

Entwicklung und Evaluierung eines Inertialsensors zur Erfassung von Bewegungsdaten im Trialsport

Larena Hees (2025) | Masterarbeit Sportwissenschaft M.Sc. | Universität Tübingen, Arbeitsbereich für Trainings- und Bewegungswissenschaft | Prof. Dr. Veit Wank

Forschungsproblem und zentrale Forschungsfrage:

Inertialsensoren (IMUs) werden in der Sportwissenschaft vielseitig eingesetzt, bislang jedoch vor allem für zyklische Bewegungen unter kontrollierten Laborbedingungen. Ein Transfer in die sportartspezifische Praxis hochdynamischer, nicht-zyklischer Sportarten erfolgt bisher kaum. Stationäre Systeme wie 3D-Analysen können für diesen Anwendungskontext präzise Ergebnisse liefern. Diese sind im Trainingsalltag jedoch zu aufwendig oder zu kostenintensiv. Besonders in technisch anspruchsvollen Disziplinen mangelt es für das tägliche Training an praxistauglicher, objektiver Rückmeldung zu leistungsrelevanten Bewegungsparametern. Ob IMUs diese Lücke schließen können, wird in dieser Arbeit exemplarisch am Beispiel der Sportart Fahrradtrial untersucht. Die zentrale Forschungsfrage lautet: Kann ein selbst entwickelter IMU-Prototyp eine valide und zuverlässige Grundlage für die kinematische Bewegungsanalyse im Fahrradtrial bieten?

Theoretisch-konzeptioneller Hintergrund:

Die Arbeit ist als erste Einschätzung zur Praxistauglichkeit von IMUs im Fahrradtrial angelegt und nutzt deshalb ein praxisnahes Vorgehen. Ausgangspunkt war die Analyse der sportartspezifischen Bewegungsanforderungen im Fahrradtrial, um relevante Parameter zu identifizieren. Zentral für das methodische Vorgehen waren die theoretischen Grundlagen der Intertialsensorik. Hier wurden die Verfahren Sensorfusion, Kalibrierung, Filterung und Driftkorrektur an die sportspezifischen Bedingungen angepasst. Der Forschungsstand zeigt, dass mit steigender Dynamik, besonders bei Geschwindigkeitsdaten, das Fehlerrisiko zunimmt. Daher wurden kleinschrittige Signalanalysen durchgeführt und auf standardisierte Verfahren verzichtet. Stattdessen standen Flexibilität und Kontrolle im Vordergrund, auch als Reaktion auf die häufig kritisierte Intransparenz in der IMU-Datenverarbeitung.

Forschungsdesign und Methodik:

Zunächst wurde ein IMU-Prototyp entwickelt, bestehend aus Sensoreinheit, Microkontroller, Akku und 3D-gedruckten Gehäuse, gesteuert über eine App. Die Datenerhebung basierte auf einem Hinterradsprung zwischen zwei Hindernissen als zentralem Bewegungsmuster im Fahrradtrial und erfolgte in zwei Schritten: Zunächst

wurde das System anhand eines einzelnen Sprungs durch den Abgleich mit einem videobasierten, markerlosen Referenzsystem (SIMI) validiert. Anschließend wurde die technische Stabilität im Rahmen einer Intra-Session-Reliabilitätsprüfung über mehrere Sprünge gegen den durchschnittlichen Signalverlauf überprüft. Die Auswertung der Daten erfolgte mit einer eigens entwickelten MATLAB-Pipeline zur Synchronisation und Rekonstruktion zentraler Bewegungsparameter. Analysiert wurde die Geschwindigkeit (X- und Z-Achse), sowie der Neigungswinkel des Fahrrades, ergänzend dazu qualitative Beobachtungen weiterer Parameter, wie Beschleunigungen und Gyroskopdaten.

Ergebnisse und Diskussion:

Die Hardware sowie deren Montage erwiesen sich als funktional und robust. Das System erreichte stabile Abtastraten von 400 Hz. In der Validierung wiesen insbesondere der Neigungswinkel ($CMC = 0,843$) und die Geschwindigkeit in Fahrtrichtung ($CMC = 0,905$) eine hohe Übereinstimmung mit dem Referenzsystem auf. Abweichungen zeigten sich dagegen bei der Vertikalgeschwindigkeit vermehrte Ausreißer sowie eine systematische Überschätzung des Neigungswinkels ($RMSE = 9,11^\circ$) und einem Dynamikverlust in den Geschwindigkeitsverläufen ($RMSE 0,52\text{--}0,69 \text{ m/s}$). Die Reliabilitätsanalysen bestätigten eine sehr hohe Wiederholungsgenauigkeit ($CMC > 0,95$). Neigungswinkel und Geschwindigkeitsverläufe zeigten sich als praxisnahe Kenngrößen zur Bewertung von Technik und Bewegungsstrategien im Training.

Implikationen und Schlussfolgerungen:

Trotz IMU-typischer Messabweichungen erwies sich das System als praxistauglich und valide für den Einsatz in einer hochdynamischen, nicht-zyklischen Sportart. Die Arbeit liefert einen ersten, praxisnahen Beitrag zur Anwendung von IMUs im Trialsport und zeigt eine mögliche Grundlage für Feedbacksysteme in anderen technischen Sportarten auf.

Schlagwörter: Inertialsensorik, Feedbacksystem, Bewegungsanalyse, Fahrradtrial

Schlüsselreferenzen:

- Bland, J. M., & Altman, D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, 327(8476), 307–310. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8)
- Camomilla, V., Bergamini, E., Fantozzi, S., & Vannozzi, G. (2018). Trends Supporting the In-Field Use of Wearable Inertial Sensors for Sport Performance Evaluation: A Systematic Review. *Sensors*, 18(3), 873. <https://doi.org/10.3390/s18030873>
- Ferrari, A., Cutti, A. G., Garofalo, P., Raggi, M., Heijboer, M., Cappello, A., & Davalli, A. (2010). First in vivo assessment of “Outwalk”: A novel protocol for clinical gait analysis based on inertial and magnetic sensors. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 48(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11517-009-0544-y>
- James, D. A. (2006). The Application of Inertial Sensors in Elite Sports Monitoring. In E. F. Moritz & S. Haake (Hrsg.), *The Engineering of Sport 6* (S. 289–294). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-0-387-45951-6_52
- Kadaba, M. P., Ramakrishnan, H. K., Wootten, M. E., Gainey, J., Gorton, G., & Cochran, G. V. B. (1989). Repeatability of kinematic, kinetic, and electromyographic data in normal adult gait. *Journal of Orthopaedic Research*, 7(6), 849–860. <https://doi.org/10.1002/jor.1100070611>
- Prisco, G., Pirozzi, M. A., Santone, A., Esposito, F., Cesarelli, M., Amato, F., & Donisi, L. (2024). Validity of wearable inertial sensors for gait analysis: A systematic review. *Diagnostics*, 15(1), 36. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15010036>
- Zeng, Z., Liu, Y., Hu, X., Tang, M., & Wang, L. (2022). Validity and Reliability of Inertial Measurement Units on Lower Extremity Kinematics During Running: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Medicine - Open*, 8(1), 86. <https://doi.org/10.1186/s40798-022-00477-0>