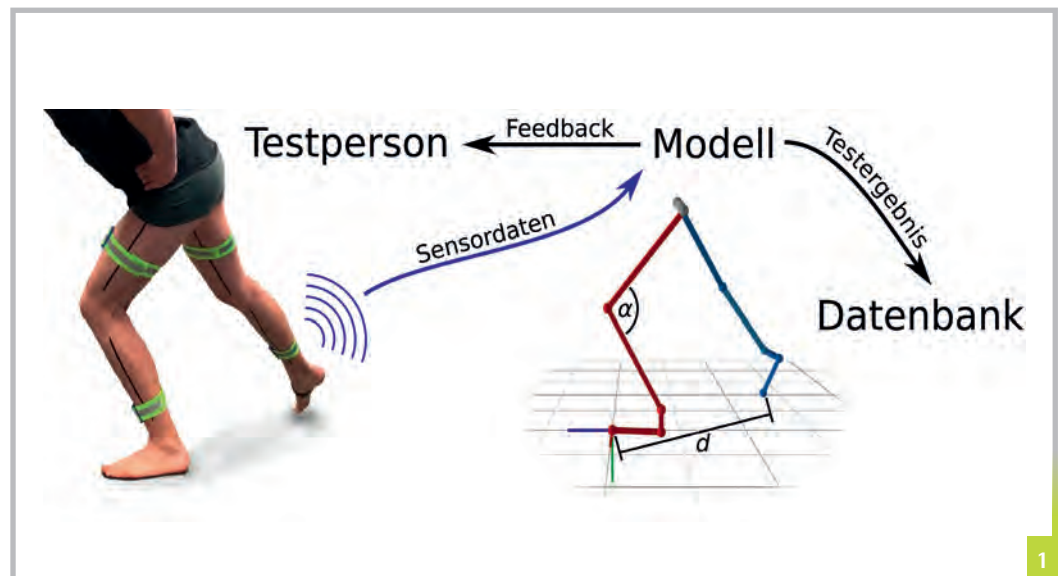


Menschliche Bewegungen drahtlos und genau messen

Sensoren und Algorithmen für die Heimanwendung sensomotorischer Tests

Balance, Sprungkraft und Körpergefühl sind im Sport, aber auch bei der Rehabilitation wichtige Indikatoren.

Wissenschaftler*innen am Institut für Mikroelektronische Systeme entwickeln in Kooperation mit externen Partnern aus den Sportwissenschaften und der Industrie ein mobiles Diagnosesystem zur Beurteilung der sensomotorischen Regulationsfähigkeit mithilfe standardisierter Sporttests.



Sensomotorische Tests werden in der Sportwissenschaft als Indikatoren für verschiedene Eigenschaften des menschlichen Bewegungsapparats verwendet, wie zum Beispiel Balance, Sprungkraft, oder Propriozeption (Körpergefühl). Mithilfe solcher Tests können zum Beispiel Leistungssteigerungen im Training oder der Genesungsfortschritt während der Unfallrehabilitation quantisiert werden. Um ein umfangreiches Bild des Bewegungsapparats einer Person zu erhalten, wird oft eine ganze Reihe solcher standardisierter sportwissenschaftlicher Tests angewendet. Allerdings sind diese Tests normalerweise personalintensiv, da ein oder mehrere Tester*innen zur Durchführung benötigt werden.

Das Projekt

Im biomedizintechnischen Kooperationsprojekt D-Sense DL entwickelt eine eNIFE-Arbeitsgruppe am Institut für Mikroelektronische Systeme in Kooperation mit externen Partnern aus den Sportwissenschaften und der Industrie ein mobiles Diagnosesystem zur Beurteilung der sensomotorischen Regulationsfähigkeit. Dieses System aus mehreren Inertialsensoren (IMUs – siehe Infokasten) und speziell entwickelten Algorithmen erlaubt es, verschiedene sensomotorische Testverfahren – ohne Anleitung durch geschulte Tester*innen (siehe Abbildung 1) – selbst durchzuführen. Derartige Systeme können zur Selbstkontrolle im sportmedizinischen

Bereich oder in der Rehabilitationsmedizin mit geringem Personaleinsatz genutzt werden. Auch die Untersuchung des Trainingserfolgs im Fitnessbereich oder im Profisport ist denkbar.

Das entwickelte System kann die Durchführung und Auswertung verschiedener Sporttests unterstützen. Um das Körpergefühl (Propriozeption) zu testen kann beispielsweise die „Aktive Winkelreproduktion“ verwendet werden: Es werden verschiedene Gelenkwinkel vorgegeben, die die Testperson dann mit geschlossenen Augen reproduzieren soll. Für die Bestimmung der Sprungkraft eignet sich beispielsweise der „Squat Jump“, ein Maximalsprung aus halb gehockter Position

mit Messung der Sprunghöhe. Der „Star Excursion Balance Test“ (SEBT) ist ein funktionsdynamischer Test der dynamischen Balance. Die Testperson steht auf einem Bein und streckt das andere Bein so weit wie möglich in acht verschiedene Richtungen aus, ohne dabei zu straucheln. Dabei muss in mehreren Durchgängen für jede Richtung die maximale Reichweite des Spielbeins gemessen werden.

Die im Projekt entwickelten Algorithmen berechnen je nach durchgeführtem Sporttest dreidimensionale mathematische Körpermodelle unterschiedlicher Komplexität. Das Spektrum der Komplexität reicht von einem einzelnen Körpersegment, über ein einzelnes Gelenk aus zwei Segmenten, bis hin zu einem kompletten kinematischen Modell von der Hüfte abwärts bis zu den Füßen. Aus diesen Modellen werden dann verschiedene Messgrößen berechnet wie beispielsweise Gelenkwinkel oder Abstände zwischen Körpersegmenten, um das Testergebnis zu be-

stimmen. Anhand des zeitlichen Verlaufs der Messwerte können dabei sowohl Fehler erkannt als auch die korrekte Durchführung der Tests angeleitet werden. Fehler können beispielsweise sein: Bewegung nicht richtig ausgeführt, vorgegebene Pose nicht korrekt eingenommen, während Bewegung gestrauchelt, Ferse des Standbeins angehoben, oder ähnliches.

Anwendung des Systems

Vor Beginn eines Tests werden die nötigen Sensoren mit elastischen Klettbandern an der Testperson angebracht. Die grobe Position und die Anzahl der Sensoren ist abhängig vom durchgeführten Test. Die Präzision der Anbringung ist nicht entscheidend, da die genaue Platzierung der Sensoren in einem späteren Schritt mithilfe einer Kalibrierbewegung bestimmt wird. Bei einigen Tests werden außerdem spezielle Bodenkontaktplatten als zusätzliche Sensoren verwendet um zu erkennen, ob ein Teil des Fußes vom Boden

abgehoben wurde.

Wenn die Vorbereitungen abgeschlossen sind, können die eigentlichen Messungen beginnen. Alle verwendeten Sensoren werden eingeschaltet und senden daraufhin ihre Sensordaten 50-mal pro Sekunde per Bluetooth Low Energy (BLE) an ein zentrales Gerät. Auf dem empfangenden Gerät – zum Beispiel einem Tablet oder Laptop – werden dann die Daten aller IMUs kombiniert und mit den speziell für diesen Test entwickelten Algorithmen verarbeitet. Diese Algorithmen definieren die Testabschnitte und dabei durchzuführende Bewegungen und geben entsprechende Anweisungen. Die meisten Tests beginnen dabei mit zwei Kalibrierposen, um die genaue Anbringung der IMU am Körper zu bestimmen (siehe Abbildung 2).

Wichtig bei dieser Vorgehensweise ist die Echtzeitfähigkeit des Systems sowie eine geringe Verzögerung zwischen Bewegung und dazugehörigem Feedback. Eine entscheidende Herausforderung ist also die

Abbildung 1
Der Testablauf am Beispiel des SEBT. Drahtlose Sensoren senden ihre eigene Orientierungsschätzung an ein Gerät, welches die entwickelten Algorithmen für den gewählten Sporttest ausführt. Ein testspezifisches mathematisches Modell wertet die Sensordaten aus und gibt Feedback zur Testdurchführung an die Testperson. Dieses Feedback kann etwa sein, dass die aktuelle Messung abgeschlossen ist und der nächste Testabschnitt beginnt, oder dass ein Fehler gemacht wurde und die Bewegung wiederholt werden muss. Bei korrekter Durchführung wird das Testergebnis berechnet und abgespeichert.

Quelle: ims



Abbildung 2
Die Kalibrierbewegung besteht aus einer aufrecht stehenden Pose und einer zurückgelehnten oder liegenden Pose. Die stehende Pose ist genau festgelegt und unterscheidet sich von der liegenden Pose nur durch eine Rotation um eine Achse – dabei sind auch weniger als 90 Grad ausreichend. Aus den IMU-Sensordaten in diesen beiden Posen kann mithilfe des Kreuzprodukts der Gravitationsvektoren die Rotationsachse bestimmt und so die genaue Anbringung der IMUs am Körper berechnet werden.

Quelle: ims

Überführung der entwickelten Algorithmen in eine effiziente und performante Software-Umsetzung. Zu diesem Zweck wurde im Projekt D-Sense eine Realisierung in nativem C++ mit C-API gewählt. Dies bietet den weiteren Vorteil, dass die Algorithmen mit allen Programmiersprachen und Betriebssystemen kompatibel sind und in verschiedene Benutzer-Interface-Frameworks eingebettet werden

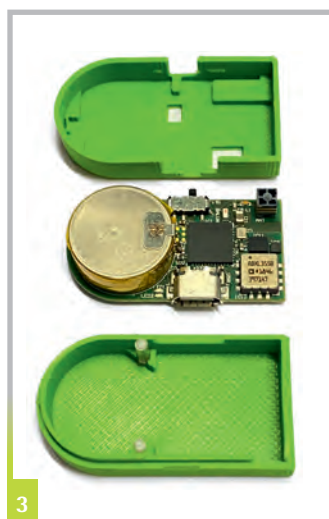


Abbildung 3

Die Oberseite der am IMS entwickelten BLE-IMU-v6 Platine, zusammen mit dem 3D-gedruckten Prototypengehäuse. Erkennbar sind der Prozessor in der Mitte, die Sensorchips rechts, die Antenne und der Einschalter oben, der USB-Anschluss unten, und der Lithium-Ionen-Akku links. Die Abmaße des Gehäuses sind 37 x 20 x 12 Millimeter.

Quelle: ims

können. Wenn eine Bewegung erfolgreich abgeschlossen wurde, geben die Algorithmen die Anweisungen für den nächsten Testabschnitt aus. Wurde ein Fehler erkannt, dann muss der letzte Abschnitt so oft wiederholt werden, bis kein Fehler mehr gemacht wurde. Alle erfolgreichen und nicht erfolgreichen Bewegungen

werden dabei aufgezeichnet und protokolliert. So kann die Berechnung des Testergebnisses später genau nachvollzogen werden.

Nachdem alle Testabschnitte erfolgreich aufgezeichnet wurden, wird das Testergebnis berechnet und präsentiert. Je nach Test kann es sich dabei um Werte handeln wie den Mittelwert eines bestimmten Abstands, die Standardabweichung eines Winkels, oder die Anzahl der gezählten Fehler während eines Durchlaufs. Anschließend können weitere Tests durchgeführt werden.

Eigene Inertialsensoren

Für Anwendungen in diesem und diversen anderen biomedizintechnischen Forschungsprojekten wurden am IMS in den letzten zehn Jahren mehrere Generationen an IMUs entwickelt. Die neueste Generation „v6“ (siehe Abbildung 3) basiert auf einem kombinierten Gyroskop- und Accelerometer-Chip sowie einem Präzisionsaccelerometer. Bei der Orientierungsschätzung durch Integration von Gyroskop-Messwerten kann dabei prinzipbedingt ein „Drift“ auftreten, also eine unprovokierte, virtuelle Rotation um die Hochachse. Für die Drift-Kompensation steht deshalb zusätzlich ein Magnetometer mit drei Achsen zur Verfügung. Außerdem enthalten sind Sensoren für Luftdruck

und Temperatur, sowie Anschlüsse für externe Analogsensoren oder Schalter. Der eingebaute Akku mit 120 mAh wird per Micro-USB geladen und erlaubt eine mobile Verwendung der IMUs über mehrere Stunden.

Die Datenverarbeitung und die drahtlose Kommunikation per Bluetooth Low Energy übernimmt ein ARM Cortex M4F Mikrocontroller. Jede IMU kann ihre Messwerte bis zu 100-mal pro Sekunde als BLE Notification an ein anderes Gerät senden. Per BLE kann außerdem die selbst entwickelte Firmware flexibel konfiguriert werden, um beispielsweise die Datenrate einzustellen, oder um festzulegen, welche Messwerte gesendet werden sollen.

Weiterführende Publikationen: <http://go.lu-h.de/fisfw>



Fritz Webering
Nils Stanislawski
Holger Blume

→ Weitere Informationen siehe Autor*innenseiten.

Infokasten IMUs

Inertialsensoren (Inertial Measurement Units, IMUs) sind kleine Geräte, die mit einem Accelerometer ihre eigene Beschleunigung und mit einem Gyroskop ihre Rotationsgeschwindigkeit messen, jeweils in drei Achsen. Diese insgesamt 6 Freiheitsgrade (engl. „degrees of freedom“, wie in „6-DOF-IMU“) erlauben die Beschreibung aller möglichen Bewegungen im dreidimensionalen Raum. Spezielle Sensorfusionsalgorithmen – wie Kalman-, Madgwick-, oder VQF-Filter – berechnen dann aus diesen Rohdaten die dreidimensionale Orientierung des Sensors im Raum. Diese Orientierungsschätzungen können beispielsweise lokal auf der IMU aufgezeichnet oder per Kabel bzw. Funk an ein Gerät mit mehr Rechenleistung gesendet werden, wie Tablet, Handy oder PC. Dort kann dann die weitere Verarbeitung oder Aufzeichnung erfolgen, um den Akku der IMU zu entlasten. Je nach Anwendungsgebiet und verwendeten Sensoren kann die Datenrate variieren, zwischen wenigen Einzelmessungen und mehr als 1000 Messwerten pro Sekunde.