

Ermittlung von Einflussfaktoren auf das Einsatzpotenzial inertialsensorbasierter Motion Capture-Systeme für die Ergonomieanalyse

Erik HARNAU¹, Christoph BERNIG², Stefan WAßMANN³

¹ *Institut für Arbeitswissenschaft, Fabrikautomatisierung und Fabrikbetrieb (IAF),
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (OVGU),
Universitätsplatz 2, D-39106 Magdeburg*

² *METOP Mensch-Technik-Organisation-Planung GmbH,
Sandtorstraße 23, D-39106 Magdeburg*

³ *Sachgebiet Personalentwicklung, Universitätsklinikum Magdeburg,
Leipziger Straße 44, D-39120 Magdeburg*

Kurzfassung: In der Ergonomiebewertung bestehender Arbeitsplätze bieten moderne Motion Capture-Systeme große Vorteile, u. a. im Hinblick auf Objektivität und Zeitersparnis. Zur Anwendung kommen hierfür bisher insb. optische Motion Capture-Systeme, welche sich durch eine hohe Genauigkeit auszeichnen, jedoch auch einen hohen Einrichtungsaufwand erfordern. Mehr Potenzial zum flexiblen Einsatz bieten inertialsensorbasierte Systeme, werden zu diesem Zweck aber nur selten genutzt, da sie, insbesondere bedingt durch den sog. „Drift“, als weniger reliabel gelten. Unter dem Aspekt des technologischen Fortschritts in der Sensorik in Kombination mit immer feineren Sensor-Fusions-Algorithmen soll überprüft werden, ob die erhobenen Daten tatsächlich nicht hinreichend genau zur Ergonomiebewertung sind bzw. welche Faktoren das Messergebnis negativ beeinflussen.

Schlüsselwörter: Motion Capture, MoCap, Inertialsensor, IMU, Xsens, Ergonomieanalyse

1. Problemstellung

Der stetig steigende Fachkräftemangel ist ein erhebliches Risiko für den Wirtschaftsstandort Deutschland. Nicht zuletzt deshalb sind Unternehmen zunehmend darum bemüht, ihre Mitarbeitenden gesund zu erhalten und deren Berufsunfähigkeitstage zu minimieren. Diese lagen im Jahr 2021 zu 21,5 % in Muskel-Skelett-Erkrankungen begründet (Badura 2022). In der Gestaltung neu entstehender Arbeitsplätze können heutzutage schon in der Planung hilfreiche Simulationswerkzeuge eingesetzt werden, um, neben der Prozessoptimierung, auch ergonomische Anforderungen zu berücksichtigen. In der Bewertung bereits bestehender Arbeitsplätze hingegen kommen meist noch empirische Erhebungen, mittels einer Beobachtung und der Anwendung etablierter Bewertungsverfahren (z. B. EAWS, RULA, Cuela, LMM), zum Einsatz. Neben dem hohen Zeitaufwand sind die Ergebnisse dieser beobachtungs-basierten Verfahren jedoch z. T. auch abhängig von der subjektiven Wahrnehmung sowie individuellen Erfahrung des Beobachters (Schäfer et al. 2007).

Die automatisierte Erfassung und Bewertung von Bewegungsdaten weist hier ein großes Potenzial zur Zeitersparnis sowie Qualitätssteigerung im Prozess der Ergonomieanalyse auf. Die zu diesem Zweck derzeit eingesetzten Bewegungserfassungs-

Systeme (Motion Capture-Systeme, kurz: MoCap-Systeme) basieren häufig auf kamerabasierten Verfahren. Dieses optische MoCap zeichnet sich durch eine besonders hohe Genauigkeit aus, weist jedoch auch einen hohen Einrichtungsaufwand auf. So müssen hierfür mehrere Kameras aufgestellt und kalibriert, Verdeckungen des Probanden im Testumfeld vermieden und, je nach System, Marker auf der Kleidung angebracht werden (Ciklacandir 2022).

Im Vergleich dazu bieten inertialsensorbasierte MoCap-Systeme ein wesentlich höheres Maß an Flexibilität. Bei den Systemen „MVN Link“ und „MVN Awinda“ von Xsens beispielsweise wird die Versuchsperson mit inertialen Sensoren (Inertial Measurement Unit, kurz: IMU) ausgestattet, deren Signale kabellos an ein Empfangsgerät übertragen und dort aufgezeichnet sowie ausgewertet werden. Durch den Verzicht auf externe Sensorik kann sich der Proband während der Aufzeichnung frei innerhalb der Reichweite des Empfängers bewegen, ohne Einschränkungen durch Verdeckungen oder Kamerasichtfelder. So kann die Aufzeichnung i. d. R. direkt am zu bewertenden Arbeitsplatz erfolgen, ohne die Notwendigkeit jeglicher Anpassungen an die Sensortechnik.

Die IMUs bestehen im Allgemeinen aus je drei Gyroskopen und Accelerometern, entsprechend der Koordinatenachsen ausgerichtet, zur dreidimensionalen Orientierung im Raum häufig noch um drei Magnetometer erweitert (Iosa et al. 2016). Die damit aufgezeichneten Daten werden mithilfe eines Sensor-Fusions-Algorithmus kombiniert (Bolin et al. 2016), sodass sich Lage und Ausrichtung der einzelnen Sensoren im Raum bestimmen lassen. Dass die IMU-basierten Systeme bisher kaum Anwendung zur Ergonomieanalyse finden, liegt vor allem in der geringeren Genauigkeit der Daten im Vergleich zu optischen MoCap begründet, insbesondere hervorgerufen durch den sog. „Drift“ (Zhou & Hu 2008). Diese über die Versuchsdauer auftretende Abweichung von aufgezeichneter zu realer Position wird von Zhou & Hu (2008) zum einen auf das Sensorrauschen und die Offsets der Gyroskope und Accelerometer zurückgeführt, zum anderen auf ferromagnetische Störeinflüsse auf die Magnetometer. Weiterhin wird in der Literatur auf Bewegungsartefakte, basierend auf Relativbewegungen zwischen Sensor und Oberfläche (Iosa et al. 2016), sowie den „Soft Tissue Error“, der aufgezeichneten Bewegung von Weichteilen (z. B. Haut, Muskel- und Fettgewebe) über dem ergonomisch relevanten Skelett (McGinnis et al. 2015), hingewiesen. Diese letzteren beiden Faktoren wirken jedoch bei markerbasierten MoCap-Systemen ebenso wie bei den IMU-basierten (Bolin et al. 2016).

2. Zielsetzung und Vorgehensweise

Aufgrund des technologischen Fortschritts bei der Sensorik sowie den zunehmend verfeinerten Sensor-Fusions-Algorithmen können die oben beschriebenen Ungenauigkeiten IMU-generierter Daten immer weiter reduziert werden. Im Rahmen des Dissertationsvorhabens ergeben sich daher folgende Forschungsfragen (FF):

- FF1: Können mittels IMU-basierter MoCap-Systeme hinreichend genaue Daten für eine valide Ergonomiebewertung generiert werden?
- FF2: Welche Einflussparameter gibt es, die sich auf das Messergebnis auswirken?
- FF3: Unter welchen Rahmenbedingungen ist es zu empfehlen, ein IMU-basiertes MoCap-System zur Ergonomiebewertung einzusetzen?

Zur Überprüfung der FF1 konnte in einer ersten Studie durch Harnau et al. (2022) bereits aufgezeigt werden, dass der auftretende Drift bei dem untersuchten System

„MVN Link“ durchaus innerhalb für die Ergonomiebewertung akzeptabler Grenzen liegt. Dazu wurde zwischen einem „globalen Drift“ (der Lageabweichung des gesamten Systems im Raum) und einem „lokalen Drift“ (der Lageabweichung der einzelnen Sensoren relativ zueinander) unterschieden (s. Abbildung 1). Innerhalb der 20-minütigen Versuchsdauern wurde zwar ein z. T. erheblicher globaler Drift von durchschnittlich über 700 mm aufgezeichnet, jedoch blieb der für die Ergonomiebewertung im Wesentlichen relevante lokale Drift aller betrachteten Sensoren im Durchschnitt unter 50 mm.

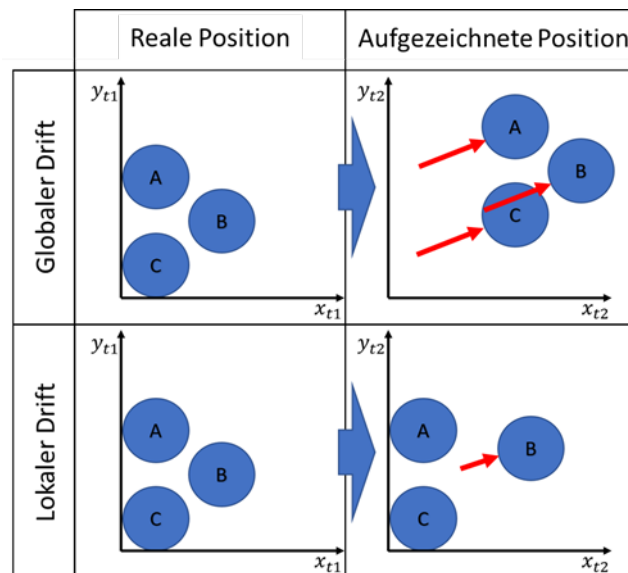


Abbildung 1: Differenzierung globaler/lokaler Drift, Verschiebung aufgezeichneter Sensorpositionen im Raum, vereinfachte zweidimensionale Darstellung (eigene Darstellung)

Zurückzuführen ist die wesentlich geringer ausfallende relative Lageabweichung vermutlich auf den Algorithmus der Analysesoftware, der die auf Grundlage der Kalibrierung erhobenen Körperverhältnisse, entsprechend des Menschmodells, beibehält und den lokalen Drift dadurch weitestgehend eliminieren kann. Daher sollte der Fokus folgend auf die Winkelabweichungen der aufgezeichneten Daten gelegt werden, auf welche sich, bei konstanten Körperproportionen des Menschmodells, die relativen Lageabweichungen womöglich direkt zurückführen lassen. Dieses Vorgehen wurde ebenso in den meisten vorausgegangenen Arbeiten verfolgt, deren Erkenntnisse im Rahmen einer strukturierten Literaturanalyse zusammengetragen und identifizierte Forschungslücken durch weitere eigene Studien gefüllt werden sollen. Als Richtwert werden weitestgehend absolute Abweichungen von unter 5° als ausreichend messgenau angegeben (McGinley et al. 2009).

Zur Beantwortung der FF2 sollte im weiteren Vorgehen ein Augenmerk daraufgelegt werden, welche äußeren Faktoren das Ergebnis beeinflussen. Bei der Verwendung von Magnetometern sind ferromagnetischen Einflüsse im Allgemeinen naheliegend (u. a. Berner et al. 2020). Auch die Bewegungsgeschwindigkeit (Lebel et al. 2013; Cottam et al. 2022) sowie die korrekte Ausführung und Häufigkeit der Kalibrierungen (Robert-Lachaine et al. 2017) wurden in spezifischen Studien bereits untersucht. Weitere Parameter könnten z. B. die Aufzeichnungsdauer, Unebenheit des Untergrunds oder konstitutionelle Körpermerkmale der Versuchsperson sein.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen soll abschließend für die FF3 abgeleitet werden, welche Rahmenbedingungen für bzw. gegen den Einsatz IMU-basierter MoCap-Systeme zur Ergonomiebewertung sprechen.

3. Untersuchungsdesign

Die Grundlage für folgende Untersuchungen bildet die strukturierte Literaturanalyse. Ein Fokus liegt hier auf die Reliabilität und Validität IMU-basierter Bewegungsdaten und die im Zuge dessen identifizierten Einflussparameter, noch unabhängig vom spezifischen Einsatzgebiet. Es gilt zu eruieren, ob die vorliegenden Studienergebnisse auf den aktuellen Stand der Technik übertragbar sind, oder neu erhoben werden müssten.

Für die auf Aktualität zu überprüfenden Studienergebnisse sowie die bisher nicht betrachteten Einflussparameter gilt es, in Laborstudien neue Daten zu erheben. Die Beurteilung der Messgenauigkeit ist innerhalb zweier unterschiedlicher Versuchsaufbauten möglich: durch die regelmäßige Einnahme räumlich fixierter Referenzpositionen innerhalb der Versuchsdauer, entsprechend der Studie von Harnau et al. im Jahr 2022 (s. Abbildung 2), oder durch die gleichzeitige Aufzeichnung der Bewegungsdaten durch das zu untersuchende IMU-basierte Messsystem sowie eines optischen Gold-Standard-MoCap-Systems (z. B. Feuvrier et al. 2020). Zwar ermöglicht die simultane Aufzeichnung beider Messsysteme eine detailliertere Datenanalyse zu beliebigen Versuchszeitpunkten, jedoch ist der Versuchsaufbau ebenso wieder den oben bereits beschriebenen Einschränkungen von optischen MoCap-Systemen unterworfen. Daher ist das Versuchsdesign jeweils entsprechend der individuellen Anforderungen zu wählen.

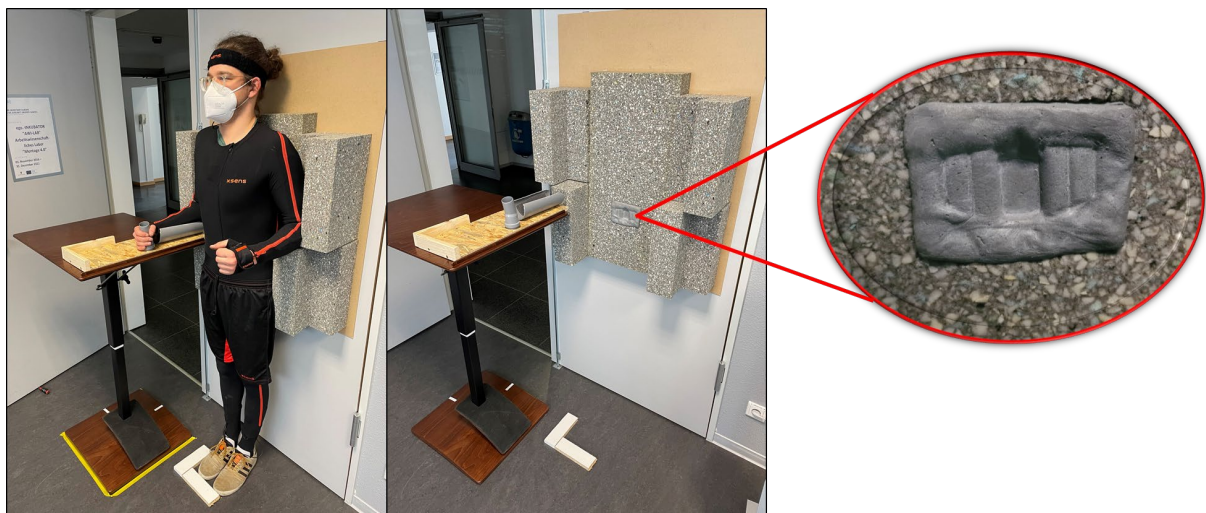


Abbildung 2: Versuchsaufbau von Harnau et al. (2022), räumlich fixierte Sensorpositionen innerhalb einzunehmender Vorrichtung (eigene Darstellung)

Die Aufzeichnung der Bewegungsdaten kann für den gesamten Körper erfolgen. In vorangegangenen Studien wurden jedoch häufig anwendungsspezifisch nur die unteren (z. B. Piche et al. 2022) oder oberen Extremitäten (z. B. Morrow et al. 2017) betrachtet. Grundsätzlich können für Ergonomiebewertungen alle aufzuzeichnenden Gelenkwinkel relevant sein, die gewonnenen Erkenntnisse können aber womöglich gleichermaßen auf die übrigen Sensordaten übertragen werden. Daher gilt es auch

hier individuell festzulegen, ob der höhere Aufwand zur Einrichtung aller verfügbaren Sensoren angebracht ist, oder mit einer Sensorauswahl bereits hinreichende Daten generiert werden können.

4. Diskussion

Ziel des gesamten Dissertationsvorhaben ist es, eine situationsspezifische Empfehlung darüber geben zu können, ob sich für ein bestimmtes Versuchsumfeld die Verwendung IMU-basierter MoCap-Systeme anbietet oder nicht. Auf dieser Basis sollen zukünftig Forschende bereits frühzeitig in ihrer Entscheidung des zu verwendenden MoCap-Systems unterstützt werden, bevor weitere anwendungsspezifische Validierungsstudien durchgeführt werden. Grundlegend dafür gilt es, die Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen strukturiert zusammenzufassen und bei Bedarf, um eigene Studien zu ergänzen. Hier ergeben sich jedoch zwei zentrale Fragen zur weiteren Verwendung identifizierter Literaturquellen:

1. Inwiefern sind die Ergebnisse von auf Basis verschiedener IMU-Systeme und damit häufig einhergehend verschiedener Sensor-Fusions-Algorithmen erhobener Daten miteinander vergleichbar?
2. Wie lang darf eine Untersuchung zurückliegen, um trotz des technologischen Fortschritts noch gegenwärtig relevante Ergebnisse zu präsentieren?

Eine weitere Hürde in der Verwendung der Literaturdaten liegt darin, dass in vielen Untersuchungen die Verwendung eines IMU-Systems für einen spezifischen Anwendungsfall validiert wurde, ohne objektiv die den Messabweichungen zugrunde liegenden Einflussparameter zu identifizieren.

5. Literatur

- Badura B, Ducki A, Meyer M, Schröder H (2022) Fehlzeiten-Report 2022. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (2022).
- Berner K, Cockcroft J, Morris LD, Louw Q (2020) Concurrent validity and within-session reliability of gait kinematics measured using an inertial motion capture system with repeated calibration. In: Journal of Bodywork and Movement Therapies 24 (4), S. 251–260. DOI: 10.1016/j.jbmt.2020.06.008.
- Bolink SAAN, Naisas H, Senden R, Essers H, Heyligers IC, Meijer K, Grimm B (2016) Validity of an inertial measurement unit to assess pelvic orientation angles during gait, sit-stand transfers and step-up transfers: Comparison with an optoelectronic motion capture system. In: Medical engineering & physics 38 (3), S. 225–231. DOI: 10.1016/j.medengphy.2015.11.009.
- Ciklacandir S, Ozkan S, Isler Y (2022) A Comparison of the Performances of Video-Based and IMU Sensor-Based Motion Capture Systems on Joint Angles. In: 2022 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU). 2022 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU). Antalya, Turkey, 07.09.2022–09.09.2022: IEEE, S. 1–5.
- Cottam DS, Campbell AC, Davey PC, Kent P, Elliott BC, Alderson JA (2022) Measurement of uni-planar and sport specific trunk motion using magneto-inertial measurement units: The concurrent validity of Noraxon and Xsens systems relative to a retro-reflective system. In: Gait & Posture 92, S. 129–134. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2021.11.012.
- Feuervier F, Sijobert B, Azevedo C, Griffiths K, Alonso S, Dupeyron A, Laffont I, Froger J (2020): Inertial measurement unit compared to an optical motion capturing system in post-stroke individuals with foot-drop syndrome. In: Annals of physical and rehabilitation medicine 63 (3), S. 195–201. DOI: 10.1016/j.rehab.2019.03.007.
- Harnau E, Waßmann S, Bernig C (2022) Untersuchung des Einsatzpotentials eines Inertialsensorsystems zur Motion Capture-basierten Ergonomieanalyse. In: Technologie und Bildung in hybriden Arbeitswelten. Sankt Augustin: GfA-Press.

- Iosa M, Picerno P, Paolucci S, Morone G (2016) Wearable inertial sensors for human movement analysis. In: Expert review of medical devices 13 (7), S. 641–659. DOI: 10.1080/17434440.2016.1198694.
- Lebel K, Boissy P, Hamel M, Duval C (2013) Inertial measures of motion for clinical biomechanics: comparative assessment of accuracy under controlled conditions - effect of velocity. In: PloS one 8 (11), e79945. DOI: 10.1371/journal.pone.0079945.
- McGinley JL, Baker R, Wolfe R, Morris ME (2009) The reliability of three-dimensional kinematic gait measurements: a systematic review. In: Gait & Posture 29 (3), S. 360–369. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2008.09.003.
- McGinnis RS, Cain SM, Tao S, Whiteside D, Goulet GC, Gardner EC, Bedi A, Perkins NC (2015) Accuracy of Femur Angles Estimated by IMUs During Clinical Procedures Used to Diagnose Femoroacetabular Impingement. In: IEEE transactions on bio-medical engineering 62 (6), S. 1503–1513. DOI: 10.1109/TBME.2015.2392758.
- Morrow MMB, Lowndes B, Fortune E, Kaufman KR, Hallbeck MS (2017) Validation of Inertial Measurement Units for Upper Body Kinematics. In: Journal of applied biomechanics 33 (3), S. 227–232. DOI: 10.1123/jab.2016-0120.
- Piche E, Guilbot M, Chorin F, Guerin O, Zory R, Gerus P (2022) Validity and repeatability of a new inertial measurement unit system for gait analysis on kinematic parameters: Comparison with an optoelectronic system. In: Measurement 198, S. 111442. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111442.
- Robert-Lachaine X, Mecheri H, Larue C, Plamondon A (2017) Accuracy and repeatability of single-pose calibration of inertial measurement units for whole-body motion analysis. In: Gait & Posture 54, S. 80–86. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2017.02.029.
- Schäfer E, Buch M, Pahls I, Pfitzmann J (2007) Arbeitsleben! Arbeitsanalyse – Arbeitsgestaltung – Kompetenzentwicklung. Kassel: kassel university press GmbH.
- Zhou H, Hu H (2008): Human motion tracking for rehabilitation—A survey. In: Biomedical Signal Processing and Control 3 (1), S. 1–18. DOI: 10.1016/j.bspc.2007.09.001.



Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Nachhaltig Arbeiten und Lernen

**Analyse und Gestaltung lernförderlicher
und nachhaltiger Arbeitssysteme
und Arbeits- und Lernprozesse**

69. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

01. – 03. März 2023

GfA-Press

Bericht zum 69. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 01. – 03. März 2023

**Fakultät Maschinenbau, Institut für Berufswissenschaften der Metalltechnik (IBM) und
Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA), Leibniz Universität Hannover**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Sankt Augustin: GfA-Press, 2023
ISBN 978-3-936804-32-4

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle (s. u.) erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© GfA-Press, Sankt Augustin

Schriftleitung: Prof. Dr. Rolf Ellegast

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Geschäftsstelle der GfA

Simone John, Tel.: +49 (0)30 1300-13003

Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin

info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de · www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de

Screen design und Umsetzung

© 2023 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de