری داشته باشند. در چنین مواردی، چالش‌های فنی متعددی مطرح است که می‌تواند تحلیل را با پیچیدگی مواجه سازد. یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها، هماهنگ‌سازی زمان‌بندی ثبت داده‌ها از منابع مختلف است؛ به‌عنوان مثال، داده‌های EMG ممکن است با فرکانس بالا ثبت شوند درحالی‌که داده‌های fNIRS دارای تأخیر زمانی طبیعی در پاسخ اکسیژناسیون هستند (Sui et al., 2022). یکپارچه‌سازی چنین داده‌هایی مستلزم تکنیک‌های هم‌زمان‌سازی دقیق، کاهش نویز و پردازش پیشرفته سیگنال است.

از دیگر چالش‌های مهم، حجم بالای داده‌های ثبت‌شده به‌ویژه در مطالعات طولی یا با استفاده از سنسورهای مستمر است. تحلیل چنین داده‌هایی نیازمند زیرساخت‌های سخت‌افزاری قدرتمند و الگوریتم‌هایی است که بتوانند با داده‌های بزرگ و چندبعدی به‌صورت مؤثر کار کنند. استفاده از یادگیری عمیق، اگرچه ظرفیت بالایی در استخراج ویژگی دارد، اما به داده‌های آموزشی بسیار زیادی نیاز دارد و در صورت کم بودن حجم داده‌ها، احتمال بیش‌برازش مدل‌ها افزایش می‌یابد (Sun et al., 2023). همچنین تفسیرپذیری پایین برخی از مدل‌های یادگیری عمیق (نظیر شبکه‌های عصبی با لایه‌های زیاد) می‌تواند در حوزه سلامت که شفافیت تصمیم‌گیری اهمیت زیادی دارد، چالش‌برانگیز باشد (Marcus et al., 2019).

در نهایت، چالش‌های اخلاقی و امنیتی نیز در استفاده از داده‌های بیولوژیکی و حرکتی مطرح است. ثبت مداوم اطلاعات حرکتی یا مغزی سالمندان نیازمند اخذ رضایت آگاهانه، حفاظت از داده‌های شخصی، و اطمینان از عدم سوءاستفاده از اطلاعات است. بسیاری از مطالعات جدید، به‌ویژه در حوزه فناوری‌های پوشیدنی و رابط‌های مغز-ماشین، بر لزوم رعایت اصول اخلاقی پژوهی و طراحی مدل‌های ایمن و شفاف تأکید دارند (Clarke et al., 2021).

در مجموع، موفقیت هوش مصنوعی در تحلیل راه رفتن، وابسته به کیفیت، تنوع و هماهنگی داده‌هایی است که به آن ارائه می‌شود. ترکیب داده‌های چندمنبعی از جمله داده‌های حرکتی، EMG، تصویربرداری مغزی و سنسورهای پوشیدنی، به‌ویژه در قالب مدل‌های یادگیری چندوجهی، ظرفیت بی‌نظیری برای درک مکانیسم‌های پیچیده راه رفتن در سالمندان فراهم کرده است. با غلبه بر چالش‌های فنی و اخلاقی، می‌توان از این داده‌ها در طراحی ابزارهای تشخیصی، سیستم‌های هشداردهنده، و مداخلات توانبخشی هوشمند بهره‌برداری کرد.

مزایا و محدودیت‌های استفاده از هوش مصنوعی در تحلیل سازوکارهای راه رفتن

به‌کارگیری هوش مصنوعی در تحلیل سازوکارهای راه رفتن در سالمندان، فرصت‌های نوینی را برای پژوهشگران، پزشکان، و طراحان ابزارهای توانبخشی فراهم کرده است. این فناوری با تکیه بر توانمندی‌های یادگیری آماری و الگوریتم‌های پیشرفته، قادر به کشف الگوهایی است که در روش‌های سنتی و تحلیل‌های آماری کلاسیک به سادگی قابل تشخیص نیستند. یکی از برجسته‌ترین مزایای استفاده از هوش

مصنوعی در این حوزه، دقت بالای آن در طبقه‌بندی، پیش‌بینی و شناسایی اختلالات حرکتی است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین به‌ویژه در تحلیل داده‌های پیچیده و غیرخطی مانند داده‌های ثبت‌شده از الکترومایوگرافی یا سیگنال‌های عصبی، عملکرد بسیار مطلوبی داشته‌اند. برای مثال، در مطالعه‌ای که به طبقه‌بندی الگوهای راه رفتن با استفاده از داده‌های EMG پرداخت، شبکه‌های عصبی مصنوعی توانستند با دقتی بالاتر از ۹۰ درصد الگوهای مختل را از الگوهای نرمال تفکیک کنند (Chang & Mei, 2018).

از دیگر مزایای کلیدی هوش مصنوعی در تحلیل عملکرد راه رفتن، قابلیت پردازش داده‌های حجیم و چندبعدی است. در شرایطی که داده‌ها از منابع متعددی چون حسگرهای پوشیدنی، دستگاه‌های ثبت حرکت، EEG، fNIRS و EMG جمع‌آوری می‌شوند، تحلیل آن‌ها با ابزارهای سنتی بسیار دشوار و زمان‌بر خواهد بود. الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق، توانایی تحلیل حجم انبوهی از داده‌ها را در زمان کوتاه دارند و می‌توانند روابط پیچیده و تعاملی میان متغیرها را مدل‌سازی کنند. در پژوهشی که با هدف تحلیل هم‌زمان فعالیت‌های مغزی و حرکتی سالمندان انجام شد، الگوریتم‌های یادگیری چندوجهی توانستند بین الگوهای اکسیژناسیون قشر مغز و نوسانات مرکز جرم بدن ارتباط دقیقی برقرار کرده و پیش‌بینی دقیقی از وضعیت تعادل افراد ارائه دهند (Sui et al., 2022).

قابلیت دیگر هوش مصنوعی که آن را به ابزاری بی‌بدیل در تحلیل راه رفتن تبدیل کرده، توانایی آن در کشف الگوهای پنهان و غیرخطی در داده‌هاست. برخلاف تحلیل‌های سنتی که عمدتاً به مقایسه میانگین‌ها و تحلیل واریانس محدود می‌شوند، هوش مصنوعی قادر است ویژگی‌هایی را از داده‌ها استخراج کند که حتی متخصصان باتجربه نیز قادر به شناسایی آن‌ها نیستند. در مطالعه‌ای که روی بازماندگان سکنه مغزی انجام شد، الگوریتم‌های شبکه‌های عصبی توانستند تغییرات جزئی در هم‌زمانی بین فعال‌سازی عضلات و فازهای گام‌برداری را شناسایی کنند که به‌عنوان نشانگرهای پنهان ناپایداری حرکتی مطرح شدند (Monfort et al., 2019).

با وجود این مزایا، استفاده از هوش مصنوعی در تحلیل عملکرد حرکتی بدون چالش و محدودیت نیست. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها، وابستگی بالای این الگوریتم‌ها به داده‌های باکیفیت و حجیم است. مدل‌های یادگیری عمیق برای عملکرد بهینه نیاز به داده‌های آموزشی زیاد دارند و در صورت کم بودن داده‌ها، یا وجود نویز زیاد، احتمال ایجاد مدل‌های ناپایدار یا غیرقابل تعمیم افزایش می‌یابد. برای مثال، در مطالعه‌ای که به تحلیل راه رفتن بیماران با آسیب دهلیزی پرداخته بود، نویز بالا در داده‌های حسگرهای پوشیدنی منجر به کاهش دقت مدل طبقه‌بندی شد و نیاز به پردازش پیشرفته سیگنال برای حذف نویز احساس شد (Gimmon et al., 2017).

محدودیت مهم دیگر، خطر بیش‌برازش (overfitting) در مدل‌های یادگیری ماشین است. زمانی که مدل به‌جای یادگیری الگوهای عمومی، الگوهای خاص داده‌های آموزشی را حفظ می‌کند، توانایی آن در پیش‌بینی نمونه‌های جدید کاهش می‌یابد. این مسئله به‌ویژه در مدل‌هایی مانند شبکه‌های عصبی با لایه‌های زیاد یا در شرایطی که تعداد نمونه‌های آموزشی کم است، شایع‌تر است (Sun et al., 2023). در چنین شرایطی، استفاده از روش‌های اعتبارسنجی متقابل، کاهش ابعاد داده‌ها و تکنیک‌های منظم‌سازی (regularization) ضروری است تا از وقوع بیش‌برازش جلوگیری شود.

یکی دیگر از چالش‌های مهم در به‌کارگیری هوش مصنوعی در حوزه علوم زیستی، پیچیدگی در تفسیر خروجی مدل‌هاست. بسیاری از الگوریتم‌های یادگیری عمیق، به‌ویژه مدل‌های black-box مانند CNN یا LSTM، فاقد شفافیت لازم در فرایند تصمیم‌گیری هستند. این موضوع می‌تواند در حوزه سلامت، جایی که نیاز به شفافیت و قابل فهم بودن فرآیند تشخیص و پیش‌بینی وجود دارد، مشکل‌ساز شود. برای مثال، در پروژه‌ای که به پیش‌بینی افتادن در سالمندان با استفاده از داده‌های حرکتی پرداخت، علی‌رغم دقت بالای مدل، تبیین دقیق اینکه کدام ویژگی‌ها بیشترین نقش را در تصمیم مدل ایفا کرده‌اند، امکان‌پذیر نبود (Kim et al., 2023b). این مسأله موجب شده تا پژوهشگران به سمت توسعه مدل‌های تفسیرپذیرتر حرکت کنند یا از تکنیک‌هایی مانند LIME و SHAP برای تبیین خروجی مدل‌ها استفاده نمایند.

در کنار محدودیت‌های فنی، مسائل اخلاقی و حریم خصوصی در استفاده از داده‌های سالمندان نیز از چالش‌های جدی این حوزه محسوب می‌شوند. سالمندان به‌عنوان گروهی آسیب‌پذیر، نیازمند حفاظت بیشتری از نظر امنیت داده‌ها و حریم خصوصی هستند. ثبت مداوم داده‌های حرکتی، مغزی یا فیزیولوژیکی می‌تواند نگرانی‌هایی در زمینه شفاف نبودن نحوه استفاده از داده‌ها، ذخیره‌سازی، و دسترسی غیرمجاز به اطلاعات شخصی ایجاد کند. در مطالعه‌ای که در زمینه تحلیل عملکرد مغزی حین راه رفتن با استفاده از fNIRS انجام شد، محققان تأکید کردند که جمع‌آوری داده از سالمندان باید با رضایت آگاهانه و شفاف، رعایت اصول اخلاق پژوهش، و رعایت استانداردهای بین‌المللی حفاظت از داده انجام شود (Clarke et al., 2021). همچنین استفاده از فناوری‌های پوشیدنی در محیط‌های زندگی شخصی، اگرچه اطلاعات بسیار مفیدی فراهم می‌کند، اما در صورتی که کنترل‌های امنیتی مناسبی نداشته باشد، می‌تواند به نقض حریم خصوصی منجر شود (Nocera et al., 2019).

یکی دیگر از دغدغه‌های اخلاقی در این زمینه، استفاده از الگوریتم‌های تصمیم‌گیرنده در زمینه مداخلات درمانی است. اگرچه هوش مصنوعی می‌تواند به پزشکان در تصمیم‌گیری کمک کند، اما جایگزینی کامل قضاوت انسانی با الگوریتم‌های هوشمند، به‌ویژه در شرایطی که عدم قطعیت بالا باشد یا داده‌ها ناقص باشند، می‌تواند نتایج ناخواسته‌ای در پی داشته باشد. از همین رو، بسیاری از محققان بر توسعه مدل‌های ترکیبی انسان-ماشین تأکید دارند که در آن، هوش مصنوعی نقش مکمل و پشتیبان دارد، نه جایگزین.

با این حال، پیشرفت‌های اخیر در زمینه تفسیرپذیری مدل‌های یادگیری ماشین، طراحی الگوریتم‌های مقاوم به نویز، و توسعه چارچوب‌های اخلاقی بین‌المللی برای حفاظت از داده‌ها، مسیر را برای به‌کارگیری گسترده‌تر هوش مصنوعی در حوزه سلامت سالمندان هموار کرده است. به‌ویژه در تحلیل سازوکارهای راه رفتن که نیاز به ارزیابی چندبعدی از عملکرد عضلات، مفاصل، مغز، و سیستم‌های حسی دارد، هوش مصنوعی می‌تواند مکملی نیرومند برای ابزارهای بالینی موجود باشد.

در جمع‌بندی می‌توان گفت که اگرچه استفاده از هوش مصنوعی در تحلیل راه رفتن مزایای قابل توجهی از جمله افزایش دقت، پردازش داده‌های بزرگ، و کشف الگوهای پنهان دارد، اما همچنان با محدودیت‌هایی مانند وابستگی به داده‌های با کیفیت، خطر بیش‌برازش، دشواری تفسیر خروجی مدل، و مسائل اخلاقی مرتبط با داده‌های سالمندان مواجه است. با توسعه فناوری‌های تفسیرپذیر، افزایش همکاری بین‌رشته‌ای، و تدوین سیاست‌های روشن برای حفاظت از داده‌ها، می‌توان از پتانسیل کامل این فناوری در خدمت سلامت حرکتی سالمندان بهره‌برداری نمود.

بحث و نتیجه‌گیری

فرآیند راه رفتن در سالمندان یکی از پیچیده‌ترین و در عین حال حیاتی‌ترین ابعاد عملکرد جسمانی است که با افزایش سن، دستخوش تغییرات عمده‌ای در سطح فیزیولوژیکی، عصبی و حرکتی می‌شود. این تغییرات، اغلب به‌صورت تدریجی و چندوجهی ظاهر شده و ممکن است تا زمانی که به مراحل بحرانی نرسند، قابل مشاهده نباشند. کاهش قدرت عضلات اندام تحتانی، کاهش دقت در حس‌های عمقی و دهلیزی، کندی در پاسخ‌های اصلاحی، اختلال در هماهنگی قشر حرکتی و نواحی تحت‌قشری، و تداخل در انجام هم‌زمان فعالیت‌های شناختی و حرکتی، از جمله ویژگی‌هایی هستند که الگوی راه رفتن سالمندان را از افراد جوان متمایز می‌سازند. این تفاوت‌ها نه تنها بر کیفیت زندگی افراد سالمند اثرگذارند، بلکه با افزایش خطر زمین‌خوردگی و آسیب‌های جبران‌ناپذیر همراه هستند.

در این میان، هوش مصنوعی به‌عنوان ابزاری نوین، توانسته است ظرفیت‌های کم‌نظیری را در تحلیل سازوکارهای راه رفتن فراهم آورد. از قابلیت تشخیص دقیق‌تر الگوهای حرکتی گرفته تا امکان پردازش هم‌زمان داده‌های مختلف از منابع گوناگون، این فناوری شرایطی را

ایجاد کرده است که تحلیل و درک عملکرد حرکتی سالمندان با دقتی فراتر از روش‌های سنتی صورت گیرد. توانایی مدل‌سازی فعالیت‌های قشر مغز، تحلیل سیگنال‌های عضلانی، بررسی دینامیک مفاصل و پیش‌بینی تغییرات پاتولوژیک در مراحل ابتدایی، از جمله کاربردهایی هستند که موجب ارتقاء دقت تشخیص و کارایی مداخلات توانبخشی شده‌اند.

هوش مصنوعی همچنین با فراهم آوردن امکان تحلیل داده‌های چندوجهی نظیر داده‌های حرکتی، سیگنال‌های مغزی، سیگنال‌های الکترومایوگرافی و اطلاعات دریافتی از سنسورهای پوشیدنی، بستری مناسب برای پژوهش‌های میان‌رشته‌ای ایجاد کرده است. این رویکرد جامع‌نگر، دیدگاه جدیدی به مطالعات سالمندی ارائه داده است، به گونه‌ای که پژوهشگر قادر است با نگاهی یکپارچه به تعامل سیستم‌های عصبی، عضلانی و اسکلتی، بینش عمیق‌تری نسبت به تغییرات وابسته به سن در عملکرد حرکتی به‌دست آورد.

با وجود این مزایا، همچنان چالش‌هایی در مسیر به‌کارگیری مؤثر هوش مصنوعی در تحلیل راه رفتن وجود دارد. کیفیت پایین داده‌ها، نویزهای محیطی، محدود بودن تعداد نمونه‌ها در برخی جمعیت‌های سالمندی، و خطر بیش‌برازش در الگوریتم‌های یادگیری عمیق، از جمله مسائلی هستند که می‌توانند صحت تحلیل‌ها را تحت تأثیر قرار دهند. علاوه بر این، تفسیرپذیری پایین برخی از مدل‌های هوش مصنوعی و عدم شفافیت در نحوه تصمیم‌گیری آن‌ها، چالش‌هایی جدی در حوزه سلامت و پزشکی ایجاد کرده است که نیازمند توسعه مدل‌های قابل توضیح و اعتمادپذیر است.

مسائل اخلاقی و حریم خصوصی نیز در بهره‌برداری از داده‌های سالمندان جایگاه مهمی دارند. ثبت داده‌های رفتاری، عصبی و فیزیولوژیکی از گروهی آسیب‌پذیر همچون سالمندان، مستلزم رعایت دقیق اصول اخلاق پژوهی، دریافت رضایت آگاهانه، و حفاظت از اطلاعات شخصی است. توسعه چارچوب‌های قانونی و فنی برای مدیریت داده‌ها، می‌تواند نقش مهمی در اعتمادسازی و پذیرش بیشتر این فناوری‌ها ایفا کند.

در مجموع، می‌توان گفت هوش مصنوعی با ارائه رویکردی داده‌محور و دقیق، تحول شگرفی در درک سازوکارهای راه رفتن در فرآیند سالمندی ایجاد کرده است. این فناوری نه تنها امکان پیشگیری از افت عملکرد و شناسایی زودهنگام اختلالات را فراهم کرده، بلکه بستر طراحی مداخلات شخصی‌سازی شده را مهیا ساخته است. آینده پژوهش‌ها در این حوزه، به‌ویژه با رشد فناوری‌های پوشیدنی، الگوریتم‌های تفسیرپذیر، و داده‌های طولی، می‌تواند گام مهمی در جهت حفظ استقلال حرکتی سالمندان و ارتقاء کیفیت زندگی آن‌ها باشد. پژوهش‌ها و اقدامات آینده باید با تمرکز بر ترکیب نوآوری فناوریانه و رعایت اصول انسانی، از ظرفیت‌های هوش مصنوعی در خدمت سلامت و توانمندی سالمندان بهره‌برداری کنند.

تعارض منافع

در انجام مطالعه حاضر، هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد.

تشکر و قدردانی

محققان بر خود لازم می‌دانند از تمامی افرادی که با پژوهشگران همکاری صمیمانه‌ای داشتند، تشکر نمایند.

مشارکت نویسندگان

در نگارش این مقاله تمامی نویسندگان نقش یکسانی ایفا کردند.

موازین اخلاقی

تمامی اصول اخلاقی در پژوهش و نشر در این مطالعه رعایت گردید.

شفافیت داده‌ها

داده‌ها و مآخذ پژوهش حاضر در صورت درخواست از نویسنده مسئول و ضمن رعایت اصول کپی رایت ارسال خواهد شد.

حامی مالی

این پژوهش حامی مالی نداشته است.

References

- Al-Yahya, E., Mahmoud, W., Meester, D., Esser, P., & Dawes, H. (2019). Neural Substrates of Cognitive Motor Interference During Walking: Peripheral and Central Mechanisms. *Frontiers in human neuroscience*, 12. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00536>
- Bouzar, M., Bryce, M., Castillo, S., Cortez, D., Doucette, O., Garcia, B., Ho, A. H. Y., Ito, K., Kim, C., Lansdell, K., & Soangra, R. (2022). Peripheral Display in Virtual Reality Environments Involves Higher Cognitive Demands Compared to Centered Display During Dual-Tasking. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 66(1), 1015-1019. <https://doi.org/10.1177/1071181322661362>
- Chang, Q., & Mei, F. (2018). A Bioinspired Gait Transition Model for a Hexapod Robot. *Journal of Robotics*, 2018, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2018/2913636>
- Clarke, G. S., Gatford, K. L., Young, R. L., Grattan, D. R., Ladyman, S. R., & Page, A. J. (2021). Maternal Adaptations to Food Intake Across Pregnancy: Central and Peripheral Mechanisms. *Obesity*, 29(11), 1813-1824. <https://doi.org/10.1002/oby.23224>
- Gimmon, Y., Millar, J., Pak, R. W., Liu, E., & Schubert, M. C. (2017). Central Not Peripheral Vestibular Processing Impairs Gait Coordination. *Experimental Brain Research*, 235(11), 3345-3355. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5061-x>
- Heinzel, J., Swiadek, N. V., Ashmwe, M., Rührnößl, A., Oberhauser, V., Kolbenschlag, J., & Hercher, D. (2020). Automated Gait Analysis to Assess Functional Recovery in Rodents With Peripheral Nerve or Spinal Cord Contusion Injury. *Journal of Visualized Experiments*(164). <https://doi.org/10.3791/61852>
- Holtzer, R., Vergheze, J., Allali, G., İzzetoğlu, M., Wang, C., & Mahoney, J. R. (2015). Neurological Gait Abnormalities Moderate the Functional Brain Signature of the Posture First Hypothesis. *Brain Topography*, 29(2), 334-343. <https://doi.org/10.1007/s10548-015-0465-z>
- Huang, Y. Z., Chang, F.-Y., Liu, W.-C., Chuang, Y.-F., Chuang, L.-L., & Chang, Y. J. (2017). Fatigue and Muscle Strength Involving Walking Speed in Parkinson's Disease: Insights for Developing Rehabilitation Strategy for PD. *Neural plasticity*, 2017, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2017/1941980>
- Kim, D., Triolo, R. J., & Charkhkar, H. (2023a). Plantar Somatosensory Restoration Enhances Gait, Speed Perception, and Motor Adaptation. *Science Robotics*, 8(83). <https://doi.org/10.1126/scirobotics.adf8997>
- Kim, D., Triolo, R. J., & Charkhkar, H. (2023b). Restored Somatosensation in Individuals With Lower Limb Loss Improves Gait, Speed Perception, and Motor Adaptation. <https://doi.org/10.1101/2023.05.30.23290267>
- Klöcker, A., Gueorguiev, D., Thonnard, J. L., & Mouraux, A. (2016). Peripheral vs. Central Determinants of Vibrotactile Adaptation. *Journal of Neurophysiology*, 115(2), 685-691. <https://doi.org/10.1152/jn.00519.2015>
- Ly, Y., Fang, H., Xu, J., Wang, Q., & Zhang, X. (2020). A Heterogeneous Model for Gait Analysis of the Lower-Limb and the Prosthesis Coupled System. <https://doi.org/10.1115/detc2020-22392>
- Marcus, H. J., Paine, H., Sargeant, M., Wolstenholme, S., Collins, K., Marroney, N., Arshad, Q., Tsang, K., Jones, B., Smith, R., Wilson, M. H., Rust, H., & Seemungal, B. M. (2019). Vestibular Dysfunction in Acute Traumatic Brain Injury. *Journal of Neurology*, 266(10), 2430-2433. <https://doi.org/10.1007/s00415-019-09403-z>
- Mitchell, T., Starrs, F., Soucy, J.-P., Thiel, A., & Paquette, C. (2018). Impaired Sensorimotor Processing During Complex Gait Precedes Behavioral Changes in Middle-Aged Adults. *The Journals of Gerontology Series A*, 74(12), 1861-1869. <https://doi.org/10.1093/gerona/gly210>

- Monfort, S. M., Pan, X., Loprinzi, C. L., Lustberg, M. B., & Chaudhari, A. M. (2019). Exploring the Roles of Central and Peripheral Nervous System Function in Gait Stability: Preliminary Insights From Cancer Survivors. *Gait & Posture*, 71, 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.04.002>
- Nocera, J., Arşık, İ., Keskinocak, P., Lepley-Flood, A., Lah, J. J., Levey, A. I., & Esper, G. J. (2019). The Feasibility of Measuring Gait in an Outpatient Cognitive Neurology Clinical Setting. *Journal of Alzheimer S Disease*, 71(s1), S51-S55. <https://doi.org/10.3233/jad-190106>
- Shushtari, S. M., Weng, J., Nasiri, R., & Arami, A. (2021). A Framework for Modeling and Simulation of Neuromuscular Control of Walking. <https://doi.org/10.32393/csme.2021.95>
- Simon, N. G., Franz, C. K., Gupta, N., Alden, T. D., & Kliot, M. (2016). Central Adaptation Following Brachial Plexus Injury. *World Neurosurgery*, 85, 325-332. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2015.09.027>
- Sui, S. X., Hendy, A. M., Teo, W. P., Moran, J. T., Nuzum, N. D., & Pasco, J. A. (2022). A Review of the Measurement of the Neurology of Gait in Cognitive Dysfunction or Dementia, Focusing on the Application of fNIRS During Dual-Task Gait Assessment. *Brain Sciences*, 12(8), 968. <https://doi.org/10.3390/brainsci12080968>
- Sun, T., Dai, Z., & Manoonpong, P. (2023). Robust and Reusable Self-Organized Locomotion of Legged Robots Under Adaptive Physical and Neural Communications. *Frontiers in Neural Circuits*, 17. <https://doi.org/10.3389/fncir.2023.1111285>
- Wallard, L., Boulet, S., Cornu, O., Dubuc, J.-É., Mahaudens, P., Postlethwaite, D., Cauter, M. V., & Detrembleur, C. (2018). Intersegmental Kinematics Coordination in Unilateral Peripheral and Central Origin: Effect on Gait Mechanism? *Gait & Posture*, 62, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.03.014>
- Wang, G., Chen, X., & Han, S.-K. (2017). Central Pattern Generator and Feedforward Neural Network-Based Self-Adaptive Gait Control for a Crab-Like Robot Locomoting on Complex Terrain Under Two Reflex Mechanisms. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 14(4), 172988141772344. <https://doi.org/10.1177/1729881417723440>
- Zhang, J. (2025). Terrain-Adaptive Gait Planning Method for Hexapod Bionic Robots. *Applied and Computational Engineering*, 127(1), 141-147. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.20263>