JMMBS
Journal of Movement Mechanics & Biomechanics Science
ISSN 3070-3662 (ऑनलाइन)

हिन्दी अनुवाद · Hindi translation of the English original

- यह लेख मूल अंग्रेज़ी लेख "AI Biomechanics Analysis Software: Technological Foundations, Mechanical Interpretation, and Practical Applications" का हिन्दी अनुवाद है। मूल अंग्रेज़ी लेख ही आधिकारिक संस्करण (Version of Record) है; किसी भी विसंगति की स्थिति में अंग्रेज़ी मूल मान्य होगा।
- **DOI:** https://doi.org/10.66078/jmmbs.v3i1.010 — यह DOI मूल अंग्रेज़ी लेख का है; इस अनुवाद के लिए कोई अलग DOI जारी नहीं किया गया है।
- यह अनुवाद मशीन-सहायित है (नवंबर 2026)। लेखकों के नाम, संबद्धताएँ, DOI, ISSN और संदर्भ अपरिवर्तित रखे गए हैं। इसकी विशेषज्ञ हिन्दी भाषा-समीक्षा अभी नहीं हुई है।
- यह अनुवाद मूल PDF के पाठ से तैयार किया गया है; चित्र, तालिकाएँ और समीकरण मूल अंग्रेज़ी PDF में देखें।

समीक्षा लेख | खुली पहुँच | हिन्दी अनुवाद

एआई बायोमैकेनिक्स विश्लेषण सॉफ्टवेयर: तकनीकी आधार, यांत्रिक व्याख्या और व्यावहारिक अनुप्रयोग

मूल अंग्रेज़ी शीर्षक: AI Biomechanics Analysis Software: Technological Foundations, Mechanical Interpretation, and Practical Applications

Neeraj Mehta
MMSx Authority Institute for Movement Mechanics & Biomechanics Research

Steve Henderson
MMSx Authority Institute for Movement Mechanics & Biomechanics Research

Gandharv Mahajan
MMSx Authority Institute for Movement Mechanics & Biomechanics Research

पत्रिका

Journal of Movement Mechanics & Biomechanics Science (JMMBS) · ISSN 3070-3662 (ऑनलाइन)

खंड / अंक

खंड 3, अंक 1 · 2026

लेख का प्रकार

समीक्षा लेख (Review Article)

DOI (मूल अंग्रेज़ी लेख)

https://doi.org/10.66078/jmmbs.v3i1.010

मूल लेख प्रकाशित

12 मार्च 2026

प्रकाशक

MMSx Authority Institute for Movement Mechanics & Biomechanics Research

लाइसेंस

CC BY 4.0 (मूल लेख का लाइसेंस)

सार

कृत्रिम बुद्धिमत्ता तेजी से खेल विज्ञान, पुनर्वास और नैदानिक बायोमैकेनिक्स में मानव आंदोलन के विश्लेषण के तरीके को बदल रही है। पारंपरिक गति विश्लेषण ऐतिहासिक रूप से मार्कर-आधारित गति कैप्चर सिस्टम, बल प्लेटफ़ॉर्म और इलेक्ट्रोमायोग्राफी सहित प्रयोगशाला-आधारित उपकरण पर निर्भर रहा है, जो अत्यधिक सटीक होने के बावजूद महंगा है और वास्तविक दुनिया के वातावरण में तैनात करना मुश्किल है। एआई-आधारित बायोमैकेनिक्स विश्लेषण सॉफ्टवेयर के उद्भव-कंप्यूटर विज़न, मशीन लर्निंग और वास्तविक समय गति ट्रैकिंग को एकीकृत करने से मानक वीडियो इनपुट का उपयोग करके मार्कर रहित आंदोलन विश्लेषण सक्षम हो गया है।

यह लेख समकालीन बायोमैकेनिक्स के भीतर एआई-संचालित आंदोलन विश्लेषण प्रणालियों की तकनीकी नींव, यांत्रिक व्याख्या और व्यावहारिक अनुप्रयोगों की जांच करता है। MMSx यांत्रिक ढांचे के भीतर बल वेक्टर अभिविन्यास, टोक़ वितरण, लोड ट्रांसफर पथ और गतिज श्रृंखला समन्वय जैसे सिद्धांतों के माध्यम से एआई-व्युत्पन्न गतिज डेटा के सार्थक यांत्रिक अंतर्दृष्टि में अनुवाद पर विशेष जोर दिया गया है। लेख आगे वास्तविक समय आंदोलन प्रतिक्रिया के नैदानिक और प्रदर्शन निहितार्थों का मूल्यांकन करता है, मार्कर रहित विश्लेषण से जुड़ी विश्वसनीयता और सत्यापन चुनौतियों पर चर्चा करता है, और पहनने योग्य सेंसर और बल-पहचान प्रणाली सहित मल्टीमॉडल सेंसिंग प्रौद्योगिकियों के भविष्य के एकीकरण की रूपरेखा तैयार करता है।

एआई बायोमैकेनिक्स सॉफ्टवेयर में प्रयोगशाला सेटिंग्स के बाहर स्केलेबल, पारिस्थितिक रूप से मान्य बायोमैकेनिकल मूल्यांकन को सक्षम करके आंदोलन विज्ञान तक पहुंच का विस्तार करने की क्षमता है। हालाँकि, इन प्रणालियों का वैज्ञानिक और नैदानिक मूल्य अंततः कठोर सत्यापन, पारदर्शी पद्धतिगत सीमाओं और मानव आंदोलन को नियंत्रित करने वाले स्थापित बायोमैकेनिकल सिद्धांतों के साथ एकीकरण पर निर्भर करता है।

यह लेख एआई-आधारित बायोमैकेनिक्स सिस्टम की तकनीकी नींव की जांच करता है, यांत्रिक सिद्धांतों के माध्यम से उनकी व्याख्या बताता है, और आंदोलन विज्ञान में अनुप्रयोगों, सीमाओं और भविष्य की दिशाओं पर चर्चा करता है।

कीवर्ड

आर्टिफिशियल इंटेलिजेंस, बायोमैकेनिक्स, मार्करलेस मोशन कैप्चर, पोज़ एस्टीमेशन, मूवमेंट मैकेनिक्स, स्पोर्ट्स बायोमैकेनिक्स, रिहैबिलिटेशन टेक्नोलॉजी

परिचय

मानव गतिविधि के वैज्ञानिक विश्लेषण ने लंबे समय से बायोमैकेनिक्स, खेल विज्ञान और नैदानिक पुनर्वास के भीतर एक केंद्रीय स्थान पर कब्जा कर लिया है। यह समझना कि गतिशील गतिविधि के दौरान मस्कुलोस्केलेटल प्रणाली कैसे बलों को उत्पन्न और संचारित करती है, एथलेटिक प्रदर्शन में सुधार, चोट को रोकने और चिकित्सीय हस्तक्षेप का मार्गदर्शन करने के लिए मौलिक है। दशकों से, मानव आंदोलन यांत्रिकी की जांच प्रयोगशाला-आधारित माप प्रौद्योगिकियों जैसे मार्कर-आधारित गति कैप्चर सिस्टम, बल प्लेटफ़ॉर्म और इलेक्ट्रोमोग्राफिक विश्लेषण पर निर्भर रही है। इन उपकरणों ने संयुक्त गतिकी, जमीनी प्रतिक्रिया बलों और मांसपेशी सक्रियण पैटर्न के विस्तृत माप को सक्षम किया है, जो मानव आंदोलन के यांत्रिक निर्धारकों में मूल्यवान अंतर्दृष्टि प्रदान करता है।

अपने वैज्ञानिक मूल्य के बावजूद, पारंपरिक बायोमैकेनिकल मूल्यांकन प्रणालियाँ पहुंच और पारिस्थितिक वैधता में सीमित हैं। मोशन कैप्चर प्रयोगशालाओं को विशेष उपकरण, नियंत्रित वातावरण और प्रशिक्षित तकनीकी कर्मियों की आवश्यकता होती है, जो अनुसंधान संस्थानों और विशिष्ट प्रदर्शन केंद्रों तक उनकी उपलब्धता को सीमित करता है। परिणामस्वरूप, अधिकांश एथलीट, मरीज़ और चिकित्सक बाहरी वातावरण में काम करते हैं जहाँ व्यापक बायोमैकेनिकल विश्लेषण को नियमित रूप से लागू किया जा सकता है। प्रयोगशाला माप क्षमता और वास्तविक दुनिया के आंदोलन वातावरण के बीच इस अलगाव को समकालीन बायोमैकेनिक्स अभ्यास की प्रमुख सीमाओं में से एक के रूप में व्यापक रूप से मान्यता दी गई है।

कृत्रिम बुद्धिमत्ता, कंप्यूटर विज़न और मशीन लर्निंग में हालिया प्रगति ने इस परिदृश्य को बदलना शुरू कर दिया है। डीप लर्निंग एल्गोरिदम द्वारा संचालित मार्करलेस मोशन कैप्चर प्रौद्योगिकियां अब मानक कैमरा सिस्टम द्वारा कैप्चर किए गए वीडियो डेटा से सीधे मानव संयुक्त स्थिति और खंड अभिविन्यास का अनुमान लगाने में सक्षम बनाती हैं। इन प्रौद्योगिकियों ने खेल प्रशिक्षण सुविधाओं, पुनर्वास क्लीनिकों और क्षेत्र-आधारित प्रदर्शन सेटिंग्स सहित प्रयोगशाला उपकरणों के लिए पहले से दुर्गम वातावरण में बायोमैकेनिकल विश्लेषण करने की संभावना पेश की है। दृश्य डेटा स्ट्रीम से गतिज जानकारी के निष्कर्षण को स्वचालित करके, एआई-संचालित बायोमैकेनिक्स प्लेटफार्मों में नाटकीय रूप से उस पैमाने का विस्तार करने की क्षमता है जिस पर आंदोलन विश्लेषण आयोजित किया जा सकता है।

हालाँकि, बायोमैकेनिक्स में कृत्रिम बुद्धिमत्ता का उद्भव एक महत्वपूर्ण वैचारिक चुनौती पेश करता है: गतिज अवलोकन और यांत्रिक व्याख्या के बीच का अंतर। जबकि एआई सिस्टम उच्च सटीकता के साथ संयुक्त कोणों, खंड प्रक्षेपवक्र और आंदोलन विषमताओं का पता लगाने में तेजी से सक्षम हैं, ये माप अकेले मस्कुलोस्केलेटल प्रणाली के भीतर कार्य करने वाले यांत्रिक बलों को पूरी तरह से समझा नहीं पाते हैं। संचलन यांत्रिकी मूल रूप से गतिज श्रृंखला में बल वैक्टर, संयुक्त टॉर्क और लोड ट्रांसफर पथों के बीच बातचीत द्वारा नियंत्रित होती है। इस यांत्रिक संदर्भ में व्याख्या के बिना, विशुद्ध रूप से गतिक विवरण गति अक्षमता और ऊतक लोडिंग के अंतर्निहित कारणों की अनदेखी करने का जोखिम उठाते हैं।

MMSx (मूवमेंट मैकेनिक्स एंड बायोमैकेनिक्स साइंस) ढांचा एक यांत्रिक निर्णय-विज्ञान परिप्रेक्ष्य के माध्यम से आंदोलन की व्याख्या करके इस चुनौती का समाधान करता है। इस ढांचे के भीतर, मानव गति को गुरुत्वाकर्षण और कार्य मांगों की बाधाओं के तहत संचालित बल विनियमन, टोक़ वितरण और गतिशील श्रृंखला समन्वय की एक प्रणाली के रूप में अवधारणाबद्ध किया गया है। इसलिए कृत्रिम बुद्धिमत्ता न केवल गति ट्रैकिंग के लिए एक वर्णनात्मक उपकरण के रूप में कार्य करती है, बल्कि बायोमैकेनिकल तर्क के एक कम्प्यूटेशनल विस्तार के रूप में कार्य करती है, जो बल संचरण और मस्कुलोस्केलेटल लोडिंग को प्रभावित करने वाले आंदोलन पैटर्न की पहचान करने में चिकित्सकों की सहायता करती है। इस लेख का उद्देश्य आधुनिक आंदोलन विज्ञान के भीतर एआई बायोमैकेनिक्स विश्लेषण सॉफ्टवेयर की उभरती भूमिका की जांच करना है। विशेष रूप से, लेख एआई-संचालित गति विश्लेषण की तकनीकी नींव, गतिज डेटा का यांत्रिक अंतर्दृष्टि में अनुवाद, और खेल प्रदर्शन और नैदानिक पुनर्वास के लिए वास्तविक समय बायोमैकेनिकल प्रतिक्रिया के निहितार्थ की पड़ताल करता है। इसके अलावा, पेपर मार्कर रहित गति विश्लेषण से जुड़ी पद्धतिगत सीमाओं पर चर्चा करता है और एआई-आधारित बायोमैकेनिकल सिस्टम

की सटीकता और व्याख्यात्मक शक्ति को बढ़ाने में सक्षम मल्टीमॉडल सेंसिंग प्रौद्योगिकियों के भविष्य के एकीकरण की रूपरेखा तैयार करता है।

मानव आंदोलन के स्थापित यांत्रिक सिद्धांतों के भीतर कृत्रिम बुद्धिमत्ता को स्थापित करके, लेख का उद्देश्य यह स्पष्ट करना है कि कैसे एआई प्रौद्योगिकियां सार्थक नैदानिक और प्रदर्शन अनुप्रयोगों के लिए आवश्यक वैज्ञानिक कठोरता को बनाए रखते हुए बायोमैकेनिक्स में साक्ष्य-आधारित निर्णय लेने का समर्थन कर सकती हैं।

मानव गतिविधि का बायोमैकेनिकल अध्ययन ऐतिहासिक रूप से चिकित्सकों और शोधकर्ताओं के लिए उपलब्ध उपकरणों द्वारा बाधित किया गया है। बीसवीं शताब्दी के अधिकांश समय में, चाल, मुद्रा और एथलेटिक तकनीक का विश्लेषण प्राथमिक द्वि-आयामी वीडियो द्वारा पूरक प्रशिक्षित नेत्र अवलोकन पर निर्भर था। पर्यवेक्षक संयुक्त कोणों की व्याख्या करेंगे, जमीनी प्रतिक्रिया बलों का अनुमान लगाएंगे, और फुटेज से गुणात्मक निष्कर्ष निकालेंगे, जो किसी भी आधुनिक मानक के अनुसार, मोटे और अस्थायी रूप से अस्पष्ट थे। यहां तक कि जैसे-जैसे अनुशासन परिपक्व हुआ, प्रचलित प्रतिमान विशेषज्ञ व्याख्या में से एक बना रहा - एक स्वाभाविक रूप से व्यक्तिपरक और श्रम-गहन प्रक्रिया जो अंतर-रेटर परिवर्तनशीलता से ग्रस्त है।

1990 और 2000 के दशक की शुरुआत में डिजिटल बायोमैकेनिक्स प्रयोगशालाओं में संक्रमण ने त्रि-आयामी मोशन कैप्चर सिस्टम, फोर्स प्लेटफॉर्म और इलेक्ट्रोमोग्राफिक रिकॉर्डिंग की शुरुआत की, जिससे सामूहिक रूप से गतिक और गतिज रिज़ॉल्यूशन के स्तर को सक्षम किया गया जो वास्तव में परिवर्तनकारी था। फिर भी इन प्रणालियों की अपनी बाधाएं थीं: निषेधात्मक पूंजी लागत, प्रतिबंधात्मक पर्यावरणीय आवश्यकताएं, और विस्तारित प्रसंस्करण पाइपलाइन जो विशेष अनुसंधान संदर्भों के बाहर वास्तविक समय की प्रतिक्रिया को काफी हद तक अव्यावहारिक बनाती थीं। एक प्रतिस्पर्धी धावक, शल्य चिकित्सा के बाद पुनर्वास रोगी, या सामुदायिक जिम में एक युवा एथलीट को कभी भी आंदोलन विश्लेषण की गहराई प्राप्त होने की संभावना नहीं थी जो इस तरह के बुनियादी ढांचे प्रदान कर सकते थे। कृत्रिम बुद्धिमत्ता के समकालीन उद्भव - और विशेष रूप से कंप्यूटर विज़न, मशीन लर्निंग और एज कंप्यूटिंग के अभिसरण ने इस क्षेत्र के लिए वास्तव में एक नया प्रक्षेप पथ पेश किया है। एआई बायोमैकेनिक्स विश्लेषण सॉफ्टवेयर न केवल मौजूदा उपकरणों पर एक वृद्धिशील सुधार का प्रतिनिधित्व करता है, बल्कि एक संरचनात्मक पुनर्संरचना करता है कि कौन आंदोलन विज्ञान तक पहुंच सकता है, इसे कब लागू किया जा सकता है, और डेटा की कितनी मात्रा की सार्थक व्याख्या की जा सकती है। साक्ष्य-आधारित अभ्यास के अग्रणी किनारे पर काम करने वाले खेल वैज्ञानिकों, चिकित्सकों और प्रदर्शन प्रशिक्षकों के लिए इस बदलाव के दायरे, अंतर्निहित वास्तुकला और व्यावहारिक निहितार्थ को समझना आवश्यक है।

पारंपरिक गति विश्लेषण वातावरण की सीमाएँ

पारंपरिक त्रि-आयामी गति विश्लेषण के लिए एक नियंत्रित प्रयोगशाला सेटिंग की आवश्यकता होती है जिसमें प्रतिभागी के शरीर पर संरचनात्मक स्थलों पर रेट्रोरिफ्लेक्टिव मार्कर चिपकाए जाते हैं। इन्फ्रारेड कैमरों का एक नेटवर्क - आम तौर पर संख्या में आठ से बारह - नमूना दरों पर त्रि-आयामी अंतरिक्ष में मार्कर स्थिति को त्रिकोणित करता है जो प्रति सेकंड दो सौ या अधिक फ्रेम तक पहुंच सकता है। जबकि इस पद्धति के माध्यम से प्राप्त गतिज निष्ठा असाधारण है, प्रयोगशाला-आधारित मूल्यांकन की पारिस्थितिक वैधता पर लगातार सवाल उठाए जाते हैं। मानव आंदोलन, विशेष रूप से खेल और व्यावसायिक संदर्भों में, स्वाभाविक रूप से प्रतिक्रियाशील और अप्रत्याशित है। प्रतिस्पर्धी दबाव के तहत निष्पादित रक्षात्मक कटिंग पैंतरेबाज़ी की बायोमैकेनिक्स एक बाँझ प्रयोगशाला वातावरण में एक पर्यवेक्षक की उपस्थिति के साथ किए गए समान आंदोलन से सार्थक रूप से भिन्न होती है। फोर्स-प्लेट आधारित विश्लेषण, इसी तरह, सीधी-रेखा या न्यूनतम बाधित कार्यों के दौरान अलग-अलग फुटफॉल को पकड़ते हैं, वास्तविक दुनिया के एथलेटिक प्रदर्शन की बहु-दिशात्मक, संपर्क-भरी मांगों का शायद ही कभी अनुमान लगाते हैं। प्रयोगशाला-आधारित विश्लेषण से जुड़ी संसाधन आवश्यकताएँ इसके नैदानिक और कोचिंग अनुप्रयोगों को और सीमित कर देती हैं। सेटअप और मार्कर प्लेसमेंट के लिए आमतौर पर प्रति सत्र तीस से साठ मिनट की आवश्यकता होती है; कच्चे मोशन डेटा की पोस्ट-प्रोसेसिंग एक विशेष कार्य है जिसमें महत्वपूर्ण विश्लेषक समय की आवश्यकता होती है; और परिणामी

डेटासेट-हालांकि समृद्ध-अक्सर सारांश आंकड़ों तक सीमित हो जाते हैं जो आंदोलन की अस्थायी गतिशीलता को अस्पष्ट करते हैं। डेटा संग्रह और कार्रवाई योग्य आउटपुट के बीच की बाधा ऐतिहासिक रूप से व्यवसायी का समय और व्याख्यात्मक क्षमता रही है, न कि माप उपकरण का समाधान।

बायोमैकेनिकल मूल्यांकन में बाधा कभी भी सेंसर रिज़ॉल्यूशन नहीं रही है - यह पारिस्थितिक रूप से मान्य परिस्थितियों में, वास्तविक समय में बड़े पैमाने पर आंदोलन की व्याख्या करने की मानवीय क्षमता रही है।

तालिका 1: पारंपरिक बनाम एआई-संचालित बायोमैकेनिक्स विश्लेषण प्रणालियों की तुलना

पहलू

पारंपरिक मार्कर-बेस डी सिस्टम

एआई-संचालित मार्करलेस सिस्टम (उदाहरण के लिए, OpenPose, मीडियापाइप, थिया3डी)

[तालिका या चित्र — मूल अंग्रेज़ी PDF देखें।]

मानक आरजीबी वीडियो, उच्च पारिस्थितिक क्षेत्र/क्लिनिक/खेल वैधता, प्रकाश व्यवस्था, रोड़ा, सेटिंग्स स्केलेबल कपड़ों की तैनाती के प्रति संवेदनशील

सेटअप समय

प्रति सत्र 30-60 मिनट (मार्कर प्लेसमेंट)

न्यूनतम (केवल कैमरा पोजीशनिंग)

गतिज सटीकता (धनु तल)

कूल्हे/घुटने के लचीलेपन (त्रुटियों <1-2°) के लिए स्वर्ण मानक 3-8° एमएई; नियंत्रित चाल में 2-5°

वास्तविक समय की क्षमता

संभावित सत्र-दर-सत्र n भिन्नता

कार्यात्मक कार्यों में गिरावट के लिए अच्छा है मल्टी-प्लानर/उच्च-वी गति गति

गतिज अनुमान

प्रत्यक्ष बल प्लेटफ़ॉर्म + व्युत्क्रम गतिशीलता

त्वरण (F=ma) से अनुमान लगाया गया; आघूर्ण भुजाओं के माध्यम से टॉर्क (τ=r×F)

अप्रत्यक्ष लेकिन स्केलेबल

केवल अनुमान; परिशुद्धता के लिए संलयन की आवश्यकता होती है

[तालिका या चित्र — मूल अंग्रेज़ी PDF देखें।]

Validation envelope narrower than lab systems

वास्तविक समय प्रतिक्रिया

सीमित सक्षम (समवर्ती (प्रक्रिया के बाद के संकेत) प्रभावी)

मोटर लर्निंग को बढ़ाता है

प्रसंस्करण विलंबता पर निर्भर

एआई बायोमैकेनिक्स सिस्टम को रेखांकित करने वाली कोर टेक्नोलॉजीज

समकालीन एआई बायोमैकेनिक्स प्लेटफ़ॉर्म तीन व्यापक तकनीकी डोमेन को एकीकृत करते हैं: कंप्यूटर विज़न, मोशन ट्रैकिंग एल्गोरिदम और मशीन लर्निंग पैटर्न डिटेक्शन। ये घटक वास्तुशिल्प रूप से एक दूसरे पर निर्भर हैं, और उनका संयुक्त संचालन विश्लेषणात्मक क्षमता की एक डिग्री सक्षम करता है जिसे कोई भी एकल तकनीक अलग से हासिल नहीं कर सकती है। कंप्यूटर विज़न कच्ची छवि या वीडियो डेटा से सार्थक संरचनात्मक जानकारी निकालने के लिए एल्गोरिदम की क्षमता को संदर्भित करता है। बायोमैकेनिक्स के संदर्भ में, इसमें मानव शरीर के खंडों का पता लगाना, संयुक्त स्थिति का अनुमान लगाना और दो-आयामी या तीन-आयामी इमेजिंग इनपुट से कंकाल ज्यामिति का पुनर्निर्माण शामिल है। बड़े पैमाने पर मानव मुद्रा डेटासेट पर प्रशिक्षित गहरे दृढ़ तंत्रिका नेटवर्क के विकास - विशेष रूप से COCO और Human3.6M बेंचमार्क से प्राप्त मॉडल - ने मानक कैमरा हार्डवेयर से नैदानिक रूप से प्रासंगिक सटीकता प्राप्त करने के लिए मुद्रा अनुमान एल्गोरिदम को सक्षम किया है। OpenPose, मीडियापाइप ब्लेज़पोज़, और हाल के ट्रांसफार्मर-आधारित आर्किटेक्चर जैसे सिस्टम उपभोक्ता-ग्रेड ग्राफिक्स हार्डवेयर पर वास्तविक समय प्रसंस्करण के अनुरूप गति पर तैंतीस या अधिक संरचनात्मक कुंजी बिंदुओं को स्थानीयकृत कर सकते हैं।

मोशन ट्रैकिंग पूरे समय में मुद्रा अनुमान का विस्तार करती है, जिससे अनुक्रमिक फ्रेम डेटा से कोणीय किनेमेटिक्स, खंड वेग और त्वरण प्रोफाइल की व्युत्पत्ति सक्षम होती है। मजबूत ट्रैकिंग में रोड़ा, तीव्र खंड विस्थापन, परिवर्तनशील प्रकाश की स्थिति और अंतर्निहित कंकाल संरचना के सापेक्ष नरम ऊतक की गैर-कठोर प्रकृति को ध्यान में रखना चाहिए। कलमन फ़िल्टरिंग, ऑप्टिकल प्रवाह अनुमान, और ध्यान-आधारित टेम्पोरल मॉडलिंग प्रत्येक को इन चुनौतियों पर लागू किया गया है, जिसमें अप्रतिबंधित वातावरण में बेहतर मजबूती का प्रदर्शन करने वाले दृष्टिकोण शामिल हैं। गहराई वाले कैमरों का एकीकरण - संरचित प्रकाश या उड़ान के समय सेंसर - प्रयोगशाला प्रणालियों की मार्कर-निर्भरता के बिना त्रि-आयामी पुनर्निर्माण सटीकता को और बढ़ाता है।

मशीन लर्निंग पैटर्न का पता लगाना पूर्ववर्ती पाइपलाइन द्वारा उत्पादित गतिज और गतिज डेटा धाराओं पर काम करता है। लेबल किए गए आंदोलन डेटासेट पर प्रशिक्षित पर्यवेक्षित वर्गीकरण मॉडल विशिष्ट तकनीक विचलन की पहचान कर सकते हैं, मानक आबादी के सापेक्ष असमानताओं को चिह्नित कर सकते हैं, और इंटरक्लास सहसंबंध गुणांक के साथ आंदोलन गुणवत्ता स्कोर को वर्गीकृत कर सकते हैं जो अच्छी तरह से परिभाषित कार्यों के लिए विशेषज्ञ मानव रेटर के करीब पहुंचते हैं। शोधकर्ताओं द्वारा पूर्वनिर्धारित नहीं किए गए आंदोलन पैटर्न की खोज के लिए अनपर्यवेक्षित और अर्ध-पर्यवेक्षित दृष्टिकोण तेजी से लागू किए जा रहे हैं, जो प्रतिपूरक यांत्रिकी की खोजपूर्ण पहचान को सक्षम बनाता है जो नैदानिक रूप से स्पष्ट शिथिलता से पहले हो सकता है।

चित्र 1: एआई-आधारित आंदोलन विश्लेषण प्रणालियों में वीडियो कैप्चर से लेकर पोज अनुमान, गतिज निष्कर्षण, यांत्रिक अनुमान और लागू निर्णय आउटपुट तक की प्रगति को दर्शाने वाली वैचारिक पाइपलाइन।

OpenPose और मीडियापाइप जैसे डीप-लर्निंग-आधारित पोज़ अनुमान मॉडल में हाल की प्रगति ने मानक कैमरा सिस्टम (11-18) का उपयोग करके मार्कर रहित मूवमेंट ट्रैकिंग को सक्षम किया है।

यांत्रिक बुनियाद

एआई किनेमेटिक्स को मैकेनिकल लोडिंग से जोड़ना जबकि बायोमैकेनिक्स में कृत्रिम बुद्धिमत्ता प्रणाली मुख्य रूप से गतिज जानकारी-संयुक्त स्थिति, खंड प्रक्षेपवक्र, कोणीय वेग और आंदोलन समरूपता निकालती है - मानव आंदोलन की व्याख्या के लिए अंततः इन अवलोकनों को यांत्रिक लोडिंग चर में अनुवाद की आवश्यकता होती है। किनेमेटिक्स वर्णन करता है कि शरीर कैसे चलता है; बायोमैकेनिक्स बताता है कि वह गति क्यों होती है और ऊतकों को क्या अनुभव होता है। MMSx ढांचे के भीतर, एआई-व्युत्पन्न आंदोलन डेटा की व्याख्या बुनियादी यांत्रिक संबंधों के माध्यम से की जानी चाहिए जो मस्कुलोस्केलेटल लोडिंग को नियंत्रित करते हैं। दृश्य गति की जानकारी को यांत्रिक अंतर्दृष्टि में अनुवाद करते समय दो मूलभूत समीकरण विशेष रूप से प्रासंगिक होते हैं।

पहला न्यूटोनियन बल समीकरण है:

यह समीकरण बताता है कि जब किसी द्रव्यमान को त्वरित किया जाता है तो बल उत्पन्न होता है, जो बायोमैकेनिक्स में गति और बाहरी लोडिंग का आधार बनता है।

यह संबंध बताता है कि किसी पिंड खंड पर कार्य करने वाली शक्तियां उसके द्रव्यमान और त्वरण से कैसे निर्धारित होती हैं। एआई-आधारित आंदोलन विश्लेषण के संदर्भ में, अनुक्रमिक मुद्रा अनुमान फ्रेम से प्राप्त त्वरण मान प्रेक्षित गति उत्पन्न करने के लिए आवश्यक बलों के अनुमानित अनुमान की अनुमति देते हैं। जब एक एथलीट लैंडिंग कार्य के दौरान तेजी से गति कम करता है या कटिंग मूवमेंट के दौरान दिशा बदलता है, तो एआई से त्वरण प्रोफाइल प्राप्त होता है

किनेमेटिक्स निचले छोर और ट्रंक के माध्यम से प्रेषित बलों के परिमाण में अप्रत्यक्ष अंतर्दृष्टि प्रदान करता है।

गति यांत्रिकी को नियंत्रित करने वाला दूसरा मौलिक संबंध टॉर्क समीकरण है, जो संयुक्त केंद्र से दूरी पर कार्य करने वाले बल के घूर्णी प्रभाव का वर्णन करता है:

यह समीकरण दर्शाता है कि संयुक्त बलाघूर्ण तब बनता है जब एक बल संयुक्त अक्ष के चारों ओर एक क्षणिक भुजा के माध्यम से कार्य करता है।

यहां, τ\tau संयुक्त टोक़ का प्रतिनिधित्व करता है, आरआरआर क्षण भुजा (संयुक्त केंद्र और लागू बल वेक्टर के बीच लंबवत दूरी) का प्रतिनिधित्व करता है, और एफएफएफ लागू बल के परिमाण का प्रतिनिधित्व करता है। मानव गति में, टॉर्क पीढ़ी यह निर्धारित करती है कि गतिशील गतिविधि के दौरान जोड़ों के चारों ओर के खंडों को घुमाने के लिए मांसपेशियों और संयोजी ऊतकों को कैसे कार्य करना चाहिए। एआई-आधारित मुद्रा अनुमान प्रणाली संयुक्त केंद्रों और खंड अभिविन्यासों के लिए आवश्यक स्थानिक निर्देशांक प्रदान करती है, जिससे आंदोलन के दौरान हथियारों के क्षण का अनुमान लगाया जा सकता है। जब अनुमानित बाहरी ताकतों के साथ जोड़ा जाता है - जैसे कि त्वरण या पहनने योग्य सेंसर से अनुमानित जमीनी प्रतिक्रिया बल - तो इन गतिज इनपुट को संयुक्त टोक़ वितरण के अनुमानों में अनुवादित किया जा सकता है।

अनुप्रयुक्त बायोमैकेनिक्स संदर्भों में, इस यांत्रिक अनुवाद के महत्वपूर्ण निहितार्थ हैं। दृष्टिगत रूप से सूक्ष्म विचलन, जैसे बैठने के दौरान ट्रंक का बढ़ा हुआ झुकाव, काठ की रीढ़ की हड्डी के सापेक्ष भार के क्षणिक हाथ को काफी हद तक बढ़ा सकता है, जिससे संयुक्त कोण विचलन मामूली दिखाई देने पर भी स्पाइनल टॉर्क की मांग बढ़ जाती है। इसी तरह, लैंडिंग के दौरान घुटने के वाल्गस में थोड़ी सी वृद्धि घुटने के जोड़ केंद्र के सापेक्ष जमीनी प्रतिक्रिया बलों की गति को बदल सकती है, जिससे लिगामेंटस लोडिंग और संभावित चोट का खतरा बढ़ जाता है।

इस कारण से, एआई-आधारित बायोमैकेनिक्स सिस्टम की व्याख्या केवल गति ज्यामिति को मापने के उपकरण के रूप में नहीं की जानी चाहिए। उनका व्यावहारिक मूल्य देखे गए आंदोलन पैटर्न के यांत्रिक परिणामों का अनुमान लगाने की उनकी क्षमता में निहित है - विशेष रूप से बल वैक्टर, क्षण हथियार और त्वरण संयुक्त लोडिंग स्थितियों को निर्धारित करने के लिए कैसे बातचीत करते हैं। MMSx यांत्रिक निर्णय-विज्ञान ढांचे के भीतर, एआई आंदोलन विश्लेषण का उद्देश्य अवलोकन योग्य किनेमेटिक्स और अंतर्निहित यांत्रिक लोडिंग के बीच अंतर को पाटना है, जिससे चिकित्सकों को गतिशील गतिविधि के दौरान बल वितरण, टोक़ मांगों और गतिज श्रृंखला स्थिरता को बदलने वाले आंदोलन पैटर्न की पहचान करने में सक्षम बनाया जा सके।

तालिका 2: एआई किनेमेटिक्स से MMSx फ्रेमवर्क के माध्यम से व्याख्या किए गए मुख्य यांत्रिक पैरामीटर

[तालिका या चित्र — मूल अंग्रेज़ी PDF देखें।]

उच्च लोडिंग का अनुमान → ऊंचे मंदी/लैंडिंग के दौरान जीआरएफ अनुमान → चोट का जोखिम

[तालिका या चित्र — मूल अंग्रेज़ी PDF देखें।]

मांसपेशियों/स्नायुबंधन वाल्गस में घुटने τ पर घूर्णी बढ़ी हुई मांग की मात्रा निर्धारित करता है → एसीएल तनाव

जोड़ के सापेक्ष बल खंड वेक्टर अकुशल वेक्टर अभिविन्यास + सीओएम केंद्र लोड पथ अभिविन्यास की पहचान करता है

ट्रंक का झुकाव → पश्च शिफ्ट → काठ का अधिभार

लोड ट्रांसफर मार्ग

बहु-खंड समन्वय

कूल्हे के विस्तार में देरी → घुटने के तनाव की भरपाई

कतरनी बनाम

कंप्रेसि

संयुक्त कोण + वेग/त्वरण अभिविन्यास/कतरनी से अनुमान लगाया गया

[तालिका या चित्र — मूल अंग्रेज़ी PDF देखें।]

लिगामेंट का आकलन करता है काटने में अत्यधिक बनाम उपास्थि लोडिंग कतरनी → लिगामेंट तनाव

समीकरण

टोक़ समीकरण

संवेग समीकरण

यह समीकरण दर्शाता है कि संयुक्त बलाघूर्ण तब बनता है जब एक बल संयुक्त अक्ष के चारों ओर एक क्षणिक भुजा के माध्यम से कार्य करता है।

यह समीकरण द्रव्यमान और वेग की परस्पर क्रिया द्वारा निर्मित गति की मात्रा के रूप में रैखिक गति की व्याख्या करता है।

बल समीकरण

कोणीय संवेग समीकरण

यह समीकरण बताता है कि जब किसी द्रव्यमान को त्वरित किया जाता है तो बल उत्पन्न होता है, जो बायोमैकेनिक्स में गति और बाहरी लोडिंग का आधार बनता है।

यह समीकरण कोणीय गति को जड़ता के क्षण और कोणीय वेग द्वारा निर्धारित घूर्णी गति के रूप में वर्णित करता है।

कार्य समीकरण

आवेग समीकरण

यह समीकरण समय के साथ लगाए गए बल के प्रभाव के रूप में आवेग की व्याख्या करता है, जिससे गति में परिवर्तन होता है।

यह समीकरण यांत्रिक कार्य को गति की दिशा में विस्थापन के माध्यम से लगाए गए बल के रूप में वर्णित करता है।

द्रव्यमान समीकरण का केंद्र शक्ति समीकरण

यह समीकरण सभी शरीर खंडों की भारित औसत स्थिति के रूप में द्रव्यमान के केंद्र की गणना करता है।

यह समीकरण शक्ति को उस दर के रूप में परिभाषित करता है जिस पर समय के साथ यांत्रिक कार्य किया जाता है।

सन्दर्भ

1–3, 36–38

चित्र 4. एआई-आधारित आंदोलन विश्लेषण से प्राप्त यांत्रिक चर। वैचारिक मॉडल यह दर्शाता है कि कैसे एआई-व्युत्पन्न गतिज आउटपुट (संयुक्त कोण, खंड वेग और त्वरण) को बायोमैकेनिकल व्याख्या के भीतर पल हाथ अनुमान, बल वेक्टर अभिविन्यास और लोड ट्रांसफर पथ सहित यांत्रिक रूप से प्रासंगिक चर में अनुवादित किया जाता है।

MMSx मैकेनिकल फ्रेमवर्क के भीतर एआई व्याख्या एआई-आधारित आंदोलन विश्लेषण प्रणाली मुख्य रूप से संयुक्त निर्देशांक और खंड प्रक्षेपवक्र जैसे गतिज आउटपुट उत्पन्न करती है। हालाँकि, केवल स्थितीय ट्रैकिंग मस्कुलोस्केलेटल प्रणाली द्वारा अनुभव की गई यांत्रिक लोडिंग का वर्णन नहीं करती है। MMSx यांत्रिक ढांचे के भीतर, गति यांत्रिकी और चोट के जोखिम को समझने के लिए गतिज डेटा की व्याख्या बल वैक्टर, टॉर्क वितरण, लोड ट्रांसफर पथ और कतरनी बनाम संपीड़न गतिशीलता सहित यांत्रिक चर के माध्यम से की जानी चाहिए।

मानव गति विश्लेषण पर लागू कृत्रिम बुद्धिमत्ता को अंततः सतह-स्तरीय गतिक विवरण से परे विस्तारित होना चाहिए। जबकि कंप्यूटर विज़न सिस्टम संयुक्त स्थिति, खंड कोण और आंदोलन प्रक्षेपवक्र की सटीक पहचान कर सकते हैं, ये माप अकेले मस्कुलोस्केलेटल लोडिंग को नियंत्रित करने वाली यांत्रिक प्रक्रियाओं का पूरी तरह से वर्णन नहीं करते हैं। MMSx (मूवमेंट मैकेनिक्स एंड बायोमैकेनिक्स साइंस) ढांचे के भीतर, एआई-आधारित आंदोलन विश्लेषण की व्याख्या यांत्रिक निर्णय-विज्ञान के लेंस के माध्यम से की जाती है, जिसमें आंदोलन को मुख्य रूप से मानव गतिज श्रृंखला में बल उत्पादन, संचरण और विनियमन की एक प्रणाली के रूप में समझा जाता है।

इस मॉडल में, कृत्रिम बुद्धिमत्ता एक कम्प्यूटेशनल पर्यवेक्षक के रूप में कार्य करती है जो गति डेटा के भीतर पैटर्न की पहचान करने में सक्षम है जो मस्कुलोस्केलेटल प्रणाली की अंतर्निहित यांत्रिक स्थितियों के अनुरूप है। केवल आदर्शीकृत आसन टेम्पलेट्स के विरुद्ध आंदोलन का

मूल्यांकन करने के बजाय, MMSx दृष्टिकोण विश्लेषण को प्राथमिकता देता है कि गतिशील गतिविधि के दौरान शरीर के माध्यम से बल कैसे फैलते हैं और भार के तहत संरचनात्मक संरचनाओं की बातचीत से यांत्रिक दक्षता या अक्षमता कैसे उभरती है।

इस व्याख्या का एक केंद्रीय घटक शरीर के संयुक्त केंद्रों के सापेक्ष बल वैक्टर का अभिविन्यास है। हरकत, उठाने या खेल-विशिष्ट क्रियाओं के दौरान, जमीनी प्रतिक्रिया बल वेक्टर मांसपेशियों, स्नायुबंधन और आर्टिकुलर उपास्थि पर रखी गई यांत्रिक मांगों को निर्धारित करने के लिए संयुक्त केंद्रों और खंड क्षण भुजाओं के साथ बातचीत करता है। समय-समय पर बॉडी सेगमेंट ओरिएंटेशन को ट्रैक करने में सक्षम एआई सिस्टम अनुमान लगा सकता है कि ये बल वैक्टर आंदोलन निष्पादन के दौरान कैसे बदलते हैं, जिससे चिकित्सकों को उन विचलनों की पहचान करने की अनुमति मिलती है जो संयुक्त लोडिंग पैटर्न को बदलते हैं। उदाहरण के लिए, बैठने के दौरान अत्यधिक ट्रंक झुकाव या दौड़ने के दौरान असममित जमीन संपर्क बल वैक्टर को उन तरीकों से पुनर्निर्देशित कर सकता है जो संयुक्त क्षणों और ऊतक तनाव को बढ़ाते हैं। जोड़ों में टॉर्क वितरण की अवधारणा वेक्टर ओरिएंटेशन से निकटता से संबंधित है। टॉर्क संयुक्त केंद्र से दूरी पर कार्य करने वाले बल के घूर्णी प्रभाव का प्रतिनिधित्व करता है और गतिशील आंदोलन के दौरान मस्कुलोस्केलेटल लोडिंग के प्राथमिक निर्धारकों में से एक है। MMSx ढांचे के भीतर, एआई-व्युत्पन्न गतिज डेटा की व्याख्या इस संदर्भ में की जाती है कि समीपस्थ और दूरस्थ खंडों के बीच टोक़ मांगों को कैसे वितरित किया जाता है। टॉर्क शेयरिंग में व्यवधान - जैसे अपर्याप्त कूल्हे के योगदान के कारण लैंडिंग के दौरान अत्यधिक घुटने का टॉर्क - अक्षम आंदोलन पैटर्न और बढ़े हुए चोट के जोखिम के प्रमुख यांत्रिक हस्ताक्षर का प्रतिनिधित्व करता है। MMSx दृष्टिकोण गतिज श्रृंखला के भीतर भार स्थानांतरण मार्गों के महत्व पर और जोर देता है। मानव गति स्वतंत्र रूप से कार्य करने वाले अलग-अलग जोड़ों द्वारा नहीं बल्कि पूरे शरीर में यांत्रिक ऊर्जा संचारित करने वाले कई खंडों के बीच समन्वित अंतःक्रियाओं द्वारा उत्पन्न होती है। कार्य की आवश्यकता होने पर कुशल गति इन मार्गों के माध्यम से जमीनी इंटरफ़ेस से निचले छोर, श्रोणि, ट्रंक और ऊपरी शरीर के माध्यम से बलों के व्यवस्थित प्रसार पर निर्भर करती है। अनुक्रमिक गति डेटा का विश्लेषण करने वाली एआई प्रणालियाँ इन मार्गों में रुकावटों का पता लगा सकती हैं, जैसे उठाने के दौरान कूल्हे के विस्तार में देरी या चाल के दौरान असममित पेल्विक रोटेशन, ये दोनों आसन्न जोड़ों पर यांत्रिक तनाव को पुनर्वितरित कर सकते हैं। एक अन्य महत्वपूर्ण यांत्रिक विचार आर्टिकुलर संरचनाओं में कतरनी और संपीड़ित लोडिंग के बीच संतुलन है। जबकि संपीड़न बल अक्सर उपास्थि और सबचॉन्ड्रल हड्डी में उनके वितरण के कारण संयुक्त सतहों द्वारा अच्छी तरह से सहन किए जाते हैं, अत्यधिक कतरनी बल संयुक्त गति को स्थिर करने के लिए जिम्मेदार स्नायुबंधन और संयोजी ऊतकों पर अधिक दबाव डाल सकते हैं। एआई-सहायता प्राप्त विश्लेषण जो संयुक्त अभिविन्यास, खंड वेग, या दिशात्मक त्वरण में परिवर्तनों की पहचान करता है, उन स्थितियों का अनुमान लगाने में मदद कर सकता है जिनके तहत संपीड़न के सापेक्ष कतरनी लोडिंग बढ़ सकती है। ऐसी जानकारी विशेष रूप से उच्च-वेग या दिशा-परिवर्तन गतिविधियों में प्रासंगिक है जहां संयुक्त स्थिरता सटीक न्यूरोमस्क्यूलर समन्वय पर निर्भर करती है।

अंत में, MMSx रूपरेखा यह मानती है कि गतिज श्रृंखला की अखंडता आंदोलन दक्षता और चोट के लचीलेपन के लिए केंद्रीय है। खंडों के बीच समन्वय यह निर्धारित करता है कि यांत्रिक ऊर्जा प्रणाली के माध्यम से सुचारू रूप से प्रसारित होती है या प्रतिपूरक रणनीतियों के माध्यम से नष्ट हो जाती है। बहु-खंड समन्वय पैटर्न का एआई-संचालित विश्लेषण इस श्रृंखला में व्यवधानों को प्रकट कर सकता है, जैसे कि कूदने के दौरान अतुल्यकालिक कूल्हे-घुटने का विस्तार या एकतरफा कार्यों के दौरान अपर्याप्त ट्रंक स्थिरीकरण। ये पैटर्न अक्सर थकान, न्यूरोमस्कुलर अवरोध या संरचनात्मक सीमा के शुरुआती संकेतक दर्शाते हैं। MMSx प्रतिमान के भीतर, कृत्रिम बुद्धिमत्ता न केवल एक वर्णनात्मक उपकरण के रूप में बल्कि बायोमैकेनिकल तर्क के कम्प्यूटेशनल विस्तार के रूप में कार्य करती है। यांत्रिक व्याख्या के साथ गतिज अवलोकन को एकीकृत करके - बल वैक्टर, टोक़ वितरण, लोड स्थानांतरण, कतरनी-संपीड़न संतुलन, और गतिज श्रृंखला समन्वय - एआई सिस्टम चिकित्सकों को आंदोलन पैटर्न की पहचान करने में सहायता कर सकते हैं जो मस्कुलोस्केलेटल लोडिंग और दीर्घकालिक ऊतक स्वास्थ्य को प्रभावित करते हैं। इसका उद्देश्य विशेषज्ञ नैदानिक या कोचिंग निर्णय को प्रतिस्थापित करना नहीं है, बल्कि इसे मानव आंदोलन के यांत्रिक निर्धारकों में स्केलेबल, डेटा-संचालित अंतर्दृष्टि के साथ बढ़ाना है।

चित्र 2: प्रमुख यांत्रिक डोमेन का योजनाबद्ध प्रतिनिधित्व जिसके माध्यम से एआई-व्युत्पन्न आंदोलन डेटा की व्याख्या MMSx ढांचे के भीतर की जाती है, जिसमें बल वेक्टर अभिविन्यास, टोक़ वितरण, गतिज श्रृंखला समन्वय, भार स्थानांतरण पथ और कतरनी बनाम संपीड़न गतिशीलता शामिल है।

संदर्भ: 32-35, 7, 8, 36

वास्तविक समय विश्लेषण: कोचिंग और नैदानिक अभ्यास के लिए निहितार्थ

शायद एआई बायोमैकेनिक्स सिस्टम द्वारा सक्षम सबसे परिणामी व्यावहारिक बदलाव वास्तविक समय आंदोलन प्रतिक्रिया की क्षमता है। प्रयोगशाला-आधारित विश्लेषण पारंपरिक रूप से एक अतुल्यकालिक प्रतिमान के भीतर संचालित होता है: डेटा को एक सत्र के दौरान एकत्र किया जाता है और बाद के परामर्श में वितरण के लिए व्याख्या की जाती है। आंदोलन निष्पादन और सुधारात्मक प्रतिक्रिया के बीच अस्थायी अंतर का मोटर सीखने पर प्रभाव पड़ता है; कौशल अधिग्रहण का समकालीन तंत्रिका विज्ञान लगातार विलंबित फीडबैक प्रतिमानों की तुलना में प्रारंभिक चरण के मोटर कौशल विकास के लिए समवर्ती या तुरंत टर्मिनल संवर्धित फीडबैक को अधिक प्रभावी मानता है। एआई सिस्टम काइनेमेटिक विचलनों का पता लगाने में सक्षम है - जैसे कि एकतरफा लोडिंग के दौरान अत्यधिक विरोधाभासी ट्रंक झुकाव, सनकी तनाव के तहत गतिशील घुटने के वाल्गस, या ओवरहेड प्रेसिंग आंदोलनों के दौरान आगे की ओर सिर की गाड़ी - और एक ही प्रशिक्षण पुनरावृत्ति के भीतर एथलीट या रोगी को उन विचलनों को संप्रेषित करना फीडबैक-मोटर सीखने के चक्र में एक सार्थक प्रगति का प्रतिनिधित्व करता है। वास्तविक समय कोचिंग संकेतों के शुरुआती कार्यान्वयन ने छोटे प्रशिक्षण ब्लॉकों पर आंदोलन गुणवत्ता मेट्रिक्स में औसत दर्जे का सुधार प्रदर्शित किया है, कुछ हस्तक्षेप अध्ययनों ने एआई-निर्देशित फीडबैक प्रोटोकॉल के बाद लैंडिंग कार्यों के दौरान घुटने के अपहरण के क्षण में महत्वपूर्ण कमी की सूचना दी है।

नैदानिक पुनर्वास के लिए, वास्तविक समय की बायोमैकेनिकल निगरानी फिजियोथेरेपी सत्र की नियंत्रित स्थितियों और उस अनियंत्रित वातावरण के बीच लगातार अंतर को संबोधित करती है जिसमें मरीज घरेलू व्यायाम कार्यक्रम करते हैं। पहनने योग्य और कैमरा-आधारित AI

निगरानी प्रणाली चिकित्सकों को संपूर्ण पुनर्वास कार्यक्रम में वस्तुनिष्ठ अनुपालन और गुणवत्ता डेटा प्रदान करती है, जिससे डेटा-संचालित प्रगति निर्णय सक्षम होते हैं जो केवल चिकित्सक के सत्र के अवलोकन पर निर्भर नहीं होते हैं।

यांत्रिक ऊर्जा सिद्धांत एथलेटिक कार्यों के दौरान आंदोलन दक्षता और प्रदर्शन को समझने के लिए एक अतिरिक्त रूपरेखा प्रदान करते हैं।

गतिज ऊर्जा

यह समीकरण गतिज ऊर्जा को उस ऊर्जा के रूप में परिभाषित करता है जो किसी पिंड में उसकी गति के कारण होती है।

संभावित ऊर्जा

यह समीकरण संभावित ऊर्जा को परिभाषित करता है क्योंकि किसी पिंड में गुरुत्वाकर्षण के विरुद्ध उसकी ऊंचाई के कारण संग्रहीत ऊर्जा होती है।

कुल यांत्रिक ऊर्जा

यह समीकरण गति के दौरान गतिज और स्थितिज ऊर्जा के योग के रूप में कुल यांत्रिक ऊर्जा को दर्शाता है।

डेटा विश्वसनीयता, सत्यापन, और नैदानिक अनुवाद का प्रश्न

एआई बायोमैकेनिक्स सिस्टम की नैदानिक और वैज्ञानिक विश्वसनीयता मूल रूप से उस कठोरता पर निर्भर करती है जिसके साथ उनके आउटपुट को स्थापित संदर्भ मानकों के विरुद्ध मान्य किया गया है। आंदोलन विज्ञान साहित्य में एक साथ प्रयोगशाला-आधारित मोशन कैप्चर डेटा के साथ एआई पोज़ अनुमान आउटपुट की तुलना करने वाले मानदंड वैधता अध्ययनों का एक बढ़ता हुआ समूह शामिल है। परिणाम मोटे तौर पर नियंत्रित स्थितियों के तहत मूल्यांकन किए गए धनु-समतल किनेमेटिक्स के लिए उत्साहजनक हैं - मोनोकुलर कैमरा सिस्टम से संयुक्त कोण अनुमानों ने सामान्य कार्यात्मक आंदोलनों के दौरान घुटने और कूल्हे के लचीलेपन के लिए मार्कर-आधारित संदर्भ माप के सापेक्ष तीन से आठ डिग्री की सीमा में पूर्ण त्रुटियों का प्रदर्शन किया है। हालाँकि, तेजी से मल्टी-प्लानर मूवमेंट, गहरे संयुक्त लचीलेपन के कोण, हड्डी के स्थलों के महत्वपूर्ण वसा ऊतक कवरेज, और पार्श्व या पीछे के कैमरे की स्थिति जो संरचनात्मक लैंडमार्क रोड़ा पेश करती है, की स्थितियों के तहत वैधता गुणांक कम हो जाते हैं। लागू प्रदर्शन या नैदानिक सेटिंग्स में ये बाधाएं मामूली नहीं हैं; वे सटीक रूप से उन स्थितियों का प्रतिनिधित्व करते हैं जिनके तहत बायोमैकेनिकल विश्लेषण नैदानिक रूप से सबसे मूल्यवान है। वैज्ञानिक समुदाय का दायित्व है कि वह इन सीमाओं को पारदर्शी रूप से संप्रेषित करे, और एआई विश्लेषण उपकरण अपनाने वाले चिकित्सकों को प्रत्येक प्रणाली के मान्य प्रदर्शन लिफाफे के संदर्भ में प्लेटफ़ॉर्म आउटपुट की व्याख्या करने के लिए महत्वपूर्ण साक्षरता विकसित करनी चाहिए।

पुनरावृत्ति और अंतर-सत्र विश्वसनीयता अतिरिक्त पद्धतिगत विचार प्रस्तुत करती है। मार्कर-आधारित प्रणालियों के विपरीत, जहां लैंडमार्क प्लेसमेंट प्रोटोकॉल को सत्रों में मानकीकृत किया जा सकता है, एआई सिस्टम से प्राप्त संरचनात्मक मुख्य बिंदु अनुमान कपड़ों, कैमरा स्थिति, परिवेश प्रकाश व्यवस्था और पृष्ठभूमि जटिलता में भिन्नता के कारण सत्र-दर-सत्र भिन्नता प्रदर्शित कर सकते हैं। इन चरों को संबोधित करने वाले कठोर कार्यान्वयन प्रोटोकॉल अनुदैर्ध्य निगरानी अनुप्रयोगों के लिए एक शर्त हैं जिसमें वास्तविक परिवर्तन का पता लगाने को माप शोर से अलग किया जाना चाहिए।

चित्र 3: प्रयोगशाला संदर्भ सत्यापन और एल्गोरिदम परिशोधन से लेकर प्रदर्शन, नैदानिक और अनुसंधान वातावरण में लागू तैनाती तक की प्रगति को दर्शाने वाला अनुवादात्मक वर्कफ़्लो।

सन्दर्भ: 14-24

एआई-आधारित बायोमैकेनिक्स विश्लेषण प्रणालियों की सीमाएं

मानव गति विश्लेषण में कृत्रिम बुद्धिमत्ता की तीव्र प्रगति के बावजूद, एआई-व्युत्पन्न बायोमैकेनिकल डेटा की व्याख्या करते समय कई पद्धतिगत सीमाओं को पहचाना जाना चाहिए। इन बाधाओं के बारे में जागरूकता यह सुनिश्चित करने के लिए आवश्यक है कि कम्प्यूटेशनल आउटपुट नैदानिक और प्रदर्शन वातावरण में उचित रूप से लागू किए जाएं।

एक बड़ी चुनौती कैमरा अवरोधन से उत्पन्न होती है, जिसमें संरचनात्मक स्थल कैमरे के दृश्य क्षेत्र से अस्थायी रूप से छिप जाते हैं। अवरोधन तब हो सकता है जब गति के दौरान शरीर के खंड ओवरलैप हो जाते हैं, जब बाहरी वस्तुएं दृश्य में बाधा डालती हैं, या जब कई व्यक्ति एक साथ फ्रेम पर कब्जा कर लेते हैं। जब रोड़ा होता है, तो मुद्रा अनुमान एल्गोरिदम को ऐतिहासिक स्थिति का अनुमान लगाने के लिए पूर्वानुमानित मॉडलिंग पर भरोसा करना चाहिए, जो संयुक्त कोण गणना में अनुमान त्रुटि पेश कर सकता है।

दूसरी सीमा में कपड़ों की कलाकृतियाँ शामिल हैं। एआई पोज़ अनुमान प्रणाली मानव शरीर की आकृति से जुड़ी दृश्य विशेषताओं का विश्लेषण करके कंकाल स्थलों की पहचान करती है। ढीले कपड़े, संपीड़न वस्त्र, प्रतिबिंबित सामग्री, या स्तरित परिधान संरचनात्मक स्थलों के दृश्य प्रतिनिधित्व को बदल सकते हैं, जो संभावित रूप से संयुक्त स्थिति का पता लगाने की सटीकता को प्रभावित कर सकते हैं। ये कलाकृतियाँ गणना किए गए संयुक्त कोणों में छोटे लेकिन सार्थक विचलन का कारण बन सकती हैं, विशेष रूप से तीव्र खंड विस्थापन से जुड़े आंदोलनों में।

डीप ज्वाइंट फ्लेक्सन कैमरा-आधारित गति विश्लेषण प्रणालियों के लिए एक और ज्ञात चुनौती का प्रतिनिधित्व करता है। गहरी उकड़ू बैठने, फुफकारने, या बैठने की स्थिति जैसे आंदोलनों के दौरान, शारीरिक स्थलचिह्न आंशिक रूप से अस्पष्ट हो सकते हैं या दृष्टि के परिप्रेक्ष्य से दृष्टिगत रूप से संकुचित हो सकते हैं।

कैमरा. यह ज्यामितीय विकृति ऐतिहासिक स्थानीयकरण की सटीकता को कम कर सकती है, विशेष रूप से कूल्हे और घुटने के जोड़ों के लिए जब गैर-इष्टतम कैमरा कोण से देखा जाता है। एआई बायोमैकेनिक्स सिस्टम को मल्टी-प्लानर या उच्च-वेग आंदोलनों के दौरान भी कठिनाइयों का सामना करना पड़ सकता है। कई मुद्रा अनुमान एल्गोरिदम नियंत्रित परिस्थितियों में चलने या बैठने जैसे धनु-समतल आंदोलनों के लिए मजबूत सटीकता प्रदर्शित करते हैं। हालाँकि, जटिल एथलेटिक गतिविधियाँ - जिनमें दिशा में तेजी से बदलाव, घूर्णी कार्य, या संपर्क-आधारित खेल गतिविधियाँ शामिल हैं - गति धुंधलापन, तीव्र खंड त्वरण और गैर-रेखीय संयुक्त प्रक्षेप पथ से संबंधित अतिरिक्त चुनौतियाँ पेश करती हैं। ये स्थितियाँ ट्रैकिंग त्रुटि को बढ़ा सकती हैं और व्युत्पन्न गतिज चर की सटीकता को कम कर सकती हैं।

पर्यावरणीय कारक सिस्टम की विश्वसनीयता को और अधिक प्रभावित कर सकते हैं। प्रकाश की स्थिति, कैमरा रिज़ॉल्यूशन, पृष्ठभूमि जटिलता और कैमरा स्थिति में भिन्नताएं संरचनात्मक लैंडमार्क पहचान के लिए जिम्मेदार कंप्यूटर विज़न मॉडल के प्रदर्शन को प्रभावित कर सकती हैं। इन कारणों से, एआई-आधारित आंदोलन विश्लेषण को आंतरिक यांत्रिक बलों के प्रत्यक्ष माप के बजाय बायोमैकेनिकल व्यवहार के अनुमान के रूप में व्याख्या किया जाना चाहिए। एआई-व्युत्पन्न आउटपुट की सटीकता और विश्वसनीयता की पुष्टि के लिए स्थापित संदर्भ प्रणालियों - जैसे त्रि-आयामी गति कैप्चर, बल प्लेटफ़ॉर्म, इलेक्ट्रोमोग्राफी और मस्कुलोस्केलेटल सिमुलेशन मॉडल - के विरुद्ध सत्यापन आवश्यक है।

MMSx ढांचे के भीतर, कृत्रिम बुद्धिमत्ता को निर्णय-समर्थन उपकरण के रूप में देखा जाता है जो बायोमैकेनिकल तर्क या व्यवसायी विशेषज्ञता के प्रतिस्थापन के बजाय अवलोकन क्षमता को बढ़ाता है। जब उचित पद्धतिगत जागरूकता और सत्यापन के साथ लागू किया जाता है, तो एआई-आधारित विश्लेषण प्रणाली नैदानिक, एथलेटिक और अनुसंधान वातावरण में बायोमैकेनिकल मूल्यांकन की पहुंच और पैमाने का विस्तार करने की महत्वपूर्ण क्षमता रखती है। तालिका 3: बायोमैकेनिक्स में मार्करलेस पोज़ अनुमान के लिए प्रतिनिधि सत्यापन मेट्रिक्स (लेख संदर्भों के साथ संरेखित साहित्य से)

[तालिका या चित्र — मूल अंग्रेज़ी PDF देखें।]

OpenPose/मेड गैट, स्क्वाट, घुटना पाइप डीवीजे फ्लेक्सन/एक्सटेंशन

OpenPose/मेड गैट iaपाइप

मीटर वैल्यू आईसी (टाइपिका एल रेंज)

तुलना मानक

नोट्स (सत्यापन अध्ययन से)

एमएई 2.3-4.1 मार्कर-आधारित ° (विकॉन/क्वालिसी कैमरा एस) पक्ष पर बेहतर; धनु तल सबसे मजबूत

कूल्हा/घुटना/आईसीसी 0.89-0। 3डी मोशन क्ले (1,3) 99 कैप्चर

उत्कृष्ट तरंगरूप समानता (सीएमसी 0.89–0.994)

OpenPose/मेड शोल्डर iaपाइप अपहरण

कंधे का रोम

एमएई 1.97-7. गोनियोमीटर/एम 42° oCap (दूरी ई-निर्भर)

उत्कृष्ट विश्वसनीयता (आईसीसी >0.81)

स्पैटिओटेम्प ओरल के लिए उत्कृष्ट; मध्यम श्रोणि झुकाव

Theia3D

चाल/रन्निन निचला अंग जी (धनु)

आरएमएस <6° डी (कूल्हा/घुटना ईई); 6-14° (हिप ऑफसेट)

जनरल मार्करलेस

कार्यात्मक कार्य

एमएई 2.4-3.2 3डी तुलनीय ° मार्कर-आधारित/ई से मानव मानव मूल्यांकनकर्ता; मजबूत सहसंबंध (आर=0.97)

[तालिका या चित्र — मूल अंग्रेज़ी PDF देखें।]

- प्रकाश भिन्नता मुद्रा पहचान को प्रभावित करती है
- कैमरा अंशांकन और परिप्रेक्ष्य विरूपण

सन्दर्भ

19–24

एकीकरण क्षितिज

वियरेबल्स, परफॉर्मेंस एनालिटिक्स और मल्टीमॉडल फ्यूजन एआई बायोमैकेनिक्स सॉफ्टवेयर के लिए अगली विकासात्मक सीमा जड़त्वीय माप इकाइयों, बल-संवेदन इनसोल, शारीरिक मॉनिटर और पर्यावरण सेंसर से पूरक डेटा धाराओं के साथ कैमरा-आधारित कीनेमेटिक डेटा का एकीकरण है। यह मल्टीमॉडल फ़्यूज़न दृष्टिकोण किसी एकल संवेदन पद्धति की मूलभूत सीमा को संबोधित करता है: कोई भी व्यक्तिगत सेंसर प्रकार मानव आंदोलन के पूर्ण बायोमैकेनिकल और शारीरिक संदर्भ को कैप्चर नहीं करता है।

अंग खंडों या काठ की रीढ़ पर पहनी जाने वाली जड़त्वीय माप इकाइयां क्षेत्र के वातावरण में निरंतर गतिज डेटा प्रदान करती हैं जहां कैमरा कवरेज अव्यावहारिक है, जबकि बल-संवेदन इनसोल ग्राउंड प्रतिक्रिया बल सरोगेट्स प्रदान करते हैं जो गतिज जानकारी के साथ गतिज तस्वीर को पूरक करते हैं। एआई-व्युत्पन्न पोज़ डेटा के साथ इन धाराओं का एकीकरण व्यक्तिगत रूप से किसी भी घटक की तुलना में काफी अधिक नैदानिक शक्ति का एक समग्र आंदोलन प्रोफ़ाइल बनाता है। विषम मल्टीमॉडल इनपुट से सीखने में सक्षम मशीन लर्निंग फ्रेमवर्क इस क्षमता को साकार करने के लिए केंद्रीय हैं, और मानव गति विश्लेषण के लिए सेंसर फ्यूजन में वर्तमान अनुसंधान तेजी से आगे बढ़ रहा है।

प्रदर्शन विश्लेषण प्लेटफ़ॉर्म इस प्रौद्योगिकी स्टैक की अनुदैर्ध्य अनुप्रयोग परत का प्रतिनिधित्व करते हैं। प्रशिक्षण चक्रों और प्रतिस्पर्धी सीज़न में एकत्रित व्यक्तिगत सत्र डेटा, क्रमिक गतिज बहाव, थकान-प्रेरित तकनीक में गिरावट और चोट से पहले के हफ्तों में प्रतिपूरक आंदोलन पैटर्न के उद्भव की पहचान करने के लिए आवश्यक अस्थायी गहराई प्रदान करता है। जनसंख्या-स्तरीय डेटासेट - जब उचित रूप से डी-

आइडेंटिफाइड और एकत्रित किए जाते हैं - चोट के जोखिम और प्रदर्शन पठार के पूर्वानुमानित मॉडल बनाने के लिए आवश्यक सांख्यिकीय शक्ति प्रदान करते हैं जो अकेले व्यक्तिगत मामले के डेटा से प्राप्त नहीं किया जा सकता है। एआई बायोमैकेनिक्स सॉफ्टवेयर के लिए यात्रा की दिशा, कुल मिलाकर, विशेषज्ञ बुनियादी ढांचे की आवश्यकताओं के बिना व्यवसायी के रोजमर्रा के वर्कफ़्लो में एकीकृत निरंतर, पारिस्थितिक रूप से मान्य, मात्रात्मक रूप से कठोर आंदोलन निगरानी में सक्षम प्रणाली की ओर है। वर्तमान क्षमता और उस विज़न के बीच की दूरी मापने योग्य है, और कंप्यूटर विज़न, एज कंप्यूटिंग और एप्लाइड मशीन लर्निंग में विकास का प्रक्षेपवक्र बताता है कि यह सट्टा गंतव्य के बजाय एक व्यावहारिक है। आंदोलन विज्ञान समुदाय का दायित्व यह सुनिश्चित करना है कि यह विकास वैज्ञानिक कठोरता, नैदानिक उपयोगिता और सत्यापन मानकों के प्रति एक अडिग प्रतिबद्धता द्वारा निर्देशित हो।

निष्कर्ष

कृत्रिम बुद्धिमत्ता प्रयोगशाला से परे और पारिस्थितिक रूप से मान्य नैदानिक, एथलेटिक और वास्तविक दुनिया के प्रदर्शन वातावरण में आंदोलन विश्लेषण का विस्तार करके बायोमैकेनिक्स के परिदृश्य को नया आकार दे रही है। एआई बायोमैकेनिक्स सॉफ्टवेयर का महत्व न केवल मुद्रा अनुमान को स्वचालित करने या संयुक्त गति को ट्रैक करने की क्षमता में निहित है, बल्कि बल वितरण, टोक़ मांग और गतिज श्रृंखला व्यवहार की यांत्रिक रूप से सार्थक व्याख्याओं में गतिज जानकारी का अनुवाद करने की क्षमता में भी निहित है।

MMSx ढांचे के भीतर, एआई का मूल्य केवल वर्णनात्मक नहीं बल्कि व्याख्यात्मक है। मानव गति को एक बल-विनियमित यांत्रिक प्रणाली के रूप में समझा जाना चाहिए, और एआई तब सबसे उपयोगी हो जाता है जब यह चिकित्सकों को विचलन की पहचान करने में सहायता करता है जो गतिशील परिस्थितियों में लोड स्थानांतरण, स्थिरता और ऊतक तनाव को बदलता है। यह परिप्रेक्ष्य चर्चा को डिजिटल सुविधा से परे और वास्तविक बायोमैकेनिकल निर्णय समर्थन की ओर ले जाता है। साथ ही, एआई-आधारित बायोमैकेनिक्स सिस्टम की वैज्ञानिक उपयोगिता कठोर सत्यापन, पद्धतिगत सीमाओं की पारदर्शी पहचान और व्यवसायी विशेषज्ञता के साथ उचित एकीकरण पर निर्भर करती है। मार्कर रहित विश्लेषण, मल्टीमॉडल सेंसिंग और मशीन लर्निंग भविष्यवाणी मॉडल प्रमुख अवसर प्रदान करते हैं, लेकिन उनके आउटपुट को यांत्रिकी और नैदानिक तर्क के स्थापित सिद्धांतों पर आधारित रहना चाहिए।

इसलिए एआई बायोमैकेनिक्स सॉफ़्टवेयर को बायोमैकेनिकल विज्ञान के प्रतिस्थापन के रूप में नहीं, बल्कि इसके उभरते हुए विस्तार के रूप में समझा जाना चाहिए - एक, जिसे यदि विकसित और सख्ती से लागू किया जाता है, तो खेल विज्ञान, पुनर्वास और मानव प्रदर्शन में आंदोलन विश्लेषण के पैमाने, पहुंच और व्यावहारिक उपयोगिता में उल्लेखनीय वृद्धि हो सकती है।

संदर्भ

संदर्भ मूल अंग्रेज़ी में यथावत दिए गए हैं।

1. Winter DA.Biomechanics and Motor Control of Human Movement.4th ed. Hoboken: Wiley; 2009.
2. Hamill J, Knutzen KM, Derrick TR.Biomechanical Basisof Human Movement.4th ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2015.
3. McGinnis PM.Biomechanics of Sport and Exercise.Champaign: Human Kinetics; 2013.
4. Zatsiorsky VM, Prilutsky BI.Biomechanics of SkeletalMuscles.Champaign: Human Kinetics; 2012.
5. Robertson DGE, Caldwell GE, Hamill J, Kamen G, Whittlesey SN.Research Methods in Biomechanics.2nd ed. Champaign: Human Kinetics;2013.

6. Bartlett R.Introduction to Sports Biomechanics.2nd ed. London: Routledge; 2007.
7. Enoka RM.Neuromechanics of Human Movement.5th ed.Champaign: Human Kinetics; 2015.
8. Lieber RL.Skeletal Muscle Structure, Function, and Plasticity.Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins; 2010.
9. Komi PV.Strength and Power in Sport.Oxford: BlackwellScience; 2003.
10. Delp SL, Anderson FC, Arnold AS, et al. OpenSim: open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement.IEEE TransBiomed Eng.2007.
11. Halilaj E, Rajagopal A, Fiterau M, Hicks JL, Hastie TJ, Delp SL. Machine learning in human movement biomechanics.J Biomech.2018.
12. Halilaj E, Hicks JL, Delp SL. Modeling and simulation in musculoskeletal biomechanics. Nat Rev Bioeng.2019.
13. Cao Z, Hidalgo G, Simon T, Wei S, Sheikh Y. OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields.IEEE TransPattern Anal Mach Intell.2018.
14. Nakano N, Sakura T, Ueda K, et al. Evaluation of 3D markerless motion capture accuracy using OpenPose.Front Sports Act Living.2020.
15. Washabaugh EP, Kalyanaraman T, Adamczyk PG, et al. Validity of open-source pose estimation methods for gait analysis.Gait & Posture.2022.
16. Stenum J, Rossi C, Roemmich RT. Two-dimensional video-based pose estimation for clinical gait analysis.Digital Health.2024.
17. Cronin NJ, et al. Feasibility of OpenPose markerless motion analysis in real-world sport. Front Sports Act Living.2024.
18. Ino T, et al. Validity and reliability of OpenPose-based motion analysis in biomechanics. Sensors.2024.
19. Ge F, et al. Reliability and validity of OpenPose for measuring hip-knee-ankle angles in knee osteoarthritis.Sci Rep.2025.
20. Baldinger M, et al. Influence of camera viewing angle on OpenPose joint angle estimation.Sensors.2025.
21. Scataglini S, et al. Accuracy and reliability of markerless motion capture systems: a systematic review.Sensors.2025.
22. Mundt M, et al. Estimating ground reaction forces from 2D video pose estimation. Sensors.2022.
23. Stamm O, et al. Accuracy of monocular pose estimation using smartphone-based motion analysis.JMIR mHealth.2020.
24. Saiki Y, et al. Reliability of pose estimation algorithms for knee range-of-motion measurement.BMC Musculoskelet Disord.2023.
25. Souaifi M, et al. Artificial intelligence in sports biomechanics: a scoping review.Sports Medicine.2025.
26. Yuan J, et al. Machine learning applications in sports injury prediction.Sports Medicine Research.2025.
27. López-Valenciano A, et al. Epidemiology of injuries in sport and machine learning risk prediction.Br J Sports Med.2022.
28. Bahr R, Krosshaug T. Understanding injury mechanisms in sport.Br J Sports Med. 2005.
29. Hewett TE, Myer GD, Ford KR. Biomechanical measures of neuromuscular control and ACL injury risk.Am J Sports Med.2005.
30. Boden BP, Dean GS, Feagin JA, Garrett WE. Mechanisms of ACL injury.Orthopedics. 2000.
31. Griffin LY, et al. Understanding and preventing noncontact ACL injuries.Am J Sports Med.2006.

32. Davids K, Button C, Bennett S.Dynamics of Skill Acquisition:A Constraints-Led Approach.Champaign: Human Kinetics; 2008.
33. Bernstein NA.The Coordination and Regulation of Movements.Oxford: Pergamon Press; 1967.
34. Kelso JAS.Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior.MIT Press; 1995.
35. Newell KM. Constraints on the development of coordination. In: Wade MG, Whiting HTA (eds).Motor Development in Children.Dordrecht: MartinusNijhoff; 1986.
36. Pandy MG. Computer modeling and simulation of human movement.Annu Rev Biomed Eng.2001.
37. Neptune RR, Kautz SA, Zajac FE. Contributions of individual muscles to support and propulsion during walking.J Biomech.2001.
38. Biewener AA, Patek SN.Animal Locomotion.Oxford University Press; 2018.
39. Koul A, et al. Accuracy of OpenPose for spontaneous human movement estimation. Behav Res Methods.2025.
40. Pemasiri A, et al. Biomechanically accurate gait analysis using 3D human reconstruction from video.Comput Biol Med.2026.

उद्धरण

कृपया मूल अंग्रेज़ी लेख का हवाला दें:

Mehta, N., Henderson, S., & Mahajan, G. (2026). AI Biomechanics Analysis Software: Technological Foundations, Mechanical Interpretation, and Practical Applications. *Journal of Movement Mechanics & Biomechanics Science*, *3*(1). https://doi.org/10.66078/jmmbs.v3i1.010

JMMBS — Journal of Movement Mechanics & Biomechanics Science · ISSN 3070-3662 (ऑनलाइन)
प्रकाशक: MMSx Authority Institute for Movement Mechanics & Biomechanics Research

यह अनुवाद मूल लेख के CC BY 4.0 लाइसेंस की शर्तों के अनुसार, मूल लेखकों और स्रोत के उचित श्रेय सहित, साझा किया गया है।

हिन्दी मुखपृष्ठ · संग्रह · सहकर्मी समीक्षा प्रक्रिया · सुधार और वापसी · English