

Aus dem Julius Wolff Institut
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Die Entwicklung und Validierung effektiver Methoden zur Reduzierung
von Hautmarkerartefakten für eine effektive, funktionelle Bestimmung des
Hüftgelenkzentrums aus Bewegungsdaten

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum medicarum (Dr. rer. medic.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin
von

Diplom Sportingenieur Stefan Kratzenstein
aus Haldensleben

Gutachter: 1. Professor Dr. Georg N. Duda.

2. Univ.-Professor Dr. Gert-Peter Brüggemann

3. Univ.-Professor Dr. Adamantios Arampatzis

Datum der Promotion: 25.10.2013

Inhalt

Abstract	4
Einleitung	5
Methodik	6
Untersuchungsstrategie	6
In-vivo Validierung des Verfahrens SCoRE zur funktionellen Bestimmung des Rotationszentrums am Hüftgelenk.....	6
Validierung des SCoRE Residuums als Qualitätsindex zur unmittelbaren Beurteilung des funktionell bestimmten Rotationszentrums am Hüftgelenk	7
Einführung und Validierung der gewichteten OCST zur effektiven Reduzierung von STAs unter Berücksichtigung gewichteter Hautmarkerpositionen	9
Anwendung der wOCST zur Identifizierung optimaler Hautmarkerpositionen für die funktionelle Bestimmung des Rotationszentrums am Hüftgelenk.....	10
Ergebnisse	11
Diskussion.....	12
Ausblick	15
Literatur.....	16
Anteilerklärung.....	18
Publikationen	20
Lebenslauf.....	21
Publikationen und Konferenzbeiträge.....	23

Abstract

Die klinische Ganganalyse ist ein Verfahren zur Erfassung der Kinematik des Bewegungsapparates. Sie ermöglicht die Quantifizierung von kinematischen Veränderungen im Krankheitsverlauf und der Evaluierung von Therapieerfolgen [1]. Die Bestimmung von Gelenkzentren ist ein fundamentaler Bestandteil der Ganganalyse, da besonders die Kinematik von Gelenken und deren Belastung im Fokus von Analysen stehen. Die Präzision der Verfahren zur funktionellen Bestimmung von Gelenkzentren wird primär durch Hautmarkerverschiebungsartefakte (STAs) limitiert [2, 3], wenn sich durch z.B. Hautelastizität der Weichteilmantel samt Hautmarker relativ zum Skelett verschiebt. Wird diese Bewegung als Bewegung des Skeletts interpretiert, kann dies zu falschen klinischen Schlussfolgerungen führen [4]. Während in-silico und in-vitro Studien funktionellen Methoden unter Ausschluss von STAs eine Präzision im Bereich von <5mm attestierten konnten [5], liegen die Abweichungen in in-vivo Applikationen eher im Bereich von cm [6]. Somit verbleibt die effektive Reduzierung von STAs der Schlüssel zu einer zuverlässigen Analyse der skeletalen Kinematik aus Bewegungsdaten. Durch die systematische Validierung und Weiterentwicklung des funktionellen Verfahrens *Symmetrical Centre of Rotation Estimation* (SCoRE) [5] zur Bestimmung des Rotationszentrums am Hüftgelenk und der *Optimal Common Shape Technique* (OCST) [3], einem Verfahrens zur Reduzierung von STAs, sollen STAs effektiver reduziert, optimale Hautmarkerpositionen identifiziert und somit das Leistungspotential funktioneller Verfahren ausgeschöpft werden.

Zum Erreichen dieses Ziels wurden folgende Teilstudien durchgeführt: (1) In-vivo Validierung des SCoRE Verfahrens, (2) Validierung des SCoRE Residuums als Qualitätsindex zur unmittelbaren Beurteilung funktionell bestimmter Rotationszentren, (3) Einführung und Validierung der gewichteten OCST (wOCST) zur effektiven Reduzierung von STAs unter Berücksichtigung gewichteter Hautmarkerpositionen, (4) Anwendung der wOCST zur Identifizierung optimaler Markerpositionen für die funktionelle Bestimmung des Rotationszentrums am Hüftgelenk.

Durch die systematische Validierung und Weiterentwicklung des Verfahrens SCoRE und der OCST, konnte mit dem SCoRE Residuum ein Qualitätsindex bestätigt werden, der die unmittelbare Beurteilung der Güte des funktionellen Ergebnisses erlaubt und zusammen mit der OCST ein neues Verfahren, die wOCST, bildet, welches durch die Gewichtung von Hautmarkerpositionen erstmals die unregelmäßige Verteilung von STAs berücksichtigt. Somit konnte die Präzision, mit welcher Rotationszentren in-vivo ermittelt werden, auf ein Niveau angehoben werden, welches bis dato nur in in-vitro und in-silico Studien erreicht wurde, wenn STAs ausgeschlossen waren. Für die klinische

Ganganalyse bedeutet dies ein neues Maß an Zuverlässigkeit, da sich die, um ein vielfaches höhere Qualität des Analyseverfahrens direkt auf die klinischen Schlussfolgerungen übertragen lassen.

Einleitung

Die klinische Ganganalyse ist ein nicht-invasives Verfahren zur Erfassung der Kinematik des muskuloskeletalen Systems [1, 6]. Sie dient der Beschreibung gesunder und pathologischer Bewegungsmuster bzw. der kinematischer Veränderungen im Krankheits- oder Therapieverlauf [7-9]. Die Bestimmung von Gelenkpositionen ist hierbei ein fundamentaler Bestandteil des Verfahrens, da besonders die Kinematik von Gelenken und deren Belastung im Fokus der Analysen stehen [6, 10].

In der Praxis werden Körpersegmente mit reflektierenden Hautmarkern versehen, deren Bewegungen erst durch Infrarotlicht Kameras erfasst und anschließend als Bewegung der Körpersegmente interpretiert werden. Mit Hilfe funktioneller Methoden wird anschließend aus den Bewegungsdaten die Position der Gelenkzentren ermittelt. In in-silico [5, 11] und in-vitro Studien [12-14] wurde gezeigt, dass durch dieses Verfahren Rotationszentren, wie das Hüftgelenkzentrum, mit einer Genauigkeit von <5mm Abweichung vom der tatsächlichen Gelenkposition bestimmt werden können, eine Genauigkeit, die in in-vivo Studien (13-52mm [6, 10, 13, 15, 16]) bisher nicht nachgewiesen werden konnte. Ein Grund dafür sind Hautmarkerverschiebungsartefakte (STAs), die auftreten, wenn sich das Weichgewebe samt Hautmarkern relativ zum darunter liegenden Skelett bewegt [3, 17] und diese Bewegung als skeletale Bewegung interpretiert wird.

Eine abweichende Gelenkposition hat Fehlinformationen zum kinematischen Ablauf einer Bewegung zur Folge, was sich direkt auf klinische Schlussfolgerungen bzgl. der Bewegung des Patienten auswirkt [18]. Stagni et al. [4] simulierten eine Abweichung von +/-30mm auf die tatsächliche Gelenkposition und ermittelten eine Minderung des Gelenkmomentes von bis zu 22% und eine Verkürzung der Schrittdauer von bis zu 25%, eine Größenordnung, welche es in vielen Anwendungen unmöglich macht, zwischen gesunden und pathologischen Bewegungsmustern zu unterscheiden. Eine Folge dieser Unsicherheit ist u.a. die schwierige Etablierung der klinischen Ganganalyse in der Praxis, weshalb das Verfahren derzeit überwiegend als Instrument der Forschung dient [19].

Die *Symmetrical Centre of Rotation Estimation* (SCoRE) war als erstes funktionelles Verfahren in der Lage, durch die Berücksichtigung beider Gelenksegmentbewegungen Rotationszentren auch bei geringen Bewegungsumfängen von <20° Rotationszentren mit einer Genauigkeit von <2mm zu bestimmen [5], was bisher allerdings nur in-silico bestätigt werden konnte. Zudem entwickelte unsere Arbeitsgruppe die *Optimal Common Shape Technique* (OCST) [3], ein mathematisches

Verfahren zur Reduzierung von STAs. Zwar konnten in einem Tierversuch STAs im Vergleich mit bisherigen Verfahren deutlich effektiver reduziert werden, doch steht eine Validierung am Menschen bisweilen noch aus.

Durch eine systematische Validierung und Weiterentwicklung bzw. eine Kombination dieser beiden Verfahren sollen STAs somit effektiver reduziert, optimale Hautmarkerpositionen identifiziert und die Anwendungsgenauigkeit funktioneller Methoden zur Bestimmung von Rotationszentren auf das Niveau bisheriger in-vitro bzw. in-silico Studien maximiert werden.

Methodik

Untersuchungsstrategie

Zur Erreichung des Arbeitsziels, der systematischen Validierung und Weiterentwicklung bzw. der Kombination der Verfahren SCoRE und OCST wurden folgende vier Teilziele angestrebt:

- (1) In-vivo Validierung des Verfahrens SCoRE zur funktionellen Bestimmung des Rotationszentrums am Hüftgelenk,
- (2) Validierung des SCoRE Residuums als Qualitätsindex zur unmittelbaren Beurteilung des funktionell bestimmten Rotationszentrums am Hüftgelenk,
- (3) Einführung und Validierung der gewichteten OCST zur effektiven Reduzierung von STAs unter Berücksichtigung gewichteter Hautmarkerpositionen,
- (4) Anwendung der wOCST zur Identifizierung optimaler Hautmarkerpositionen für die funktionelle Bestimmung des Rotationszentrums am Hüftgelenk.

In-vivo Validierung des Verfahrens SCoRE zur funktionellen Bestimmung des Rotationszentrums am Hüftgelenk

Hintergrund

Die auf Hautmarker basierte Bewegungsanalyse stellt hohe Anforderungen an den bewussten Umgang mit STAs und der exakten Bestimmung von Gelenkzentren, um besonders in Längsschnittstudien durch einen hohen Grad an Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit eine sichere Erfassung von Entwicklungen sicherzustellen. Obwohl das SCoRE Verfahren bereits in-silico untersucht und eine deutlich höhere Genauigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren ermittelt wurde [5], fehlt bisher eine in-vivo Untersuchung der Gütekriterien, um weiterführende Entwicklungsschritte abzusichern. Die Untersuchung dieser Gütekriterien ist Ziel dieses Abschnitts.

Mittels des SCoRE Verfahrens werden über die Hautmarker lokale Koordinatensysteme (LKS) auf den entsprechenden Körpersegmenten definiert und aus der simultanen Bewegung der LKS

zueinander das Rotationszentrum des Gelenks berechnet [5]. Die Stärken des Verfahrens liegen dabei besonders in der Präzision bei geringen Bewegungsumfängen [5], was eine hohe Bedeutung in klinischen Anwendungen findet, und in der hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit, welche bis zum 200fachen von bisherigen funktionellen Methoden erreichen kann [15].

Methodik

6 gesunde Probanden (Alter $\bar{30} \pm 4,5$; BMI $22,8 \pm 0,4$) gaben ihr Einverständnis zur Teilnahme an der Studie, welche zuvor von der Ethikkommission der Charité geprüft und genehmigt wurde. Sie wurden mit reflektierenden Hautmarkern bestückt und führten 100 Wiederholungen (4 Tage x 5 Untersucher x 5 Wiederholungen) einer standardisierten Bewegung [20] zur Bestimmung des Hüftgelenkrotationszentrums durch. Durch Kombination der Verfahren OCST, SCoRE und Symmetrical Axis of Rotation Approach (SARA), kurz: OSSCA, wurden anschließend STAs minimiert und die funktionellen Zentren der Knie- und Hüftgelenke bestimmt. Die STAs wurden durch die OCST minimiert, welche Veränderungen des Markerclusters auf den Körpersegmenten über den gesamten Bewegungszeitraum detektiert und das fehlerbehaftete Cluster durch ein für den gesamten Zeitraum optimales rigides Cluster ersetzt [3]. Anschließend wurde mit dem SCoRE Verfahren das Rotationszentrum am Hüftgelenk funktionell ermittelt. Das Kniezentrum wurde als Mittelpunkt der epicondylären Hautmarker auf die funktionelle Rotationsachse transformiert, welche mit dem ähnlichen Prinzip des SCoRE Verfahrens über die Definition von LKS durch das SARA Verfahren [11] ermittelt wurde. Als Vergleich zu herkömmlichen Verfahren diente der regressive Ansatz von Hunt [21]. Hierbei wurden Gelenkpositionen über feste geometrische Beziehungen zwischen tastbaren anatomischen Landmarken berechnet. Die Femurlänge, der Abstand zwischen den Gelenkzentren des Knies und der Hüfte, wurde als Vergleichskriterium zwischen den Messungen herangezogen.

Validierung des SCoRE Residuums als Qualitätsindex zur unmittelbaren Beurteilung des funktionell bestimmten Rotationszentrums am Hüftgelenk

Hintergrund

Neben STAs zählen auch systematische und zufällige Messungenauigkeiten, die z.B. durch unzureichende Kamerakalibrierung, Folgefehler durch digitale Bildbearbeitung, das Glätten und Filtern von Daten und die ungenaue Rekonstruktion von verdeckten Hautmarkern induziert werden können, zu potentiellen Fehlerquellen [22]. Sie stellen ein zusätzliches Risiko ungenau bestimmter Gelenkzentren dar und können damit ebenfalls zu falschen Analysen führen. Trotz der Kenntnis um diese Risikofaktoren ist es bisher nicht möglich, die Güte des ermittelten Gelenkzentrums unmittelbar nach Bewegungsanalyse zu verifizieren bzw. auf Verfahrensfehler zu prüfen. Ein Schritt,

der dringend notwendig ist, um die Zuverlässigkeit weiterführender Schlussfolgerungen sicher zu stellen.

Das SCoRE Verfahren bietet mit dem SCoRE Residuum (r) eine mathematische Größe, von der angenommen wird, dass sie in einem festen linearen Zusammenhang mit der globalen Abweichung des funktionell bestimmten Rotationszentrums steht [5]. Es beschreibt den Abstand der beiden lokalen bzw. segmentalen Rotationzentren, die zunächst für jedes Segment des Gelenks bestimmt werden und deren gemittelte Position schlussendlich errechnet und ins globale Koordinatensystem zurücktransformiert wird. Im Falle eines perfekten Rotationzentrums würden diese beiden lokalen Rotationszentren deckungsgleich sein, womit $r=0$ gelten würde. Die Verifizierung dieser Größe und die Ermittlung des mathematischen Zusammenhangs zwischen dem SCoRE Residuum und dem globalen Fehler ist Teil dieses Abschnitts.

Methodik

Auf der Grundlage eines in-vivo Hautmarkerprotokolls mit 6 Hautmarkern an der Hüfte und 8 Markern am Oberschenkel wurden Standardbewegungen zur Ermittlung des Hüftgelenkzentrums [20] simuliert. Die Bewegungen wurden durch das Induzieren unterschiedlicher Grade STAs (SD 0-10mm) und die Veränderung der Bewegungsumfänge (20° , 45° und 90°) variiert. Für eine Untersuchung des Einflusses der OCST [3] auf die Genauigkeit, mit welcher das Rotationszentrums am Hüftgelenk bestimmt wird, wurde aus den resultierenden Datensätzen anschließend mit und ohne vorheriger Reduzierung der STAs durch die OCST das Rotationszentrum bestimmt und mit der bekannten Position verglichen.

Zur Evaluation der Simulationsergebnisse wurden die Rotationszentren der Hüftgelenke von 6 gesunden Probanden (Alter $\bar{30} \pm 4,5$; BMI $22,8 \pm 0,4$) bestimmt. Alle Probanden gaben ihr schriftliches Einverständnis zur Studie, welches zuvor von der lokalen Ethikkommission der Charité geprüft und genehmigt wurden war. Mit der Platzierung von 6 Hautmarkern an der Hüfte und 8 weiteren am Oberschenkel wurde das identische Markerset der Simulation verwendet. Die Probanden führten jeweils 94 mal eine Standardbewegung zur Bestimmung der Hüftgelenksposition [20] aus. Die Marker wurden durch alternierende Untersucher jeweils immer neu platziert. Mittels SCoRE wurde anschließend aus den Bewegungsdaten das Rotationszentrum der Hüfte bestimmt. Die Berechnung erfolgte mit und ohne Reduzierung der STAs durch die OCST. Das Ergebnis wurde anhand des SCoRE Residuums mit dem Ergebnis der Simulationsstudie verglichen und verifiziert.

Einführung und Validierung der gewichteten OCST zur effektiven Reduzierung von STAs unter Berücksichtigung gewichteter Hautmarkerpositionen

Hintergrund

Trotz bestehender Verfahren zur Reduzierung von STAs verbleiben STAs die stärkste Fehlerquelle in der Hautmarker basierten Bestimmung von Gelenkzentren [17, 23]. Geometrische Veränderungen des Hautmarkerclusters werden über den gesamten Bewegungszeitraum bereits sehr genau erfasst und die Positionen der Hautmarker korrigiert [3, 24]. Die Korrekturen unterliegen jedoch der Annahme gleichmäßig verteilter STAs ohne Berücksichtigung der individuellen Tauglichkeit einer Hautmarkerposition hinsichtlich ihrer Eignung zur bestmöglichen Bestimmung des Rotationszentrums.

Mit dem SCoRE Residuum als Qualitätsindex für die Bestimmung von Rotationzentren besteht erstmals eine Zielgröße, die es erlaubt die Korrektur der Hautmarkerpositionen hinsichtlich einer möglichst genauen Bestimmung des Rotationszentrums am Hüftgelenk zu optimieren. Hierbei soll den Positionen von Hautmarkern eine Gewichtung zugeteilt werden, mit welcher Marker auf weniger geeigneten Positionen, z.B. Marker an Orten mit erhöhter Muskelaktivität oder Marker nahe dem Gelenk [25-27], durch ein geringeres Gewicht einen minderen Anteil in Berechnung der Gelenkposition eingehen, um somit das SCoRE Residuum zu minimieren. Marker auf besonders geeigneten Positionen sollen ein entsprechend hohes Gewicht zugewiesen bekommen und die Kerninformation zur Positionsbestimmung liefern. Als Grundlage dient die OCST nach Taylor et al. [3], ein Verfahren zur Reduzierung von STAs. Es wurde durch einen entsprechenden Optimierungsalgorithmus erweitert und erlaubt somit erstmalig die Berücksichtigung der unregelmäßigen Verteilung von STAs bei der Korrektur von Bewegungsdaten. Die Implementierung und Validierung des Verfahrens, der sogenannten gewichteten OCST (wOCST), ist das Ziel dieses Abschnitts.

Methodik

24 Patienten (Alter $\bar{67,5} \pm 5,4$; BMI $27 \pm 3,2$; 10 männlich) gaben ihr schriftliches Einverständnis zur Teilnahme an der Studie, welche zuvor von der Ethikkommission der Charité geprüft und genehmigt wurde. Sie wurden mit Hautmarkern am Becken und dem operierten Oberschenkel bestückt und führten anschließend eine Standardbewegung zur Bestimmung der Hüftgelenkposition [20] aus. Durch die Untersuchungen künstlicher Hüftgelenke konnte davon ausgegangen werden, dass es sich bei der Bewegung um eine reine rotatorische Bewegung handelt und exzentrische Artefakte durch z.B. unregelmäßige Verschleißerscheinungen am Femurkopf ausgeschlossen werden. Die Positionen der Rotationszentren der Hüftgelenke, bzw. der Implantate wurde mit dem SCoRE Verfahren

bestimmt. Die Reduzierung von STAs erfolgte durch die Standard OCST [3] und der zu validierenden wOCST. Als Kontrollgruppe dienten die unbehandelten Rohdaten der Bewegung. Die Genauigkeit des Ergebnisses wurde am SCoRE Residuum verifiziert.

Anwendung der wOCST zur Identifizierung optimaler Hautmarkerpositionen für die funktionelle Bestimmung des Rotationszentrums am Hüftgelenk

Hintergrund

Mit der Kenntnis über den direkten Zusammenhang zwischen der Größenordnung von Hautmarkerartefakten und der Platzierung von Hautmarkern [27] ist auch bekannt, dass STAs bereits im Vorhinein durch eine optimale Platzierung der Hautmarker auf ausgewählten Positionen minimiert werden können. Trotz zahlreicher Studien, die die Verteilung von STAs auf Körpersegmenten untersuchten, besteht keine konkrete Empfehlung zur Positionierung von Markerclustern unter Berücksichtigung unregelmäßig verteilter STAs. Im abschließenden Teil dieser Arbeit soll die wOCST als Verfahren zur Gewichtung von Hautmarkerpositionen angewandt werden, um die Bedeutung einzelner Hautmarkerpositionen innerhalb eines flächendeckenden Netzes von regelmäßig verteilten Hautmarkern über den Oberschenkel zu bestimmen. Ziel ist es ein Minimalmarkerset zu ermitteln, das zum einen minimalen Raum für STAs bietet und zum anderen eine größtmögliche Toleranz in der Markerplatzierung erlaubt.

Methodik

79 reflektierende Hautmarker wurden regelmäßig und flächendeckend auf dem rechten Oberschenkel und dem Becken von sieben gesunden, männlichen Probanden (Alter $\bar{29,1} \pm 5,5$; BMI $22,1 \pm 1,3$) verteilt. Alle Probanden gaben zuvor ihr schriftliches Einverständnis zur Studie, welche von der Ethikkommission der Charité geprüft und genehmigt wurde. Die Probanden führten eine Standardbewegung zur Bestimmung des Rotationszentrums am Hüftgelenk durch. Durch die wOCST wurde anschließend jedem der 63 Marker ein Gewicht zugeteilt, mit welchem die Eignung des Markers zur Bestimmung des Gelenkrotationszentrums ermittelt wurde. Die Grundlage der Gewichtung ist das Maß der Eigenbewegung des Hautmarkers während der Bewegung. Anschließend wurde aus einem Satz geeigneter Hautmarkerpositionen ein Minimalset an Markern untersucht und validiert. Die Ergebnisse wurden anhand des SCoRE Residuums verglichen. Zur Entwicklung des Untersuchungsprotokolls beschränkte sich die Studie zunächst auf die Ermittlung von geeigneten Regionen am Oberschenkel.

Ergebnisse

Die Untersuchung der Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit des funktionellen Ansatzes OSSCA (Kombination: SCoRE, SARA und OCST) zur Bestimmung der Femurlänge aus Bewegungsdaten ergab mit einem Interkorrelationskoeffizient (ICC) von 0,87, einen signifikant ($p < 0,01$) höheren minimalen ICC im Tages-, Untersucher und Gesamtvergleich als unter Verwendung des bisherigen regressiven Ansatzes (ICC 0,69).

Desweiteren wurde die Eignung des SCoRE Residuums (r) als Qualitätsindex in der funktionellen Bestimmung des Rotationszentrums am Hüftgelenk untersucht. Die Ergebnisse ergaben einen linearen Zusammenhang zwischen dem Wert des SCoRE Residuums und der tatsächlichen Abweichung (err) vom bekannten Rotationszentrum. Dieser lineare Zusammenhang kann mit $err = 0,5r$ beschrieben werden und wies eine Unabhängigkeit vom Umfang der Bewegung (20° , 45° und 90°) und dem Grad der STAs (SD 0-10mm) auf. Die anschließende in-vivo Ermittlung von 6 Gelenkpositionen konnte zeigen, dass die Anwendung der OCST zur Reduzierung von STAs das Residuum von 11mm auf < 6 mm reduzieren konnte. Das Ergebnis entspricht damit einem globalen Fehler von $err < 3$ mm und liegt somit in der Größenordnungen der SCoRE Residuen der Simulation.

Zur Validierung der wOCST wurden die Rotationszentren der Hüftgelenke von 24 Hüftpatienten bestimmt. Die Berechnung der Gelenkpositionen ohne gezielte Reduzierung von STAs resultierte in einem mittleren globalen Fehler von 14,4mm. Durch die Anwendung der Standard OCST konnte die mittlere globale Abweichung auf $err = 2,9 \pm 1$ mm reduziert werden. Die geringsten Abweichungen, gemessen am SCoRE Residuum, wurden durch die Anwendung der wOCST erreicht ($err = 1,7 \pm 0,5$ mm). Hierbei wurde für alle 24 Patienten eine signifikante Reduzierung ($p < 0,001$) des globalen Fehlern um durchschnittlich 24% erreicht. Für keine der Optimierungsverfahren wurde eine signifikante Korrelation zwischen dem BMI und dem SCoRE Residuum gefunden (OCST $R < -0,06$ und $p = 0,78$ / wOCST $R < 0,284$ und $p = 0,179$).

Die Anwendung der wOCST zur Identifizierung optimaler Positionen zur Hautmarkerplatzierung auf dem Oberschenkel ergab folgende Ergebnisse: Aus einem Set von 63 Markern ergaben sich für alle Probanden 6 Hautmarker mit einer erhöhten Gewichtung. Die Positionen dieser Hautmarker kumuliert mit den Positionen ihren beiden am höchsten bewerteten Nachbarn ergaben die optimalen Regionen zur Markerplatzierung (AI: proximal Rectus Femoris, AII: distal Rectus Femoris, LI und LII: lateral entlang Tensor Fasciae, PI: proximal Biceps Femoris, PII: distal Biceps Femoris). Die Validierung dieser Regionen zeigte, dass der Informationsgehalt dieser 6 ausgewählten Marker allein etwa dem des gesamten Marker Sets (63) entspricht (SCoRE Residuum: 63Marker $r = 2,7 \pm 0,5$ mm / 6 Marker $3,6 \pm 0,6$ mm).

Diskussion

Das Ziel dieser Arbeit war die systematische Validierung und Weiterentwicklung bzw. die Kombination von SCoRE [5] und OCST [3] zur effektiveren Reduzierung von STAs, um das Potential der Präzision und Genauigkeit funktioneller Methoden zur Bestimmung des Rotationszentrums am Hüftgelenk voll ausschöpfen zu können.

Dazu war es zunächst notwendig die Gütekriterien des SCoRE Verfahrens in-vivo zu validieren, um weitere Entwicklungsschritte gegen methodische Unsicherheiten abzusichern. Die Ergebnisse dieser Arbeiten zeigen in der Untersuchung der Gütekriterien Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit signifikante Vorteile des funktionellen Ansatzes gegenüber bisherigen regressiven Methoden. Die Vorteile des Verfahrens entstehen durch die Unabhängigkeit von der Platzierung von Hautmarken auf anatomischen Landmarken, welche zum einen besonders bei adipösen Probanden schwer zu identifizieren sind [17, 20, 21] und zum anderen durch individuelle oder z.B. auch geschlechterspezifische Unterschiede nicht den einheitlichen, geometrischen Berechnungsgrundlagen der Regressionsverfahren entsprechen [21, 28, 29].

Diese Studie fokussierte ausschließlich die Präzision des SCoRE Verfahrens, welche die wichtigste Grundlage für Längsschnittuntersuchungen ist, um einen sicheren Verlauf von Veränderungen in der Kinematik des Bewegungsapparates zu erfassen. Was weiterhin fehlt, ist eine in-vivo Validierung der Genauigkeit der funktionellen Methode, welche bis dato zwar in-silico untersucht wurde [5], aber in-vivo bisher daran scheiterte, nicht-invasive Bilddaten der Anatomie mit den Bewegungsdaten zu verbinden [30]. Trotz dieses Defizits kann davon ausgegangen werden, dass das SCoRE Verfahren nach dem derzeitigen Stand der Entwicklung und Validierung [5, 15, 31] ein zuverlässiges Instrument zur funktionellen Bestimmung von Rotationszentren für die Bestimmung von Gelenkpositionen und der Erfassung morphologischer Strukturen bietet.

Mit dem SCoRE Residuum besteht erstmals ein Qualitätsindex zur unmittelbaren Beurteilung des funktionell bestimmten Rotationszentrums am Hüftgelenk und der damit einhergehenden klinischen Analyse der Kinematik des Patienten. STAs und systematische sowie auch zufällige Fehler können zwar nicht differenziert, aber in der Summe quantifiziert werden, um in Längsschnittanalysen die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit abzuschätzen. Die Simulation der skeletalen Bewegung ergab einen linearen Zusammenhang zwischen dem globalen Fehler err und dem SCoRE Residuum (r), welcher mit $err=0,5r$ zu beschreiben werden konnte. Die Beziehung erwies sich unabhängig vom Umfang der Bewegung und der Größenordnung der induzierten STAs, sobald die OCST angewandt wurde. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass weder der BMI eines Patienten noch ein eingeschränkter Bewegungsumfang einen Einfluss auf dieses Verhältnis haben. Es gilt dabei zu

beachten, dass das SCoRE Residuum lediglich die Sphärizität und nicht die Abweichung von der anatomische Lage des Gelenks beschreibt. Auch wenn nach einer Studie von Cereatti et al. [32] die Bewegung des Femurkopfes im Acetabelum als rein kugelförmig betrachtet werden kann, ist es nicht auszuschließen, dass im Falle einer ungleichmäßigen Abnutzung der knöchernen Strukturen des Gelenks das Rotationszentrum auch außerhalb des anatomischen Zentrums liegen kann.

Mit dem SCoRE Residuum als Qualitätsindex konnte zudem erstmals der Einfluss der OCST auf die Qualität des ermittelten Rotationszentrums untersucht werden. Nachdem durch Taylor et al. [3] bereits im Tierversuch am Femur des Schafs die hohe Effektivität des Verfahrens demonstriert wurde, konnte nun auch erstmals die Leistungsfähigkeit am Menschen gezeigt werden. Durch die Anwendung der OCST konnte das Residuum von ~11mm auf weniger als 6mm reduziert werden, einem Unterschied, dessen Auswirkungen z.B. in Studien der sensiblen Entwicklungsschritte der Kinematik von Kindern mit Cerebralparese [8] den Unterschied zwischen Stabilität und Degression machen kann.

Zur Verifizierung der Simulationsergebnisse wurden zusätzlich die Hüftgelenke von 6 gesunden Probanden bestimmt. Hier bestätigen die in-vivo Korrekturen der STAs am Becken ($\varnothing 2,8 \pm 0,6 \text{mm}$) und am Oberschenkel ($\varnothing 7,82 \pm 1,9 \text{mm}$) eine realitätsnahe Größenordnung der künstlich induzierten STAs (SD: 0-10mm) in der Simulation. Die in-vivo SCoRE Residuen entsprachen ebenfalls den in-silico ermittelten Gelenkzentren. Auch wenn die ermittelten SCoRE Residuen nur ein Aussage über die Lage des Rotationszentrum zulassen und nur indirekt auf die Lage des anatomischen Hüftgelenkzentrum verweisen, kann durch die Ergebnisse der Studien davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse der Simulation den Bedingungen und Anforderungen in der Praxis stand halten. Damit besteht erstmals die Möglichkeit, die Güte funktionell bestimmter Gelenkpositionen und damit im weiteren Verlauf auch die Kinematik sowie die errechneten Belastungen des skeletalen Systems unmittelbar nach der Bewegungsanalyse abzuschätzen und auf Untersuchungsfehler zu prüfen.

Mit der erfolgreichen Validierung des SCoRE Residuums bestand ein Optimierungskriterium für effektivere Reduzierung von STAs und es erfolgte die Weiterentwicklung des OCST Verfahrens. Durch die gewichtete OCST (wOCST) werden den Hautmarkern Gewichte zu geteilt, wodurch erstmals die unregelmäßige Verteilung von STAs in der Korrektur von Bewegungsdaten berücksichtigt werden kann. Die Validierung der wOCST ergab eine deutlich effektivere Reduzierung von STAs gegenüber der Standard OCST und der Verwendung von Rohdaten, womit die Rotationszentren von Hüftgelenken zuverlässig mit einer Präzision bestimmt wurden, die zuvor nur in in-vitro oder in-silico Studien erreicht wurde. Auch in diesem Teil der Arbeit ist aufgrund

fehlender Information über die tatsächlichen Position des anatomischen Hüftgelenkzentrums, der Zusammenhang zwischen dem funktionell bestimmten Rotationzentrum und dem anatomischen Zentrum offen und muss somit Gegenstand zukünftiger Studien sein.

Die Untersuchung der Effektivität des neuen wOCST Verfahrens erfolgte durch die Bestimmung von 24 Hüftgelenken von Patienten mit primärem Hüftgelenkersatz. Die Probanden repräsentieren eine bedeutende klinische Kohorte und bieten mit einem perfekten mechanischen Kugelgelenk eine ideale Untersuchungsgruppe zur Ermittlung des Rotationszentrums am Hüftgelenk. Hier führte die gezielte Reduzierung von STAs durch die wOCST im Vergleich zur Verwendung von Rohdaten zu einer 7fachen Verkleinerung des globalen Fehlers bei der Bestimmung der Gelenkposition. Dieses Ergebnis untermauert, dass besonders bei der Untersuchung sensibler kinematischer Veränderungen, ein gewissenhafter Umgang mit STAs unumgänglich ist und ein effektives Verfahren zur Reduzierung von STAs eine Standardapplikation in jeder Bewegungsanalyse sein muss.

Ziel des abschließenden Teils dieser Arbeit war, durch die Anwendung der wOCST optimale Regionen zur Platzierung von Hautmarkern zu identifizieren und damit einen Beitrag zum Verständnis der Eignung entsprechender Regionen am Oberschenkel für die funktionellen Bestimmung des Rotationszentrum am Hüftgelenk zu leisten. Aus einem flächendeckenden Set von 63 Hautmarkern ergaben sich 6 Regionen zur optimalen Platzierung von Hautmarkern, deren Verwendung in einem SCoRE Residual resultierten, welches zuvor durch die Verwendung aller Marker erreicht wurde.

Während das Gesamtmarkerset den Vorteil genießt, die Redundanz von Bewegungsinformation verwenden zu können, um Daten nutzen und ignorieren zu können, gelang es durch das gezielte Positionieren von 6 Hautmarkern annähernd die gleiche Information zu erhalten, um mit ähnlicher Präzision das Rotationszentrum zu berechnen. Die Regionen entsprachen im Gesamtbild Lagen, welche bereits von anderen Studien befürwortet wurden. So wurden u.a. drei der sechs Regionen gelenkfern ermittelt, was Aussagen von Ehrig et al. [5] entspricht, der durch distale Platzierung der Marker vom Gelenk das Signal-Rausch-Verhältnis optimieren konnte. Durch die gezielte Platzierung der Marker konnte eine weitere konstante Reduzierung des SCoRE Residuums und damit eine Erhöhung der Präzision, mit welcher das Rotationszentrum an der Hüfte bestimmt wurde, erreicht werden. Damit ist es nicht nur möglich STAs im Vorfeld der Datenerfassung zu minimieren, bzw. zu vermeiden, sondern auch individuelle Markerprotokolle zu ermitteln, ein erhöhter Aufwand, der sich in Längsschnittstudien durch präzise Erfassung der Kinematik auszahlt.

Durch die systematische Validierung und Weiterentwicklung der Verfahren SCoRE [5] und der OCST [3], konnte mit dem SCoRE Residuum ein Qualitätsindex entwickelt werden, der die

Beurteilung der Güte des funktionellen Ergebnisses erlaubt. Zusammen mit dem OCST Verfahren bildet es ein neues Verfahren, die wOCST, welches die Gewichtung von Hautmarkerpositionen ermöglicht und damit erstmals bei der Korrektur von auf Hautmarker basierten Bewegungsdaten die unregelmäßige, bzw. individuelle Verteilung von STAs berücksichtigt. Im Ergebnis konnte somit die Präzision, mit welcher Rotationszentren in-vivo ermittelt werden, auf Niveau angehoben werden, welches bis dato nur in in-vitro und in-silico Studien erreicht wurde, wenn STAs ausgeschlossen waren. Für die klinische Ganganalyse bedeutet dies ebenfalls ein neues Maß an Zuverlässigkeit, da sich die, um ein vielfaches höhere Qualität des Analyseverfahrens direkt auf die klinischen Schlussfolgerungen übertragen lassen.

Ausblick

Der Zusammenhang zwischen dem SCoRE Residuum und der anatomische Position des Hüftgelenkszentrums, definiert als Zentrum des Femurkopfes, ist weiterhin ungeklärt und erlaubt somit nur Aussagen über die Präzision des Verfahrens. Auch wenn durch eine Studie von Cereatti et al. [32] anzunehmen ist, dass das Rotationszentrum der Hüfte auf des anatomische übertragbar ist, verbleibt die Untersuchung der Genauigkeit des SCoRE Verfahrens ein wichtiger Gegenstand zukünftiger Studien, um die Untersuchung der Gütekriterien abzuschließen.

Desweiteren wurden alle Zentren über die sogenannte Star Arc Bewegung [20] bestimmt, einer Standardbewegung zur funktionellen Ermittlung der Hüftgelenksposition. Zwar erlaubt SCoRE die Übertragung dieser Information als Kalibrierung auf allgemeine Bewegungen (z.B. Gehen, Treppensteigen), doch ist die Übertragbarkeit bisher nicht untersucht wurden und verbleibt somit Gegenstand weiterführender Studien.

Nach der experimentellen Untersuchung der Präzision von SCoRE und wOCST muss im nächsten Schritt die Anwendungsgenauigkeit untersucht werden, um festzustellen inwiefern diese Verfahren tatsächlich in der Lage sind kinematische Veränderungen zu differenzieren. Hierzu sollen im folgenden Schritt klinische Anwendungen bzw. physiologische Entwicklungen, wie z.B. der gezielten Korrektur der Beinachse untersucht werden.

Literatur

1. Cappozzo A. Gait analysis methodology. *Human Movement Science*. 1984;3(1-2):27-50.
2. Cappozzo A, Gazzani F, Macellari V. Skin marker artifacts in gait analysis. *J Biomech*. 1990;23(4):363-.
3. Taylor WR, Ehrig RM, Duda GN, Schell H, Seebeck P, Heller MO. On the influence of soft tissue coverage in the determination of bone kinematics using skin markers. *J Orthop Res*. 2005;23(4):726-34.
4. Stagni R, Leardini A, Cappozzo A, Grazia Benedetti M, Cappello A. Effects of hip joint centre mislocation on gait analysis results. *J Biomech*. 2000;33(11):1479-87.
5. Ehrig RM, Taylor WR, Duda GN, Heller MO. A survey of formal methods for determining the centre of rotation of ball joints. *J Biomech*. 2006;39(15):2798-809.
6. Bell AL, Pedersen DR, Brand RA. A comparison of the accuracy of several hip center location prediction methods. *J Biomech*. 1990;23(6):617-21.
7. Andriacchi TP. Biomechanics and gait analysis in total knee replacement. *Orthop Rev*. 1988;17(5):470-3.
8. Bell KJ, Ounpuu S, DeLuca PA, Romness MJ. Natural progression of gait in children with cerebral palsy. *J Pediatr Orthop*. 2002;22(5):677-82.
9. Galli M, Cimolin V, Santambrogio GC, Crivellini M, Albertini G. Gait Analysis before and after Gastrocnemius Fascia Lengthening for Spastic Equinus Foot Deformity in a 10-Year-Old Diplegic Child. *Case Report Med*. 2010;2010:417806.
10. Leardini A, Cappozzo A, Catani F, Toksvig-Larsen S, Petitto A, Sforza V, et al. Validation of a functional method for the estimation of hip joint centre location. *J Biomech*. 1999;32(1):99-103.
11. Ehrig RM, Taylor WR, Duda GN, Heller MO. A survey of formal methods for determining functional joint axes. *J Biomech*. 2007;40(10):2150-7.
12. Cereatti A, Donati M, Camomilla V, Margheritini F, Cappozzo A. Hip joint centre location: an ex vivo study. *J Biomech*. 2009;42(7):818-23.
13. Piazza SJ, Erdemir A, Okita N, Cavanagh PR. Assessment of the functional method of hip joint center location subject to reduced range of hip motion. *J Biomech*. 2004;37(3):349-56.
14. Schwartz MH, Rozumalski A. A new method for estimating joint parameters from motion data. *J Biomech*. 2005;38(1):107-16.
15. Rozumalski A, Schwartz MH. P041 A comparison of two functional methods for calculating joint centers and axes in a clinical setting. *Gait & Posture*. 2008;28(Supplement 2):S74-S5.
16. Hicks JL, Richards JG. Clinical applicability of using spherical fitting to find hip joint centers. *Gait & Posture*. 2005;22(2):138-45.
17. Cappozzo A, Catani F, Leardini A. Skin movement artefacts in human movement photogrammetry. *J Biomech*. 1994;27(6):755-.
18. Cappozzo A, Della Croce U, Leardini A, Chiari L. Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 1: theoretical background. *Gait & Posture*. 2005;21(2):186-96.
19. Wren TA, Gorton GE, Ounpuu S, Tucker CA. Efficacy of clinical gait analysis: A systematic review. *Gait & Posture*. 2011;34(2):149-53.
20. Camomilla V, Cereatti A, Vannozzi G, Cappozzo A. An optimized protocol for hip joint centre determination using the functional method. *J Biomech*. 2006;39(6):1096-106.
21. Hunt MA, Birmingham TB, Jenkyn TR, Giffin JR, Jones IC. Measures of frontal plane lower limb alignment obtained from static radiographs and dynamic gait analysis. *Gait & Posture*. 2008;27(4):635-40.
22. Chiari L, Croce UD, Leardini A, Cappozzo A. Human movement analysis using stereophotogrammetry: Part 2: Instrumental errors. *Gait & Posture*. 2005;21(2):197-211.
23. Leardini A, Chiari L, Della Croce U, Cappozzo A. Human movement analysis using stereophotogrammetry. Part 3. Soft tissue artifact assessment and compensation. *Gait & Posture*. 2005;21(2):212-25.

24. Andriacchi TP, Alexander EJ, Toney MK, Dyrby C, Sum J. A point cluster method for in vivo motion analysis: applied to a study of knee kinematics. *J Biomech Eng.* 1998;120(6):743-9.
25. Camomilla V, Donati M, Stagni R, Cappozzo A. Non-invasive assessment of superficial soft tissue local displacements during movement: A feasibility study. *J Biomech.* 2009;42(7):931-7.
26. Stagni R, Fantozzi S, Cappello A, Leardini A. Quantification of soft tissue artefact in motion analysis by combining 3D fluoroscopy and stereophotogrammetry: a study on two subjects. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2005;20(3):320-9.
27. Peters A, Galna B, Sangeux M, Morris M, Baker R. Quantification of soft tissue artifact in lower limb human motion analysis: A systematic review. *Gait & Posture.* 2010;31(1):1-8.
28. Davis RB, Öunpuu S, Tyburski D, Gage JR. A gait analysis data collection and reduction technique. *Human Movement Science.* 1991;10(5):575-87.
29. Harrington ME, Zavatsky AB, Lawson SE, Yuan Z, Theologis TN. Prediction of the hip joint centre in adults, children, and patients with cerebral palsy based on magnetic resonance imaging. *J Biomech.* 2007;40(3):595-602.
30. Kratzenstein S, Heller MO, Ehrig RM, Schröder J, Duda GN, Taylor WR. Der Vergleich von nicht-invasiven Techniken zur Bestimmung der Hüftgelenksposition: In-vivo. *Deutscher Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie.* Berlin 2009.
31. Monnet T, Desailly E, Begon M, Vallée C, Lacouture P. Comparison of the SCoRE and HA methods for locating in vivo the glenohumeral joint centre. *J Biomech.* 2007;40(15):3487-92.
32. Cereatti A, Margheritini F, Donati M, Cappozzo A. Is the human acetabulofemoral joint spherical? *J Bone Joint Surg Br.* 2010;92(2):311-4.

Anteilerklärung

Stefan Kratzenstein hatte folgenden Anteil an den vorgelegten Publikationen:

Publikation 1: W.R. Taylor, E.I. Kornaropoulos, G.N. Duda, *S. Kratzenstein*, R.M. Ehrig, A. Arampatzis, M.O. Heller (2010). Repeatability and reproducibility of OSSCA, a functional approach for assessing the kinematics of the lower limb. *Gait & Posture*, Volume 32, Pages 231-236.

Gesamtbeitrag: 20 Prozent

Beitrag im Einzelnen:

Studienplanung (20%). Messung der Probanden (40%). Aufbereitung der Bewegungsdaten (33%). Mitgestaltung des Manuskripts (20%).

Publikation 2: R.M. Ehrig, M.O. Heller, *S. Kratzenstein*, G.N. Duda, A. Trepczynski, W.R. Taylor (2011) *The SCoRE residual: A quality index to assess the accuracy of joint estimations*. *Journal of Biomechanics*, Volume 44, Issue 7, Pages 1400-1404.

Gesamtbeitrag: 40 Prozent

Beitrag im Einzelnen: Anfertigung Ethikantrag (75%). Versuchsplanung (40%). Probandenrekrutierung und -betreuung (80%). Durchführung der in-vivo Messung (50%). Datenauswertung und Analyse für in-vivo und in-silico Daten (50%). Anfertigung des Manuskripts (60%).

Publikation 3: M.O. Heller, *S. Kratzenstein*, R.M. Ehrig, G. Wassilew, G.N. Duda, W.R. Taylor (2011). *The weighted optimal common shape technique improves identification of the hip joint center of rotation in vivo*. *J Orthop Res*. Oct;29(10):1470-5. doi: 10.1002/jor.21426. Epub 2011 Apr 11.

Gesamtbeitrag: 42 Prozent

Beitrag im Einzelnen:

Ethikantrag (75%). Versuchsplanung (40%). Probandenrekrutierung und -betreuung (80%). Durchführung der Messung (70%). Datenauswertung und Analyse (70%). Anfertigung und Einreichung des Manuskripts (62%). Review (40%).

Publikation 4: S. *Kratzenstein*, E.I. Kornaropoulos, R.M. Ehrig, M.O. Heller, B.M. Pöplau, W.R. Taylor (2012). *Effective marker placement for functional identification of the centre of rotation at the hip*. Gait & Posture, Volume 36, Issue 3, Pages 482-486.

Gesamtbeitrag: 65 Prozent

Beitrag im Einzelnen:

Ethikantrag (75%). Versuchsplanung (65%). Probandenrekrutierung und -betreuung (60%). Durchführung der Messung (60%). Datenauswertung und Analyse (75%). Anfertigung und Einreichung des Manuskripts (80%). Review (50%).

Die Angaben zum Anteil des Promovenden an den jeweiligen Publikationen entsprechen der Richtigkeit:

Berlin, den 26.10.2012

Diplom Sportingenieur Stefan Kratzenstein

Publikationen

- S. **Kratzenstein**, E.I. Kornaropoulos, R.M. Ehrig, M.O. Heller, B.M. Pöplau, W.R. Taylor (2012). *Effective marker placement for functional identification of the centre of rotation at the hip*. Gait & Posture, Volume 36, Issue 3, Pages 482-486.
- M.O. Heller, S. **Kratzenstein**, R.M. Ehrig, G. Wassilew, G.N. Duda, W.R. Taylor (2011). *The weighted optimal common shape technique improves identification of the hip joint center of rotation in vivo*. J Orthop Res. Oct;29(10):1470-5. doi: 10.1002/jor.21426. Epub 2011 Apr 11.
- R.M. Ehrig, M.O. Heller, S. **Kratzenstein**, G.N. Duda, A. Trepczynski, W.R. Taylor (2011) *The SCoRE residual: A quality index to assess the accuracy of joint estimations*. Journal of Biomechanics, Volume 44, Issue 7, Pages 1400-1404.
- W.R. Taylor, E.I. Kornaropoulos, G.N. Duda, S. **Kratzenstein**, R.M. Ehrig, A. Arampatzis, M.O. Heller (2010). Repeatability and reproducibility of OSSCA, a functional approach for assessing the kinematics of the lower limb. Gait & Posture, Gait & Posture, Volume 32, Pages 231-236.

Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

Publikationen und Konferenzbeiträge

Publikationen

- S. Kratzenstein**, E.I. Kornaropoulos, R.M. Ehrig, M.O. Heller, B.M. Pöppel, W.R. Taylor (2012). Effective marker placement for functional identification of the centre of rotation at the hip. *Gait & Posture*, Volume 36, Issue 3, Pages 482-486.
- M.O. Heller, **S. Kratzenstein**, R.M. Ehrig, G. Wassilew, G.N. Duda, W.R. Taylor (2011). The weighted optimal common shape technique improves identification of the hip joint center of rotation in vivo. *J Orthop Res.* Oct;29(10):1470-5. doi: 10.1002/jor.21426. Epub 2011 Apr 11.
- R.M. Ehrig, M.O. Heller, **S. Kratzenstein**, G.N. Duda, A. Trepczynski, W.R. Taylor (2011) The SCoRE residual: A quality index to assess the accuracy of joint estimations. *Journal of Biomechanics*, Volume 44, Issue 7, Pages 1400-1404.
- W.R. Taylor, E.I. Kornaropoulos, G.N. Duda, **S. Kratzenstein**, R.M. Ehrig, A. Arampatzis, M.O. Heller (2010). Repeatability and reproducibility of OSSCA, a functional approach for assessing the kinematics of the lower limb. *Gait & Posture*, Volume 32, Pages 231-236.

Konferenzbeiträge – Vorträge

- Kratzenstein S**, Ehrig RM, Heller MO, Duda GN, Taylor WR (2010). A Quantification of Accuracy in Estimating Joint Centers: Application to in vivo gait analysis. Presentation at the 17th Congress of the European Society of Biomechanics. Edinburgh, Scotland, 5.-8.July 2010.
- Kratzenstein S**, Heller MO, Ehrig RM, Wassilew G, Duda GN, Taylor WR (2010). A new approach for optimally reducing skin marker artifact allows determination of the hip joint center within 3mm. Presentation at the 56th Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society. New Orleans, USA, 7.-10.März. 2010.
- Kratzenstein S**, Heller MO, Ehrig RM, Duda GN, Schröder J, Taylor WR (2009). Der Vergleich von nicht-invasiven Techniken zur Bestimmung der Hüftgelenksposition: In-vivo. Präsentation auf dem Deutschen Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie. Berlin, 21.-24.Oktober 2009.
- Kratzenstein S**, Ehrig RM, Heller MO, Taylor WR (2009). Reduction of the Influence of Skin Marker Artefact using the Optimal Common Shape Technique. Presentation at Annual meeting of the ESMAC 2009. London, England, 17.-19.September 2009.
- Taylor WR, **Kratzenstein S**, Kornaropoulos EI, Ehrig RM, Moewis P, Heller MO (2009). Non-invasive Assessment of Skeletal Kinematics. In *Measurement & Sensing in Medicine & Health: Capturing Motion and Musculoskeletal Dynamics (Keynote Lecture)*. London, England, 15.Oktober 2009.

Konferenzbeiträge - Poster Präsentationen

- Kratzenstein S**, Heller MO, Ehrig RM, Duda GN, Taylor WR (2010). The Hip Joint Centre can be determined to within 3 mm: An in vivo Analysis in 24 THA Patients. Poster Presentation at the 17th Congress of the European Society of Biomechanics. Edinburgh, Scotland, 5.-8.July 2010.
- Kratzenstein S**, Heller MO, Ehrig RM, Duda GN, Taylor WR (2010). The Residual: A Reliable Measure of Accuracy in the Determination of Joint Centers. Poster Presentation at the 56th Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society. New Orleans, USA, 7.-10.März. 2010.
- Kratzenstein S**, Heller MO, Ehrig RM, Schröder J, Duda GN, Taylor WR (2009). Die Bestimmung der Genauigkeit nicht-invasiver Techniken zur Ermittlung der Hüftgelenksposition in-vivo. In 6th annual Meeting of the German Society of Biomechanics. Münster, 14.-16. Mai 2009.
- Taylor WR, Kornaropoulos EI, **Kratzenstein S**, Ehrig RM, Plank F, Heller MO (2011). Targeted Marker Placement for the Functional Identification of the Hip Joint Centre. Poster Presentation at the Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society. Long Beach, California, USA, 13.-16.Januar 2011.
- Betzler N, **Kratzenstein S**, Schweizer F, Witte K, Shan G (2006). 3D Motion Analysis of Golf Swings: Development and validation of a golf-specific test set-up. Poster presentation at the 9th ISB Symposium on the 3D Analysis of Human Movement. Valenciennes, France, 28.-30.Juni 2006.

Selbstständigkeitserklärung

„Ich, Stefan Kratzenstein, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: ‚Die Entwicklung und Validierung effektiver Methoden zur Reduzierung von Hautmarkerartefakten für eine effektive, funktionelle Bestimmung des Hüftgelenkzentrums aus Bewegungsdaten‘ selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die (unzulässige) Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.“

Berlin, den 26.10.2012

Diplom Sportingenieur Stefan Kratzenstein

Danksagung

Der Weg zu dieser Arbeit war lang und eben so lang ist die Liste derer, die mich bis hier unterstützt haben. Mein Dank gilt in erster Linie meiner Frau Claudia, meinen Eltern und meiner Familie, die mich zu jeder Zeit unterstützt haben. Desweiteren möchte ich besonders Bill Taylor danken, der mir mit dem Beginn meiner Laufbahn am JWI ein zuverlässiger Mentor war. Sein respekt- und vertrauensvoller Umgang mit meiner Arbeit, gepaart mit seiner konstruktiven Art mich stets zu fordern, waren der Grundstein für diese Arbeit. Vielen Dank, Bill! Desweiteren möchte ich auch Herrn Professor Duda dafür danken, dass er sich meiner Betreuung in diesem Projekt angenommen hat. Ein besonderer Dank geht auch an all meine langjährigen Kollegen. Hier möchte ich insbesondere Markus Heller, Rainald Ehrig, Christian König, Georgi Wassilew und Navrag Singh für ihre permanente inhaltliche und moralische Unterstützung danken. Zu guter Letzt geht ein großes „Danke schön“ an die Probanden, die sich bereit erklärt hatten, an meinen Untersuchungen teilzunehmen. Die Arbeit mit Ihnen war stets etwas ganz besonderes! Vielen Dank!