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

हिन्दी अनुवाद · Hindi translation of the English original

- यह लेख मूल अंग्रेज़ी लेख "Clinical Validity of Markerless Motion Capture for Biomechanical Decisions" 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.2026.v3i2.020 — 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।

समीक्षा लेख | खुली पहुँच | हिन्दी अनुवाद

बायोमैकेनिकल निर्णयों के लिए मार्करलेस मोशन कैप्चर की नैदानिक वैधता

मूल अंग्रेज़ी शीर्षक: Clinical Validity of Markerless Motion Capture for Biomechanical Decisions

Swapnesh Tiwari
Department of Population Health, CVS Health, USA

Anee Thomas
Department of Nutrition and Movement Sciences, Indian Institute of Kinesiology & Biomechanics Science, India

Gandharv Mahajan
Technical Research Division, MMSx Authority Institute, USA

Nesrine Adhadhii
PhD, Biomechanics and Physiology of Exercise; ISSEP Kef; Al Asimah, Kuwait

Christopher Alfiero
Performance Technology Division, Eternal, San Rafael, California, USA

Yash Majali
Performance Coach, Exos; MSc Sport Biomechanics, Loughborough University, UK

पत्रिका

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

खंड / अंक

खंड 3, अंक 2 · 2026

लेख का प्रकार

समीक्षा लेख (Review Article)

DOI (मूल अंग्रेज़ी लेख)

https://doi.org/10.66078/jmmbs.2026.v3i2.020

प्राप्त

20 अक्टूबर 2026

स्वीकृत

10 नवंबर 2026

मूल लेख प्रकाशित

11 नवंबर 2026

प्रकाशक

MMSx Authority Institute for Movement Mechanics & Biomechanics Research

लाइसेंस

CC BY 4.0 (मूल लेख का लाइसेंस)

सार

पृष्ठभूमि: मार्कर रहित गति कैप्चर विशेषज्ञ प्रयोगशालाओं से परे मात्रात्मक मूल्यांकन का विस्तार कर सकता है। इसका नैदानिक मूल्य इस बात पर निर्भर करता है कि एक निर्दिष्ट आउटपुट एक परिभाषित बायोमैकेनिकल निर्णय का समर्थन करता है या नहीं। उद्देश्य: वीडियो-व्युत्पन्न मापों को बायोमैकेनिकल व्याख्या से जोड़ने वाले साक्ष्य की जांच करना और नैदानिक उपयोग के मूल्यांकन के लिए एक व्यावहारिक रूपरेखा का प्रस्ताव करना। तरीके: एक महत्वपूर्ण कथा संश्लेषण ने लक्षित विद्वानों की खोज, संदर्भ सत्यापन, सुलभ प्राथमिक अध्ययन और पद्धति संबंधी मार्गदर्शन को संयुक्त किया। खोजों को 10 नवंबर 2026 को अद्यतन किया गया था। साक्ष्य को माप निर्माण, संदर्भ, जनसंख्या, कार्य और इच्छित व्याख्या द्वारा व्यवस्थित किया गया था। चयन उद्देश्यपूर्ण था; कोई विस्तृत खोज, एकत्रित सटीकता अनुमान या औपचारिक निश्चितता ग्रेड नहीं लिया गया। संश्लेषण: सत्यापन परिणाम जोड़, घूर्णन तल, कार्य, रिकॉर्डिंग की स्थिति और संदर्भ मॉडल पर निर्भर करते हैं। नैदानिक अध्ययनों से पता चलता है कि औसत धनु तरंगों में सहमति छूटी हुई व्यक्तिगत असामान्यताओं या चाल-वर्गीकरण असहमति के साथ सह-अस्तित्व में हो सकती है। बहुकेन्द्रीय समूह विभेदीकरण व्यक्तिगत माप समझौते से भिन्न संपत्ति स्थापित करता है। काइनेटिक अनुमान बाहरी ताकतों, संपर्क मान्यताओं और मस्कुलोस्केलेटल मॉडल संरचना पर अतिरिक्त निर्भरता का परिचय देता है। सहसंबंध, दोहराव, पता लगाने योग्य परिवर्तन, चिकित्सकीय रूप से महत्वपूर्ण परिवर्तन और बेहतर निर्णयों के लिए अलग-अलग साक्ष्य की आवश्यकता होती है। निष्कर्ष: मार्कर रहित गति कैप्चर का मूल्यांकन जुड़े माप और व्याख्याओं के रूप में किया जाना चाहिए। विश्वसनीय उपयोग के लिए स्पष्ट संरचनात्मक परिभाषाएँ, संदर्भ-जागरूक अनुबंध विश्लेषण, प्रतिनिधि बाहरी मूल्यांकन, विफल रिकॉर्डिंग का पारदर्शी उपचार और संस्करण-नियंत्रित अनुदैर्ध्य मूल्यांकन की आवश्यकता होती है। प्रस्तावित रूपरेखा सार्वभौमिक कोणीय-त्रुटि सीमा निर्धारित किए बिना या वीडियो-व्युत्पन्न आउटपुट को प्रत्यक्ष ऊतक-लोड माप के रूप में प्रस्तुत किए बिना साक्ष्य आवश्यकताओं की पहचान करती है।

हाइलाइट

- वैधता एक निर्दिष्ट आउटपुट, जनसंख्या, कार्य, सेटिंग और निर्णय से संबंधित है - किसी डिवाइस से नहीं।
- अनुकूल औसत तरंगरूप समझौता छूटी हुई व्यक्तिगत असामान्यताओं और चाल-वर्गीकरण असहमति के साथ सह-अस्तित्व में रह सकता है।
- गतिज समझौता गतिज वैधता स्थापित नहीं करता है; शुद्ध संयुक्त क्षण ऊतक बल नहीं हैं।
- पता लगाने योग्य परिवर्तन, चिकित्सकीय रूप से महत्वपूर्ण परिवर्तन और बेहतर निर्णयों में से प्रत्येक के लिए अलग-अलग साक्ष्य की आवश्यकता होती है।

अंग्रेजी में प्रकाशित लेखों का पूरा विवरण, पंजीकरण के संस्करण का संदर्भ। एल रिज्यूमे, लॉस पुंटोस क्लेव, लॉस एन्काबेज़ाडोस वाई लॉस टिटुलोस डी फिगुरस वाई लॉस एस्टान डिस्पोनिबल्स एन लॉस कुआत्रो इडियोमास।

يُنشر النص الكامل للمقالة باللغة الإنجليزية، وهي لغة النسخة المسجّلة المرجعية. ويتوفر الملخص وأبرز النقاط والعناوين وعناوين الأشكال والجداول باللغات الأربع.

लेख का पूर्ण पाठ अंग्रेज़ी में प्रकाशित है, जो पंजीकृत संस्करण की संदर्भ भाषा है। सार, मुख्य बिंदु, शीर्षक तथा चित्रों और तालिकाओं के शीर्षक चारों भाषाओं में उपलब्ध हैं।

धारा 1

परिचय

मात्रात्मक गति विश्लेषण यह समझाने में मदद कर सकता है कि कोई व्यक्ति किसी कार्य को कैसे पूरा करता है, उपचार के बाद यांत्रिक मांगें कैसे बदलती हैं, और क्या प्रदर्शन में सुधार जोड़ों के बीच पुनर्वितरण को छुपाता है। पारंपरिक प्रयोगशाला मूल्यांकन को सामुदायिक सेटिंग्स में दोहराना मुश्किल हो सकता है क्योंकि इसके लिए उपकरण, तैयारी और विशेषज्ञ व्याख्या की आवश्यकता होती है। मार्कर रहित मोशन कैप्चर छवियों से शरीर की गति प्राप्त करके इनमें से कुछ अधिग्रहण बाधाओं को संबोधित करता है। इसका विकास शरीर के आकार के ज्यामितीय पुनर्निर्माण से लेकर समकालीन मुद्रा अनुमान और मॉडल-आधारित विश्लेषण तक बढ़ गया है [1,2]। हालाँकि, आसान अधिग्रहण स्वयं नैदानिक व्याख्या की वैधता स्थापित नहीं करता है।

प्रासंगिक प्रश्न यह है कि क्या कोई आउटपुट विचाराधीन निर्णय के लिए पर्याप्त रूप से सटीक और जानकारीपूर्ण है। चलने की गति का अनुमान लगाने के लिए उपयुक्त प्रणाली अक्षीय घुटने के घुमाव में एक छोटे से बदलाव की पहचान करने के लिए अनुपयुक्त हो सकती है। एक एल्गोरिदम जो समूह-औसत तरंगरूप को पुन: उत्पन्न करता है, उस व्यक्ति में एक असामान्य पैटर्न छूट सकता है जिसे मूल्यांकन की सबसे अधिक आवश्यकता है। ओपनकैप दर्शाता है कि किनेमेटिक्स और गतिशीलता का अनुमान लगाने के लिए स्मार्टफोन वीडियो को मस्कुलोस्केलेटल सिमुलेशन के साथ कैसे जोड़ा जा सकता है [3]। व्यापक नैदानिक साहित्य फिर भी शारीरिक पत्राचार, रोगविज्ञान आंदोलन और सेटिंग्स के बीच सत्यापन के हस्तांतरण के बारे में अनसुलझे प्रश्नों की पहचान करता है [4]।

यह समीक्षा रिकॉर्ड की गई छवियों से लेकर नैदानिक निर्णयों तक की श्रृंखला की जांच करती है। यह तीन व्यावहारिक तत्वों का योगदान देता है: मापी या अनुमानित की जाने वाली मात्राओं के बीच अंतर; प्रयोगशाला समझौते, नैदानिक प्रयोज्यता और बहुकेंद्रीय समूह भेदभाव को अलग करने वाला एक साक्ष्य मानचित्र; और स्पष्ट निर्णय परिणामों के साथ एक प्रस्तावित सत्यापन मार्ग। जोर निचले अंगों की गति और चाल पर है क्योंकि ये कार्य चयनित अनुभवजन्य उदाहरणों पर हावी हैं। सिद्धांत अन्य गतिविधियों पर भी लागू होते हैं, लेकिन अनुभवजन्य परिणामों को ऊपरी अंगों के कार्यों, व्हीलचेयर के उपयोग या सभी खेल गतिविधियों के लिए स्वचालित रूप से सामान्यीकृत नहीं किया जा सकता है। प्रस्तावित मार्ग एक पद्धतिगत संश्लेषण है, न कि सर्वसम्मति मानक, मान्य स्कोर या नैदानिक निकासी नियम।

धारा 2

साक्ष्य की पहचान और महत्वपूर्ण मूल्यांकन

PubMed, सुलभ PubMed केंद्रीय लेखों, प्रकाशक वेबसाइटों और संस्थागत रिपॉजिटरी में अनुक्रमित विद्वानों के रिकॉर्ड की लक्षित वेब खोजों को 10 नवंबर 2026 को अपडेट किया गया था। खोज संयोजनों ने मार्कर रहित गति कैप्चर, मुद्रा अनुमान, नैदानिक चाल, समवर्ती वैधता, दोहराव, सेरेब्रल पाल्सी, घुटने के पुराने ऑस्टियोआर्थराइटिस, ओपनकैप, कार्यात्मक कार्य, कपड़े, संयुक्त समन्वय प्रणाली और

मस्कुलोस्केलेटल सत्यापन को संबोधित किया। सटीक-शीर्षक और डीओआई खोजों ने आपूर्ति की गई पांडुलिपि के संदर्भों की जांच की और प्रासंगिक नए अध्ययनों की पहचान की। पद्धतिगत खोजों ने बार-बार अवलोकन, विश्वसनीयता, माप त्रुटि और नैदानिक भविष्यवाणी और निर्णय-समर्थन प्रणालियों के मूल्यांकन के साथ समझौते को संबोधित किया।

किसी विशिष्ट व्याख्यात्मक प्रश्न में उनके प्रत्यक्ष योगदान के लिए स्रोतों का चयन किया गया था। अनुभवजन्य सटीकता के दावों के लिए मानव सत्यापन अध्ययनों को प्राथमिकता मिली; मूल कार्यप्रणाली प्रकाशनों और पेशेवर सिफारिशों ने माप और रिपोर्टिंग सिद्धांतों का समर्थन किया। पहले की समीक्षाओं ने ऐतिहासिक संदर्भ प्रदान किया और सीमाओं की पहचान करने में मदद की, लेकिन उनका उपयोग महत्वपूर्ण अध्ययनों की प्रत्यक्ष जांच के लिए एकत्रित निष्कर्षों को प्रतिस्थापित करने के लिए नहीं किया गया था। चयन में चिकित्सकीय रूप से प्रासंगिक असहमति के साथ-साथ उत्साहजनक परिणाम वाले अध्ययन शामिल थे। बायोमैकेनिकल व्याख्या के बिना शुद्ध कंप्यूटर-विज़न बेंचमार्क प्रदर्शन मुख्य दायरे से बाहर था।

मूल्यांकन में लक्ष्य जनसंख्या और कार्य, अधिग्रहण की स्थिति, शारीरिक परिभाषाएँ, संदर्भ-प्रणाली की सीमाएँ, विकास और मूल्यांकन डेटा की स्वतंत्रता, बार-बार मापी गई संरचना और व्यक्तिगत निर्णय के लिए रिपोर्ट किए गए परिणाम की प्रासंगिकता पर विचार किया गया। महत्वपूर्ण पद्धतिगत विवरण के लिए उपलब्ध पूर्ण पाठों की जांच की गई। जब केवल एक सार या अनुक्रमित रिकॉर्ड ही पहुंच योग्य था, तो बयान वहां स्पष्ट रूप से रिपोर्ट की गई जानकारी तक ही सीमित थे; असूचित बहिष्करण, मॉडल सेटिंग्स और सॉफ़्टवेयर संस्करणों का अनुमान नहीं लगाया गया था। संलग्न स्रोत रजिस्टर पहुंच प्राप्त स्रोत और पहुंच स्तर का दस्तावेजीकरण करता है। तालिका 2 प्रतिनिधि अनुभवजन्य अध्ययन के लिए पहुंच सीमा की पहचान करती है।

यह एक उद्देश्यपूर्ण आलोचनात्मक कथा समीक्षा थी। इसमें पंजीकृत व्यवस्थित-समीक्षा प्रोटोकॉल, डुप्लिकेट स्क्रीनिंग, संपूर्ण डेटाबेस खोज या औपचारिक जोखिम-पूर्वाग्रह स्कोर का उपयोग नहीं किया गया। इसलिए यह अनुकूल परिणामों की व्यापकता का अनुमान नहीं लगा सकता, वाणिज्यिक उत्पादों को रैंक नहीं कर सकता, या व्यापक निश्चितता मूल्यांकन प्रदान नहीं कर सकता। अवलोकन किए गए निष्कर्ष, यांत्रिकी से निष्कर्ष, और प्रस्तावित अनुसंधान प्रक्रियाएं सभी में भिन्न हैं। विभिन्न अध्ययनों से संख्यात्मक त्रुटियों को एकत्रित नहीं किया गया क्योंकि उनके कार्य, संयुक्त परिभाषाएँ, तुलनित्र, मैट्रिक्स और एकत्रीकरण स्तर भिन्न हैं।

धारा 3

इसकी वैधता का मूल्यांकन करने से पहले मात्रा निर्दिष्ट करें

मार्कर रहित सिस्टम छवि निर्देशांक, पुनर्निर्मित स्थलचिह्न, खंड अभिविन्यास, संयुक्त कोण, चाल घटनाएं, शुद्ध संयुक्त क्षण या अनुमानित ऊतक बल उत्पन्न कर सकते हैं। ये मात्राएँ माप श्रृंखला में अलग-अलग स्थान रखती हैं और अलग-अलग साक्ष्य की आवश्यकता होती है। एक प्रक्षेपित द्वि-आयामी कोण त्रि-आयामी संरचनात्मक घुमाव नहीं है। न ही एक सीखा हुआ छवि लैंडमार्क आवश्यक रूप से एक कार्यात्मक संयुक्त केंद्र या उभरे हुए हड्डी वाले लैंडमार्क के बराबर है। संयुक्त समन्वय सम्मेलनों, रोटेशन अनुक्रम, संकेत और खंड परिभाषा की सूचना दी जानी चाहिए; इंटरनेशनल सोसाइटी ऑफ बायोमैकेनिक्स की सिफारिशें प्रासंगिक जोड़ों के लिए एक स्थापित प्रारंभिक बिंदु प्रदान करती हैं [5]।

नीधम और सहकर्मियों ने चलने, दौड़ने और कूदने के दौरान मार्कर-आधारित कैप्चर के साथ कई मुद्रा-आकलन दृष्टिकोणों की तुलना की। उनके निष्कर्षों ने व्यवस्थित कूल्हे और घुटने के केंद्र में अंतर और कुछ अन्य जोड़ों में छोटी विसंगतियां दिखाई [6]। निहितार्थ यह है कि एक अलग संरचनात्मक स्थान का संदर्भ देते समय एक समन्वय को दोहराया जा सकता है। मिलीमीटर में व्यक्त की गई त्रुटि संदर्भ फ़्रेम और

तुलना से पहले किए गए किसी भी संरेखण पर भी निर्भर करती है। किसी प्रतिभागी-विशिष्ट ऑफसेट को हटाने या परीक्षण डेटा के विरुद्ध संरेखण को अनुकूलित करने से स्वतंत्र रूप से प्राप्त नैदानिक रिकॉर्डिंग के मूल्यांकन से भिन्न प्रश्न का उत्तर मिल सकता है।

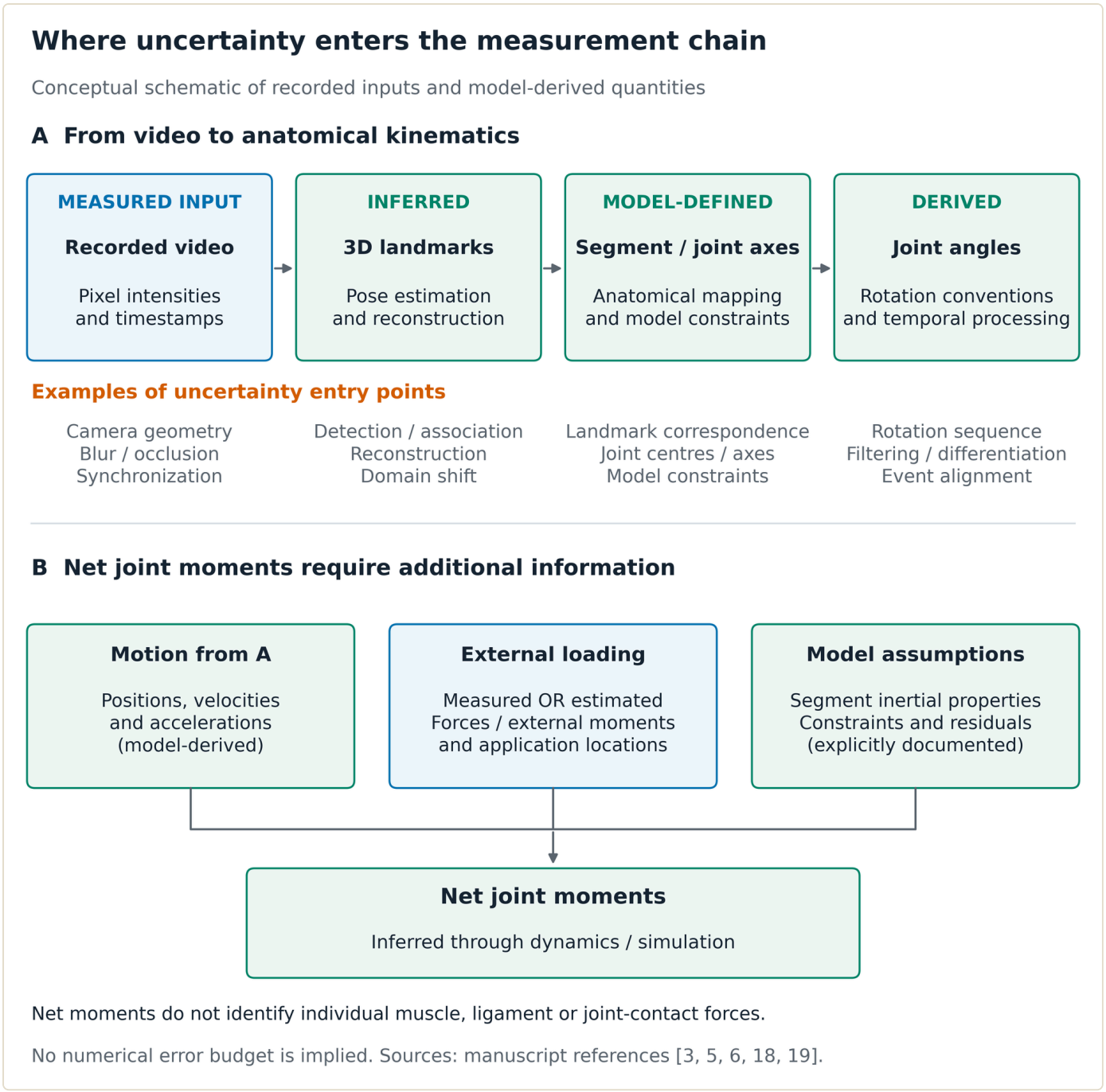
स्टेनम और सहकर्मियों ने द्वि-आयामी वीडियो [7] से अस्थायी, स्थानिक और धनु गति संबंधी गति मापों का मूल्यांकन किया। उनके चर-विशिष्ट निष्कर्ष बताते हैं कि क्यों सफल घटना समय विस्तार द्वारा संयुक्त रोटेशन या लोडिंग को मान्य नहीं कर सकता है। एक पाइपलाइन पैर के संपर्क की पहचान करने में अच्छा प्रदर्शन कर सकती है जबकि श्रोणि का कम सटीक अनुमान लगा सकती है। जांचकर्ताओं को सटीकता की रिपोर्ट करने से पहले माप इकाई और एकत्रीकरण नियम निर्दिष्ट करना चाहिए: फ्रेम, स्ट्राइड, परीक्षण, सत्र, प्रतिभागी माध्य, या व्यक्तिगत परिवर्तन। स्वतंत्रता के कई स्तरों पर एक अनुकूल माध्य उपचार का चयन करने के लिए उपयोग किए जाने वाले एक चर में त्रुटि को छुपा सकता है।

इसलिए एक इच्छित उपयोग विवरण में जनसंख्या, कार्य, आउटपुट, पर्यावरण, ऑपरेटर और निर्णय का नाम होना चाहिए। उदाहरण के लिए, घुटने के पुराने ऑस्टियोआर्थराइटिस वाले वयस्कों में बिना सहायता के ओवरग्राउंड चाल के दौरान औसत चलने की गति का अनुमान लगाना संकीर्ण और परीक्षण योग्य है। किसी उपकरण को केवल चिकित्सकीय रूप से मान्य बताने से ये स्थितियाँ अनिर्दिष्ट हो जाती हैं। गलत व्याख्या के परिणाम के संबंध में स्वीकार्य त्रुटि को संभावित रूप से उचित ठहराया जाना चाहिए। जब कोई चिकित्सकीय रूप से स्थिर सहिष्णुता मौजूद नहीं होती है, तो अध्ययन को सार्वभौमिक पास सीमा का आविष्कार किए बिना सटीकता और प्रयोज्यता की रिपोर्ट करनी चाहिए। तालिका 1 माप श्रृंखला के लिए आवश्यक साक्ष्य का सारांश प्रस्तुत करती है।

तालिका 1
माप की मात्राएँ और व्याख्या के लिए आवश्यक साक्ष्य

आउटपुट	आवश्यक तुलना या जाँच	व्याख्या की सीमा
छवि स्थलचिह्न	एनोटेशन परिभाषाएँ, छवि दृश्यता, पहचान और संबद्धता त्रुटियाँ	पिक्सेल समझौता एक संरचनात्मक संयुक्त केंद्र स्थापित नहीं करता है
त्रि-आयामी स्थलचिह्न	अंशांकन, तुल्यकालन, पुनर्निर्माण, संदर्भ-फ़्रेम संरेखण	स्थिति समझौता सटीक खंड अभिविन्यास स्थापित नहीं करता है
संयुक्त कोण और चाल घटनाएँ	तुलनीय संरचनात्मक मॉडल, रोटेशन परंपराएं, घटना परिभाषाएं, तरंग रूप और समय संबंधी त्रुटियां	सत्यापन परीक्षण किए गए जोड़, तल, कार्य और जनसंख्या पर लागू होता है
नेट संयुक्त क्षण और शक्तियाँ	गति, बाहरी बल या रिंच, मॉडल गुण, तुल्यकालन, अवशेष	अनुमानित शुद्ध क्षण एक व्यक्तिगत मांसपेशी या स्नायुबंधन बल नहीं है
ऊतक-स्तर का अनुमान	शारीरिक और शारीरिक धारणाएँ, स्वतंत्र अभिसरण सत्यापन, संवेदनशीलता विश्लेषण	प्रशंसनीय मॉडल आउटपुट आंतरिक लोडिंग का प्रत्यक्ष माप नहीं है
नैदानिक व्याख्या	दावे और इच्छित निर्णय के लिए उपयुक्त अनुदैर्ध्य या नैदानिक साक्ष्य	अकेले मापन समझौता बेहतर परिणाम प्रदर्शित नहीं करता है

यह तालिका शारीरिक, अनुभवजन्य और मॉडलिंग साहित्य [3,5-7] द्वारा सूचित एक व्याख्यात्मक संश्लेषण है। यह एक अनुसमर्थित मानक नहीं है.
चित्र 1 माप श्रृंखला को मैप करता है और शुद्ध संयुक्त क्षणों का अनुमान लगाने के लिए आवश्यक अतिरिक्त जानकारी को अलग करता है।



चित्र 1. जहां अनिश्चितता माप श्रृंखला में प्रवेश करती है

माप श्रृंखला का वैचारिक मानचित्र और इसकी अनिश्चितता प्रवेश बिंदु। ए, रिकॉर्ड किया गया वीडियो पिक्सेल तीव्रता और टाइमस्टैम्प प्रदान करता है। मुद्रा अनुमान और पुनर्निर्माण स्थलों का अनुमान लगाएं; संरचनात्मक मानचित्रण और मॉडल बाधाएं खंड और संयुक्त अक्षों को परिभाषित करती हैं; रोटेशन कन्वेंशन और टेम्पोरल प्रोसेसिंग संयुक्त कोण उत्पन्न करते हैं। सूचीबद्ध अनिश्चितता स्रोत उदाहरण हैं, मात्रात्मक या संपूर्ण त्रुटि बजट नहीं। बी, शुद्ध संयुक्त क्षणों का अनुमान लगाने के लिए अतिरिक्त रूप से गति व्युत्पन्न, बाहरी लोडिंग की आवश्यकता होती है जिसे मापा जाता है या स्पष्ट रूप से अनुमान लगाया जाता है, और जड़त्वीय और मॉडल मान्यताओं को दस्तावेज किया जाता है। संपर्क या समर्थन बलों और उनके आवेदन के बिंदुओं पर विचार किया जाना चाहिए। इसलिए, संयुक्त कोणों में समझौता, अपने आप में, गतिज वैधता स्थापित नहीं करता है। शुद्ध क्षण परिणामी मांग का प्रतिनिधित्व करते हैं और विशिष्ट रूप से व्यक्तिगत मांसपेशियों, स्नायुबंधन या संयुक्त-संपर्क बलों की पहचान नहीं करते हैं। यह मूल योजनाबद्ध संदर्भों को संश्लेषित करता है [3,5,6,18,19]।

धारा 4

अनुभवजन्य सत्यापन क्या स्थापित करता है

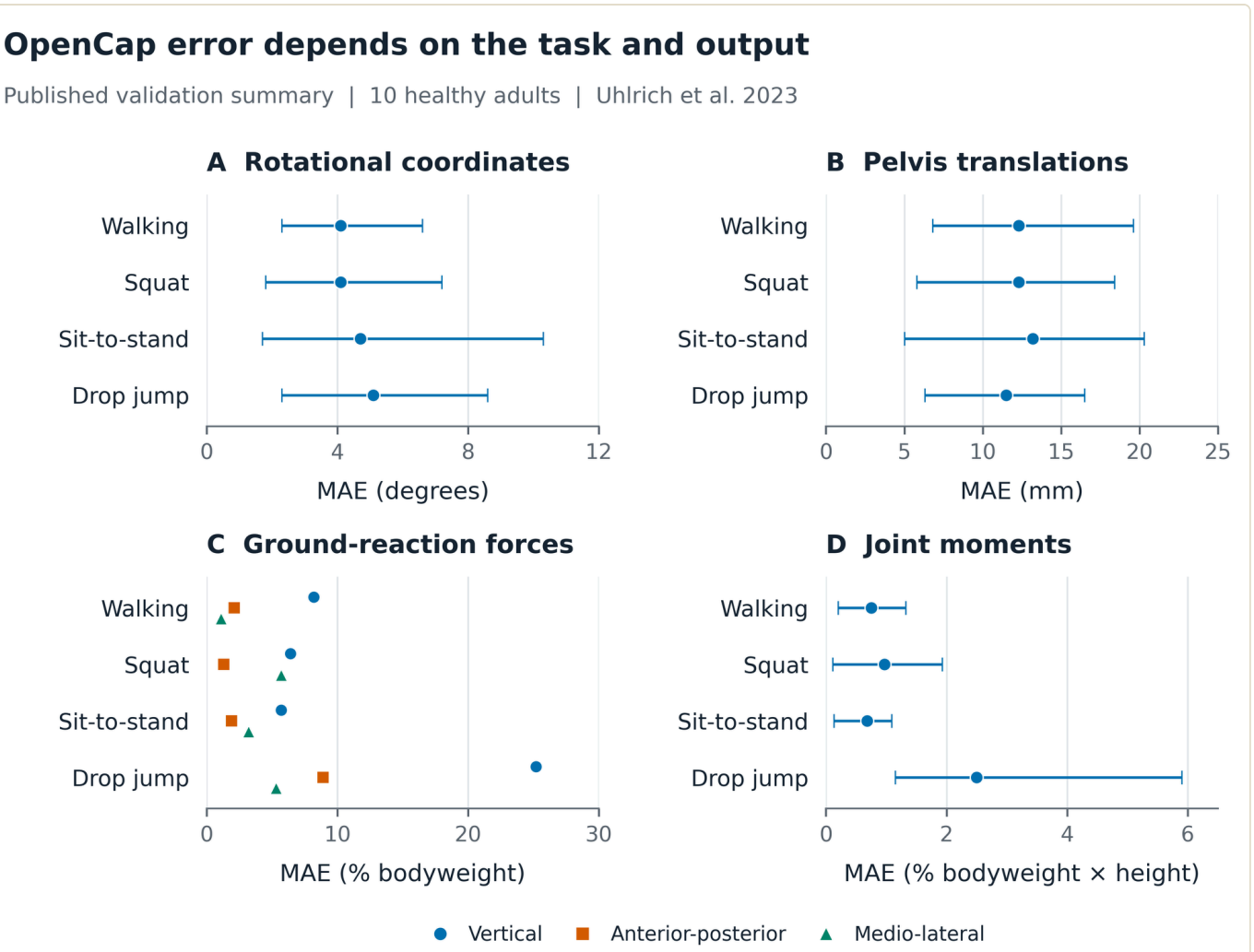
4.1प्रयोगशाला समझौता और दोहराव

कांको और सहकर्मियों ने 30 स्वस्थ वयस्कों में सिंक्रोनाइज़्ड मार्करलेस और मार्कर-आधारित चाल माप की तुलना की और पाया कि संयुक्त केंद्रों और रोटेशन अक्षों में भिन्नता पाई गई [8]। तीन सत्रों में आठ वयस्कों के एक अलग अध्ययन ने अंतराल पुनरावृत्ति का मूल्यांकन किया [9]। ये परिणाम पूरक प्रश्नों को संबोधित करते हैं: सिस्टम के बीच पत्राचार और बार-बार अधिग्रहण के दौरान स्थिरता। इनमें से कोई भी नैदानिक आबादी में उपचार के प्रति प्रतिक्रिया स्थापित नहीं करता है। व्यवस्थित संरचनात्मक ऑफसेट मौजूद होने पर पुनरावृत्ति उच्च रह सकती है।

त्रुटियाँ विशेष रूप से छोटी नहीं हैं, लगभग गाऊसी गड़बड़ी हैं। दो स्वस्थ स्वयंसेवकों से जुड़े एक OpenPose अध्ययन में, नाकानो और सहकर्मियों ने शरीर के खंडों के गलत निर्धारण सहित विफलताएं देखीं [10]। ऐसी घटनाएँ सामान्य समन्वय शोर से गुणात्मक रूप से भिन्न होती हैं। एक सत्यापन रिपोर्ट में सफल रिकॉर्डिंग के बीच त्रुटि वितरण और प्रयोग करने योग्य आउटपुट उत्पन्न करने वाली इच्छित रिकॉर्डिंग के अनुपात दोनों को दिखाया जाना चाहिए। मैन्युअल मरम्मत वैध हो सकती है, लेकिन मरम्मत के परिणामों के साथ आवृत्ति, नियम, ऑपरेटर प्रयास और ऑपरेटरों के बीच समझौता होना चाहिए।

मूल ओपनकैप मूल्यांकन में चलने, बैठने, कुर्सी से उठने और ड्रॉप जंप करने वाले दस स्वस्थ प्रतिभागियों को शामिल किया गया था। इसमें संयुक्त कोणों के लिए 4.5° की पूलित माध्य निरपेक्ष त्रुटियां, जमीनी प्रतिक्रिया बलों के लिए शरीर के वजन का 6.2% और संयुक्त क्षणों के लिए ऊंचाई से गुणा किए गए शरीर के वजन का 1.2% बताया गया है [3]। वे सामान्यीकृत मात्राएँ और एकत्रीकरण विकल्प स्पष्ट रहने चाहिए। स्वेटेक और सहकर्मियों द्वारा 20 प्रतिभागियों के एक स्वतंत्र मूल्यांकन में कार्य और संयुक्त-निर्भर विसंगतियां पाई गईं, जिसमें चाल परीक्षणों में तुलनात्मक रूप से बड़ी धनु कूल्हे की त्रुटियां भी शामिल थीं [11]। अध्ययन विभिन्न प्रोटोकॉल का परीक्षण करते हैं; उनके परिणामों को एकल प्लेटफ़ॉर्म सटीकता दावे में संपीड़ित नहीं किया जाना चाहिए।

मूल ओपनकैप सत्यापन से कार्य-विशिष्ट त्रुटियां बताती हैं कि प्रत्येक आउटपुट और गतिविधि के लिए प्रदर्शन को अलग से क्यों रिपोर्ट किया जाना चाहिए (चित्रा 2)।



चित्र 2. ओपनकैप त्रुटि कार्य और आउटपुट पर निर्भर करती है

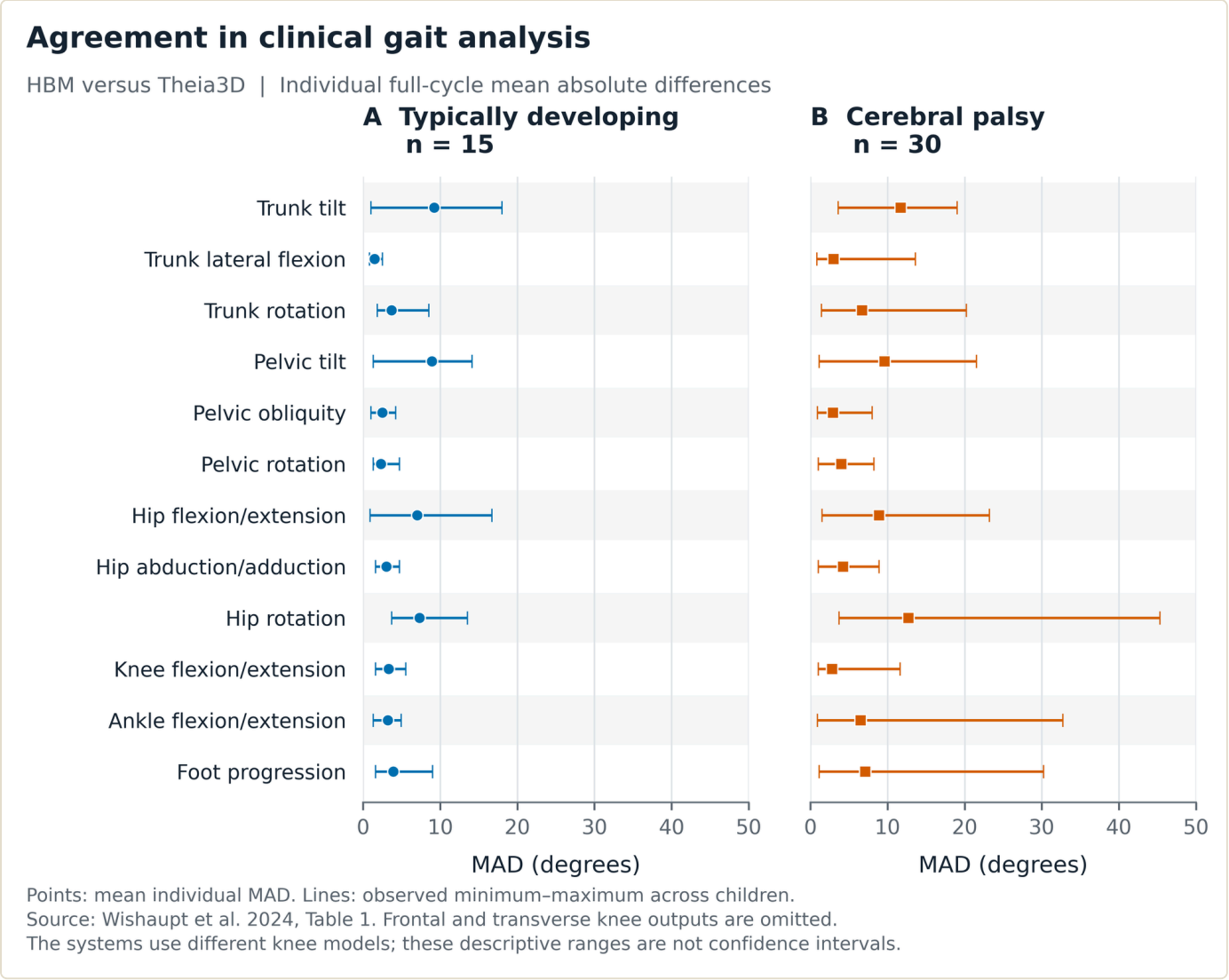
दस स्वस्थ वयस्कों में ओपनकैप के लिए कार्य-विशिष्ट माध्य निरपेक्ष त्रुटियाँ (एमएई)। ए, घूर्णी निर्देशांक; बी, श्रोणि अनुवाद; सी, तीन जमीनी-प्रतिक्रिया-बल घटक; डी, संयुक्त क्षण. अंक प्रकाशित एमएई दर्शाते हैं। ए, बी और डी में क्षैतिज खंड परीक्षणों और प्रतिभागियों के औसत के बाद स्वतंत्रता की मॉडल डिग्री में न्यूनतम और अधिकतम एमएई का विस्तार करते हैं। वे निर्देशांक में वर्णनात्मक श्रेणियां हैं, आत्मविश्वास अंतराल या प्रतिभागी मानक विचलन नहीं। सी में बल-घटक बिंदुओं में स्रोत तालिका में कोई अनिश्चितता अंतराल नहीं बताया गया है। BW शरीर के वजन को दर्शाता है; आघूर्ण त्रुटि को 100 × आघूर्ण MAE/(BW × प्रतिभागी ऊँचाई) के रूप में व्यक्त किया जाता है। संदर्भ मार्कर-आधारित गति कैप्चर, बल प्लेट और व्युत्क्रम गतिशीलता को जोड़ता है। मानों को उहलरिच एट अल से एक नए लेआउट में दोहराया गया है। (2023), तालिका 1 [3]। परिणाम रिपोर्ट किए गए अधिग्रहण और प्रसंस्करण कॉन्फ़िगरेशन पर लागू होते हैं और व्यक्तिगत नैदानिक सहिष्णुता स्थापित नहीं करते हैं।

4.2नैदानिक आबादी और परिणामी असहमति

नैदानिक सत्यापन को उन असामान्य पैटर्न की जांच करनी चाहिए जिन्हें इच्छित सेवा को पहचानने की आवश्यकता है। विशौप्ट और सहकर्मियों ने स्पास्टिक सेरेब्रल पाल्सी वाले 30 बच्चों और आमतौर पर विकसित होने वाले 15 बच्चों का अध्ययन किया [12]। यद्यपि कई कोणीय पैटर्न पुन: प्रस्तुत किए गए थे, पैल्विक झुकाव और अनुप्रस्थ कूल्हे के घुमाव में व्यक्तिगत अंतर को मार्कर रहित प्रणाली द्वारा समान

सीमा तक कैप्चर नहीं किया गया था। उनका पूरा पाठ बायोमैकेनिकल मॉडल के बीच अंतर की भी पहचान करता है, जिसमें पैर विभाजन और घुटने की स्वतंत्रता की डिग्री शामिल है। इस प्रकार असहमति को स्वचालित रूप से पूरी तरह से छवि ट्रैकिंग को नहीं सौंपा जा सकता है।

मार्कर-आधारित और मार्कर रहित चाल आउटपुट के बीच व्यक्तिगत अंतर संरचनात्मक चर के अनुसार भिन्न होता है और समूह माध्य से परे विस्तारित होता है (चित्रा 3)।



चित्र 3. नैदानिक चाल विश्लेषण में समझौता

आरामदायक गति से नंगे पैर चलने के दौरान मार्कर-आधारित मानव शरीर मॉडल (HBM) और Theia3D मार्कर रहित माप के बीच समझौता। ए, आमतौर पर विकासशील बच्चे (एन = 15); बी, स्पास्टिक सेरेब्रल पाल्सी वाले बच्चे (एन = 30)। अंक व्यक्तिगत पूर्ण-चक्र माध्य निरपेक्ष अंतर (एमएडी) के समूह माध्य को दर्शाते हैं, और क्षैतिज खंड बच्चों में देखे गए न्यूनतम और अधिकतम को दर्शाते हैं। ये खंड विश्वास अंतराल या समझौते की ब्लैंड-ऑल्टमैन सीमाएं नहीं हैं। प्रति बच्चा औसतन पाँच चक्र थे; स्रोत ने आम तौर पर विकासशील बच्चों के लिए दाहिने पैर का उपयोग किया और सेरेब्रल पाल्सी के लिए चिकित्सकीय रूप से अधिक प्रभावित पैर का उपयोग किया, जबकि हानि बराबर होने पर दाहिने पैर का चयन किया गया। दोनों पैनलों में समान कोण पैमाने का उपयोग किया जाता है। फ्रंटल और अनुप्रस्थ घुटने के आउटपुट को छोड़ दिया गया है क्योंकि HBM और Theia3D घुटने की स्वतंत्रता की विभिन्न डिग्री का उपयोग करते हैं; उनके प्रकाशित मान स्रोत-डेटा फ़ाइल में रहते हैं। मूल्यों को विशौप्ट एट अल से एक नए लेआउट में दोहराया गया है। (2024), तालिका 1 [12]। अंतरों में संरचनात्मक-मॉडल और समन्वय-परिभाषा प्रभाव के साथ-साथ ट्रैकिंग असहमति भी शामिल है।

चाफेट्ज़ और सहकर्मियों द्वारा 2026 के एक बड़े अध्ययन में जटिल चाल पैटर्न वाले 202 बच्चों में एक साथ रिकॉर्डिंग की तुलना की गई [13]। प्रकाशित सार रिपोर्ट धनु घुटने और टखने का मतलब रूट-माध्य-वर्ग त्रुटियां 5 डिग्री से नीचे है, लेकिन निर्दिष्ट धनु चाल वर्गीकरण के लिए केवल 67% समग्र अनुरूपता, κ = 0.60 के साथ। बॉडी मास इंडेक्स और वॉकर के उपयोग से त्रुटियां बढ़ीं। यह विशेष रूप से व्याख्या के लिए प्रासंगिक है: स्पष्ट रूप से अनुकूल कोणीय सारांश समकक्ष वर्गीकरण की गारंटी नहीं देते हैं। परिणाम यह निर्धारित नहीं करता है कि किस प्रणाली ने सही वर्गीकरण दिया है, और इसे हर नैदानिक निदान के लिए लागू नहीं किया जाना चाहिए।

आउटरलीज़ और सहकर्मी विभिन्न प्रकार के साक्ष्य प्रदान करते हैं। उनके तीन-केंद्रीय अध्ययन में 486 प्रतिभागियों को शामिल किया गया था, जिनमें से 351 को घुटने का ऑस्टियोआर्थराइटिस था, और विभिन्न स्थानों पर बीमारी से संबंधित चाल में व्यापक रूप से लगातार अंतर की पहचान की गई थी [14]। यह बहुकेंद्रीय परिनियोजन में समूह पैटर्न का अध्ययन करने की व्यवहार्यता का समर्थन करता है। क्योंकि समूह विभेदन एक स्वतंत्र संदर्भ के साथ युग्मित तुलना के समान प्रयोग नहीं है, यह व्यक्तिगत विनिमेयता, नैदानिक संवेदनशीलता, या उपचार प्रतिक्रिया स्थापित नहीं करता है। इस भेद की उचित मान्यता अध्ययन के योगदान को बढ़ा-चढ़ाकर बताए बिना मजबूत करती है।

एकल-कैमरा त्रि-आयामी अनुमान अपने स्वयं के मूल्यांकन की गारंटी देता है। वेल्लुची और सहकर्मियों ने 17-सेंसर जड़त्व प्रणाली के खिलाफ एक पाइपलाइन का प्रशिक्षण किया और स्वस्थ प्रतिभागियों में कैमरा स्थान, कपड़े, मानवमिति और चाल रणनीति की जांच की [15]। सर्वोत्तम प्रदर्शन करने वाले दृष्टिकोण में 2.97 सेमी और 4.24° की रिपोर्ट की गई लैंडमार्क और कोण मूल-माध्य-वर्ग त्रुटियां, 0.65 की चाल-प्रोफ़ाइल-स्कोर आईसीसी के साथ मिलीं। ये जड़त्वीय अनुमानों के साथ तुलना हैं, प्रत्यक्ष कंकाल माप नहीं। वे परीक्षणित परिस्थितियों में विकास संकेत प्रदर्शित करते हैं; वे न्यूरोलॉजिकल या आर्थोपेडिक रोगियों को मूल्यों को स्थानांतरित करने का औचित्य नहीं रखते हैं।

तालिका 2
चयनित अनुभवजन्य अध्ययन और उनकी व्याख्यात्मक सीमाएँ

अध्ययन और संदर्भ	संपत्ति का मूल्यांकन किया	मुख्य योगदान	व्याख्यात्मक सीमा और पहुंच
कांको एट अल. 2021 [8]; 30 स्वस्थ वयस्क	समवर्ती चाल गतिकी	समझौता संयुक्त और रोटेशन अक्ष के अनुसार भिन्न होता है	स्वस्थ ट्रेडमिल चाल; सार की जाँच की गई
कांको एट अल. 2021 [9]; आठ स्वस्थ वयस्क	तीन सत्रों की पुनरावृत्ति	बार-बार मार्कर रहित चाल अधिग्रहण की व्यवहार्यता प्रदर्शित करता है	छोटा नमूना; दोहराव सटीकता से अलग है; सार की जाँच की गई
उहलरिच एट अल. 2023 [3]; दस स्वस्थ वयस्क	चार गतिविधियों में गतिकी और गतिकी	स्मार्टफोन अधिग्रहण को मॉडल-आधारित गतिशीलता से जोड़ता है	एकत्रित त्रुटियाँ प्रत्येक आउटपुट या रोगी समूह को मान्य नहीं करतीं; पूर्ण पाठ की जाँच की गई
स्वेटेक एट अल. 2025 [11]; 20 प्रतिभागी	चाल और कार्यात्मक कार्यों के दौरान ओपनकैप	महत्वपूर्ण कार्य एवं संयुक्त निर्भरता को प्रकट करता है	प्रयोगशाला उपकरण और देखने की स्थितियाँ मायने रखती हैं; पूर्ण पाठ की जाँच की गई
विशौप्ट एट अल. 2024 [12]; सेरेब्रल पाल्सी और तुलना समूह	नैदानिक चाल विचलन का पुनरुत्पादन	छूटी हुई व्यक्तिगत श्रोणि और कूल्हे की भिन्नता की पहचान करता है	शारीरिक मॉडल अंतर एट्रिब्यूशन को जटिल बनाते हैं; पूर्ण पाठ की जाँच की गई
चाफेट्ज़ एट अल. 2026 [13]; 202 बच्चे	जटिल चाल और वर्गीकरण समझौता	एक बड़े नैदानिक समूह तक साक्ष्य का विस्तार करता है	केवल सार प्रकाशित; वर्गीकरण समझौता नैदानिक परिणाम लाभ नहीं है
आउटरलीज़ एट अल. 2025 [14]; तीन केंद्रों पर 486 प्रतिभागी	समूह पैटर्न और साइट स्थिरता	बहुकेंद्रीय अवलोकन संबंधी अनुप्रयोगों का समर्थन करता है	व्यक्तिगत मानदंड की वैधता का कोई दावा नहीं; सार की जाँच की गई
वेल्लुची एट अल. 2026 [15]; स्वस्थ चलना	एक जड़त्वीय प्रणाली के विरुद्ध एकल-कैमरा अनुमान	दृष्टिकोण और पारिस्थितिक गड़बड़ी की जांच करता है	सन्दर्भ स्वयं अनुमानित है; प्रकाशित सार की जाँच की गई

तालिका एक उद्देश्यपूर्ण साक्ष्य मानचित्र है, न कि कोई व्यवस्थित सूची या तुलनात्मक रैंकिंग। विभिन्न त्रुटि मेट्रिक्स और एकत्रीकरण योजनाएं प्रत्यक्ष संख्यात्मक रैंकिंग को रोकती हैं।

धारा 5

संदर्भ विधियों की अपनी अनिश्चितता होती है

ऑप्टिकल मार्कर-आधारित कैप्चर एक स्थापित तुलना पद्धति है, लेकिन त्वचा पर लगे मार्कर सीधे हड्डी की गति प्रदान नहीं करते हैं। दौड़ने के दौरान हड्डी-पिन की तुलना में, रेन्स्चिमड्ट और उनके सहयोगियों ने प्रदर्शित किया कि त्वचा की गति से होने वाली त्रुटियां रोटेशन विमान और प्रतिभागी द्वारा भिन्न होती हैं [16]। इसलिए एक ऑप्टिकल सिस्टम के साथ समझौते का मतलब उस कार्यान्वयन के साथ समझौता है, जिसमें उसका मार्कर प्लेसमेंट, संरचनात्मक मॉडल और प्रसंस्करण शामिल है। जड़त्वीय प्रणालियाँ विभिन्न संरेखण, बहाव-सुधार और मॉडलिंग मान्यताओं का परिचय देती हैं। किसी भी तुलनित्र को त्रुटि रहित कंकाल सत्य के रूप में वर्णित नहीं किया जाना चाहिए।

तुलना में पहले यह स्थापित करना चाहिए कि क्या दोनों पाइपलाइनें समान मात्रा को लक्षित करती हैं। एक बहुखंडीय पैर और एक एकल कठोर पैर मॉडल अलग-अलग टखने की व्याख्या उत्पन्न कर सकते हैं, भले ही दोनों अपनी निर्दिष्ट विशेषताओं को लगातार ट्रैक करते हों। इसी प्रकार, एक बाधित घुटने का मॉडल कम बाधित मॉडल द्वारा उत्पादित सभी घुमावों को स्वतंत्र रूप से व्यक्त नहीं कर सकता है। कार्डन अनुक्रमों का मिलान सहायक है लेकिन खंड अक्षों या संरचनात्मक परिभाषाओं में अंतर को दूर नहीं करता है। जब भी डेटा अनुमति दे तो मॉडल-स्तरीय असहमति, ट्रैकिंग त्रुटि और संदर्भ त्रुटि पर अलग से विचार किया जाना चाहिए।

एक मजबूत अध्ययन सिंक्रनाइज़ तुलना, स्वतंत्र अंशांकन जांच, बार-बार संदर्भ माप और संवेदनशीलता विश्लेषण को जोड़ सकता है। जहां हड्डी की इमेजिंग संभव और उचित है, यह विशेष शारीरिक प्रश्नों का उत्तर दे सकती है, लेकिन इसकी उपलब्धता और देखने का क्षेत्र सार्वभौमिक संदर्भ के रूप में इसकी भूमिका को सीमित करता है। जहां आंतरिक मात्रा का प्रत्यक्ष अवलोकन अनुपलब्ध है, वहां सही प्रतिक्रिया दावे का परिसीमन करना और एकत्रित साक्ष्य की तलाश करना है। प्रशिक्षण डेटा या शारीरिक मान्यताओं को साझा करने वाले दो एल्गोरिदम के बीच समझौता वास्तव में स्वतंत्र माप मार्गों के बीच समझौते की तुलना में कम स्वतंत्र पुष्टि प्रदान करता है।

धारा 6

गति से लेकर शुद्ध संयुक्त मांग और आंतरिक लोडिंग तक

गतिज समझौते को गतिज वैधता के लिए स्वचालित रूप से आगे नहीं बढ़ाया जा सकता है। स्वतंत्र सामान्यीकृत निर्देशांक में व्यक्त निर्दिष्ट कठोर-शरीर मॉडल के लिए, एक योजनाबद्ध संतुलन है:

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = Q + J_c(q)^{\mathsf{T}} W_{\text{ext}}.$$

यहाँ q विन्यास को दर्शाता है, $\dot{q}$ और $\ddot{q}$ इसका समय व्युत्पन्न, M द्रव्यमान मैट्रिक्स, और h गति-निर्भर और गुरुत्वाकर्षण शब्द। Q जबकि सामान्यीकृत सक्रियण शामिल है J_c बाह्य संपर्क गति के लिए सामान्यीकृत गति को मैप करता है और W_{ext} इसमें संबंधित बाहरी ताकतें और क्षण शामिल हैं। सटीक सूत्रीकरण मॉडल और बाधाओं पर निर्भर करता है। OpenSim ऐसे मॉडलों के निर्माण और समाधान के लिए एक कम्प्यूटेशनल ढांचा प्रदान करता है [17,18]। सॉफ़्टवेयर उपलब्धता यह स्थापित नहीं करती है कि कोई विशेष मॉडल किसी विशेष रोगी की शारीरिक रचना या गतिविधि का प्रतिनिधित्व करता है।

व्युत्क्रम गतिशीलता में, निर्धारित गति और बाहरी लोडिंग चयनित मान्यताओं के तहत शुद्ध सामान्यीकृत मांग निर्धारित करते हैं। जब बाहरी ताकतों को मापा नहीं जाता है, तो एक वीडियो-आधारित पाइपलाइन को उनका अनुमान लगाना चाहिए या अतिरिक्त संपर्क और शारीरिक बाधाओं का परिचय देना चाहिए। अज्ञात हाथ का सहारा, कोई उठाई हुई वस्तु, या चलने में सहायता दृश्यमान संयुक्त कोणों में विशिष्ट पुनर्प्राप्ति योग्य हस्ताक्षर के बिना बाहरी लोडिंग को बदल सकती है। जांचकर्ताओं को यह बताना चाहिए कि किन बलों को मापा गया, अनुमान लगाया गया, अनुपस्थित माना गया, या अवशिष्ट शब्दों से प्रतिस्थापित किया गया। किसी सिस्टम के लेबल को सूचना के इन विभिन्न स्रोतों को अस्पष्ट नहीं करना चाहिए।

शुद्ध संयुक्त क्षण व्यक्तिगत मांसपेशी बलों की पहचान नहीं करते हैं। एकाधिक एगोनिस्ट-प्रतिपक्षी संयोजन एक ही क्षण उत्पन्न कर सकते हैं, जबकि सह-संकुचन शुद्ध क्षण में इसी वृद्धि के बिना संयुक्त संपर्क लोडिंग को बदल सकता है। ऊतक-स्तर का अनुमान अतिरिक्त रूप से मांसपेशियों के पथ, क्षण भुजाओं, शक्ति मापदंडों, कण्डरा व्यवहार और बल साझाकरण को हल करने के लिए उपयोग किए जाने वाले मानदंड पर निर्भर करता है। हिक्स और सहकर्मी विश्वसनीय सिमुलेशन के जुड़े घटकों के रूप में सत्यापन, आउटपुट-विशिष्ट सत्यापन और संवेदनशीलता विश्लेषण की सलाह देते हैं [19]। सक्रियण समय या किसी अन्य अप्रत्यक्ष संकेत के साथ समझौता संभाव्यता को मजबूत कर सकता है, लेकिन यह एक अनिर्धारित आंतरिक-बल अनुमान को प्रत्यक्ष माप में परिवर्तित नहीं कर सकता है।

किसी उपकरण को अनुभवजन्य त्रुटि निर्दिष्ट किए बिना ज्यामितीय त्रुटि के यांत्रिक महत्व को चित्रित किया जा सकता है। एक निश्चित बल के लिए F, स्थिति त्रुटि के कारण क्षण में प्रथम-क्रम परिवर्तन Δr है $\Delta \tau = \Delta r \times F$. 1,000 N का बल और इसकी क्रिया की रेखा के लंबवत 0.01 m की त्रुटि 10 N·m की विसंगति उत्पन्न करती है। यदि बल और स्थिति दोनों अनिश्चित हैं, तो योगदान और उनकी निर्भरता दोनों मायने रखती हैं। यह उदाहरण एक विश्लेषणात्मक चित्रण है, न कि कोई अवलोकन किया गया प्रदर्शन परिणाम या सार्वभौमिक त्रुटि बजट।

फ़िल्टरिंग, विभेदन, सिंक्रनाइज़ेशन और घटना संरेखण भी गतिज अनुमानों को प्रभावित करते हैं। शोर प्रक्षेपवक्र को अलग करने से उच्च-आवृत्ति घटकों का विस्तार होता है; स्मूथिंग वास्तविक चोटियों को कम कर सकती है। किनेमेटिक्स और बाहरी ताकतों के बीच एक समय ऑफसेट एक अनुमानित क्षण को बदल सकता है, भले ही प्रत्येक संकेत अलगाव में प्रशंसनीय दिखाई दे। नमूना दर, पुन: नमूनाकरण, फ़िल्टर परिवार और कटऑफ़, चरण हैंडलिंग और सिंक्रनाइज़ेशन प्रक्रियाओं की रिपोर्ट करें। संवेदनशीलता विश्लेषण को प्रशंसनीय इनपुट को संयुक्त रूप से अलग-अलग करना चाहिए जब वे निर्भर होते हैं और दिखाते हैं कि क्या अनिश्चितता समापन बिंदु की व्याख्या को बदल देती है। सबसे अधिक प्रासंगिक आउटपुट किसी निर्णय में अनिश्चितता हो सकता है, बजाय दृश्यमान औसत तरंग में अनिश्चितता के।

धारा 7

समझौते और अनुदैर्ध्य परिवर्तन के लिए अलग-अलग विश्लेषण की आवश्यकता होती है

सहसंबंध सहपरिवर्तन का वर्णन करता है और विनिमेयता स्थापित नहीं करता है। लगभग सामान्य, स्थिर विचरण के साथ स्वतंत्र युग्मित अंतरों के लिए, समझौते की पारंपरिक सीमाओं का अनुमान औसत अंतर प्लस या माइनस 1.96 गुना अंतर के मानक विचलन के रूप में लगाया जाता है [20]। ये सीमाएँ असहमति के वितरण का वर्णन करती हैं, न कि माध्य पूर्वाग्रह के आसपास विश्वास अंतराल का। सीमाओं के लिए विश्वास अंतराल की भी सूचना दी जानी चाहिए। आनुपातिक पूर्वाग्रह, तिरछापन, या बदलते विचरण के लिए मॉडलिंग या परिवर्तन की आवश्यकता हो सकती है, व्याख्या को चिकित्सकीय रूप से सार्थक इकाइयों में बनाए रखा जा सकता है।

मूवमेंट डेटा को क्लस्टर किया जाता है: फ़्रेम स्ट्राइड्स बनाते हैं, स्ट्राइड्स ट्रायल बनाते हैं, और बार-बार परीक्षण लोगों और सत्रों से संबंधित होते हैं। ब्लैंड और ऑल्टमैन बार-बार किए गए अवलोकनों के लिए विस्तार का वर्णन करते हैं [21]। जांचकर्ताओं को इस पदानुक्रम और इच्छित भविष्यवाणी लक्ष्य के अनुरूप एक मॉडल या पुन: नमूनाकरण योजना का उपयोग करना चाहिए। कुछ प्रतिभागियों के हजारों फ़्रेमों को स्वतंत्र अवलोकन के रूप में मानने से भ्रामक सटीकता प्राप्त होती है। प्रतिभागी-स्तर का औसत औसत-प्रदर्शन प्रश्न का उत्तर देता है; वे फ़्रेम-लेवल या सिंगल-स्ट्राइड समझौता स्थापित नहीं करते हैं। एक अध्ययन को अपने सांख्यिकीय विश्लेषण का चयन करने से पहले प्राथमिक इकाई को परिभाषित करना चाहिए।

विश्वसनीयता रिपोर्टिंग में इंट्राक्लास सहसंबंध गुणांक मॉडल, समझौते या स्थिरता परिभाषा, एकल-माप या औसत-माप लक्ष्य और अनिश्चितता अंतराल [22] की पहचान होनी चाहिए। पर्याप्त पूर्ण त्रुटि के बावजूद एक विषम नमूने में एक आईसीसी उच्च हो सकता है। इसलिए यह आकलन करने के लिए अपर्याप्त है कि क्या एक व्यक्ति में एक छोटा सा परिवर्तन माप परिवर्तनशीलता से अलग है। व्यक्ति के भीतर पूर्ण त्रुटि की रिपोर्ट करें और निरीक्षण करें कि क्या यह आधारभूत मूल्य, कार्य कठिनाई या हानि की गंभीरता के आधार पर भिन्न है।

एक पारंपरिक मॉडल के तहत लगभग सामान्य, स्वतंत्र, दो अवसरों पर समान रूप से परिवर्तनीय त्रुटियां और कोई बेहिसाब व्यवस्थित बदलाव नहीं, 95% न्यूनतम पता लगाने योग्य परिवर्तन होता है $1.962\,\mathrm{SEM}$, जहां SEM प्रासंगिक प्रोटोकॉल के लिए माप की मानक त्रुटि है [23]। यदि रिपोर्ट किया गया स्कोर औसत पुनरावृत्ति है, तो इसका SEM उसी स्कोर के अनुरूप होना चाहिए। सहसंबद्ध अवसर

त्रुटियाँ, सीखने के प्रभाव, विषमलैंगिकता, या परिवर्तित अधिग्रहण सरल अभिव्यक्ति को अमान्य कर सकते हैं। पता लगाने योग्य परिवर्तन माप अनिश्चितता का वर्णन करता है; यह उस परिमाण को स्थापित नहीं करता है जो किसी मरीज या एथलीट के लिए मायने रखता है।

चिकित्सकीय रूप से महत्वपूर्ण परिवर्तन के लिए इच्छित परिणाम से जुड़े एक अलग औचित्य की आवश्यकता होती है। एक सांख्यिकीय रूप से भिन्न कोण परिवर्तन चिकित्सकीय रूप से तुच्छ हो सकता है, जबकि एक शोर वाले उपकरण में चिकित्सकीय रूप से मूल्यवान सुधार अनिश्चित रह सकता है। श्वार्ट्ज और सहकर्मियों ने चाल परिवर्तनशीलता के स्रोतों को अलग करने और व्याख्या में माप अनिश्चितता को शामिल करने के लिए एक दृष्टिकोण का प्रदर्शन किया [24]। मार्कर रहित निगरानी के लिए, अनुरूप दोहराव-सत्र डिज़ाइन को ऑपरेटरों और सेटअप में यथार्थवादी भिन्नता बनाए रखनी चाहिए। कुर्सी की ऊंचाई, चलने की गति, जूते और निर्देशों को मानकीकृत करने से व्याख्या में सुधार हो सकता है, लेकिन एक अध्ययन में यह भी स्थापित किया जाना चाहिए कि क्या उन बाधाओं को प्राप्त किया जा सकता है जहां विधि का उपयोग किया जाएगा।

जब व्याख्या समय या आंदोलन की रणनीति पर निर्भर करती है तो तरंगरूप और घटना विश्लेषण को अलग-अलग चोटियों का पूरक होना चाहिए। एक कम औसत तरंगरूप त्रुटि एक पक्षपाती प्रभाव शिखर को छुपा सकती है, जबकि आक्रामक अस्थायी संरेखण वास्तविक समय अंतर को हटा सकता है। इसके विपरीत, बहुलता को संबोधित किए बिना प्रत्येक समय बिंदु का स्वतंत्र रूप से परीक्षण करना अंतर के साक्ष्य को बढ़ा-चढ़ाकर पेश कर सकता है। घटना का पता लगाने की प्रक्रिया, संरेखण नियम और पूर्वनिर्धारित तरंगरूप प्रश्न की रिपोर्ट करें। न तो कोई सांख्यिकीय रूप से महत्वपूर्ण अंतर और न ही कोई गैर-महत्वपूर्ण तुलना, उचित सहनशीलता और पर्याप्त सटीकता के बिना नैदानिक गैर-समतुल्यता या समतुल्यता स्थापित करती है।

धारा 8

सामान्यीकरण और माप कवरेज

अधिग्रहण की शर्तें उपकरण का हिस्सा हैं। प्रतिकृति के लिए कैमरा प्लेसमेंट, लेंस गुण, रोशनी, मोशन ब्लर, सिंक्रोनाइज़ेशन, छवि रिज़ॉल्यूशन, कपड़े और अवरोधन का पर्याप्त रूप से वर्णन किया जाना चाहिए। कंको और सहकर्मियों ने स्पष्ट रूप से विभिन्न कपड़ों की स्थितियों के तहत चल रहे माप की तुलना की [25]। इस तरह का काम तैनाती कारकों में हेरफेर करने के लिए एक मिसाल प्रदान करता है, लेकिन विशेष परिधानों के साथ सफल प्रदर्शन हर कपड़े, फिट या मूवमेंट को कवर नहीं करता है। अध्ययनों को पहले महत्वपूर्ण कारकों को अलग करना चाहिए, फिर एक स्वतंत्र सेटिंग में यथार्थवादी संयोजनों का मूल्यांकन करना चाहिए।

तंत्रिका नेटवर्क प्रशिक्षण एनोटेशन और विकास के दौरान प्रदर्शित उपस्थिति और आंदोलनों की सीमा पर निर्भर करते हैं [26]। सुचारू प्रक्षेपवक्र किसी असामान्य आंदोलन की विश्वसनीय पुनर्प्राप्ति के बजाय एक मजबूत सीखे गए पूर्व को प्रतिबिंबित कर सकते हैं। इसलिए मूल्यांकन में न केवल औसत त्रुटि की जांच होनी चाहिए बल्कि चिकित्सकीय रूप से प्रासंगिक चरम सीमाओं और व्यक्ति-व्यक्ति के बीच भिन्नता के संरक्षण की भी जांच होनी चाहिए। क्लिनिकल सेरेब्रल पाल्सी के निष्कर्ष एक भी कम्प्यूटेशनल कारण साबित किए बिना इस चिंता को दर्शाते हैं [12,13]। जब दृश्यता, कार्य निष्पादन, निकाय आयाम और मॉडल संरचना योगदान दे सकते हैं तो जांचकर्ताओं को प्रत्येक उपसमूह अंतर को जनसांख्यिकीय विशेषता के लिए जिम्मेदार ठहराने से बचना चाहिए।

मूवमेंट बायोमैकेनिक्स में मशीन-लर्निंग मार्गदर्शन विकास को मूल्यांकन से अलग करने और सूचना रिसाव से बचने पर जोर देता है [27]। जब दावा नए लोगों के लिए सामान्यीकरण से संबंधित हो तो आसन्न फ्रेम, बार-बार परीक्षण, या एक ही व्यक्ति के दोनों अंगों को प्रशिक्षण और परीक्षण सेट में वितरित नहीं किया जाना चाहिए। किसी बाहरी साइट के डेटा पर ट्यूनिंग उस साइट को मॉडल विकास का हिस्सा बनाती

है जब तक कि एक अलग अछूता मूल्यांकन बरकरार न रखा जाए। रिपोर्ट करें कि क्या पूर्व-प्रशिक्षित, पुनः प्रशिक्षित, अंशांकित और चयनित किया गया था, जिसमें संदर्भ परिणाम द्वारा सूचित कोई भी मानवीय सुधार भी शामिल है।

मापन कवरेज सशर्त सटीकता के साथ होना चाहिए। एक प्रस्तावित रिपोर्टिंग संरचना प्रत्येक नुकसान के कारणों के साथ पात्र यात्राओं की संख्या, प्रयास किए गए अधिग्रहण, तकनीकी रूप से पर्याप्त रिकॉर्डिंग, सफलतापूर्वक संसाधित आउटपुट और व्याख्या योग्य नैदानिक रिपोर्ट है। विफलताएँ सबसे गंभीर हानि या सहायता की सबसे बड़ी आवश्यकता से जुड़ी हो सकती हैं। इसलिए अकेले पूर्ण-मामले की त्रुटि एक अनुचित अनुकूल तस्वीर दे सकती है। यदि कोई आउटपुट उत्पन्न नहीं किया जा सकता है, तो विफलता की रिपोर्ट करना इसे सामान्य गति के रूप में चुपचाप मानने या एक प्रशंसनीय वक्र लगाने की तुलना में अधिक जानकारीपूर्ण है।

इक्विटी दावों के लिए पर्याप्त डेटा, स्पष्ट तुलना और अनिश्चितता की आवश्यकता होती है। यह प्रासंगिक शारीरिक आयामों, आयु सीमा, वास्तविक प्रकाश के तहत त्वचा की उपस्थिति, कपड़ों के अभ्यास और सहायक उपकरणों के उपयोग के प्रदर्शन की जांच करने के लिए उपयोगी है। हालाँकि, एक छोटा अध्ययन गैर-महत्वपूर्ण उपसमूह परीक्षणों के माध्यम से जनसांख्यिकीय निष्पक्षता स्थापित नहीं कर सकता है। स्थानीय रूप से प्रासंगिक स्थितियों का परीक्षण करते समय बहुकेंद्रीय सहयोग एक सामान्य कोर प्रोटोकॉल को बनाए रख सकता है। उन्हें साइट-विशिष्ट कवरेज और अनिश्चितता की रिपोर्ट करनी चाहिए, क्योंकि एक एकत्रित औसत कम-संसाधन वाली साइट पर व्यवस्थित विफलता को अस्पष्ट कर सकता है। जब अप्रतिबंधित वीडियो साझाकरण अनुपयुक्त हो तो पहचान योग्य वीडियो को उचित सहमति, पहुंच नियंत्रण और व्युत्पन्न डेटा साझा करने के लिए एक प्रतिलिपि प्रस्तुत करने योग्य योजना की भी आवश्यकता होती है।

धारा 9

माप से लेकर नैदानिक उपयोग तक एक प्रस्तावित मार्ग

V3 ढांचा बायोमेट्रिक निगरानी प्रौद्योगिकियों के लिए सत्यापन, विश्लेषणात्मक सत्यापन और नैदानिक सत्यापन को अलग करता है [28]। आंदोलन विश्लेषण के लिए, इन श्रेणियों को प्रत्येक चरण में संरचनात्मक मात्रा और निर्णय निर्दिष्ट करके संचालित किया जा सकता है। सत्यापन का संबंध सही कार्यान्वयन और अधिग्रहण से है। विश्लेषणात्मक सत्यापन एक उपयुक्त संदर्भ के विरुद्ध माप या अनुमान से संबंधित है। नैदानिक सत्यापन इच्छित जनसंख्या और संदर्भ में व्याख्या से संबंधित है। तालिका 3 इस मार्ग के व्यावहारिक घटकों के रूप में बाहरी मूल्यांकन, अनुदैर्ध्य उपयोग और संभावित वर्कफ़्लो मूल्यांकन को जोड़ती है।

तालिका 3
प्रस्तावित सत्यापन मार्ग और न्यूनतम रिपोर्टिंग आवश्यकताएँ

मंच	एकत्र करने हेतु साक्ष्य	रिपोर्टिंग आवश्यकता
इच्छित उपयोग	जनसंख्या, कार्य, आउटपुट, सेटिंग, ऑपरेटर, इच्छित कार्रवाई	सहनशीलता चुनने से पहले निर्णय और त्रुटि के परिणाम बताएं
तकनीकी सत्यापन	अंशांकन, तुल्यकालन, इकाई परीक्षण, संरचनात्मक सम्मेलन, प्रसंस्करण प्रतिलिपि प्रस्तुत करने योग्यता	हार्डवेयर, मॉडल, सॉफ़्टवेयर संस्करण और सभी मैन्युअल हस्तक्षेपों की पहचान करें
विश्लेषणात्मक सत्यापन	युग्मित संदर्भ डेटा, पूर्वाग्रह, पूर्ण त्रुटि, समझौते की सीमाएँ, घटनाएँ और तरंग रूप	संदर्भ अनिश्चितता का वर्णन करें और उचित क्लस्टर विश्लेषण का उपयोग करें
बाह्य मूल्यांकन	नए लोग, ऑपरेटर, साइटें और यथार्थवादी गड़बड़ी	रिपोर्ट कवरेज, उपसमूह अनिश्चितता, और क्या कोई स्थानीय ट्यूनिंग हुई
अनुदैर्ध्य मूल्यांकन	दोहराए गए सत्र, व्यावहारिक एसईएम, संस्करण ब्रिजिंग, चिकित्सकीय रूप से प्रासंगिक एंकर	पता लगाने योग्य परिवर्तन को महत्वपूर्ण परिवर्तन से और व्यक्तिगत को समूह अनुमान से अलग करें
निर्णय मूल्यांकन	व्याख्या, प्रबंधन परिवर्तन, ओवरराइड, बोझ, अनपेक्षित परिणाम	परीक्षण करें कि माप का उपयोग करने से इच्छित उपयोग के लिए प्रासंगिक परिणाम में सुधार होता है या नहीं
सतत निगरानी	अधिग्रहण विफलताएं, वितरण परिवर्तन, सॉफ़्टवेयर अद्यतन, प्रतिलिपि प्रस्तुत करने योग्यता	परिभाषित करें कि कोई परिणाम कब रोका जाता है, समीक्षा की जाती है, पुनः प्राप्त किया जाता है, या पुन: संसाधित किया जाता है

यह प्रस्तावित मार्ग स्थापित माप सिद्धांतों को वर्तमान महत्वपूर्ण संश्लेषण [19-24,27,28] के साथ जोड़ता है। इसके लिए अनुभवजन्य मूल्यांकन की आवश्यकता है और यह एक मान्य चेकलिस्ट स्कोर नहीं है।

एक व्यवहार्य संभावित सत्यापन अध्ययन को एक प्राथमिक आउटपुट और इसके इच्छित उपयोग के लिए आवश्यक सटीकता को निर्दिष्ट करना चाहिए। प्रतिभागियों को केवल सुविधाजनक स्वस्थ स्वयंसेवकों के बजाय प्रासंगिक हानि और सहायता सहित नैदानिक सेवा का प्रतिनिधित्व करना चाहिए। बार-बार होने वाले सत्रों में संपूर्ण सेटअप प्रक्रिया को पुन: पेश किया जाना चाहिए, और जब सेवा एकाधिक ऑपरेटरों पर निर्भर हो तो ऑपरेटर भिन्नता को शामिल किया जाना चाहिए। एक सिंक्रनाइज़ संदर्भ उपसमुच्चय विश्लेषणात्मक समझौते का परीक्षण कर सकता है जबकि बड़ा परिनियोजन समूह कवरेज और व्यवहार्यता का परीक्षण कर सकता है। नमूना आकार को समझौते की सीमा, विफलता दर, या निर्णय प्रदर्शन की आवश्यक सटीकता का पालन करना चाहिए; प्रत्येक प्रश्न के लिए प्रतिभागियों की सामान्य न्यूनतम संख्या बचाव योग्य नहीं है।

विश्लेषण से पहले, जांचकर्ताओं को बहिष्करण नियम, न्यूनतम रिकॉर्डिंग गुणवत्ता, आंशिक परीक्षणों का उपचार, लापता-आउटपुट हैंडलिंग, प्राथमिक एकत्रीकरण और अंशांकन और मूल्यांकन के बीच की सीमा निर्दिष्ट करनी चाहिए। एक प्रोटोकॉल को व्यवहार्यता विभाजक में असफल विज़िट को बनाए रखना चाहिए, भले ही वे संख्यात्मक अनुबंध डेटा का योगदान न कर सकें। डेटा-संचालित थ्रेशोल्ड चयन विकास डेटा के भीतर होना चाहिए और स्वतंत्र रूप से मूल्यांकन किया जाना चाहिए। पूर्ण अनुक्रम की रिपोर्ट करना एक लचीली प्रसंस्करण पाइपलाइन को बार-बार पोस्ट हॉक विकल्पों को स्पष्ट रूप से पूर्वनिर्धारित नैदानिक परीक्षण में बदलने से रोकता है।

जब आउटपुट एक नैदानिक भविष्यवाणी मॉडल बन जाता है तो मार्ग की शाखाएँ बन जाती हैं। TRIPOD+AI भविष्यवाणी-मॉडल विकास और मूल्यांकन की पारदर्शी रिपोर्टिंग का समर्थन करता है [29], जबकि PROBAST+AI गुणवत्ता, पूर्वाग्रह के जोखिम और प्रयोज्यता [30] को संबोधित करता है। ये उपकरण कोण अनुमान के लिए उपकरण-अनुबंध विधियों को प्रतिस्थापित नहीं करते हैं। यदि मार्कर रहित

आउटपुट एक डायग्नोस्टिक या पूर्वानुमानित नियम फ़ीड करते हैं, तो माप चरण और डाउनस्ट्रीम नियम दोनों को मूल्यांकन की आवश्यकता होती है। एक मॉडल जो भविष्य की चोट की भविष्यवाणी करता है उसे अतिरिक्त रूप से अनुदैर्ध्य परिणामों, प्रतिनिधि जोखिम, अंशांकन और स्वतंत्र सत्यापन की आवश्यकता होती है; एक आंदोलन सुविधा की यांत्रिक संभाव्यता अपर्याप्त है।

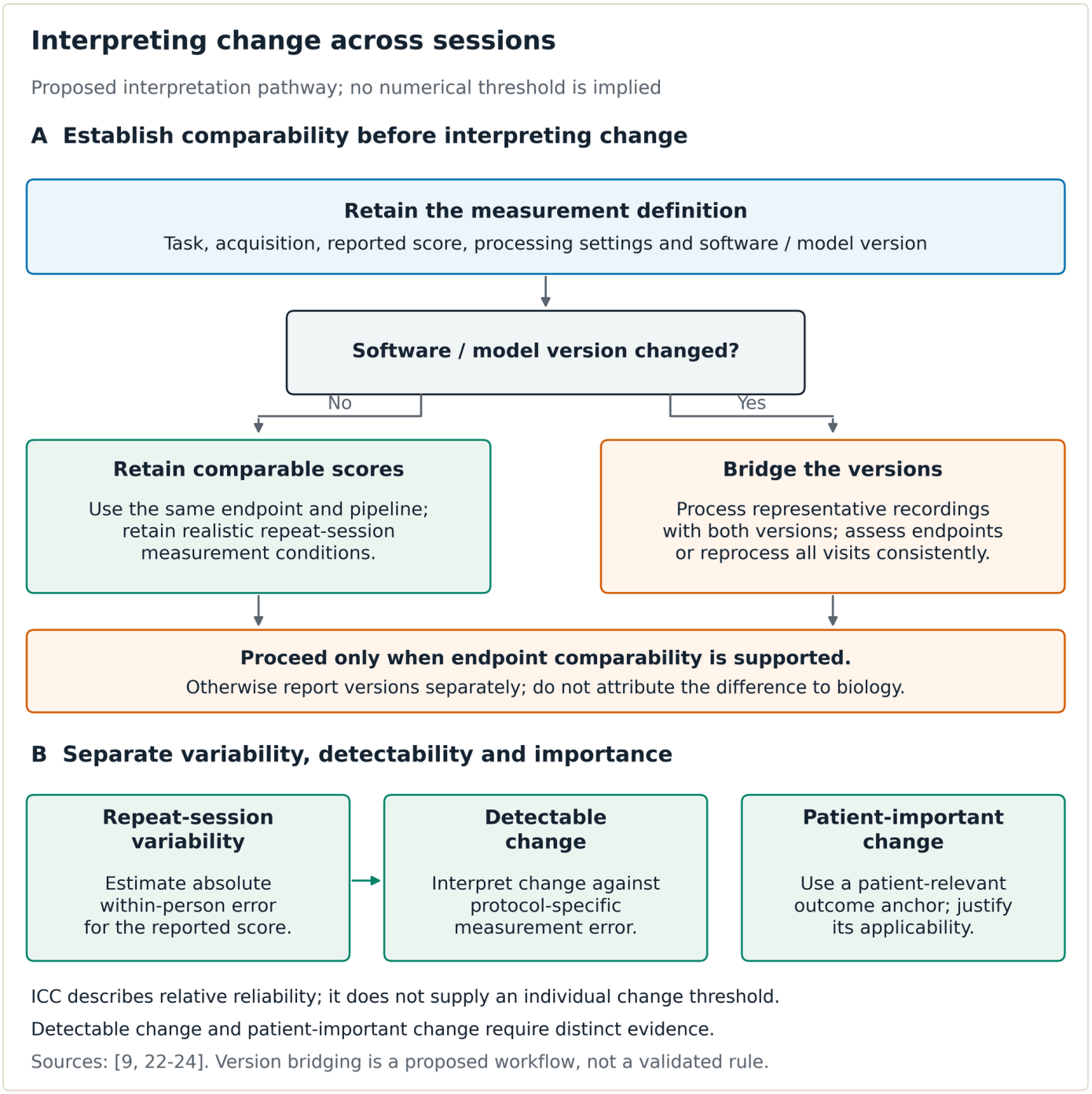
नैदानिक उपयोगिता इस बात पर भी निर्भर करती है कि लोग रिपोर्ट पर कैसे कार्य करते हैं। DECIDE-AI, AI-समर्थित निर्णयों के प्रारंभिक नैदानिक मूल्यांकन के लिए रिपोर्टिंग मार्गदर्शन प्रदान करता है [31]। एक अनुरूप आंदोलन-विश्लेषण मूल्यांकन में रिकॉर्ड किया जाना चाहिए कि क्या चिकित्सक अनिश्चितता को समझते हैं, जब वे आउटपुट से असहमत होते हैं या ओवरराइड करते हैं, और क्या जानकारी प्रबंधन को बदलती है। प्रबंधन में परिवर्तन मध्यवर्ती परिणाम हैं। लाभ प्रदर्शित करने के लिए कार्य, लक्षण, भागीदारी, संसाधन उपयोग या किसी अन्य पूर्वनिर्धारित परिणाम का आकलन करने वाले तुलनात्मक डिजाइन की आवश्यकता हो सकती है। उस मूल्यांकन का आकार और डिज़ाइन प्रस्तावित नैदानिक दावे के अनुरूप होना चाहिए।

धारा 10

अनुदैर्ध्य व्याख्या और सॉफ्टवेयर परिवर्तन

प्रत्येक परिणाम उसकी कच्ची रिकॉर्डिंग, अधिग्रहण कॉन्फ़िगरेशन, प्रसंस्करण सेटिंग्स और मॉडल संस्करण से जुड़ा रहना चाहिए। सॉफ़्टवेयर अपडेट बिना किसी जैविक परिवर्तन के अनुमानित संयुक्त स्थानों, खंड परिभाषाओं या व्युत्पन्न स्कोर को बदल सकते हैं। एक ब्रिज मूल्यांकन को दोनों संस्करणों के माध्यम से प्रतिनिधि रिकॉर्डिंग को संसाधित करना चाहिए और अनुवर्ती के लिए उपयोग किए जाने वाले अंतिम बिंदुओं में समझौते की जांच करनी चाहिए। जब परिवर्तन कार्य पर निर्भर या अरेखीय हो तो एक निश्चित संख्यात्मक सुधार अपर्याप्त होता है। सभी विज़िटों को दोबारा संसाधित करना उचित हो सकता है, लेकिन मूल और संशोधित आउटपुट अलग-अलग रहने चाहिए।

चित्र 4 अनुदैर्ध्य व्याख्या के लिए आवश्यक संस्करण-तुलना चरण दिखाते हुए माप परिवर्तनशीलता, पता लगाने योग्य परिवर्तन और रोगी-महत्वपूर्ण परिवर्तन को अलग करता है।



चित्र 4. विभिन्न सत्रों में परिवर्तन की व्याख्या करना

अनुदैर्ध्य मार्कर रहित माप की व्याख्या के लिए प्रस्तावित वर्कफ़्लो। ए, कार्य, अधिग्रहण की स्थिति, स्कोर परिभाषा, प्रसंस्करण सेटिंग्स और सॉफ्टवेयर या मॉडल संस्करण को बनाए रखें। संस्करण परिवर्तन के बाद, सभी संस्करणों में प्रतिनिधि रिकॉर्डिंग को पाटें या विज़िट को लगातार पुन: संसाधित करें, फिर अनुवर्ती के लिए उपयोग किए जाने वाले अंतिम बिंदुओं में तुलनीयता स्थापित करें। यदि तुलनीयता अनसुलझी रहती है, तो अंतर को जैविक परिवर्तन के लिए जिम्मेदार ठहराने के बजाय अलग से संस्करण रिपोर्ट करें। बी, दोहराए गए सत्र माप वास्तविक रिपोर्ट किए गए स्कोर के लिए व्यक्ति के भीतर पूर्ण त्रुटि की विशेषता बताते हैं। पता लगाने योग्य परिवर्तन चिंता माप अनिश्चितता; रोगी-महत्वपूर्ण परिवर्तन के लिए एक अलग प्रासंगिक परिणाम एंकर की आवश्यकता होती है। एक इंट्राक्लास सहसंबंध गुणांक (आईसीसी) अकेले न तो व्यक्तिगत परिवर्तन सीमा प्रदान करता है और न ही रोगी-महत्वपूर्ण अंतर प्रदान करता है। योजनाबद्ध कोई संख्यात्मक कटऑफ या सिम्युलेटेड प्रक्षेपवक्र प्रदान नहीं करता है। मापन सिद्धांत संदर्भों पर आधारित हैं [9,22-24]; संस्करण-प्रबंधन शाखा समीक्षा लेखकों का कार्यप्रणाली प्रस्ताव है।

बार-बार खड़े होकर बैठने के दौरान अधिकतम घुटने के लचीलेपन की निगरानी करने वाली एक प्रस्तावित सेवा पर विचार करें। सेवा कुर्सी की ऊँचाई, पैर की स्थिति, निर्देश, एकत्रीकरण नियम, कैमरा सेटअप और हाथ के समर्थन को परिभाषित करेगी। बार-बार दौरे से वास्तविक रिपोर्ट किए गए स्कोर की अनिश्चितता का अनुमान लगाया जाएगा, और एक अलग परिणाम एंकर नैदानिक प्रासंगिकता को संबोधित करेगा। यदि रिकॉर्डिंग में पैर शामिल नहीं हैं या प्रतिभागी किसी अनमॉडल समर्थन का उपयोग करता है, तो रिपोर्ट को प्रभावित व्याख्या को रोकने की आवश्यकता हो सकती है। यह उदाहरण एक अध्ययन और गुणवत्ता-नियंत्रण वास्तुकला को निर्दिष्ट करता है; यह स्थापित नहीं करता है कि घुटने का मोड़ अकेले ही पुनर्प्राप्ति का प्रतिनिधित्व करता है या एक मान्य सीमा प्रदान करता है।

गुणवत्ता नियंत्रण को ठोस कार्रवाई का संचार करना चाहिए। एक रिपोर्ट अपनी लागू माप अनिश्चितता के साथ एक अनुमान प्रदान कर सकती है, प्रासंगिक कार्य और संस्करण की पहचान कर सकती है, और बता सकती है कि आउटपुट अनुपलब्ध क्यों है। स्वचालित परहेज़ भ्रामक व्याख्याओं को कम कर सकता है, लेकिन यह कवरेज को भी कम करता है और रोगियों को असुविधा पहुंचा सकता है। इसलिए इसके प्रदर्शन को लाभकारी मानने के बजाय मापा जाना चाहिए। पोज़-आकलन नेटवर्क द्वारा प्रदान किए गए आत्मविश्वास को एक कैलिब्रेटेड नैदानिक संभावना के रूप में पुनः लेबल नहीं किया जाना चाहिए जब तक कि उस अंशांकन को इच्छित परिणाम के लिए प्रदर्शित नहीं किया गया हो।

धारा 11

सीमाएँ और अनुसंधान प्राथमिकताएँ

इस समीक्षा का उद्देश्यपूर्ण चयन और पूर्ण पाठ तक असमान पहुंच इसकी पूर्णता को सीमित करती है। साक्ष्य मानचित्र निचले अंगों की चाल और चयनित कार्यात्मक कार्यों पर ध्यान केंद्रित करता है, इसमें डेवलपर-संबंधित और स्वतंत्र अध्ययन दोनों शामिल हैं, और सिस्टम का पदानुक्रम स्थापित नहीं करता है। हाल के कई नैदानिक परिणाम केवल अमूर्त स्तर पर उपलब्ध थे। प्रस्तावित मार्ग एक मान्य हस्तक्षेप, पेशेवर सहमति या नियामक मानक के बजाय एक तर्कसंगत पद्धतिगत स्थिति को व्यक्त करता है।

सबसे उपयोगी अगला अध्ययन अपस्ट्रीम छवि और शारीरिक अनिश्चितता को डाउनस्ट्रीम निर्णय त्रुटि से जोड़ देगा; स्वतंत्र सेटिंग्स में चिकित्सकीय रूप से असामान्य गतिविधियों का मूल्यांकन करें; पारदर्शी हर का उपयोग करके विफलताओं और सफल आउटपुट की तुलना करें; और वास्तविक सेवा शर्तों के तहत अनुदैर्ध्य माप गुण स्थापित करें। संभावित मूल्यांकनों को यह जांच करनी चाहिए कि क्या माप मौजूदा मूल्यांकन से परे उपयोगी जानकारी जोड़ता है। सुलभ कैमरों के साथ अध्ययन में कर्मचारियों के समय, बार-बार दौरे, कंप्यूटिंग आवश्यकताओं और व्याख्या बोझ को भी मापा जाना चाहिए, क्योंकि कम अधिग्रहण लागत अकेले एक स्थायी नैदानिक सेवा स्थापित नहीं करती है।

धारा 12

निष्कर्ष

मार्कर रहित गति कैप्चर मात्रात्मक आंदोलन विश्लेषण तक पहुंच को व्यापक बना सकता है, लेकिन सत्यापन एक निर्दिष्ट आउटपुट, जनसंख्या, कार्य, सेटिंग और निर्णय से संबंधित है। अनुभवजन्य अध्ययन चयनित अनुप्रयोगों का समर्थन करते हैं जबकि चिकित्सकीय रूप से प्रासंगिक सीमाएं प्रकट करते हैं जो एकत्रित सटीकता या दोहराव आंकड़ों द्वारा अस्पष्ट होती हैं। विश्वसनीय अनुवाद के लिए शारीरिक स्पष्टता, संदर्भ-जागरूक अनुबंध विश्लेषण, क्लस्टर किए गए डेटा का उचित उपचार, पारदर्शी विफलता रिपोर्टिंग और मॉडल-विशिष्ट गतिज सत्यापन की आवश्यकता होती है। माप प्रदर्शन को सार्थक परिवर्तन और नैदानिक उपयोगिता से अलग करने से शोधकर्ताओं को सटीक दावे करने और चिकित्सकों को उनकी प्रदर्शित सीमाओं के भीतर अनुमानों की व्याख्या करने की अनुमति मिलती है।

लेखक

लेखक सूचना

स्वप्नेश तिवारी, एमडी, एमएस
संगत लेखक
जनसंख्या स्वास्थ्य विभाग, सीवीएस स्वास्थ्य, यूएसए
0009-0001-9271-1162
एनी थॉमस
सह-लेखक
पोषण और संचलन विज्ञान विभाग, भारतीय काइन्सियोलॉजी और बायोमैकेनिक्स विज्ञान संस्थान, भारत
aneethomasfitness@gmail.com
0009-0008-6730-8444
गंधर्व महाजन
सह-लेखक
तकनीकी अनुसंधान प्रभाग, MMSx Authority Institute, यूएसए
0000-0001-7809-6311
नेसरीन अधाधि, पीएचडी
सह-लेखक
पीएचडी, बायोमैकेनिक्स और व्यायाम की फिजियोलॉजी; आईएसएसईपी केफ; अल असीमाह, कुवैत
0009-0001-7842-5696
क्रिस्टोफर अल्फिरो, पीएचडी
सह-लेखक
प्रदर्शन प्रौद्योगिकी प्रभाग, इटरनल, सैन राफेल, कैलिफ़ोर्निया, यूएसए
0009-0001-9806-3506
यश माजली, एमएससी
सह-लेखक
प्रदर्शन कोच, एक्सोस; एमएससी स्पोर्ट बायोमैकेनिक्स, लॉफबोरो यूनिवर्सिटी, यूके
घोषणाएँ

घोषणाएँ

फंडिंग
इस कार्य के लिए कोई विशेष धनराशि प्राप्त नहीं हुई।

प्रतिस्पर्धी रुचियाँ
लेखक गण घोषित करते हैं कि कोई प्रतिस्पर्धी हित नहीं हैं।

नैतिकता और सहमति

यह समीक्षा प्रकाशित साहित्य का संश्लेषण करती है। यह किसी नए प्रतिभागी की भर्ती, पहचाने जाने योग्य प्रतिभागी सामग्री या व्यक्तिगत स्तर के प्रयोगात्मक डेटा संग्रह की रिपोर्ट नहीं करता है; इसलिए नैतिक अनुमोदन की आवश्यकता नहीं थी।

डेटा उपलब्धता

कोई नया प्रायोगिक डेटासेट तैयार नहीं किया गया. संदर्भ सूची में स्रोतों की पहचान की गई है। स्रोत-सत्यापन और खोज रिकॉर्ड JMMBS संपादकीय कार्यालय के पास हैं और उचित अनुरोध पर उपलब्ध हैं।

एआई-असिस्टेड टूल्स का उपयोग

एआई-सहायता प्राप्त टूल ने साहित्य खोज, भाषा संपादन, संदर्भ जांच और दस्तावेज़ तैयार करने का समर्थन किया। कोई प्रतिभागी डेटा या प्रयोगात्मक परिणाम उत्पन्न नहीं हुए। लेखकों ने सामग्री की समीक्षा और सत्यापन किया और प्रकाशित लेख की पूरी जिम्मेदारी लेते हैं।

पत्राचार

स्वप्नेश तिवारी, एमडी, एमएस - JMMBS संपादकीय कार्यालय के माध्यम से, info@jmmbs.org।

संदर्भ

संदर्भ मूल अंग्रेज़ी में यथावत दिए गए हैं।

References

1. Mündermann L, Corazza S, Andriacchi TP. The evolution of methods for the capture of human movement leading to markerless motion capture for biomechanical applications. J Neuroeng Rehabil. 2006;3:6. https://doi.org/10.1186/1743-0003-3-6
2. Corazza S, Mündermann L, Chaudhari AM, Demattio T, Cobelli C, Andriacchi TP. A markerless motion capture system to study musculoskeletal biomechanics: visual hull and simulated annealing approach. Ann Biomed Eng. 2006;34(6):1019–1029. https://doi.org/10.1007/s10439-006-9122-8
3. Uhlrich SD, Falisse A, Kidziński Ł, Muccini J, Ko M, Chaudhari AS, et al. OpenCap: Human movement dynamics from smartphone videos. PLoS Comput Biol. 2023;19(10):e1011462. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1011462
4. Wade L, Needham L, McGuigan P, Bilzon J. Applications and limitations of current markerless motion capture methods for clinical gait biomechanics. PeerJ. 2022;10:e12995. https://doi.org/10.7717/peerj.12995
5. Wu G, Siegler S, Allard P, Kirtley C, Leardini A, Rosenbaum D, et al. ISB recommendation on definitions of joint coordinate system of various joints for the reporting of human joint motion—part I: ankle, hip, and spine. J Biomech. 2002;35(4):543–548. https://doi.org/10.1016/S0021-9290(01)00222-6
6. Needham L, Evans M, Cosker DP, Wade L, McGuigan PM, Bilzon JL, et al. The accuracy of several pose estimation methods for 3D joint centre localisation. Sci Rep. 2021;11:20673. https://doi.org/10.1038/s41598-021-00212-x
7. Stenum J, Rossi C, Roemmich RT. Two-dimensional video-based analysis of human gait using pose estimation. PLoS Comput Biol. 2021;17(4):e1008935. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1008935
8. Kanko RM, Laende EK, Davis EM, Selbie WS, Deluzio KJ. Concurrent assessment of gait kinematics using marker-based and markerless motion capture. J Biomech. 2021;127:110665. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110665

9. Kanko RM, Laende E, Selbie WS, Deluzio KJ. Inter-session repeatability of markerless motion capture gait kinematics. J Biomech. 2021;121:110422. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110422
10. Nakano N, Sakura T, Ueda K, Omura L, Kimura A, Iino Y, et al. Evaluation of 3D markerless motion capture accuracy using OpenPose with multiple video cameras. Front Sports Act Living. 2020;2:50. https://doi.org/10.3389/fspor.2020.00050
11. Svetek A, Morgan K, Burland J, Glaviano NR. Validation of OpenCap on lower extremity kinematics during functional tasks. J Biomech. 2025;183:112602. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2025.112602
12. Wishaupt K, Schallig W, van Dorst MH, Buizer AI, van der Krogt MM. The applicability of markerless motion capture for clinical gait analysis in children with cerebral palsy. Sci Rep. 2024;14:11910. https://doi.org/10.1038/s41598-024-62119-7
13. Chafetz RS, Warshauer S, Waldron S, Kruger KM, Donahue S, Bauer JP, et al. Validation, characterization, and utility of markerless motion capture in a large cohort of pediatric patients with complex gait patterns. J Biomech. 2026;204:113359. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2026.113359
14. Outerleys J, Laende E, Malek M, Civiero S, Madden K, Ruder M, et al. Clinical integration of markerless motion capture: A multicentre study of gait in knee osteoarthritis. J Biomech. 2025;192:112952. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2025.112952
15. Vellucci CL, Ratke EJ, Guleria A, Beaudette SM. A deep-learning pipeline to extract clinical gait metrics from single-camera recordings. J Biomech. 2026;207:113573. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2026.113573
16. Reinschmidt C, van den Bogert AJ, Nigg BM, Lundberg A, Murphy N. Effect of skin movement on the analysis of skeletal knee joint motion during running. J Biomech. 1997;30(7):729–732. https://doi.org/10.1016/S0021-9290(97)00001-8
17. Delp SL, Anderson FC, Arnold AS, Loan P, Habib A, John CT, et al. OpenSim: open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. IEEE Trans Biomed Eng. 2007;54(11):1940–1950. https://doi.org/10.1109/TBME.2007.901024
18. Seth A, Hicks JL, Uchida TK, Habib A, Dembia CL, Dunne JJ, et al. OpenSim: Simulating musculoskeletal dynamics and neuromuscular control to study human and animal movement. PLoS Comput Biol. 2018;14(7):e1006223. https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006223
19. Hicks JL, Uchida TK, Seth A, Rajagopal A, Delp SL. Is my model good enough? Best practices for verification and validation of musculoskeletal models and simulations of movement. J Biomech Eng. 2015;137(2):020905. https://doi.org/10.1115/1.4029304
20. Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. Lancet. 1986;1(8476):307–310. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8
21. Bland JM, Altman DG. Agreement between methods of measurement with multiple observations per individual. J Biopharm Stat. 2007;17(4):571–582. https://doi.org/10.1080/10543400701329422
22. Koo TK, Li MY. A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. J Chiropr Med. 2016;15(2):155–163. https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012
23. Weir JP. Quantifying test-retest reliability using the intraclass correlation coefficient and the SEM. J Strength Cond Res. 2005;19(1):231–240. https://doi.org/10.1519/15184.1
24. Schwartz MH, Trost JP, Wervey RA. Measurement and management of errors in quantitative gait data. Gait Posture. 2004;20(2):196–203. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2003.09.011

25. Kanko RM, Outerleys JB, Laende EK, Selbie WS, Deluzio KJ. Comparison of concurrent and asynchronous running kinematics and kinetics from marker-based and markerless motion capture under varying clothing conditions. J Appl Biomech. 2024;40(2):129–137. https://doi.org/10.1123/jab.2023-0069
26. Cronin NJ. Using deep neural networks for kinematic analysis: Challenges and opportunities. J Biomech. 2021;123:110460. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110460
27. Halilaj E, Rajagopal A, Fiterau M, Hicks JL, Hastie TJ, Delp SL. Machine learning in human movement biomechanics: Best practices, common pitfalls, and new opportunities. J Biomech. 2018;81:1–11. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2018.09.009
28. Goldsack JC, Coravos A, Bakker JP, Bent B, Dowling AV, Fitzer-Attas C, et al. Verification, analytical validation, and clinical validation (V3): the foundation of determining fit-for-purpose for biometric monitoring technologies (BioMeTs). NPJ Digit Med. 2020;3:55. https://doi.org/10.1038/s41746-020-0260-4
29. Collins GS, Moons KGM, Dhiman P, Riley RD, Beam AL, Van Calster B, et al. TRIPOD+AI statement: updated guidance for reporting clinical prediction models that use regression or machine learning methods. BMJ. 2024;385:e078378. https://doi.org/10.1136/bmj-2023-078378
30. Moons KGM, Damen JAA, Kaul T, Hooft L, Andaur Navarro C, Dhiman P, et al. PROBAST+AI: an updated quality, risk of bias, and applicability assessment tool for prediction models using regression or artificial intelligence methods. BMJ. 2025;388:e082505. https://doi.org/10.1136/bmj-2024-082505
31. Vasey B, Nagendran M, Campbell B, Clifton DA, Collins GS, Denaxas S, et al. Reporting guideline for the early-stage clinical evaluation of decision support systems driven by artificial intelligence: DECIDE-AI. Nat Med. 2022;28(5):924–933. https://doi.org/10.1038/s41591-022-01772-9

उद्धरण

कृपया मूल अंग्रेज़ी लेख का हवाला दें:

Tiwari, S., Thomas, A., Mahajan, G., Adhadhii, N., Alfiero, C., & Majali, Y. (2026). Clinical Validity of Markerless Motion Capture for Biomechanical Decisions. *Journal of Movement Mechanics & Biomechanics Science*, *3*(2). https://doi.org/10.66078/jmmbs.2026.v3i2.020

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