

# Verwendung von Inertialsensoren zur automatisierten Auswertung sensomotorischer Tests

Niklas Rother<sup>a</sup>, Fritz Webering<sup>a</sup>, Cornelius John<sup>b</sup>, Anna Lina Rahlf<sup>b</sup>, Daniel Hamacher<sup>b</sup>, Astrid Zech<sup>b</sup>, Holger Blume<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Leibniz Universität Hannover; <sup>b</sup>Friedrich-Schiller-Universität Jena

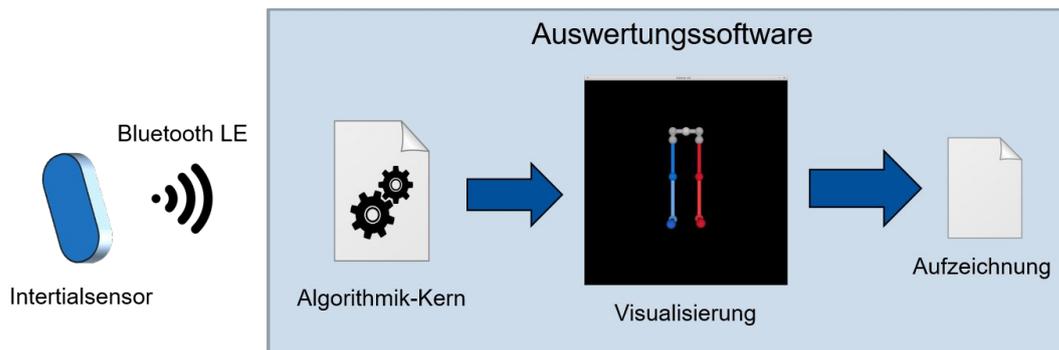
**Zusammenfassung.** Um die sensomotorische Leistungsfähigkeit von Sportlern zu evaluieren, gibt es verschiedene sportwissenschaftliche Standardtests, wie zum Beispiel den Y-Balance-Test (YBT). Allerdings ist bei vielen dieser Verfahren ein Tester nötig, der die Durchführung leitet und das Ergebnis bestimmt. In dieser Arbeit wird der Ansatz für ein System auf Basis von Inertialsensoren (IMUs) vorgestellt, durch das die Auswertung verschiedener im Bereich der Sportwissenschaften gängiger Tests automatisiert werden kann. Implementiert wurde der YBT und die aktive Winkelreproduktion. Durch die Automatisierung muss während des Tests kein Tester mehr anwesend sein, wodurch beispielsweise Freizeitsportler, Leistungssportler, Trainer, Vereine, aber auch Forschungseinrichtungen in die Lage versetzt werden, diese Tests jederzeit durchzuführen. Durch die Verwendung von IMUs, die ihre eigene Ausrichtung als Quaternion schätzen, wird im vorgestellten System die aktuelle Pose der Knochen im Skelett des Nutzers berechnet. Aus diesen werden dann die verschiedenen Testergebnisse, wie Gelenkwinkel oder die Position einzelner Extremitäten, bestimmt. Als Plattform kommt ein mobiles Gerät zum Einsatz, auf dem die Berechnung und die Visualisierung in Echtzeit erfolgen.

## 1. Einleitung

Die Sensomotorik ist eine wesentliche Grundlage zur Kontrolle von Haltung und Bewegung. Damit ist die sensomotorische Regulationsfähigkeit im sportlichen Kontext für die Leistungsfähigkeit ausschlaggebend. Eine eingeschränkte sensomotorische Kontrolle, z.B. bedingt durch Ermüdung, Verletzung oder Erkrankung, resultiert in einer verminderten Leistungsfähigkeit (Proske & Gandevia, 2012). Ein einfacher Weg, diese Regulationsfähigkeit zu messen, wäre folglich für alle Anwender interessant, die sich mit der Leistungsfähigkeit von Sportlern befassen. Das in diesem Paper vorgestellte System hat das Ziel, einen solchen Weg zur Verfügung zu stellen.

## 2. Auswahl der sensomotorischen Testverfahren

Zur Quantifizierung der sensomotorischen Regulationsfähigkeit von Sportlern haben sich im Laufe der Jahre verschiedene Tests etabliert. Hierzu zählen unter anderem funktionelle Tests zur Bewertung der dynamischen Gleichgewichtsfähigkeit oder der Propriozeption. Ein reliables sowie valides Instrument zur Bewertung der dynamischen Gleichgewichtsfähigkeit ist der Y-Balance-Test (YBT; Gribble et al., 2012; Plisky et al., 2009; Schaffer et al, 2013). Dazu wird der Boden mit drei Linien in der Form eines umgedrehten „Y“ markiert. Die Markierungen stehen für die Bewegungsrichtungen: anterior, posteromedial und posterolateral. Zur Testdurchführung steht der Proband einbeinig auf dem zu testenden Bein (Standbein) in der Mitte des „Y“. Die Aufgabe des Probanden



**Abbildung 1:** Übersicht über das Messsystem. Die vom Intertialsensor ermittelten Daten werden per Bluetooth Low Energy übermittelt. Anschließend wird die Körperpose rekonstruiert und mit Hilfe eines virtuellen Skeletts virtualisiert. Zur nachträglichen Auswertung werden die Daten aufgezeichnet.

ist es, das kontralaterale Bein (Spielbein) so weit wie möglich in die Bewegungsrichtungen zu bewegen. Für jede Bewegungsrichtung wird die maximale Reichweite registriert.

Zur Beurteilung der Propriozeption eignen sich unter anderem Winkelreproduktionstests. Bei diesen Tests wird der Stellungssinn der Gelenke als ein Aspekt der Propriozeption untersucht. Es existieren eine Reihe von Studien, die sich mit der Erhebung des Stellungssinns beschäftigt haben (Lönn et al., 2000; Desphande et al., 2003; You et al., 2005; Arvin et al., 2015). Bisher hat sich jedoch noch keine praktikable und kostengünstige Methode etabliert, die den Gütekriterien entspricht. Die Beurteilung der aktiven Winkelreproduktion anhand eines IMU-basierten Systems wird in der aktuellen Literatur unzureichend beschrieben. Die Untersuchungsdurchführung für den aktiven Winkelreproduktionstests zur Bewertung des Stellungssinn wird im Folgenden für das Kniegelenk beschrieben: Der Proband wird durch einen Tester aufgefordert das Kniegelenk so weit zu beugen, bis der Tester „stopp“ sagt. Der Kniegelenkwinkel wird als Zielwinkel registriert. Nach dem Rückführen des Kniegelenks in die Nullposition nimmt der Proband den zuvor festgelegten Winkel eigenständig erneut ein (Arvin et al., 2015). Als Parameter wird die Differenz zwischen Zielwinkel und reproduziertem Winkel analysiert.

### 3. Implementierung des Messsystems

Wie in Abb. 1 zu sehen, besteht das Gesamtsystem aus den am Patienten angebrachten Intertialsensoren, sowie einer Auswertungs- und Visualisierungssoftware. Diese beiden Teile werden im Folgenden beschrieben.

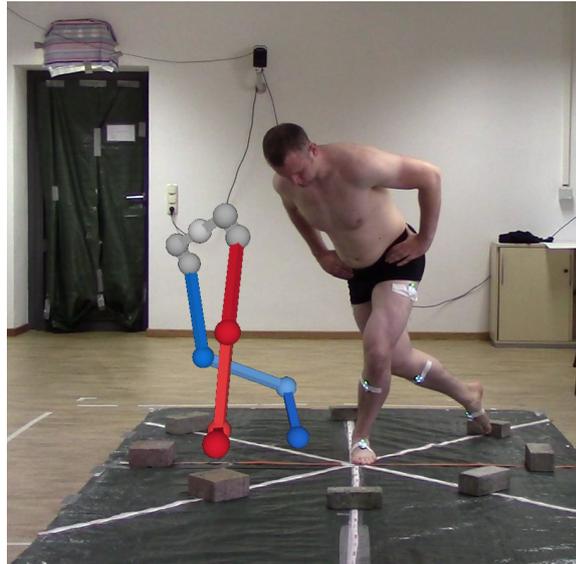
Bei den verwendeten Intertialsensoren, welche in Abb. 2 zu sehen sind, handelt es sich um Prototypen der Firma EvoSense. Die Module erfassen ihre aktuelle Ausrichtung im Raum mit Hilfe eines Sensorfusionsalgorithmus, der die Daten eines Beschleunigungssensors und eines Gyroskops auswertet. Die so berechnete Lage wird in Form



**Abbildung 2:** Die verwendete Inertialsensoreinheit mit 1-Euro-Münze als Größenvergleich.

eines Quaternions zusammen mit der aktuellen Beschleunigung bei bis zu 100Hz an ein Auswertungssystem übertragen. Die Kommunikation erfolgt über Bluetooth Low Energy.

Die Verarbeitung der Messdaten erfolgt mit dem Modell einer kinematischen Kette. Wie Abb. 3 zeigt, wird in diesem Modell der für den jeweiligen Test relevante Teil des menschlichen Skeletts digital modelliert. Die dafür nötigen Knochenlängen werden vor Beginn des Tests am Patienten erfasst. Jedem virtuellen Knochen wird ein Inertialsensor zugeordnet, der am entsprechenden Körperteil des Patienten befestigt ist. Jegliche Bewegungen des Benutzers werden auf das virtuelle Skelett übertragen. Mit Hilfe der Analysesoftware können an diesem digitalen Körpermodell beliebige Abstände und Winkel berechnet werden.



**Abbildung 3.** Proband führt den YBT durch. Gleichzeitig wird das virtuelle Skelettmodell dargestellt, welches in Echtzeit mit Hilfe der am Körper befestigten Inertialsensoren erzeugt wird.

### 3.1 Kalibrierung der Sensorposition

Vor der Verwendung des Systems ist eine Kalibrierung notwendig. Bei diesem Vorgang wird die Ausrichtung der Sensoren am Körper bestimmt. Durch die Kalibrierung ist die vom System erzielbare Genauigkeit nicht dadurch beschränkt, dass die Sensoren präzise in einer festgelegten Ausrichtung am Körper angebracht werden müssen. Statt dessen kann die Anbringung der Sensoren in einer beliebigen Orientierung erfolgen.

Zur Durchführung der Kalibrierung nimmt der Benutzer nacheinander die in Abb. 4 gezeigten Positionen ein. Die Posen unterscheiden sich durch eine Drehung des gesamten Körpers um circa  $45^\circ$  um die Querachse, wobei der genaue Winkel nicht ausschlaggebend für die Genauigkeit der Kalibrierung ist. Um die Lage der Lage der Sensoren am Körper zu



**Abbildung 4.** Die erste (links) und zweite (rechts) Pose zur Kalibrierung des Systems. Mit Hilfe dieser beiden Posen kann die Anbringung aller Sensoren vollständig bestimmt werden. Beide Posen unterscheiden sich durch eine Drehung von etwa  $45^\circ$  um die Querachse.

bestimmen, wird in beiden Posen die Richtung der Erdbeschleunigung gemessen (Palermo et. al. 2014).

### 3.2 Y-Balance-Test

Das für den Y Balance Tests (YBT) modellierte Skelett besteht aus sieben Segmenten: Dem Sacrum, den beiden Tibiae und Femora sowie den beiden Füßen (vgl. Abb. 3). Entsprechend werden sieben Intertialsensoreinheiten benötigt, die an den jeweiligen Körpersegmenten befestigt werden. Die für diesen Test gemessene Größe ist der Abstand zwischen den beiden Großzehen.



**Abbildung 5:** Der Proband führt die aktive Winkelreproduktion aus. Gleichzeitig wird das virtuelle Skelett gezeigt. Zur Kontrolle der Genauigkeit wird der Gelenkwinkel von der Testleitung mit einem Goniometer gemessen.

### 3.3 Aktive Winkelreproduktion

Für dieses sensomotorische Testverfahren wird ein Skelett bestehend aus Femur und Tibia verwendet (vgl. Abb. 5). Entsprechend werden nur zwei Intertialsensoren benötigt, die an Ober- und Unterschenkel befestigt werden. Die Kalibrierung erfolgt analog zum YBT. Die ausgegebene Messgröße ist der Winkel zwischen Tibia und Femur.

## 4. Evaluation

### 4.1 Genauigkeit unter idealen Bedingungen

Zur Evaluation der prinzipiell möglichen Genauigkeit wurde eine Messreihe mit einem UR5-Roboterarm von Universal Robots (vgl. Abb. 6) durchgeführt. Vier Intertialsensoren wurden an den Achsen des Roboterarms befestigt und so die Bewegungen auf ein dem Roboter entsprechendes Skelettmodell in der Software übertragen. Der Roboterarm verfügt über eine integrierte Sensorik, mit der die Position des Endeffektors auf 0,1 mm genau bestimmt werden kann (Universal Robots, 2016). Diese Werte wurden mit der über die Intertialsensoren bestimmten Position verglichen. Es wurden dabei Trajektorien in Form eines Dreiecks und eines Kreises verwendet. Wie Abb. 7 zeigt, stimmen vom Roboter gemessene und über die Intertialsensoren bestimmte Position gut überein. Die detaillierte Auswertung in Tab. 1 zeigt einen durchschnittlichen Fehler (Bias) von 11,3 mm (Dreieck) bzw. 22,9 mm (Kreis). Die 95%-Konfidenzintervalle (Limits of Agreement, LoA) von 9,2 mm bzw. 16,4 mm zeigen zudem, dass das System stabil arbeitet. Messreihen mit verschiedenen Bewegungsgeschwindigkeiten haben keine signifikanten Unterschiede gezeigt.

Trajektorie	Geschwindigkeit [mm/s]	Bias [mm]	LoA [mm]
Dreieck	250	11,3	9,2
Kreis	250	22,9	16,4

**Tabelle 1:** Genauigkeit des Messsystems im Roboterversuch. Dargestellt ist der Mittelwert (Bias) und das 1,96-fache der Standardabweichung (Limits of Agreement, LoA) der Differenzen der Endeffektorposition.

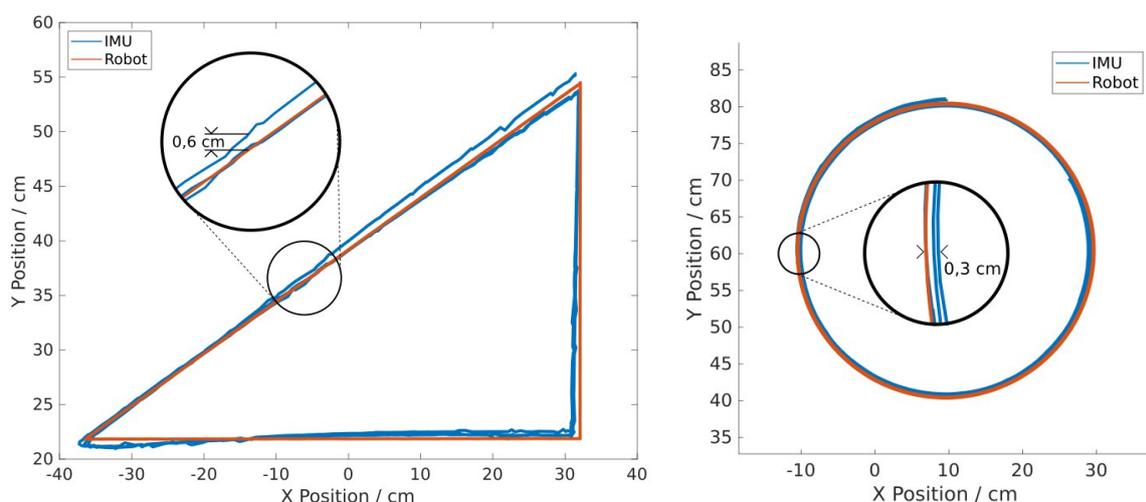
## 4.2 Genauigkeit unter realen Bedingungen

Um eine erste Abschätzung der Genauigkeit des IMU-Systems in der Praxis zu erhalten, wurde eine Einzelfallanalyse am Menschen vorgenommen. Für den YBT wurden sieben Sensoren an den in 3.2 genannten anatomischen Punkten appliziert. Die Positionsbestimmung erfolgte über das oben beschriebene Modell der kinematischen Kette. Zur Überprüfung des IMU-Systems wurden für jede Testrichtung die Reichweiten durch mechanische Begrenzungen vorgegeben (vgl. Tab. 2). Anschließend wurden durch einen Probanden diese vorgegebenen Reichweiten zehn mal je Testrichtung realisiert. Die durch das IMU-System gemessenen Reichweiten wurden mit den vorgegebenen Reichweiten verglichen. Tabelle 2 stellt die systematischen (Bias) und zufälligen (LoA) Fehler des Messsystems mit der Bland-Altman-Methode dar. Während die Reichweiten in die anteriore und posteromediale Richtung systematisch leicht überschätzt werden, wird das Ergebnis in die posterolaterale Richtung mit im Mittel 74 mm deutlich unterschätzt. Der zufällige Fehler des Messsystems bewegt sich im Bereich zwischen 26 und 40 mm.



**Abbildung 6:** Roboterarm UR5 von Universal Robots mit angebrachten Inertialsensoren (unter schwarzen Klebeband). Der vierte Sensor befindet sich am der Rückseite des Kopfs.

Insbesondere für die posteromediale sowie posterolaterale Bewegungsrichtung erscheinen die Ergebnisse aufgrund der relativ geringen LoA zunächst vielversprechend. Da es sich hierbei jedoch um eine erste Einzelfallanalyse handelt, ist als Voraussetzung für den



**Abbildung 7:** X-Y Darstellung der ermittelten Trajektorien (links Dreieck, rechts Kreis). Rot darstellt ist die Messung des Roboters, blau die mit Hilfe der IMUs rekonstruierte. Die Vergrößerung zeigt die mit dem schwarzen Kreis markierten Stellen. Bis auf kleine Ungenauigkeiten konnte die Position korrekt ermittelt werden.

.....

sportpraktischen Einsatz des IMU-Systems die Reliabilität in weiteren Studien mit größeren Stichproben differenzierter zu analysieren.

Testrichtung	Testweite [mm]	Bias [mm]	LoA [mm]
Anterior	650	-7	40
Posteromedial	1000	-20	30
Posterolateral	900	74	26

**Tabelle 2.** Reliabilität des Messsystems beim Y-Balance-Test (YBT). Dargestellt ist der Messfehler des Messsystems bei der Messung von durch Begrenzungen vorgegebenen Testweiten. Zur Datenauswertung wurde die Bland-Altman-Methode genutzt. Der Bias entspricht dem Mittelwert aus den Differenzen von vorgegebener Reichweite und gemessener Reichweite (systematischer Fehler). Die „Limits of Agreement“ (LoA, zufälliger Messfehler) sind als 1,96-fache Standardabweichung der Differenzen definiert. Die Analyse basiert auf 10 Messungen je Testrichtung bei einem Probanden.

## 5. Zusammenfassung

Es wurde ein Inertialsensor-basiertes System zur automatischen Auswertung von sensomotorischen Testverfahren vorgestellt. Das System erlaubt durch die automatische Kalibrierung eine beliebige Anbringung der Sensoren am Körper und unterstützt eine Visualisierung der Daten in Echtzeit. Durch die flexible Definition des verwendeten Skeletts ist eine Anpassung auf unterschiedliche Testverfahren möglich.

Die theoretisch erreichbare Genauigkeit des Systems wurde mit Hilfe eines Robotersystems zu weniger als 2,3 cm bestimmt. In einer praktischen Messreihe am Menschen wurde ein zufälliger Fehler von 2,6 cm bis 4,0 cm ermittelt, wobei in je nach Richtung ein systematischer Fehler von 0,7 cm bis 7,4 cm auftritt.

## 6. Ausblick

Eine Ausweitung des System auf weitere sensomotorische Testverfahren ist geplant . Wie in Abschnitt 3 dargestellt, kann das verwendete virtuelle Skelett flexibel an verschiedene Anforderungen angepasst werden. Die Implementierung für die aktive Winkelreproduktion wurde bereits vorgenommen, die Evaluation der erreichbaren Genauigkeit steht hier aber noch aus. Neben der reinen Messung von Entfernungen und Winkeln ist aber etwa auch eine Sonifikation der aktuellen Skelettpose, beispielsweise zur Verwendung in der Schlaganfallrehabilitation, möglich (Brückner, 2015).

## 7. Literaturverzeichnis

- Arvin, M., Hoozemans, M., Burger, B.J., Verschueren, S.M., van Dieen, J.H., & Pijnappels, M. (2015). Reproducibility of a knee and hip proprioception test in healthy older adults. *Aging clinical and experimental research*, 27(2), 171-177.
- Brückner, H.P., (2015). Design und Evaluation von Hardware-Architekturen zur mobilen Sonifikation von Bewegungen in der Schlaganfallrehabilitation. Verlag Dr. Hut, München.
- Deshpande N., Connelly D.M., Culham E.G., Costigan P.A. (2003) Reliability and validity of ankle proprioceptive measures. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 84(6), 883-889.
- Lönn J., Crenshaw A., Djupsjöbacka M., Johansson H. (2000) Reliability of position sense testing assessed with a fully automated system. *Clinical physiology (Oxford, England)*, 20(1), 30-37.

- Gribble, P.A., Hertel, J., & Plisky, P. (2012). Using the Star Excursion Balance Test to assess dynamic postural-control deficits and outcomes in lower extremity injury: a literature and systematic review. *Journal of athletic training*, 47(3), 339-357.
- Palermo, E., Rossi, S., Marini, F., Patanè, F. & Cappa, P. (2014). Experimental evaluation of accuracy and repeatability of a novel body-to-sensor calibration procedure for inertial sensor-based gait analysis. *Journal of the International Measurement Confederation*, 52, 145-155.
- Plisky, P., Gorman, P.P., Butler, R.J., Kiesel, K., Underwood, F.B., & Elkins, B. (2009). The reliability of an instrumented device for measuring components of the star excursion balance test. *North American journal of sports physical therapy*, 4(2), 92.
- Proske, U., & Gandevia, S.C. (2012). The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiological reviews*, 92(4), 1651-1697.
- Schaffer, S.W., Teyhen, D.S., Lorensen, C.L., Warren, R.L., Koreerat, C.M. Straseske, C.A., & Childs, J.D. (2013). Y-balance test: a reliability study involving multiple raters. *Military medicine*, 178(11), 1264-1270.
- Universal Robots (2016). UR5 Technical specifications, [https://www.universal-robots.com/media/50588/ur5\\_en.pdf](https://www.universal-robots.com/media/50588/ur5_en.pdf) (abgerufen am 21.09.2018)
- You S.H. (2005) Joint position sense in elderly fallers: a preliminary investigation of the validity and reliability of the SENSERite measure. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 86(2), 346-352.