

Performance Analysis of Human Movement Using Body-Worn Sensors

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

ANNA CHRISTINA STROHRMANN

Dipl. -Ing., TU Kaiserslautern, Germany
born 30 April 1987
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Gerhard Tröster, ETH Zürich, examiner
Prof. Anind K. Dey, Carnegie Mellon University, co-examiner
PD Dr. Hubertus J. van Hedel, co-examiner

2013

Abstract

Movement performance might decide over victory or defeat. Poor movement performance in sports increases the risk of sustaining an injury while performance improvement due to targeted rehabilitation movements has the potential to increase the quality of life. These are just some examples to illustrate the importance of movement performance analysis. Movement performance is especially critical in the fields of sports and rehabilitation. The state-of-the-art approach uses optical motion capture and ground reaction force measurements to capture the performed movement with high accuracy. However, these systems are constrained to a specific environment and do not allow for monitoring outside. The large amounts of data limit the monitoring time and access to such systems is usually limited to elite athletes or clinicians.

To overcome these issues, we investigated the use of wearable technology for performance analysis of human movement. This work comprises seven scientific publications that address the four aims of the work: (1) to investigate the use of wearable technology for unobtrusive movement assessment; (2) to investigate performance analysis using kinematic parameters; (3) to investigate a data-driven approach for an integrated analysis of human movement; and (4) to provide feedback for performance improvement.

For everyday life applicability, wearable sensors need to be unobtrusive, accurate, and unconstrained. To meet these aims, we conducted a study with 21 runners who wore 12 inertial measurement units (IMUs) during different runs. Runners did not feel restricted in their movements and perceived the sensors as comfortable to wear despite the present dynamics. As most comfortable the sensors on the feet, wrists, and back were perceived and as most perturbing the ones on the thighs.

We further developed algorithms to extract kinematic parameters from the sensor data in order to discriminate between experienced and inexperienced runners. We could reduce the sensor setup from 12 to 2 sensors (on the foot and the lower back) for this task. Despite its popularity, running is considered to be a high injury risk sport with 65 % of runners being injured per year. Movement sciences researchers found that fatigue alters the running kinematics, which increases the injury risk. To monitor fatigue during prolonged running outdoors, we conducted a study with 21 runners that followed a protocol which ensured they fatigued. We monitored their full body movement using 12 IMUs. We developed algorithms to extract kinematic parameters from the

sensor data. The results showed that changes with fatigue were not only depending on the individual and her skill level but also on the surface conditions (i.e. treadmill vs overground). Runners' step frequency e.g. decreased with fatigue on the treadmill but remained constant while running outdoors. This might be an adaptation to treadmill running since runners simply started with a higher step frequency compared to outside. We thus argue for using wearable technology to provide athletes and trainers with continuous, quantitative objective measurements of running technique.

While we could demonstrate the potential of wearable technology for movement analysis using kinematic parameters, these often focus on a single parameter and it thus lacks an integral analysis of the whole movement. Additionally, information on which parameters are useful for the analysis might not be available. Hence, we investigated a data-driven approach and applied a basic sliding window to extract standard statistical features such as mean, maximum, etc. from the sensor data. We implemented an importance count using an mRMR feature selection, that was able to automatically detect the most prominent body areas that fatigued for each runner. This is especially promising to allow for individual feedback. We used a Principal Component Analysis (PCA) and developed a distance measure to derive the progression of fatigue over time. We achieved an average correlation of $\bar{r} = 0.84$ with the perceived fatigue rating of subjects.

To further investigate the data-driven approach, we conducted a longitudinal study with 4 children in inpatient rehabilitation treatment over 4 weeks. Children suffered from Cerebral Palsy (CP) and stroke and were mainly affected in their motor capacity. We collected data with 10 IMUs during a standardized movement test battery that included locomotor and manual motor function tasks. Motor capacity was assessed by a physical therapist for ground truth. We built a regression model using statistical features calculated from the sensor data to predict the performance level of the children. A correlation of 0.86 ($p < 0.05$) across all tasks between our model and the therapist's ratings was achieved. We were able to reduce the sensor setup from 10 to 3 sensor units attached to both wrists and the hip. We concluded that with our developed methods we could provide additional quantitative information on children's motor capacity, which is especially helpful to track motor changes over time and to investigate differences in motor performance between hospital and home.

In a second study, we investigated the automatic assessment of gait impairment severity of children with CP. Plantar pressure data was collected from a sensorized shoe in a study with 15 children. We developed a center of pressure (COP) trajectory representation model using Active Shape Mod-

els (ASMs) and were able to achieve a classification accuracy of more than 90 % for five different gait severity score items. Additionally, we developed a tool to identify outliers using ASMs when monitoring in more unconstrained environments.

Finally, to investigate feedback provision, we used an off-the-shelf smartphone to monitor arm carriage while running. Faulty arm carriage decreases the movement efficiency and increases the risk of sustaining an injury. We implemented an application that provided vibrational feedback when faulty arm carriage was detected. In a study with 18 runners we evaluated our application. We found that runners were able to alter their movement using the feedback. Additionally, we achieved high user acceptance and concluded that such an application might especially be of interest to ambitious fitness runners who do not have access to a trainer.

The conclusion of this thesis is that wearable technology is a valuable tool for performance assessment of human movement, which has the benefit of being available to everyone (almost) everywhere.

Zusammenfassung

Die Bewegungsausführung kann im Sport über Sieg oder Niederlage entscheiden. Weiterhin kann eine Verbesserung der Bewegung durch Rehabilitation erheblich zur Lebensqualität beitragen. Aber wie wird festgestellt, wie eine Bewegung ausgeführt wird?

Das Standardverfahren in den Bewegungswissenschaften erfasst die Bewegung mit einem 3D optischen 'Motion Capture System'. Mehrere Infrarotkameras erfassen dabei kleine, auf der Haut angebrachte reflektierende Marker. Mit den so erfassten Daten ist eine Rekonstruktion menschlicher Bewegungen in 3D möglich. Solche Systeme sind hochgenau, können allerdings nur in geschlossenen Räumen verwendet werden und ermöglichen keine kontinuierliche Datenaufnahme über einen längeren Zeitraum. Ausserdem sind sie meist nicht allgemein zugänglich.

Um diese Einschränkungen zu überwinden, untersucht diese Arbeit die Bewegungsanalyse im Sport und der Rehabilitation von Kindern mittels kleiner körpergetragener Sensoren. Die Arbeit beinhaltet sieben wissenschaftliche Publikationen, welche die vier Ziele dieser Arbeit umfassen: (1) Die Untersuchung der Anwendbarkeit körpergetragener Sensoren zur Erfassung der Bewegungsqualität ohne Beeinträchtigung des Nutzers; (2) Die Erfassung der Bewegungsqualität anhand kinematischer Parameter; (3) Die Untersuchung eines datengetriebenen Ansatzes zur Bewegungsanalyse; und (4) Der Einfluss von Echtzeit-Feedback bezüglich der Bewegungsqualität.

Um auch im täglichen Leben anwendbar zu sein, dürfen Sensoren den Nutzer nicht einschränken und müssen genaue Messdaten liefern. Dies wurde in einer Studie mit 21 Läufern untersucht. Fragebögen ergaben, dass die Läufer sich nicht in ihrer Bewegung eingeschränkt fühlten und die Sensoren als komfortabel empfanden. Am angenehmsten empfanden sie die Sensoren an den Handgelenken, an den Füßen und am Rücken, während die Sensoren an den Oberschenkeln als am unangenehmsten angegeben wurden.

Anschliessend wurden Algorithmen entwickelt, um kinematische Parameter zur Beschreibung des Laufstils aus den Sensordaten zu extrahieren. Diese ermöglichten, erfahrene von unerfahrenen Läufern zu unterscheiden. Es genügten 2 Sensoren von anfänglich 12 (am Fuss und am unteren Rücken). Pro Jahr verletzen sich 65 % der Läufer und der Laufsport gilt somit als eine Sportart mit hohem Verletzungsrisiko. Bewegungswissenschaftler erforschten, dass Müdigkeit die Laufkinematik verändert und somit das Risiko für ei-

ne Verletzung steigt. Um die Veränderung der Kinematik mit der Ermüdung während eines Laufs zu erfassen, wurde eine Studie mit 21 Läufern durchgeführt. Das Studienprotokoll war so ausgelegt, dass die Läufer während des Laufes ermüdeten. Die Bewegung wurde mit 12 Sensoren erfasst und es wurden Algorithmen zur Extraktion kinematischer Parameter aus den Daten entwickelt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Bewegung sich nicht nur in Abhängigkeit des Läufers und dessen Könnens änderte, sondern auch massgeblich von der Laufunterlage (Laufband vs im Freien) abhängte. Beispielsweise verringerte sich die Schrittfrequenz beim Laufen auf dem Laufband mit der Ermüdung, wohingegen sie beim Laufen im Freien konstant blieb. Eine mögliche Erklärung wäre die Anpassung an das Laufbandlaufen, da die Läufer anfangs eine höhere Schrittfrequenz liefen als draussen. Mittels körpergetragener Sensoren konnten somit zusätzliche Informationen über den Laufstil gewonnen werden.

Die durch Analyse kinematischer Parameter gewonnenen Ergebnisse zeigen das Potenzial von körpergetragenen Sensoren. Da solche Parameter die Bewegung jedoch meist auf eine einzelne Analyse reduzieren, wird die Bewegung nicht ganzheitlich untersucht. Ausserdem wäre es möglich, dass keine Kenntnisse über sinnvolle zu berechnende Parameter vorliegen. Daher wurde in einem nächsten Schritt ein sogenannter datengetriebener Ansatz untersucht. Hierbei werden statistische Parameter aus den Daten extrahiert, z.B. Mittelwert, Maximum, etc., die lediglich das Sensorsignal beschreiben, aber keine direkte biomechanische Bedeutung haben. Mit diesem explorativen Ansatz wurde gezeigt, dass mittels einer automatischen 'Feature Selection' die Änderung bei Ermüdung am Körper des jeweiligen Läufers identifiziert werden kann. Mit diesen Informationen ist ein individuelles 'Feedback' an den Läufer möglich. Mit einer Hauptkomponentenanalyse und einem Distanzmass wurde gezeigt, dass der zeitliche Verlauf der Ermüdung abgeschätzt werden kann. Die Korrelation mit der subjektiven Müdigkeits-Wahrnehmung der Läufer betrug im Mittel $\bar{r} = 0.84$.

Um diesen datengetriebenen Ansatz weiter zu validieren, wurde eine longitudinale Studie mit 4 Kindern, die an Cerebralparese und Schlaganfall litten, durchgeführt. Die Studie umfasste einen Zeitraum von 4 Wochen und fand in einem Rehabilitationskrankenhaus statt. Die Kinder waren hauptsächlich in ihren motorischen Fähigkeiten eingeschränkt und wurden zum Erfassen derer mit 10 IMUs ausgestattet. Sie führten dann eine Testbatterie von 10 definierten Bewegungen durch. Die Ausführung der Bewegung wurde durch Therapeuten bewertet. Wir entwickelten ein Modell, das mittels Regression die Bewegungsausführungs-Bewertung aus den Sensordaten schätzte. Diese Schätzung korrelierte mit 0.86 ($p < 0.05$) mit der Bewer-

tung der Therapeuten. Die Anzahl der benötigten Sensoren konnte von 10 auf 3 reduziert werden: jeweils einer an beiden Handgelenken und einer an der Hüfte. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die entwickelten Methoden eine quantitative Erfassung der Bewegungsausführung ermöglichen. Dies ist besonders hilfreich, um Fortschritte zu quantifizieren und um Unterschiede der Bewegungsausführung zwischen Krankenhaus und zu Hause zu erfassen.

In einer zweiten Studie wurde die automatische Erfassung der Beeinträchtigung des Gangs von Kindern mit Cerebralparese untersucht. Hierzu wurde der Druckverlauf des Fusses während des Gangs von 15 Kindern mit einem instrumentierten Schuh erfasst. Es wurde ein Verfahren zur Repräsentation des Verlaufs des Druckschwerpunktes mit 'Active Shape Models' entwickelt. Mit diesem Verfahren gelang es, die Beeinträchtigung des Gangs in fünf Bewertungspunkten mit einer Genauigkeit von jeweils über 90 % zu bestimmen. Ausserdem wurde gezeigt, dass das entwickelte Verfahren verwendet werden kann, um Ausreisser in den Messdaten zu identifizieren.

Abschliessend wurde gezeigt, dass ein Standard-Smartphone verwendet werden kann, um Läufern ein Echtzeit-Feedback bezüglich ihres Laufstils zu geben. Hierbei wurde auf Armhaltung fokussiert, da eine schlechte Armhaltung nicht nur das Risiko einer Verletzung erhöht, sondern auch die Bewegung ineffizient bzgl. der Laufökonomie macht. Es wurde eine Anwendung implementiert, um falsche Armhaltung zu detektieren und dann den Nutzer mittels einer Vibration des Smartphones zu warnen. Die Datenanalyse ergab, dass die Läufer ihre Armhaltung tatsächlich änderten. Ausserdem wurde eine hohe Nutzerakzeptanz erzielt, was zu der Schlussfolgerung führt, dass die Verwendung eines solchen Smartphones zwar nicht unbedingt besser ist als einen Trainer zu haben, aber durchaus ein nützliches Tool sein kann für Hobbyläufer, die keinen Trainer haben.

Zusammenfassend zeigt diese Arbeit, dass tragbare Sensoren wertvolle Informationen zur Analyse der Bewegungsqualität liefern können.