

Development of innovative training solutions in the field of functional evaluation aimed at updating of the curricula of health sciences schools



MODUL BIOMECHANIK GRUNDLAGEN

Didaktische Einheit D: TECHNIKEN ZUR INSTRUMENTELLEN ANALYSE VON BEWEGUNGEN UND KRÄFTEN

D.1. Wie können Bewegungen gemessen werden und welche Parameter können analysiert werden? Was sind die wichtigsten Anwendungen?



Index

1. EINLEITUNG UND ZIELE	4
2. BEWEGUNGSANALYSESYSTEME AUF BASIS VON BILDERN	5
Marker-basierte Systeme	6
Optische Ausstattung der 3D-Stereophotogrammetrie	6
Ausstattung der 2D-Bewegungsanalyse	9
Geräte, die auf Augmented Reality (AR) basieren.....	10
Markerlose Systeme	12
3. TRÄGHEITSSYSTEME	16
Parameter	17
Vorteile und Nachteile	18
4. SONSTIGES	19
Goniometer.....	19
Parameter	20
Vorteile und Nachteile	20
Neigungssensoren	20
Parameter	21
Vorteile und Nachteile	22
GPS.....	22
Parameter	23
Vorteile und Nachteile	23
5. HAUPTANWENDUNGSGEBIETE	24
Klinische Einstellung	24
Sport	24
Ergonomie	25
6. BEISPIELE	26

Charakterisierung von Pathologien	26
Funktionelle Beurteilung	27
Auswahl an Sportgeräten	28
Bewertung von Sporttechniken	29
Charakterisierung von Arbeitsaufgaben	30
Bewertung von externen Hilfsmitteln	32
7. SCHLÜSSELIDEEN	34
8. REFERENCIAS	35

1. Einleitung und Ziele

Denken Sie daran, dass die Kinematik oder Bewegungsanalyse Wissen aus verschiedenen Methoden kombiniert, um qualitative und quantitative Variablen zu erhalten und die Bewegung unabhängig von den Kräften zu beschreiben, die sie erzeugen.

Die Geräte, die zur Untersuchung der Biomechanik menschlicher Bewegungen eingesetzt werden, haben in der letzten Zeit große Fortschritte gemacht, von manuellen Anmerkungen auf Fotos über markerbasierte optische Trackingsysteme bis hin zu Systemen, die auf Inertialsensoren basieren, und markerlosen Analysesystemen, die hochentwickelte Modelle, Computer Vision und komplexe Algorithmen für maschinelles Lernen verwenden [1].

Bewegungsanalysesysteme haben sich parallel zu den Anforderungen von Bereichen wie der Animation für Videospiele oder Kino weiterentwickelt und schnellere und leistungsfähigere Werkzeuge entwickelt, um die klinische und sportbiomechanische Beurteilung über die Laborforschung hinaus zu erweitern.

Die **Ziele** dieser didaktischen Einheit konzentrieren sich auf:

- Die Hauptgruppen der Bewegungsanalyse-Techniken.
- Verstehen, wie sie funktionieren und welche Informationen sie liefern.
- Ihre wichtigsten Vor- und Nachteile.
- Einführung in die Bereiche, in denen kinematische Instrumentaltechniken zur Bewegungsanalyse eingesetzt werden.
- Einige Anwendungsbeispiele und Systeme, die auf diesen instrumentellen Techniken basieren.

Zur Erleichterung der Untersuchung ist eine allgemeine Klassifizierung auf der Grundlage des verwendeten Sensor- oder Gerätetyps enthalten (Abbildung 1).

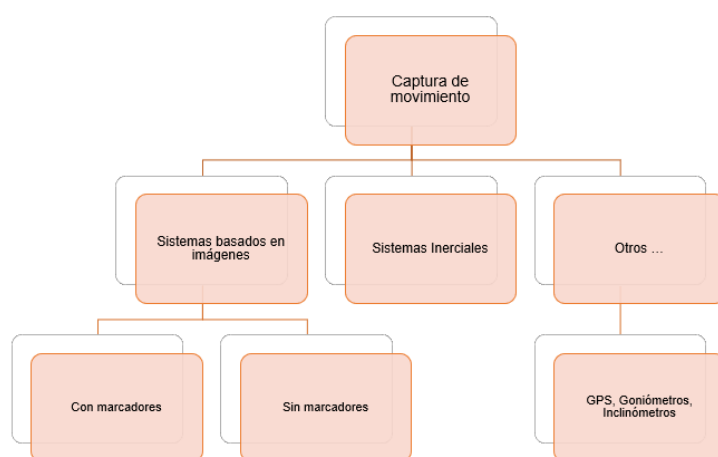


Abbildung 1 - Klassifizierung von Bewegungsanalysesystemen.

2. Bewegungsanalysesysteme auf Basis von Bildern

Seit der Einführung der Bewegungsanalyse in der biomechanischen Beurteilung basieren die am weitesten verbreiteten Methoden auf optischen Systemen, die das zu vermessende Objekt mit Hilfe von Werkzeugen untersuchen, die Bilder aufnehmen.

Bildbasierte Bewegungsanalysesysteme gelten derzeit als der Goldstandard bei der biomechanischen Untersuchung von Bewegungen, einschließlich menschlicher Funktionen und Aktivitäten. Diese optischen Systeme, die auf verschiedenen Kamertypen basieren, extrahieren aus sequenziellen Bildern oder Videos die notwendigen Informationen, um die auftretende Bewegung zu beschreiben. Diese Informationen werden je nach Gerät mit unterschiedlichen Methoden der Signalverarbeitung extrahiert.

Die optische Technologie zur Bewegungsanalyse verwendet speziell für das verwendete System konfigurierte Kameras und Beleuchtungen, um das zu beurteilende Objekt auf einfache Weise zu beobachten. Die Daten zur Verfolgung seiner Verschiebung über die Zeit können durch die Identifizierung von Punkten oder Markierungen gewonnen werden, die das Objekt durch aufeinanderfolgende Bilder darstellen.

Die Schätzung der Position (3D) und Orientierung (3D) sind die Hauptvariablen, die von einem optischen System benötigt werden, um die 6 Freiheitsgrade (DoF) oder die Pose eines Objekts zu bestimmen. Diese Variablen, zusammen mit anderen aus der kinematischen Studie extrahierten Variablen wie Geschwindigkeit und Beschleunigung, ermöglichen es uns, die Bewegung des Körpers oder seiner Segmente unabhängig oder in Interaktion mit Objekten und/oder Umgebungen im Laufe der Zeit zu untersuchen.

Die Häufigkeit der Erfassung und die Bildauflösung der Systeme sind grundlegende Eigenschaften, um die kinematischen Variablen zu extrahieren, die die Verschiebung der Segmente untersuchen; sie beeinflussen auch die Auswahl der zu untersuchenden Bewegungen und die Präzision der Ergebnisse.

Aufgrund der Komplexität des menschlichen Körpers wegen seiner vielen Gelenke, der Teilsteifigkeit seiner Segmente usw. stützt sich die biomechanische Studie auf kinematische Modelle, die mehr oder weniger komplexe Vereinfachungen zur Analyse der Bewegung darstellen. Die Studienmodelle werden durch die Platzierung von Markern an bestimmten anatomischen Punkten nach einem festgelegten Protokoll erstellt, das von dem anatomischen Bereich oder Segment oder von der zu analysierenden Bewegung abhängt [2].

Im Jahr 1973 wurde die International Society of Biomechanics (ISB) mit dem Ziel gegründet, das Studium der Biomechanik zu fördern <https://isbweb.org/>. Seit 1990 hat die ISB daran gearbeitet, Empfehlungen für die Standardisierung bei der Berichterstattung über Bewegungsanalysedaten zu geben. Diese Vorschläge für Standards beziehen sich auf die Definition von globalen, artikulären und Orientierungskordinatensystemen sowie auf Modelle verschiedener Gelenke und Körpersegmente.

Wenn die Informationen über eine Bewegung in einer Ebene (2D) auftreten, werden normalerweise einfachere Modelle mit nur einer Kamera (monokulare Ansicht) verwendet. Wenn die Bewegungen komplexer sind und in verschiedenen Ebenen (3D) auftreten, sind ein

komplexeres Modell und ein Mehrkamerasystem (Multiview) erforderlich, bei dem der Marker platziert und von mehreren Kameras verfolgt wird. Es wird empfohlen, dass mindestens drei Kameras einen Marker lokalisieren, um eine robuste 3D-Rekonstruktion aus den von jeder Kamera erhaltenen Informationen durchzuführen.

Die 3D-Rekonstruktion einer Bewegung durch Geräte, die mehrere Ansichten verwenden, ist genauer, als wenn nur eine Kamera verwendet wird, um diese Informationen anhand von Daten aus einer einzigen Ebene zu rekonstruieren.

Ein weiterer Unterschied zwischen der Durchführung einer 2D- und einer 3D-Analyse ist die Generierung von komplexeren Prozessen der Kalibrierung und Rekonstruktion von Koordinaten sowie die Definition der Gelenkwinkel [1].

Die Prozesse, aus denen diese Systeme bestehen, können wie folgt festgelegt werden (Abbildung 2):

- Kalibrierung. Ein Referenzsystem, dessen Geometrie und Abmessungen bekannt sind, wird zur Berechnung der Abgleichparameter verwendet.
- Erkennung (Digitalisierung). Identifizierung der Punkte, die das ausgewählte Modell definieren.
- Verfolgung. Das Tracking wird von den Kameras während der zu analysierenden Bewegung durchgeführt. Während der gesamten Aufzeichnung dürfen die definierten Punkte oder Marker nicht von den Kameras verdeckt werden, um Probleme in der nächsten Phase zu vermeiden.
- Rekonstruktion. Die zur Erstellung des biomechanischen Modells verwendeten Referenzen werden in den aufgenommenen Bildern identifiziert und ihre Positionen in einem 3D-Koordinatensystem ermittelt.
- Analyse. Behandlung der zuvor erhaltenen Informationen, um die definierten Variablen zu extrahieren.



Abbildung 2 - Schematische Darstellung der Abläufe bei der Verwendung von optischen Systemen.

Die Systeme, die Informationen von mehreren Kameras verarbeiten, erfordern in der Regel eine kontrollierte Umgebung, eine erhöhte Verarbeitungsleistung und eine teure Infrastruktur wie Bewegungsanalyselabore, während 2D-Analysesysteme vielseitiger und kostengünstiger sind. Die Auswahl der Geräte hängt von den Variablen und dem notwendigen Druck für die zu untersuchende Bewegung ab.

Diese didaktische Einheit klassifiziert die optischen Geräte in zwei große Gruppen, basierend darauf, ob sie **physikalische Marker** verwenden oder nicht, um Referenzen, Punkte oder Objekte zu identifizieren, die es ermöglichen, ein Modell zu erstellen, um die Bewegung in 2D oder 3D zu rekonstruieren.

Marker-basierte Systeme

Optische Ausstattung der 3D-Stereophotogrammetrie

Diese Ausrüstung besteht in der Regel aus einer Reihe von **Kameras**, die den Raum, in dem die Bewegung stattfindet, aus verschiedenen Perspektiven erfassen, und der **Analysesoftware**.

Die Platzierung der Kameras ist wesentlich, um die auf dem Subjekt oder dem Objekt befindlichen Marker zu identifizieren. Der Winkel und der Abstand zwischen den Kameras, ihre Position im Verhältnis zueinander (Parallaxe), im Verhältnis zum untersuchten Objekt, usw. sowie die Häufigkeit der Aufnahmen und die Auflösung der Kameras sind wesentliche Bedingungen, um die Marker effizient zu identifizieren und zu verhindern, dass sie z. B. in den durchgeführten Aufnahmen versteckt werden und verloren gehen. Auf diese Weise werden die optimalen Bedingungen geschaffen, um die räumlichen Koordinaten der Marker zu extrahieren, das Modell für die Studie zu definieren und die ermittelten Variablen zu extrahieren.

Dazu sammelt jede Kamera Informationen über die Position des Markers oder der Marker, die sich in ihrem Sichtfeld befinden, und legt deren Position in einem lokalen Referenzsystem der Kamera selbst fest. Dies würde für eine zweidimensionale Analyse ausreichen. Möchte man jedoch dreidimensionale Informationen erhalten, werden die von jeder Kamera extrahierten Informationen mit Hilfe von Stereophotogrammetrietechniken integriert, die es uns ermöglichen, die Koordinaten des Markers in 3D zu rekonstruieren und seine Position und Orientierung in einem globalen Referenzsystem zu bestimmen. Auf der Grundlage dieser Informationen können Variablen wie die Winkel zwischen den im Modell der Marker definierten Segmenten ermittelt werden (Abbildung 3).

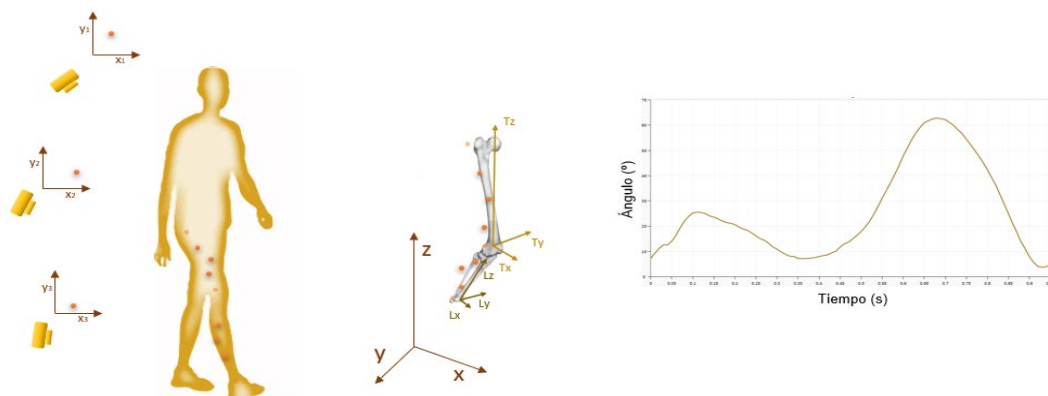


Bild 3 - Erfassung des Kniewinkels während des Gehens mit einem optischen System der 3D-Stereophotogrammetrie.

Die in diesen Systemen verwendeten Marker können **aktiv** sein, z. B. basierend auf LED-Licht, oder **passiv**, wie mit reflektierendem Material beschichtete Kugeln [3], die das reflektierte Licht zum Kamerasensor zurückwerfen. Aktive Marker haben gegenüber passiven Markern den Vorteil, dass sie robustere Messungen liefern können, haben aber den Nachteil, dass sie

Batterien und Kabel benötigen, was die Bewegungsfreiheit der Testperson beeinträchtigen kann. Außerdem sinkt die Abtastrate der Kameras, wenn ein Satz von mehreren Markern verwendet wird, da das Signal von jedem Marker seine eigene Frequenz benötigt, um individuell identifiziert zu werden [4].

Bei reflektierenden Markern hat jede Kamera einen Fokus aus Infrarotlicht (IR), das sie über ihr Sichtfeld aussendet. Auf diese Weise prallt das emittierte Licht von den Markern ab und wird vom Sensor der Kamera erfasst. Diese Sensoren verfügen über Filter, die das natürliche Licht zurückweisen und nur die von den Markern gestreute IR-Strahlung auffangen. In diesem Fall erkennt der Kamerasensor bei jedem erfassten Marker einen weißen Punkt, dessen Durchmesser von der Größe des Markers, dem Abstand der Person zum Marker, der Auflösung des Sensors usw. abhängt. Das System verwendet den Zentroid (Mittelpunkt) dieses weißen Punktes, um die notwendigen Berechnungen und die Position der Markierung in Bezug auf den Sensor zu bestimmen. Die verwendeten Modelle können ein oder mehrere Segmente oder den ganzen Körper darstellen, je nach Zweck der Analyse.

Diese Systeme können Frequenzen von 100 Hz oder Bilder pro Sekunde (fps) bis 500 fps erreichen; je höher die Frequenz, desto geringer ist jedoch die Auflösung, was die korrekte Identifizierung der Marker und die Berechnung der Variablen beeinträchtigen kann. Die Wahl der Erfassungsfrequenz hängt z. B. von der Geschwindigkeit der erfassten Bewegung ab. Je schneller die Bewegung ist, desto mehr Ereignisse treten in kürzeren Zeiträumen auf; aus diesem Grund muss man die Erfassungsfrequenz erhöhen, wenn man alle Informationen erfassen möchte. Um beispielsweise eine Golfschwungbewegung zu analysieren, ist eine Frequenz von 250 Hz erforderlich, während der menschliche Gang bei normaler Geschwindigkeit mit 100 Hz untersucht werden kann, ohne dass ein Ereignis der Bewegung verloren geht.

Beispiele für diese Analysesysteme finden Sie auf dem Markt, wie Vicon <https://www.vicon.com/software/nexus/>; BTS Bioengineering <https://www.btsbioengineering.com/products/smart-dx-motion-capture/>; STT Systems <https://www.stt-systems.com/motion-analysis/3d-optical-motion-capture/>; Kinescan/IBV <http:// analisisbiomecanico.ibv.org/productos/tecnicas-de-registro/kinescan-ibv.html>, Qualysis <https://www.qualisys.com/software/qualisys-track-manager/>; usw.

Parameter

Die Parameter, die aus der Berechnung der **Positionen** und der **Orientierung** der Segmente gezogen werden und die üblicherweise in der kinematischen Analyse mit diesen Systemen verwendet werden, sind: **relative Winkel** zwischen den Segmenten und **absolute Winkel** in Bezug auf das Referenzsystem, ihre **linearen** und **winkligen Geschwindigkeiten** und **Beschleunigungen**, sowie **Abstände** und **Längen**. Die kinematischen Informationen in Kombination mit den aus der Kraftanalyse gewonnenen Informationen erlauben uns auch, Parameter wie die in den Gelenken auftretenden externen und internen **Momente** zu zeichnen.

Vorteile und Nachteile

Die Hauptvorteile dieser Systeme sind ihre **Genauigkeit** (man bedenke, dass sie der aktuelle Goldstandard in der Bewegungsanalyse sind) und ihre **Flexibilität**, Modelle zu definieren, die mehrere Segmente und Gelenke in 3D analysieren [5].

Einige der Einschränkungen dieser Systeme liegen in der Tatsache, dass die Marker **versteckt** werden oder **verloren gehen** können, in ihrer **Empfindlichkeit gegenüber den Beleuchtungsbedingungen der Umgebung** (z. B. Änderungen des natürlichen Lichts im Freien), in den **Artefakten**, die durch die auf weichem Gewebe wie der Haut platzierten Marker bei dynamischen Bewegungen entstehen, in **Fehlern** bei der **Platzierung der Marker**, in der **Zeit**, die für die Instrumentierung benötigt wird, oder in der **Beeinflussung der Ausführung** einer Bewegung aufgrund der Position der Marker im Körper der beurteilten Person.

Die ständige Weiterentwicklung dieser Systeme hat jedoch die Probleme reduziert, die z. B. mit den Auswirkungen des Lichts zusammenhängen, indem Verbesserungen an den Sensorfiltern eingeführt wurden; oder die Auswirkungen der Weichteile durch anatomische Kalibrierungsverfahren, die es auch ermöglichen, einige Marker während der Ausführung der zu analysierenden Bewegungen zu entfernen [1].

Strenge Messprotokolle helfen, die Zuverlässigkeit der Ergebnisse in Studien zu verbessern, bei denen die Messungen an verschiedenen Tagen oder von verschiedenen Untersuchern durchgeführt werden.

Ausstattung der 2D-Bewegungsanalyse

2D-Bewegungsanalysesysteme werden üblicherweise verwendet, wenn die zu beurteilende Bewegung nicht komplex ist und die relevanten Informationen in einer Bewegungsebene auftreten, wenn die Auswertung in einer Außen- oder Feldumgebung durchgeführt wird, wenn die Beurteilung keine hohe Präzision bei den extrahierten Variablen erfordert, usw.

Diese Systeme bestehen aus einer einzelnen Kamera, die auf den Messraum ausgerichtet ist, und einer Analysesoftware.

Um eine korrekte Position und einen korrekten Winkel der Kamera sicherzustellen, ist es wichtig, eine Reihe von Faktoren zu berücksichtigen, wie z. B. den Aufnahmebereich, die Position der Kamera in Bezug auf die Messebene, die Parameter Brennweite und Blende des Kamerasensors, die Aufnahmegeschwindigkeit usw. Die an der untersuchten Person angebrachten Marker müssen, wie bei herkömmlichen Infrarot-Erfassungssystemen, sichtbar sein, damit das System die Marker während der gesamten Aufnahme verfolgen kann.

Die Genauigkeit dieser Geräte hängt von mehreren Faktoren ab, hauptsächlich von der Festlegung von Referenzen (Passpunkten) zur **Kalibrierung** der Messungen und von den Verzerrungen der **Kameraobjektive**, denen die aufgenommenen Videobilder unterliegen.

Die Hauptfehlerquelle im Zusammenhang mit den Objektiven ist die radiale Verzerrung. Diese Verzerrung verursacht den bekannten Fischaugeneffekt, der die Präzision verringert, wenn sich die Referenzlinien in der Peripherie des Bildes befinden. Um dieses Problem zu

reduzieren, werden eine Reihe von Maßnahmen zur Verbesserung der Messungen vorgeschlagen:

- Die Referenzlinien sollten in der gleichen Ebene wie das Bild liegen.
- Die Ebene, in der die Bewegung ausgeführt wird, sollte senkrecht zur Kameraachse liegen (Abbildung 4).
- Die Identifikation der Referenzsegmente und der zu messenden Segmente sollte in der Nähe der Bildmitte liegen; ebenso sollten die zu messenden Segmente in der Nähe der Referenzsegmente liegen.
- Nehmen Sie keine Zoom- oder Panorama-Ansichtseinstellungen vor, um verschiedene Segmente zu identifizieren.

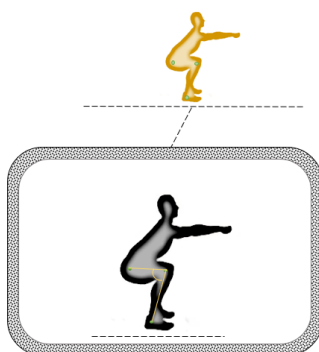


Abbildung 4 - Beispiel für die senkrechte Positionierung der Kamera in Bezug auf die Leistungsebene einer Hocke, die sich in der Mitte des Bildes befindet.

Normalerweise werden die Punkte, die mit den im Subjekt instrumentierten Markern verbunden sind, manuell im Ausgangsbild der untersuchten Bewegung identifiziert. Einige dieser Softwareprogramme können sie automatisch verfolgen und ihre Position in den verschiedenen Sequenzen des Videos bestimmen, um die zugehörigen Messungen zu extrahieren. Die sequenzielle manuelle Erkennung ist jedoch auch in den Fällen zulässig, in denen es nicht ratsam oder möglich ist, Marker in der zu beurteilenden Person zu platzieren.

Auf dem Markt gibt es einige Beispiele für diese Analysesysteme wie Kinovea <https://www.kinovea.org/> oder TEMPLO https://www.contemplas.com/motion_analysis_templo.aspx.

Parameter

Die wichtigsten Studienparameter, die aus diesen Systemen extrahiert werden, werden durch die Berechnung der Position der definierten Marker oder Segmente geschätzt und umfassen **lineare** und/oder **winklige Geschwindigkeit** und **Beschleunigung**, **Abstände**, **Verschiebungen** sowie **relative** und **absolute Winkel** von Segmenten oder Gelenken.

Vorteile und Nachteile

Die Hauptvorteile dieser Art von Systemen sind: ihre **Zugänglichkeit**, da sie nur eine Kamera, ein Stativ und einen Computer mit der Analysesoftware benötigen (die in vielen Fällen kostenlos ist); ihre **Tragbarkeit**, da die Bewertungen außerhalb des Labors durchgeführt

werden können; und die **Informationen**, die sie liefern, insbesondere bei der Analyse einfacher Bewegungen, die in einer Bewegungsebene stattfinden, wo relevante Informationen ohne die Notwendigkeit großer Präzision extrahiert werden können.

Was ihre Nachteile betrifft, so beeinträchtigen einige Faktoren die **Zuverlässigkeit** und **Präzision** der Messungen, die in den Systemen erzielt werden, die außerhalb einer kontrollierten Umgebung eingesetzt werden, wie z. B. der Einfluss des Prüfers auf die **Instrumentierung** und den **Aufbau des Systems**, die Tatsache, dass die Zerlegung einer Bewegung **in 2D-Ebenen** zu Fehlern bei den Winkelmessungen führen kann, Probleme im Zusammenhang mit **Objektiven** usw.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein 3D-Analysesystem mehr Präzision und Messungen im Volumen bietet, aber teurer und komplexer ist; ein 2D-System hingegen hat den Vorteil der Portabilität (z. B. für Feldtests) sowie der kostengünstigen und einfachen Handhabung.

Geräte, die auf Augmented Reality (AR) basieren

Augmented Reality (AR) ist eine Technik, die künstliches Sehen, Bildverarbeitung und grafische Datenverarbeitung nutzt, um der physischen Welt digitale Inhalte hinzuzufügen und so Interaktion in Echtzeit [6], Visualisierung und Handhabung von realen und virtuellen Objekten zu ermöglichen.

Diese Technik erkennt Markierungen oder Merkmale des realen Bildes, die als Koordinaten verwendet werden, um virtuelle Objekte in 2D oder 3D zu überlagern oder zu projizieren. AR kann Objekte oder Markierungen als Referenzmarken oder bestimmte Merkmale des realen Bildes verwenden, um diese Projektion zu erhalten. Die Verfolgung von rechteckigen Referenzmarkern ist eine der am häufigsten verwendeten Tracking-Lösungen für AR-Videoanwendungen [7] (Abbildung 5).

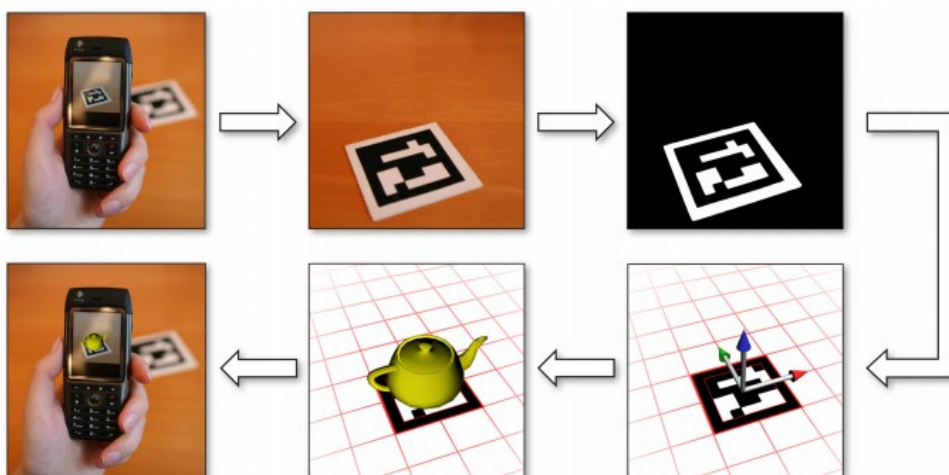


Abbildung 5 - Grundlegendes Arbeitsdiagramm einer AR-Anwendung (ARToolKitPlus) zur Erkennung und Darstellung der Pose eines Objekts in 3D von einer Kamera; Bild aus Wagner et al. [7].

Diese Technologie basiert auf der Homographie oder projektiven Geometrie, die eine Entsprechung zwischen ebenen geometrischen Figuren ermittelt und die Beziehungen

zwischen dreidimensionalen Figuren im Raum und ihrer Projektion auf eine Ebene untersucht. Dieses Prinzip wird von AR genutzt, um die Rotationen und Translationen (3D-Kinematik) eines AR-Markers in Bezug auf den Fokuspunkt der Kamera und auf die Bildebene anhand der Art und Weise zu identifizieren, wie die Ecken des Markers im aufgenommenen Bild erscheinen [8]. Der Hauptunterschied zwischen AR und anderen Verarbeitungssystemen besteht darin, dass bei AR die Objekte in 3D-Koordinaten gedreht und bewegt werden, anstatt ein 2D-Bild zu verwenden.

Ein einfaches AR-System besteht in der Regel aus einer Kamera, einer Recheneinheit und einem Bildschirm [6]. Es funktioniert, indem es das Bild mit der Kamera aufnimmt, die Markierung erkennt und die Position und Ausrichtung der Kamera ableitet, um das virtuelle Objekt auf das reale Bild zu projizieren und das Ergebnis anzuzeigen.

Die Genauigkeit dieser Systeme zur Schätzung der Position und Orientierung der Marker hängt hauptsächlich von der Kalibrierung der Kamera ab, die im Wesentlichen die Beseitigung optischer Verzerrungen und die Einstellung der Auflösung der Bilder und der Größe des Markers in Pixeln umfasst.

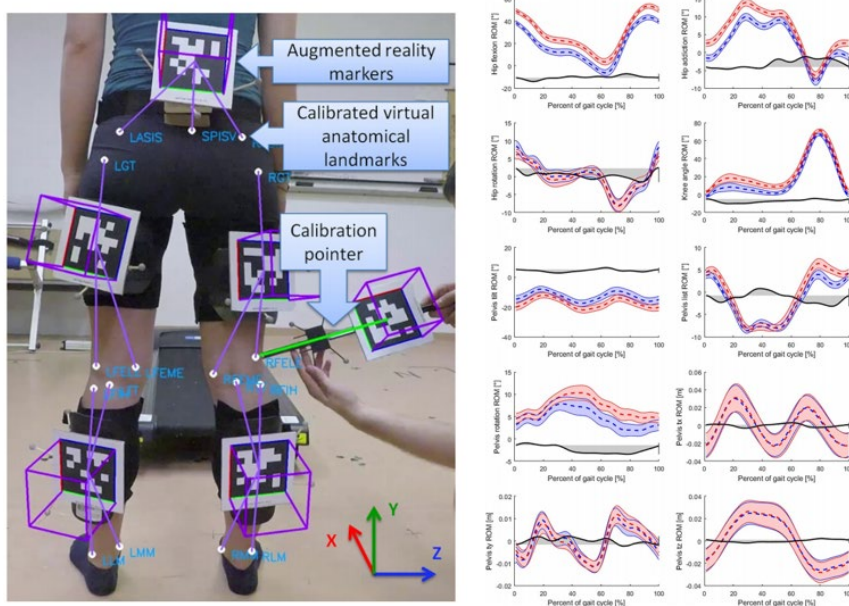


Abbildung 6 - Links: Satz von AR-Markern, die zur Extraktion kinematischer Informationen der unteren Gliedmaßen verwendet wurden, und Vergleich der Trajektorien der Winkel des AR-Systems (rot) und des Optitrack®-Bewegungsanalysesystems (blau); rechts: Bilder aus Nagymáté et al. [8].

Diese Geräte werden vor allem in Rehabilitationsprozessen, aufgrund der Möglichkeit zur Interaktion mit dem Benutzer, oder als Motion-Capture-Systeme eingesetzt. In der Studie von Nagymáté et al. [8] wird ein im Vergleich zu herkömmlichen 3D-Photogrammetriesystemen erschwingliches Ganganalysesystem vorgeschlagen und validiert, das auf einer einzigen Kamera und einem Satz von Augmented-Reality (AR)-Markern basiert. Die AR-Marker werden auf den zu vermessenden Segmenten platziert (Abbildung 6), um sicherzustellen, dass sie während der gesamten Erfassung der Bewegung, in diesem Fall des Gangzyklus, für die Kamera sichtbar sind. Die Ergebnisse der räumlich-zeitlichen und winkelmäßigen Parameter

des Gangs wurden mit den Ergebnissen verglichen, die mit einem optischen System der 3D-Bewegungsanalyse erzielt wurden.

Parameter

Die wichtigsten Parameter, die dieses Gerät zur Verfügung stellt, werden extrahiert, nachdem die Position und Orientierung des zu beurteilenden Segments durch die AR-Marker erhalten wurde, wie im Fall von optischen Systemen durch das Marker-Modell, das das Segment definiert. Zu diesen Parametern gehören die raum-zeitlichen Parameter, der Gelenkbereich, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung, usw.

Vorteile und Nachteile

Diese Technologie ermöglicht die Interaktion mit verschiedenen Umgebungen oder Objekten in Echtzeit, zusätzlich zur Aufzeichnung kinematischer Variablen, die mit einer Aktivität verbunden sind, was Ziele oder Aufgaben im Zusammenhang mit Trainings- oder Rehabilitationsprozessen erleichtert.

Die Verfolgung auf Basis von AR-Markern kann mit einer einzigen Kamera funktionieren, obwohl die Bewegungserfassung möglicherweise auf eine einzige Richtung oder im Raum beschränkt ist, damit die Auflösung der Ausrüstung das Bild genau verarbeiten kann.

Markerlose Systeme

Die aktuellen Fortschritte in der Bewegungsbeurteilung konzentrieren sich auf die Entwicklung von vollautomatischen Systemen, die keine am Körper angebrachten Marker verwenden. Die computergestützte Bildverarbeitung dieser Systeme rekonstruiert die Bewegung aus einem Video oder einem optischen Sensor, sodass die Testperson keine Art von Tracking-Marker tragen muss [3]. Dies wird die Forschung und die medizinische Praxis in verschiedenen Bereichen wie dem klinischen Umfeld und dem Sport verbessern.

Die neuesten Systeme verwenden stereografische Kameras, die das menschliche Binokularsehen imitieren, oder aktive Kameras, die Licht auf die Szene projizieren, um eine Tiefenkarte zu erstellen. Diese Systeme verbessern die Effizienz der Datenerfassung im Vergleich zu früheren Methoden, die einen Satz synchronisierter und kalibrierter Kameras sowie eine chromatische Umgebung verwendeten.



Abbildung 7. Bild der Tiefenkarte unter Verwendung des OpenNI-Tools, aus Dyce et al. [9].

Eine Tiefenkarte (Abbildung 7) ist ein Bild, in dem die Pixel die Entfernung von einem Punkt im Raum zur Kamera beschreiben, anstelle der üblichen Informationen über Farbe oder Helligkeit. Informationen über die Tiefe können helfen, die Probleme herkömmlicher Kameras zu reduzieren: Lichtverhältnisse der Umgebung, Schatten, Reflexionen oder unebene Hintergründe [1].

Bei diesen Motion-Capture-Anlagen geht es vor allem darum, die Silhouetten oder Strukturen zu erkennen, die bei der Analyse lokalisiert und verfolgt werden müssen. Diese Systeme passen menschliche Körpermodelle an die lokalisierten Silhouetten an und extrahieren die Informationen über die untersuchten Segmente. Anschließend werden diese Informationen mit Rekonstruktionsverfahren verarbeitet, die auf dem an die Silhouette angepassten Modell und der aus dem Bild gewonnenen Position des Objekts basieren (generative Algorithmen), oder mit Verfahren, die durch automatisches Lernen und Trainieren des Analysesystems die Position des Modells allein aus dem Bild bestimmen (diskriminatorische Ansätze).

Die typischen Komponenten dieser markerlosen Motion-Capture-Systeme sind [1]: Kamerasystem, Körpermodell, Erkennung der Silhouette des Körpers oder Objekts und die Algorithmen, die zur Extraktion der Parameter der Silhouette, Haltung und Position des Körpermodells verwendet werden.

Eines der am weitesten verbreiteten Systeme für die Unterhaltung wird zunehmend in verschiedenen Bereichen, wie z. B. der Rehabilitation, eingesetzt: die Kinect®-Kamera von Microsoft. Diese Kamera erzeugt eine Tiefenkarte, indem sie Infrarotlicht auf den Körper aussendet. Anschließend verfolgt die Kinect® das auf dem Bild eingestellte Modell durch die Kombination von Informationen über Tiefe und Kinematik des menschlichen Körpers (Abbildung 8).

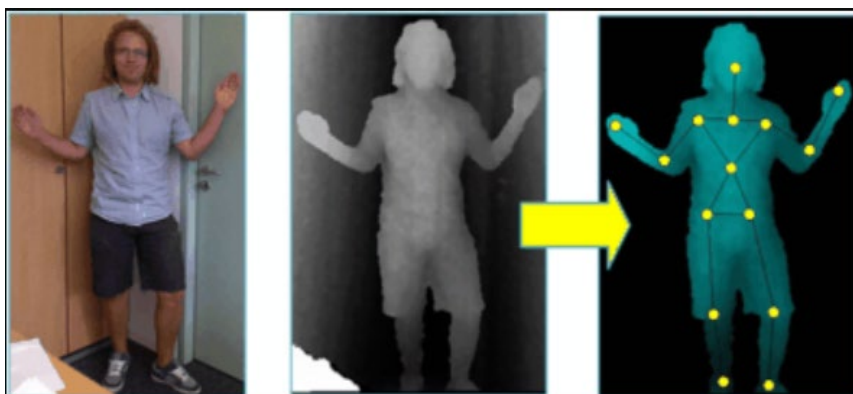


Abbildung 8. Bilder von Microsoft Kinect Tiefenkarte und Modellgenerierung, Bild entnommen aus Kristkler et al. [10].

Darüber hinaus gibt es komplexere markerlose Bewegungsanalysesysteme, die speziell auf Sportbewegungen angewendet werden. Sie bestehen aus mehreren Kameras, die den Analysebereich umgeben, und einer Körpererkenntnissoftware, mit der später ein Körpermodell zur Berechnung kinematischer Größen in 3D verknüpft wird (Abbildung 9). Diese Systeme können sowohl im Labor als auch im Freien Messungen durchführen, sofern die Lichtverhältnisse und der Farbkontrast zwischen Hintergrund und Objekt dies zulassen; dies beeinträchtigt jedoch ihre Präzision und einige Bewegungsebenen.

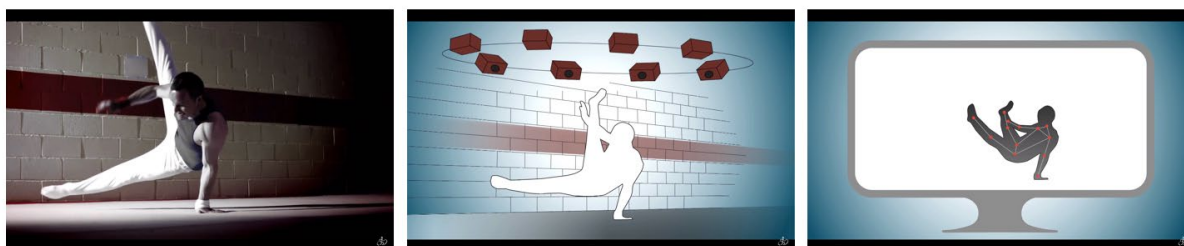


Abbildung 9 - Sportliche Bewegung in Echtzeit, Silhouettenerkennung und Zuordnung eines Körpermodells, Bilder extrahiert aus Simi Shape 3D® (<http://www.simi.com/>).

Derzeit gibt es Systeme, die auf einer einzigen Kamera basieren, um 3D-Informationen zu extrahieren. Nach den Anpassungsprozessen der Bewegungsebene und der Kalibrierung verfolgen sie die Körperpunkte, die ein vordefiniertes Modell bilden, durch Methoden der künstlichen Intelligenz, die aus neuronalen Netzen bestehen, die in der Identifizierung und Vorhersage dieser Punkte trainiert sind, sowie durch das Erlernen von Mustern auf der Grundlage der erhaltenen Daten. Die in einigen Studien erzielte Genauigkeit [11] im Bereich der Bewegungsvariablen ist ausreichend, um sie in Bereichen wie Rehabilitation und Sporttraining einzusetzen.

Parameter

Die häufigsten Parameter, die mit diesen Systemen extrahiert werden, sind analog zu denen, die für die markerbasierten Systeme beschrieben wurden.

Vorteile und Nachteile

Einer der Hauptvorteile dieser Systeme ist die Möglichkeit, Bewegungsanalysen in realen Umgebungen durchzuführen, was die Zeit für die Vorbereitung der Messung spart, wenn Laborsysteme mit Markierungsinstrumenten verwendet werden.

Die Auflösung der von diesen Systemen verwendeten Kameras beträgt normalerweise 640x480 Pixel, was im Kontext von Videospiele ausreichend sein mag, aber ein Problem darstellen kann, wenn sie zur Erkennung bestimmter Körpersegmente verwendet werden. Außerdem schränkt die zeitliche Auflösung, die bei etwa 30 Hz liegt, ihre Verwendung auf Bewegungen ein, die nicht mit hoher Geschwindigkeit ausgeführt werden.

Im Hinblick auf die Genauigkeit dieser Systeme beziehen sich die in der Bibliographie aufgeführten Studien hauptsächlich auf langsame Bewegungen, wie z. B. den menschlichen Gang, während schnellere Bewegungen, wie sie im Sport ausgeführt werden, noch untersucht werden müssen; es ist jedoch zu beachten, dass die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse, die bei der Untersuchung von Rotationen in der Transversalebene erzielt werden, schwieriger sind [1].

3. Inertiale Systeme

Inertialsysteme sind eine Art von nicht-optischen Systemen, die auf Inertialmesseinheiten (IMU) basieren. In der Bewegungsanalyse bestehen diese Einheiten meist aus mehreren Sensoren (Abbildung 10):

- **Beschleunigungsmesser.** Er misst Beschleunigungskräfte, sowohl statische (z. B. Schwerkraft) als auch dynamische (erzeugt durch Bewegung, Stöße usw.). Die in diesen Systemen verwendeten Beschleunigungsmesser sind normalerweise triaxial, d. h. sie messen die **lineare Beschleunigung**, die in jeder der drei Raumachsen auftritt. Bei statischen Bewegungen (wenn sich der Proband nicht bewegt) messen sie Winkeldrehungen.
- **Gyroskop.** Es misst die **Winkelgeschwindigkeit**, d. h. die Drehgeschwindigkeit des Sensors, in den drei Achsen des Raums.
- **Magnetometer.** Es ermöglicht uns, die **Ausrichtung** des Sensors in Bezug auf den magnetischen Nordpol zu kennen, sowie die Schätzung der Position des Sensors zusammen mit den Informationen der vorherigen Sensoren.



Abbildung 10 - Bild der Sensoren, aus denen eine IMU besteht, ihre Größe und dann kommerziell gekapselt, entnommen aus Xsens ®

Die Grundvoraussetzungen zur Schätzung der Kinematik in 2D und 3D mit dieser Technologie sind [12]:

- Kenntnis der **Orientierung und Position des Sensors** in einem 2D- und einem 3D-Raum. Isoliert betrachtet kann die globale Position nicht bestimmt werden, sondern nur die räumliche Orientierung. Aus diesem Grund wird diese Information mit Hilfe von Fusionsalgorithmen aus den Informationen der Sensoren gewonnen.
- Bestimmen der **Achsen**, in denen die Bewegung stattfindet. Die Achsen der Sensoren müssen mit den Bewegungsachsen des anatomischen Referenzsystems **ausgerichtet** werden, um das funktionale Verständnis der Gelenkinematik in 2D und 3D zu erleichtern.

Kalibrierungs- und Ereignisschätzungsverfahren, bei denen ein Nullpunkt verwendet wird, um die Driftfehler des Sensors zu korrigieren, werden angewendet, um die Fehler bei der Schätzung der Position als Ergebnis der Berechnungen zur Integration der Signale von den Sensoren und zur Ausrichtung der Achsen zu lösen. Diese Verfahren werden in der Regel *ad hoc* für die zu analysierende Bewegung durchgeführt.

Inertialsensoren bieten eine präzise und zuverlässige Messmethode zur Beurteilung menschlicher Bewegungen, aber ihre Präzision und Zuverlässigkeit zur Schätzung der erforderlichen Informationen variiert und hängt von der zu beurteilenden Bewegung ab, da spezifische Berechnungen durchgeführt werden müssen. Die Verbesserung der Berechnungsprozesse macht sie jedoch zu einem validen System zur Untersuchung menschlicher Bewegungen [5].

Die verschiedenen kommerziellen Systeme, die auf dem Markt erhältlich sind, kommen in kleinen und leichten Boxen mit drahtloser Datenübertragung. Diese werden am Körpersegment angebracht, um die Bewegung eines solchen Segments im Raum zu schätzen [13]. Darüber hinaus können zwei oder mehr IMUs verwendet werden, um Daten von mehreren Segmenten gleichzeitig und synchronisiert zu empfangen, was ein Körpermodell zur Schätzung der Gelenkkinematik erzeugt (Abbildung 11).

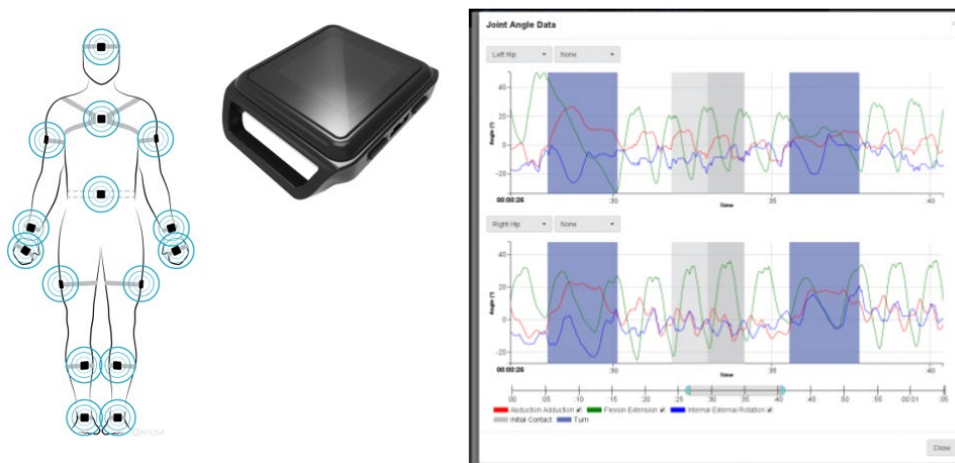


Abbildung 11 - Beispiel eines Modells aus Opal® Inertialsensoren und den Ergebnissen der Gelenkwinkel durch die Software Moveo Explorer®, Bilder aus <https://www.apdm.com/kinematics/>

Es gibt viel Literatur über den Einsatz und die Nützlichkeit dieser Systeme; die Identifizierung neuer Lösungen zur Erhöhung ihrer Präzision und Zuverlässigkeit sowie ihrer Anwendungen ist jedoch noch ein offenes Feld mit großen Erwartungen.

Parameter

Die gebräuchlichsten Parameter, die mit einem Messsystem auf der Basis von Inertialeinheiten der Bewegung berechnet werden, sind **lineare Beschleunigungen** in den drei Raumachsen, **Winkelgeschwindigkeiten** in den drei Raumachsen, **räumliche Orientierung** (Abbildung 12), **relative Winkel** zwischen zwei Segmenten in den drei Raumebenen und **raumzeitliche Ereignisse**, abhängig von der analysierten Bewegung.

Vorteile und Nachteile

Einer der Hauptvorteile dieser Systeme ist die Möglichkeit, dynamische 3D-Analysen der menschlichen Bewegung ohne die Einschränkungen oder Schwierigkeiten optischer Systeme durchzuführen. Eigenschaften wie ihre **Tragbarkeit** für den Einsatz außerhalb der Laborumgebung, ihre **Vielseitigkeit** in der Anwendung und ihr Preis machen sie zu einer attraktiven Alternative zu herkömmlichen Systemen.

Zu ihren Nachteilen gehören die Anfälligkeit für **Messfehler** bei der Berechnung der **absoluten Position** aufgrund des Vorhandenseins von Metallen in der Messumgebung, die Beschaffenheit des Sensors und die Empfindlichkeit der Datenfusionsalgorithmen zur Ermittlung der Position durch Integration der linearen Beschleunigung, die sich auf die Parameter Abstand und Länge auswirkt. Es werden jedoch weiterhin große Fortschritte in diesem Bereich gemacht, um diese Fehler zu minimieren.

Ein weiterer Nachteil bei der Verwendung von Inertialsystemen ist die **Instrumentierung**, die die Beurteilung von kleinen Gelenken oder Segmenten aufgrund von Größenproblemen einschränkt.

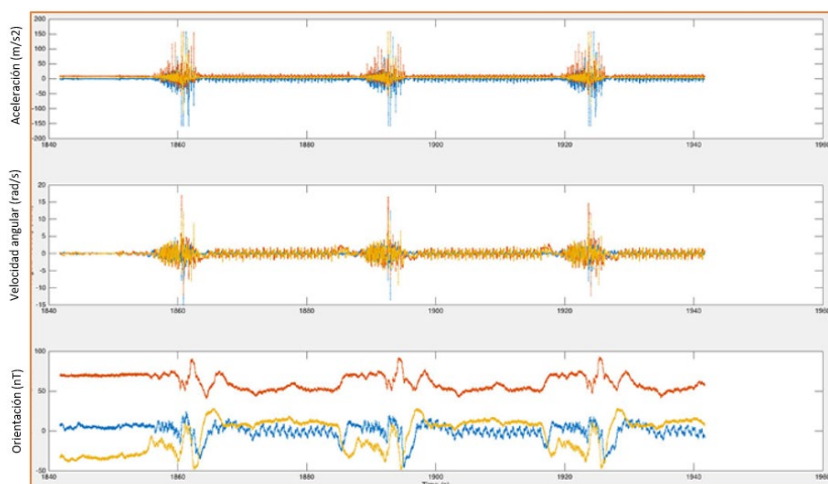


Abbildung 12 -Visualisierung der Signale der Parameter Winkelgeschwindigkeit, Beschleunigung und Orientierung, die von einem Inertialsensor stammen; Bild entnommen aus imeasureu.com

4. Andere

In diesem Abschnitt werden weitere Systeme zur Bewegungsanalyse beschrieben, die andere Technologien als die oben beschriebenen verwenden, die in verschiedenen Bereichen der biomechanischen Beurteilung eingesetzt werden.

Goniometer

Goniometer sind passive Geräte, die im klinischen Umfeld häufig zur Messung von Gelenkwinkeln verwendet werden, was zur Objektivierung von Mobilitätsdefiziten im Rahmen der klinischen Untersuchung nützlich ist.

Dieses Instrument (Abbildung 13) ähnelt einem Winkelschützer, ist aber speziell für die Messung der Gelenkwinkel des menschlichen Körpers konzipiert. Es gibt verschiedene Größen und Formen, je nach dem zu beurteilenden Gelenk. Die Messung wird durchgeführt, indem die Achse des Goniometers mit der Achse des zu messenden Gelenks und jeder Arm des Goniometers mit den Segmenten, aus denen das Gelenk besteht, ausgerichtet wird, dann wird der gemessene Winkel angezeigt [14].

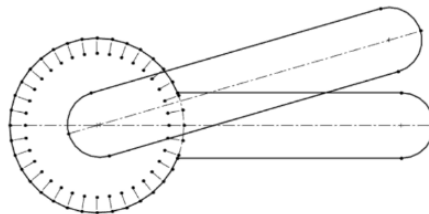


Bild 13 - Darstellung eines Goniometers zur Messung von Gelenkwinkeln, Bild entnommen aus Christenson, J. [3].

Seit der Einführung dieses Instruments wurden verschiedene Methoden entwickelt, um zu beschreiben, wie die Messungen durchgeführt werden, und um ihre Zuverlässigkeit zu verbessern, da diese Zuverlässigkeit von der Erfahrung des Untersuchers abhängt, das Goniometer, das Gelenk und die zu beurteilende Person korrekt zu positionieren. In der Literatur finden sich verschiedene Veröffentlichungen über die Zuverlässigkeit der Messungen, die von verschiedenen Untersuchern oder demselben Untersucher in verschiedenen Messsitzungen durchgeführt werden.

Eine der am häufigsten verwendeten Methoden ist die von der American Academy of Orthopaedic Surgeons (AAOS) vorgeschlagene. Von ihren Anfängen in den 1960er Jahren bis zur letzten Version aus dem Jahr 1994 hat sie Illustrationen geliefert, wie die Messungen von einer bestimmten "Start-Null-Position" aus durchzuführen sind, aber sie zeigt keine spezifischen anatomischen Bereiche, um die Goniometerarme auszurichten, und die angegebenen normativen Werte sind nicht mit Daten zu ihrer Zuverlässigkeit versehen und basieren in einigen Fällen auf kleinen Beispielen mit Erwachsenen [15].

Verschiedene Forschungsgruppen arbeiteten und arbeiten an der Verbesserung von Methoden, die dieses Instrument verwenden, und geben Empfehlungen für jede Fuge auf der

Grundlage von Reliabilitätsstudien sowie normative Werte, die nach Alter und Geschlecht segmentiert sind.

Parameter

Der vom Goniometer gelieferte Parameter ist die Messung des **relativen Gelenkwinkels** zwischen zwei Segmenten, ohne die absolute Position des Segments oder des Gelenks im Raum zu liefern.

Vorteile und Nachteile

Der Hauptvorteil dieses Instruments ist, dass es **kostengünstig, einfach zu bedienen und valide ist**, da es Informationen über den Gelenkwinkel liefert, die z. B. bei einer klinischen Untersuchung relevant sind.

Einer der Hauptnachteile von Goniometern, der in den meisten Kontexten, in denen sie eingesetzt werden, akzeptiert wird, ist ihre **Zuverlässigkeit**.

Um eine kontinuierliche Aufzeichnung dieser Information während der Messung einer Bewegung zu erhalten, wurden **Elektrogoniometer** entwickelt. Diese Geräte verwenden einen variablen Widerstand oder ein Potentiometer und ein mechanisches Befestigungssystem, so dass die Drehung eines Gelenks zu einer Drehung des Potentiometers wird. Auf diese Weise ist es möglich, direkt ein elektrisches Signal zu erhalten, das linear proportional zum gedrehten Winkel ist. Es gibt einen anderen Typ von Elektrogoniometern auf der Basis von **Dehnungsmessstreifen** (Abbildung 14), deren Instrumentierung viel weniger umständlich ist und die Winkel in verschiedenen Ebenen messen, je nachdem, ob sie einachsig, zweiachsig oder dreiachsig sind.



Abbildung 14 - Beispiel für ein kommerzielles drahtloses Elektrogoniometersystem (Biomec®), das zur Messung des Kniewinkels (blau) und des Knöchelwinkels (rot) beim Radfahren verwendet wird.

Neigungssensoren

Neigungsmesser können als Instrumente definiert werden, die auf der Schwerkraft basieren und ihre Messungen auf die Schwerkraft, eine Null-Startposition, beziehen, die sie mit Hilfe einer gewichteten Nadel oder einer Flüssigkeit anzeigen (Abbildung 15).

Elektronische Neigungssensoren (Abbildung 15) sind Geräte, die einen **Beschleunigungssensor** als Sensorelement verwenden. Dieser Beschleunigungsmesser

nutzt die Trägheit einer Masse, die sich auf einem Kraftsensor befindet, um die Gravitationsbeschleunigung zu messen. Die Änderung der vom Sensor erfassten Beschleunigung hängt von der **Neigung** eines solchen Sensors ab und zeichnet einen Wert in Grad auf.



Abbildung 15 - Baseline® Acu-Angle Blasenneigungsmesser (links) und DTS 2d Noraxon® elektronischer Neigungsmesser.

Sie werden hauptsächlich zur Beurteilung des Gelenkbewegungsumfangs verwendet und erfassen den Grad der Abweichung von der anatomischen Neutralstellung der verschiedenen Segmente der unteren/oberen Gliedmaßen sowie der Hals-, Lenden- und Brustwirbelsäule. Dazu werden sie mittels Klemmbändern an den zu untersuchenden Körpersegmenten oder anatomischen Landmarken wie den Dornfortsätzen oder der Okzipitalregion ausgerichtet (Abbildung 16).

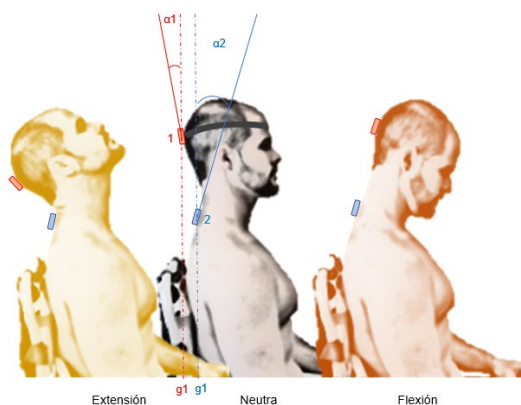


Abbildung 16 - Bewertung des Bewegungsbereichs der Halswirbelsäule. Der Wert jeder Position wird aus der Differenz zwischen den Ergebnissen von Inklinometer 1 (rot) und 2 (blau) extrahiert, modifiziertes Bild von NedRangos/IBV.

Die Informationen, die von einem am Körper oder einem Körpersegment angebrachten Beschleunigungssensor gewonnen werden, hängen hauptsächlich von vier Faktoren ab: der Position, an der er angebracht ist, der Ausrichtung seines Standorts, der Körperhaltung der Person und der Aktivität, die die Person ausführt [16].

Parameter

Neigungssensoren ermöglichen die Aufzeichnung des gemessenen Winkels in Bezug auf die Vertikale (definiert durch die Richtung der Schwerkraft) oder in Bezug auf eine festgelegte Referenzposition sowie der relativen Winkel zwischen den instrumentierten Segmenten.

Vorteile und Nachteile

Das Neigungsmessverfahren ist unter Feldbedingungen **einfach anzuwenden** und verursacht nur minimale Beeinträchtigungen für die ausführende Person, insbesondere bei nahezu statischen oder langsamen Messungen.

Die Hauptnachteile von Neigungssensoren sind, dass es nicht möglich ist, die Ebene zu identifizieren, in der die Abweichung in Bezug auf die Vertikale auftritt (daher müssen die Sensoren sorgfältig in Bezug auf die Messebene ausgerichtet werden), und die Tatsache, dass sie nicht bei schnellen Bewegungen verwendet werden können, da sie empfindlich auf Beschleunigungen reagieren.

GPS

Die Systeme, die auf der Ortung durch das Globale Navigationssatellitensystem (GNSS) basieren, werden gemeinhin als Systeme auf Basis der GPS-Technologie (Global Positioning System) bezeichnet. Die Entwicklung dieser Positionierungssysteme basiert auf der Atomuhr, die eine genaue Zeitmessung ermöglicht und uns erlaubt, den Zeitablauf zwischen der Übertragung eines Funksignals vom Satelliten und seinem Empfang durch ein GPS-Empfängersystem auf der Erde zu kennen.

Wenn die Entfernung vom Satelliten zum GPS-Empfänger bekannt ist und eine Kommunikation mit mindestens vier Satelliten besteht, kann der GPS-Empfänger durch Triangulation geortet werden [17], ebenso wie seine Richtung und Geschwindigkeit [18].

Diese Systeme werden üblicherweise in offenen Räumen eingesetzt, wo es keine physikalischen Störungen gibt, die eine korrekte Kommunikation verhindern, was Fehler in der Genauigkeit der Ortung verursacht. Die Probleme, die durch die Störungen großer Konstruktionen oder spezifischer atmosphärischer Bedingungen entstehen, werden jedoch durch differentielle GPS-Messungen (DGPS) gelöst, bei denen stationäre Empfänger, die an Bodenstandorten platziert sind, ihre festen Positionen mit der vom Satelliten gegebenen Position vergleichen [18]. So gibt es für Messungen, die in geschlossenen Umgebungen wie Sporthallen durchgeführt werden, Systeme mit Verstärkungseinrichtungen innerhalb der Umgebung und/oder die Inertialsensoren im Empfangsgerät selbst enthalten.

Die Hauptelemente, aus denen sich diese Systeme zusammensetzen, sind ein Signalsender/-empfänger im Körper des Probanden, ein Signalrepeater, der sich auf Bodenhöhe befindet, ein oder mehrere Satelliten oder ein lokales Positionierungssystem für geschlossene Umgebungen oder bei schwierigen Kommunikationsbedingungen (Abbildung 17).

Zusätzlich zu den aus dem Standort gewonnenen Informationen wie Geschwindigkeit und Entfernungen enthalten diese Systeme in der Regel Beschleunigungssensoren, die Informationen über die Intensität und die Art der zu analysierenden Bewegung liefern.

Der am weitesten fortgeschrittene Anwendungsbereich dieser Systeme ist der Sport. Die Integration der von diesen Systemen übertragenen Bewegungsinformationen zusammen mit physiologischen, taktischen oder strategischen Daten verleiht dieser Technologie ein großes Potenzial im Sport.



Abbildung 17 - Kommunikationselemente von GPS-Empfängsgeräten.

Parameter

Die wichtigsten Parameter, die von diesen Systemen erhalten werden, sind die **Position** des Empfängers (mit einer Genauigkeit von Zentimetern oder Metern, je nach Art des Systems), **Richtung**, **Entfernung**, **Geschwindigkeit** und **Beschleunigung** während der Bewegungsanalyse, des Trainings oder des Wettkampfs.

Diese Systeme können auch Beschleunigungsmesser oder Inertialsysteme enthalten, die genauere Informationen über die Bewegung liefern können: Aufprallkräfte, die während der Bewegung erzeugt werden, Beschleunigungen, die die Bewegung charakterisieren oder grundlegende raum-zeitliche Parameter wie die Biomechanik des Gangs. Informationen über die Trainingsintensität können auch durch die Verknüpfung von physiologischen Informationen durch die Erfassung der Herzfrequenz gewonnen werden.

Vorteile und Nachteile

Die Hauptvorteile dieser Systeme sind: es sind **kleine**, **leichte** und **tragbare** Geräte, die zu einem vernünftigen Preis erworben werden können; vor allem stören sie nicht die Ausführung der untersuchten Bewegungen; sie bieten **freien Zugang** zur Kommunikation mit Satelliten auf der ganzen Welt, was **kontextualisierte Informationen** für die Umgebung und die zu bewertende Aktivität bietet.

Zu den Nachteilen dieser Systeme gehören die **geringe Kommunikationsabdeckung** mit dem verfügbaren Satz von Satelliten an einigen Orten oder die Tatsache, dass die Genauigkeit der Positionierung einiger Systeme nicht ausreicht, um bestimmte Aktivitäten zu messen.

5. Hauptanwendungsgebiete

Die instrumentellen Techniken der kinematischen Analyse ermöglichen es uns, die menschliche Bewegung durch die Analyse verschiedener Variablen zu quantifizieren. Diese Variablen werden in den Messverfahren bestimmt, die zur Charakterisierung des untersuchten Objekts ausgewählt wurden.

Diese Methoden zur instrumentierten biomechanischen Analyse werden häufig implementiert und tagtäglich verwendet. Diese Geräte werden ständig weiterentwickelt, und aufgrund der Verbesserungen in Bezug auf die Tragbarkeit und die Benutzerfreundlichkeit wird diese Technologie zunehmend implementiert und von den Forschungslabors in die klinischen Sprechzimmer oder sogar zu den Benutzern selbst übertragen. Es ist jedoch wichtig, die technischen Eigenschaften der Geräte sowie die Verfahren für die Verwendung, die Zuverlässigkeit und die Gültigkeit in Bezug auf die Anwendungen, für die sie bestimmt sind, korrekt zu spezifizieren, um eine unsachgemäße Verwendung durch Fachleute, Lehrer oder Endbenutzer zu vermeiden.

Die Bereiche, in denen diese Techniken üblicherweise angewendet werden, sind der klinische Bereich, der Sport und die Ergonomie. Einige der häufigsten Anwendungsfälle in diesen Bereichen sind im Folgenden genauer aufgeführt.

Klinische Einstellung

Innerhalb der klinischen Umgebung sind die Hauptanwendungen und -einsätze dieser Techniken wie folgt:

- Zur Charakterisierung normaler Bewegungen und Bewegungen, die für bestimmte Pathologien charakteristisch sind, sowohl neurologische als auch muskuloskelettale.
- Zur objektiven Quantifizierung der funktionellen Kapazität der Person zur Durchführung von Aktivitäten des täglichen Lebens und zur Bestimmung des Grades der Veränderung.
- Um die Rehabilitationsstrategien zu planen, ihren Fortschritt zu überwachen und sie anzupassen.
- Zur Unterstützung bei der Entscheidung, ob eine Behandlung fortgesetzt, modifiziert oder beendet werden soll.
- Zur Unterstützung bei der Implantation und Anpassung von Orthesen und/oder technischen Hilfsmitteln.
- Um Indikatoren für die Wirkung eines Verfahrens zu erhalten, um die Effizienz der laufenden Prozesse zu verbessern.
- Erstellung von Richtlinien und Überwachung mit Hilfe von tragbaren Technologien, die die Adhärenz und Motivation von Menschen in bestimmten gesundheitsbezogenen Prozessen verbessern.

Sport

Im Sportbereich sind die Hauptanwendungen und -einsätze dieser Techniken:



- Zur Überwachung der Sporttechnik und Verbesserung der Leistung durch quantitative Korrektur von Fehlern und Mängeln in den technischen Bewegungen.
- Unterstützung der Profis bei ihren Trainingstechniken durch Beurteilung der Assimilation des Trainings durch den Athleten.
- Um die Risikofaktoren für bestimmte Verletzungen zu identifizieren.
- Vermeidung von Verletzungen durch Beratung über die sichere Ausführung der Sporttechniken, basierend auf den Informationen, die diese Techniken liefern.
- Zur Überwachung des Fortschritts verschiedener interessanter Variablen im Sportrehabilitationsprozess, was die Erholung und Anpassung an die Sportpraxis unterstützt.

Ergonomiken

Die Hauptanwendungen der instrumentellen Techniken im Bereich der Ergonomie am Arbeitsplatz und der Produktgestaltung sind:

- Beurteilung/Beschreibung des mit einer Tätigkeit verbundenen Muskel-Skelett-Risikos.
- Charakterisierung von sich wiederholenden Positionen und Gelenkbewegungen, die bei einer bestimmten Tätigkeit auftreten.
- Identifizierung von Verhaltensmustern, die durch Muskelermüdung und -belastung bei arbeitsbezogenen Aufgaben verursacht werden.
- Hilfe bei der Neugestaltung und Validierung von Jobs und Produkten.
- Beurteilung von Geräten und externen Hilfsmitteln im Arbeitskontext.
- Produktentwicklung unter ergonomischen Gesichtspunkten.

6. Beispiele

Dieser Abschnitt enthält einige Beispiele für Studien und Anwendungen, die für die Fach- oder Anwenderebene bestimmt sind und bei denen verschiedene instrumentelle Techniken zur Bewegungsanalyse im Einklang mit den oben beschriebenen Zielen eingesetzt werden.

In den letzten Jahren wurde eine signifikant steigende Anzahl von **klinischen** Forschungsarbeiten im Zusammenhang mit der biomechanischen Analyse veröffentlicht, was ein zunehmendes Interesse an den differenzierten Informationen zeigt, die aus diesen Techniken gewonnen werden. Diese Informationen werden vor allem in Bereichen angewandt, die mit der funktionellen Bewertung der Kapazitäten von Menschen, der Charakterisierung verschiedener Pathologien, der Festlegung und Planung einer Rehabilitation usw. verbunden sind.

Die Entwicklung der tragbaren Technologie hat zur Entwicklung von Beurteilungsgeräten und Systemen für die Diagnose beigetragen, die von medizinischem Fachpersonal ambulant eingesetzt werden können und nicht auf das biomechanische Beurteilungslabor beschränkt sind.

Charakterisierung von Pathologien

Der menschliche Gang ist eine der am meisten untersuchten Aktivitäten auf klinischer Ebene. Instrumentierte Studien zur Analyse des menschlichen Gangs wurden umfassend entwickelt, um den normalen menschlichen Gang zu verstehen und für die anschließende Analyse verschiedener Pathologien, die das muskuloskelettale System betreffen.

Die klinische Analyse des Gangs ermöglicht es uns, Informationen über den Zustand, die Entwicklung und die Prognose einiger Pathologien zu extrahieren, indem kinematische Parameter analysiert werden, die eine Korrelation mit verschiedenen funktionellen Aspekten des Gangs aufweisen. Die spezifischen Merkmale einiger Veränderungen spiegeln sich in bestimmten Parametern wider, sowohl kinematischen als auch kinetischen, und es werden Studien durchgeführt, um ihre Validität zu bestimmen, indem sie mit klinischen Skalen oder anderen Funktionstests verglichen werden.

Zum Beispiel analysiert die Studie von Weiss et al. [19] "Gait pattern in rheumatoid arthritis" kinematische und dynamische Parameter sowohl bei Probanden mit rheumatoider Arthritis (RA) als auch bei einer Kontrollgruppe, um festzustellen, ob es Parameter gibt, die den Grad der Funktionalität in Verbindung mit der Health Assessment Questionnaire (HAQ)-Skala bestimmen.

Bei Menschen mit RA kann es durch degenerative Gelenkveränderungen zu Veränderungen des normalen menschlichen Gangbildes kommen, was zu einer funktionellen Beeinträchtigung und Veränderung der Lebensqualität führt.

Die instrumentelle Technik, die für die kinematische Aufzeichnung verwendet wurde, ist die 3D-Photogrammetrie mit einem Analysesystem von Vicon Motion System® (Oxford, UK), das aus 6 Kameras besteht. Das Ganganalysemodell ist Plug in Gait (PiG), das vom Vicon® Motion

Capture System bereitgestellt wird. Dieses Modell besteht aus 34 Markern, die an anatomischen Orientierungspunkten des Kopfes, des Rumpfes, der Arme, des Beckens, der Beine und der FüÙe angebracht sind.

Das bemerkenswerteste kinematische Ergebnis dieser Studie ist die Abnahme des Gelenkbereichs, die im Rumpf, in der Hüfte, im Knie und im Sprunggelenk beobachtet wurde (Abbildung 18). Darüber hinaus wird eine Korrelation einiger kinematischer Parameter mit den aus dem HAQ extrahierten Ergebnissen beobachtet. Diese Studien können nützlich sein, um zu verstehen, wie RA die Gangveränderungen in den unteren Gliedmaßen beeinflusst.

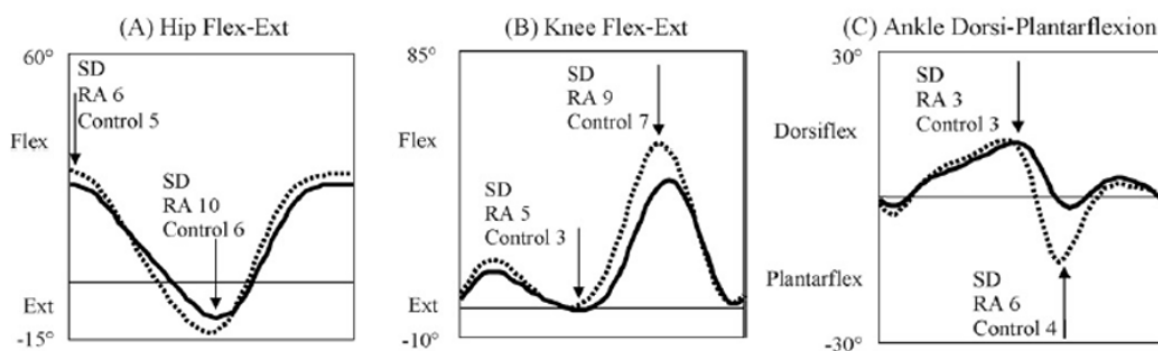


Abbildung 18 - Kinematik der RA-Gruppe und der Kontrollgruppe. Flexions-/Extensionswinkel der Hüfte (A) und des Knies (B) sowie Dorsal-/Plantarflexion des Knöchels (C) während des Gangzyklus. Durchgehende Linie (-): Kontrollgruppe, gestrichelte Linie: (- -) RA-Gruppe. Für alle Maximalparameter ist die Standardabweichung (SD) angegeben; entnommen aus Weiss et al. [19].

Funktionelle Bewertung

Stürze sind eines der aktuellen Probleme der Bevölkerung über 65 Jahre. Es wird geschätzt, dass einer von drei älteren Erwachsenen jedes Jahr stürzt, was weltweit die zweithäufigste Ursache für einen unfallbedingten oder unbeabsichtigten Tod ist. Stürze bedeuten eine Verschlechterung der Autonomie älterer Menschen und verringern ihre Lebensqualität. Traditionelle Instrumente zur Bewertung des Sturzrisikos haben einige Einschränkungen, wie z. B. Subjektivität, im Fall von Funktionsskalen, oder die Tatsache, dass sie für den Einsatz in der täglichen klinischen Praxis zeitaufwändig sind, bei umfassenderen Tests.

Tools, die auf instrumentellen Techniken basieren, werden derzeit entwickelt, um Lösungen zu bieten, die auf die Bedürfnisse von medizinischem Fachpersonal zugeschnitten sind. Als Beispiel nutzt das FallSkip-System die Trägheitssensoren eines mobilen Geräts, um Informationen während der Durchführung einer einfachen Reihe von Tests in einer klinischen Umgebung zu sammeln. Dieser Test (Abbildung 19), der auf einem modifizierten Protokoll des Time Up and Go (TUG)-Tests basiert, erfasst spezifische Parameter in Bezug auf Gang, Gleichgewicht, motorische Kontrolle und Muskelkraft. Diese Parameter stehen im Zusammenhang mit der Bewertung des Sturzrisikos bei älteren Menschen.

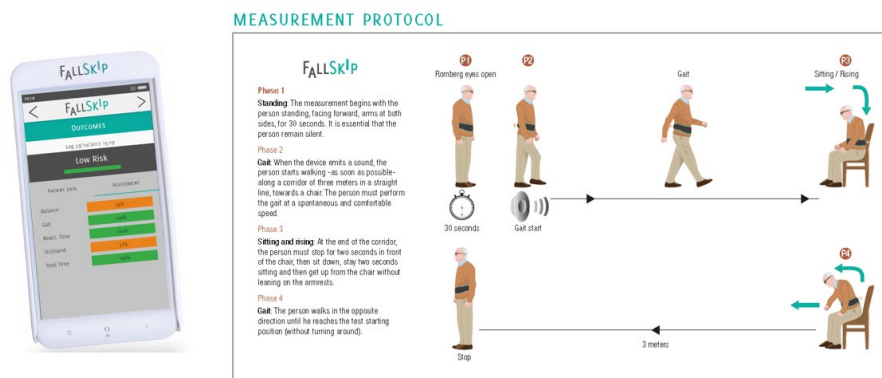


Abbildung 19 - Mobiles Gerät und Messprotokoll des FallSkip-Systems; Bilder entnommen aus <http://fallskip.com/>

Dies soll die Extraktion differenzierter objektiver Informationen von Interesse auf der Basis biomechanischer Variablen rationalisieren und vereinfachen, die es uns ermöglichen, den funktionalen Zustand einer Person hinsichtlich ihres Sturzrisikos zu kennen.

Die Anwendungen im Bereich des **Sports** sind in Bezug auf Wirkung und Nachfrage beliebter, vor allem aufgrund der steigenden Anzahl von Menschen, die Sport treiben und an verschiedenen Disziplinen teilnehmen, die mit Maßnahmen zur Gesundheitsförderung durch körperliche Aktivität zusammenhängen.

Instrumentelle Techniken der biomechanischen Analyse ermöglichen die Gewinnung quantitativer Informationen in Bezug auf Trainingstechniken, die Auswahl von Trainingsmaterial oder die Überwachung von Variablen, die mit der Leistung und dem Gesundheitsschutz zusammenhängen [20].

Auswahl der Sportgeräte

Ein Beispiel für die Forschungsergebnisse zur kinematischen Analyse des Laufens und der Schuhwahl ist die Entwicklung von Werkzeugen wie dem Runalytics®-System des Instituto de Biomecánica von Valencia (IBV). Dieses System führt eine Echtzeit-Analyse der Gelenkwinkel des Fußes während der Standphase des Laufgangs durch und klassifiziert sie nach dem Typ des Fußabdrucks (Pronator, Supinator, Neutral) unter Verwendung von Klassifikatoren, die auf Datenmanagementtechniken und maschinellem Lernen basieren. Dieses System verwendet eine Analysetechnik, die auf Videobildern zusammen mit Augmented-Reality-Markern basiert, die sich im Bein und im Rückfuß des Läufers befinden, wodurch es möglich ist, die relative Bewegung im Raum der Bein- und Fußkörpersegmente in 3D zu messen (Abbildung 20). Diese Analyse ermöglicht es uns, über die Art des Fußabdrucks beim Laufen zu beraten und das am besten geeignete Schuhwerk auszuwählen.



Abbildung 20 - Runalytics©-System zur Analyse des Fußabdrucks beim Laufen; Bilder extrahiert aus <http://www.runalytics.es/>

Bewertung von Sporttechniken

Die technische Beurteilung von Athleten ist ein wesentlicher Prozess, um die individuelle Leistungsfähigkeit und Anpassung an eine Sportdisziplin zu bewerten. Diese Beurteilung ermöglicht es uns, die Fähigkeiten des Athleten zu kennen und die Grundlagen für die anschließende Planung und Intervention im Trainingsprozess zu legen. Heutzutage machen die ständigen Verbesserungen in den verschiedenen Aspekten der Vorbereitung des Athleten, wie Ernährung, körperliche Verfassung usw., die objektive und genaue Beurteilung der Sporttechnik zu einem differenzierenden Faktor, um bessere Ergebnisse zu erzielen.

Eines der Ziele der Bewertung von Sporttechniken ist die Analyse der Variablen, die bei den verschiedenen Schlüsselereignissen während der Ausführung der Sportbewegung auftreten, um Defizite, Verbesserungsmöglichkeiten und/oder Trainingseffekte zu erkennen. Traditionell wurde diese Art der Beurteilung von Trainern durch direkte Beobachtung durchgeführt, was eine einfache und schnelle Methode ist, aber Erfahrung und Wissen seitens des Untersuchers erfordert. Die Einführung von instrumentellen Techniken bietet eine objektive Aufzeichnung der spezifischen quantifizierbaren Parameter der zu analysierenden Bewegung oder Disziplin. Derzeit ermöglichen tragbare und nicht-invasive Systeme die Durchführung dieser Art von Bewertung im Sportkontext und bieten Realismus und Validität, während Laborbewertungen Vorteile wie Objektivität, Standardisierung und Zuverlässigkeit bieten [21].

Im Falle des Tennissports werden im Folgenden zwei Beispiele für den Einsatz von instrumentellen Techniken zur kinematischen Analyse aufgeführt. Beide Beispiele konzentrieren sich auf die Analyse der Sporttechnik.

Die Arbeit von Ebner und Findling [21] "Tennis Stroke Classification: Comparing Wrist and Racket as IMU Sensor Position" untersucht eine Methodik zur Erkennung und Klassifizierung von 8 Schlägen, die im Tennis vorkommen, und zur Visualisierung der Unterschiede in den Winkelgeschwindigkeiten und Beschleunigungen in 3D, die aus den Informationen von zwei Inertialsensoren extrahiert werden: einer befindet sich im Schläger und ein weiterer im Handgelenk des Spielers (Abbildung 21).

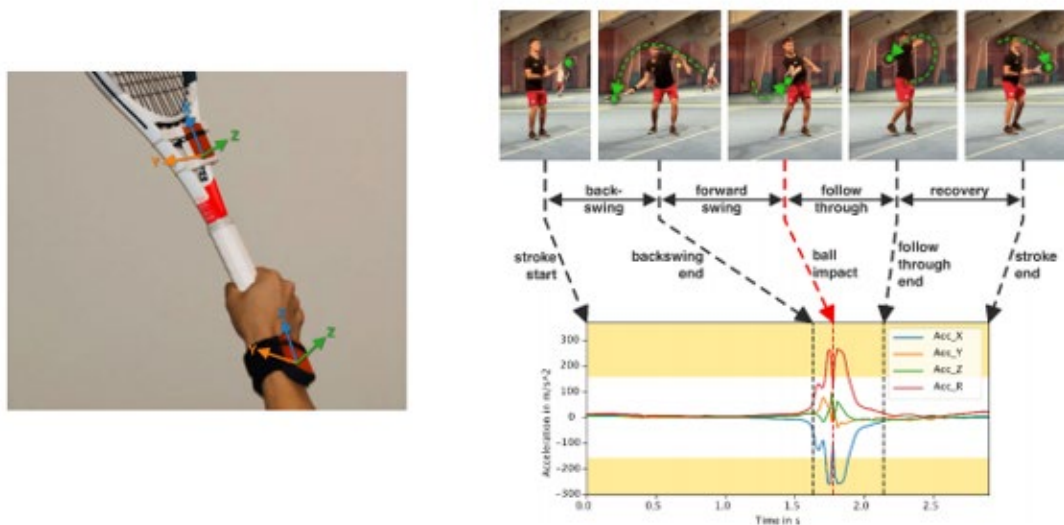


Abbildung 21 - Montage von Inertialsensoren im Schläger und im Handgelenk (links) und Beispiel für die in den verschiedenen Phasen eines Schlags aufgezeichneten Beschleunigungen (rechts); Bilder entnommen aus Ebner y Findling [22].

Die Arbeit von Yang et al. [23] "TennisMaster: an IMU-based online serve performance evaluation system" stellt ein System zur Bewertung der Leistung der Aufschlagbewegung beim Training vor. Die Informationen werden ebenfalls aus zwei Inertialeinheiten extrahiert, die sich im Schienbein und im Handgelenk des Spielers befinden (Abbildung 22).

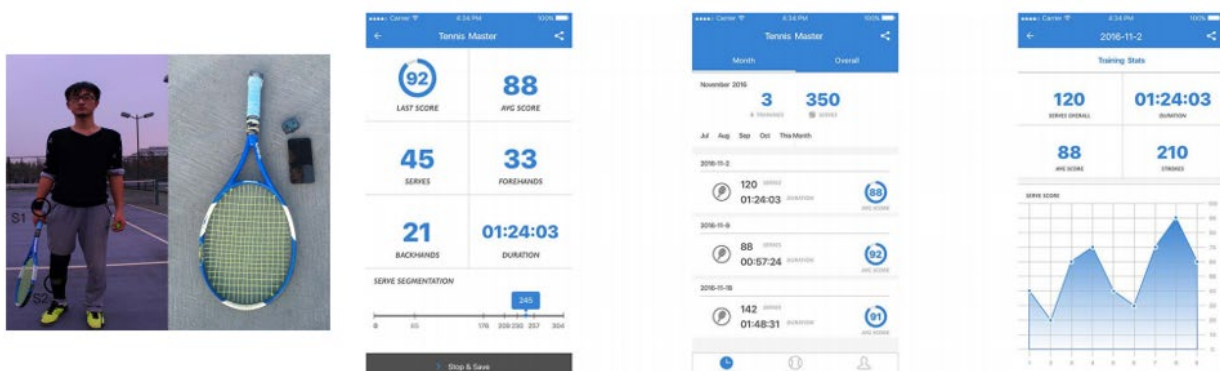


Abbildung 22 - Montage von Inertialsensoren (S1) an der Unterseite des Schlägers (S2) und im Schienbein des Spielers (links). Beispiele für die App-Screenshots, die den Aufschlagsscore, die Anzahl der Schläge, den Trainingsverlauf usw. zeigen. (rechts). Bilder entnommen aus Yang et al. [23].

Diese Systeme ermöglichen eine Quantifizierung der vom Spieler ausgeführten Belastung und des Leistungsniveaus, was sowohl dem Trainer bei der Herangehensweise und Planung des Trainings als auch dem Spieler durch das Feedback zum Training hilft.

Im Bereich der **Ergonomie** ermöglicht der Einsatz instrumenteller Techniken zur Erfassung der Gelenkbeweglichkeit, der Position verschiedener Körpersegmente, der Reichweiten und der Aufgabenleistung die Erforschung, Untersuchung und Entwicklung von Methoden zur korrekten Anpassung von Umgebungen und Produkten. Im Arbeitskontext ist es wichtig, Variablen zu erfassen und zu quantifizieren, die mit der Beweglichkeit und der Position

bestimmter Körpersegmente bei bestimmten Aufgaben der Arbeit zusammenhängen. Anhand dieser Informationen lässt sich zum Beispiel das Risiko von Muskel-Skelett-Erkrankungen bestimmen, indem das Arbeitsplatzrisiko durch Methoden auf der Grundlage der Analyse von Fehlhaltungen, sich wiederholenden Bewegungen usw. bewertet wird.

In diesem Zusammenhang werden zwei Studien zum Thema Ergonomie am Arbeitsplatz als Anwendungsbeispiel gezeigt.

Charakterisierung von Arbeitsaufgaben

Repetitive Bewegungen sind in vielen Berufen häufig und können zu muskuloskelettalen Problemen in den oberen Gliedmaßen führen. Die Arbeit von McDonald et al. [24] "Muscular and kinematic adaptations to fatiguing repetitive upper extremity work" beinhaltet eine Studie über das Auftreten von Ermüdung bei spezifischen Aufgaben, die die oberen Gliedmaßen betreffen, sowie über die Veränderungen der Kinematik der Muster im Laufe der Zeit.

Die für die Bewegungsanalyse verwendete instrumentelle Technik ist das Raptor-4-System der Firma Motion Analysis Corporation, Santa Rosa, (CA). Elf Kameras, die mit einer Frequenz von 50 Hz aufzeichnen, und ein Modell mit 72 reflektierenden Markern wurden verwendet, um die 3D-Winkel der Gelenke von Handgelenk, Ellbogen, Schulter und Rumpf zu erhalten. Zur Simulation dieser Aufgaben wurde ein im Bewegungslabor konzipierter Arbeitsplatz zusammen mit anderen instrumentellen Techniken wie Oberflächen-Elektromyographie und einer Kraftplattform verwendet (Abbildung 23).

Eine der wichtigsten Schlussfolgerungen der Studie ist, dass muskuläre Anpassungen und kinematische Muster aufgaben- und zeitabhängig sind. (Abbildung 23). Diese Studien können dazu beitragen, die Haltungsänderungen, die bestimmte Aufgaben in Abhängigkeit von der Belastung und der Ausführungszeit mit sich bringen, weiter zu untersuchen und somit Lösungen und Strategien zur Minimierung möglicher muskuloskelettaler Risiken bereitzustellen.

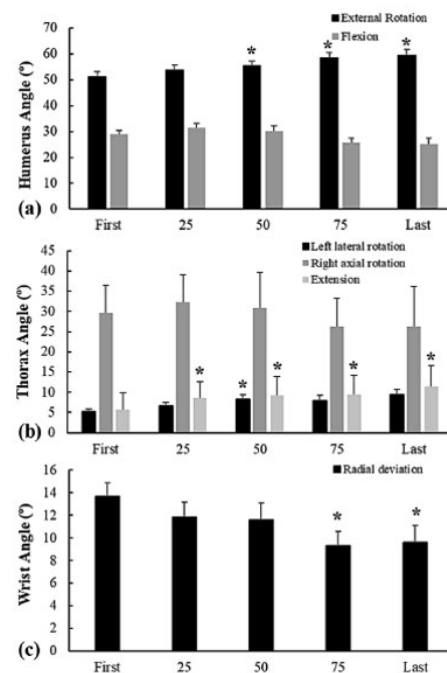
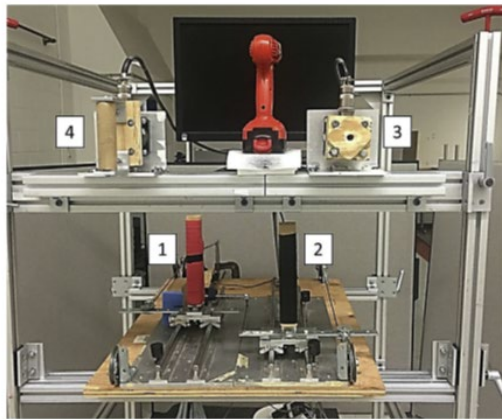


Abbildung 23 - Arbeitsstation mit vier Aufgaben: (1) Zug-Aufgabe, (2) Druck-Aufgabe, (3) Bohr-Aufgabe und (4) Auf/Ab-Ziel-Aufgabe mit 2 Kraftstufen (links). Winkeldifferenzen in verschiedenen Gelenken über die Zeit während der Drill-Aufgabe (rechts). Bilder extrahiert aus McDonald et al. [24]

Bewertung von externen Hilfsmitteln

Fehlhaltungen oder Tätigkeiten, die das Tragen und Heben von Lasten beinhalten, sind in bestimmten Berufen, vor allem im industriellen Bereich, üblich. Darüber hinaus sind Erkrankungen der Lendenwirbelsäule eine der häufigsten Erkrankungen in der heutigen Gesellschaft. Daher wurden Maßnahmen zur ergonomischen Anpassung von Werkzeugen und Arbeitsplätzen in der Arbeitsumgebung des industriellen Sektors durchgeführt; ebenso wurden Geräte entwickelt, die bei der Handhabung von Lasten helfen, um das Risiko von Verletzungen der Lendenwirbelsäule oder der oberen Gliedmaßen zu minimieren. Eines der neuesten Geräte, die derzeit eingesetzt werden, sind Exoskelette. Diese Systeme können entweder aktiv sein und Aktoren enthalten, die das Subjekt unterstützen, oder passiv, deren Hauptziel darin besteht, durch verschiedene Elemente wie Federn, Stoßdämpfer oder Materialien mit der Fähigkeit, Energie zu speichern und sie zum erforderlichen Zeitpunkt an das Subjekt zurückzugeben, zu unterstützen und zu entlasten.

Die Arbeit von Picchiotti et al. [25] "Impact of two postural assist exoskeletons on biomechanical loading of the lumbar spine" untersucht das Verhalten von zwei verschiedenen Modellen von Exoskeletten (Abbildung 24) durch die Analyse kinematischer Variablen sowie der Muskelaktivität und -kraft, die ebenfalls in dieser Studie vorgestellt werden.

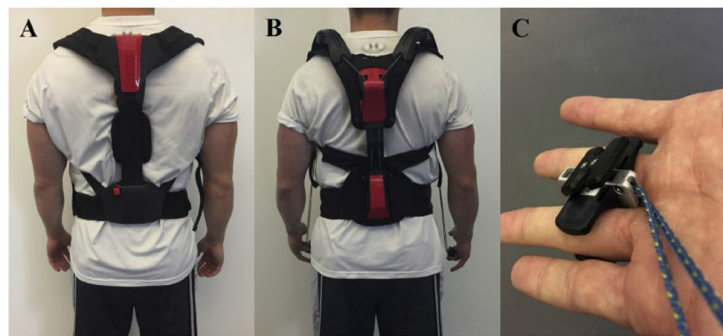


Abbildung 24 - Bilder der in der Studie getesteten Exoskelette: FLx (A), V22 (B) und der Handaktuator des V22, Bilder entnommen aus Picchiotti et al. [25].

Die instrumentelle Technik, die für die Bewegungsanalyse verwendet wird, ist ein optisches Motion-Capture-System, bestehend aus 42 Prime 41 OptiTrack-Kameras (Natural Point, Corvallis, OR, USA) mit einem Ganzkörpermodell, das aus 41 Markern besteht, deren Position im Körper von der OptiTrack-Motion-Capture-Software bestimmt wird. Die Aufnahme­frequenz wird mit 120 Hz durchgeführt.

Diese Studie vergleicht die Ergebnisse der Beugewinkel in den Gelenken der Rumpf-, Hüft- und Knie­segmente während Hebeaufgaben mit den beiden Exoskeletten und einer Kontrollbedingung (Abbildung 25). Zusätzlich wurden die Momente auf der Gelenkebene L5/S1 und die biomechanische Belastung der Lendenwirbelsäulengewebe anhand dynamischer Informationen berechnet.

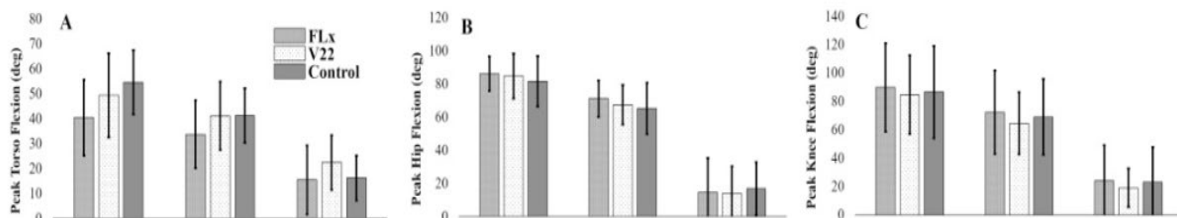


Abbildung 25 - Unterschiede in der Spitzenknieflexion zwischen den beiden untersuchten Exoskeletten und der Kontrollbedingung auf Rumpf- (A), Hüft- (B) und Knieebene (C); Bilder entnommen aus Picchiotti et al. [25].

Diese Studien helfen zu verstehen, wie diese Geräte helfen können, die Körperhaltung während der Ausführung einiger Aufgaben zu verbessern und die Beziehung oder den Einfluss in Bezug auf die Variation der Belastung des Lendenbereichs (im Fall dieser Studie) oder anderer Segmente, wie z. B. der oberen Gliedmaßen in Exoskeletten, die für diesen Zweck entworfen wurden.

7. Wichtige Ideen

Die Schlüsselideen dieser didaktischen Einheit sind:

- Es gibt verschiedene Techniken der Bewegungsanalyse.
- Die wichtigsten Techniken basieren auf der Analyse von Bildern oder Signalen von anderen Sensoren wie Beschleunigungsmessern, Gyroskopen usw.
- Die wichtigsten Parameter, die aus diesen Techniken extrahiert werden, beziehen sich auf Position, Gelenkbereich, Beschleunigung und Geschwindigkeit.
- Es ist notwendig, die technischen Merkmale und Spezifikationen der verschiedenen Techniken sowie deren Messverfahren zu kennen, um die Technik entsprechend dem zu messenden Objekt auszuwählen.
- Instrumentelle Techniken der biomechanischen Analyse werden in Bereichen wie dem klinischen Umfeld, Sport und Ergonomie mit vielfältigen Anwendungen eingesetzt.
- Die ständige technologische Weiterentwicklung, wie z. B. tragbare Aufzeichnungssysteme, die mit mobilen Apps verbunden sind, werden neue Anwendungen für die biomechanische Beurteilung ermöglichen und den Anwendungsbereich erweitern.

8. Referencias

- [1] Colyer, S.L., Evans, M., Cosker, D.P. et al. A Review of the Evolution of Vision-Based Motion Analysis and the Integration of Advanced Computer Vision Methods Towards Developing a Markerless System. *Sports Med - Open* (2018) 4: 24. <https://doi.org/10.1186/s40798-018-0139-y>.
- [2] Ancillao, A. "Analysis and Measurement of Human Motion: Modern Protocols and Clinical Considerations ". *J Robot Mech Eng Resr* (2016),1(4): 30 -37.
- [3] Pueo et al." Application of motion capture technology for sport performance analysis" *Retos: nuevas tendencias en educación física, deporte y recreación*, 2017;32: 241-247.
- [4] Van der Kruk, E., Reijne, M.M." Accuracy of human motion capture systems for sport applications; state-of-the-art review", *European Journal of Sport Science*, 2018 18 (6): 806-819. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1463397>.
- [5] Cuesta-Vargas, A., Galán-Mercant, A., Williams, J.M. "The use of inertial sensors system for human motion analysis". *Physical Therapy Reviews*, 2010;15(6): 462-473. <https://doi.org/10.1179/1743288X11Y.0000000006>.
- [6] Siltanen, S. (2012). Siltanen S. Theory and applications of marker-based augmented reality: Licentiate thesis. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, 2012. 250 p.
- [7] Wagner, Daniel & Schmalstieg, Dieter. (2007). ARToolKitPlus für Pose Tracking auf mobilen Geräten.
- 8] Nagymáté G, Kiss RM (2019) Affordable gait analysis using augmented reality markers. *PLoS ONE* 14(2): [e0212319](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212319). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212319>.
- [9] Dyce, W., Rodriguez, N., Lange, B., Andary, S., Seilles, A. Tabu search for human pose recognition. *3DIPM: 3D Image Processing, Measurement*, Feb 2014, San Francisco, United States. [ff10.1117/12.2040563](https://doi.org/10.1117/12.2040563). [ffhal-01061640f](https://doi.org/10.1117/12.2040563).
- [10] Kistler, Felix & Lugin, Birgit & Damian, Ionut & Dang, Chi Tai & Andre, Elisabeth. Natürliche Interaktion mit kulturell adaptiven virtuellen Charakteren. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 2012; 6. 39-47. [10.1007/s12193-011-0087-z](https://doi.org/10.1007/s12193-011-0087-z).
- [11] Cronin, N.J., Rantalainen, T., Ahtiainen, J.P., Hynynen, E., Waller B. Markerless 2D kinematic analysis of underwater running: A deep learning approach. *Journal of Biomechanics* 87 (2019) 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.02.021>.
- [12] Picerno, P. "25 years of lower limb joint kinematics by using inertial and magnetic sensors: A review of methodological approaches". *Gait & Posture* 51 (2017) 239-246. [http://dx.doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.11.008](https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.11.008).
- [13] Al Amri, M. et al. "Inertial Measurement Units for Clinical Movement Analysis: Reliability and Concurrent Validity". *Sensors* 2018, 18, 719; [doi:10.3390/s18030719](https://doi.org/10.3390/s18030719).

- [14] Christenson, J. Chapter Three - Sensors and Transducers. Handbook of Biomechatronics; 2019, Seiten 61-93. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812539-7.00003-9>.
- [15] Nancy Berryman Reese, William D. Bandy. Joint Range of Motion and Muscle Length Testing. Ed. Saunders, 2002. ISBN 0721689426, 9780721689425.
- [16] Godfrey, A., Conway, R., Meagher, D., ÓLaighin, G. Direct measurement of human movement by accelerometry. Medizintechnik & Physik. Band 30, Ausgabe 10, Dezember 2008, Seiten 1364-1386. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2008.09.005>.
- [17] Aughey, Robert.J. Applications of GPS Technologies to Field Sports. International Journal of Sports Physiology and Performance, 2011, 6, 295-310.
- [18] Maddison, R., Ni Mhurchu, C. Global positioning system: a new opportunity in physical activity measurement. Int J Behav Nutr Phys Act 6, 73 (2009) [doi:10.1186/1479-5868-6-73](https://doi.org/10.1186/1479-5868-6-73).
- [19] Weiss, R. J., Wretenberg, P., Stark, A., Palmblad, K., Larsson, P., Gröndal, L., & Broström, E. Gait pattern in rheumatoid arthritis. Gait & posture, 2008;28(2): 229-234.
- [20] Page del Pozo, A.F., Porcar Seder, R.M. "Biomecánica y eHealth. Aplicaciones basadas en tecnologías de uso masivo", in Tecnología Digital para la salud y la actividad física, Aladro Gonzalvo, A.R., Arbinaga Ibarzábal, F, Ed.Madrid: Pirámide, 2019, S. 127 - 146.
- [21] Morante, J.C. "Evaluación de la técnica deportiva" en en Biomecánica y Bases Neuromusculares de la Actividad Física y el Deporte, M. Izquierdo, Ed. Buenos Aires, Madrid: Médica Panamericana, 2008, S. 157 - 171.
- [22] Ebner, C., Findling, R. D. (2019). Tennis Stroke Classification: Vergleich von Handgelenk und Schläger als IMU-Sensorposition. [10.1145/3365921.3365929](https://doi.org/10.1145/3365921.3365929).
- [23] Yang, D., Tang, J., Huang, Y., Xu, C. Li, J., Hu, L., Shen, G., Liang, C.M., Liu, H. 2017. TennisMaster: an IMU-based online serve performance evaluation system. In Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference (AH '17). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Artikel 17, 1-8. <https://doi.org/10.1145/3041164.3041186>.
- [24] McDonald, A. C., Mulla, D. M., & Keir, P. J. Muscular and kinematic adaptations to fatiguing repetitive upper extremity work. Applied Ergonomics, 2019; 75: 250-256.
- [25] Picchiotti, M. T., Weston, E. B., Knapik, G. G., Dufour, J. S., & Marras, W. S. Impact of two postural assist exoskeletons on biomechanical loading of the lumbar spine. Applied Ergonomics, 2029; 75: 1-7.



Die Unterstützung der Europäischen Kommission für die Erstellung dieser Veröffentlichung stellt keine Billigung des Inhalts dar, welcher nur die Ansichten der Verfasser wiedergibt, und die Kommission kann nicht für eine etwaige Verwendung der darin enthaltenen Informationen haftbar gemacht werden.



Dieses Projekt wurde mit Unterstützung der Europäischen Kommission finanziert.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung trägt allein der Verfasser; die Kommission haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

