

Christoph Auer

Dr. sc. hum.

Intraoperative EM-Navigation in der femoralen Derotationsosteotomie?

Bedarfsanalyse, Konzeption und Realisierung eines intraoperativ computerassistierenden Messsystems

Einrichtung: Medizinische Biometrie u. Informatik

Doktorvater: Prof. Dr.-Ing. Hartmut Dickhaus

Knöcherne Umstellungsosteotomien besitzen im orthopädischen Umfeld einen hohen Stellenwert. Insbesondere bei Betroffenen einer infantiler Cerebralparese (ICP) stellen sie häufig die einzige Möglichkeit dar, pathologische Fehlstellungen des Bewegungsapparates und Gangstörungen zu korrigieren. Bei der femoralen Derotationsosteotomie (FDO), einem bereits etablierten Operationsverfahren zur knöchernen Korrektur des häufig auftretenden Innenrotationsgangs, ist die nicht zufriedenstellende Rate postoperativ diagnostizierter Über- oder Unterkorrekturen im Gangbild behandelter Patienten seit vielen Jahren ein intensiv studiertes und diskutiertes Thema. Trotz stetiger Qualitätsverbesserungen in der Diagnostik und der Therapie ist die Variabilität in der erzielten Verbesserung der funktionalen Hüftgelenkstellung unverändert hoch. Rückschlüsse auf die konkreten Ursachen verbleibender oder sogar neu auftretender Gangstörungen nach einer operativen Therapie sind bis heute schwierig, da selbst die hochentwickelte instrumentelle Quantifizierung der patientenindividuellen Kinematik in Verbindung mit klinischen Prüfungen für eine sichere klinische Interpretation nicht ausreichen. Zum einen ist die Wirkung der spastisch gelähmten Muskulatur schwer abschätzbar, andererseits werden seit längerem methodische Defizite und Fehlereinflüsse im Operationsverfahren der FDO als wahrscheinliche Ursache für klinisch relevante Fehlerbeiträge vermutet, die jedoch bisher nicht ausreichend untersucht sind.

Mit dem Ziel, reproduzierbare und verlässlichere operative Korrekturergebnisse zu erreichen, wird im Rahmen dieser Arbeit die operative Prozedur der FDO erstmalig systematisch auf mögliche Fehlereinflüsse untersucht und ihre Relevanz für das Therapieergebnis analytisch und empirisch überprüft. Beobachtungen in der Operationsdurchführung, Laborstudien an Femurphantomen und ein geometrisch abstrahierendes Computermodell zur analytischen Fallsimulation der FDO werden genutzt, um detaillierte Erkenntnisse zu den möglichen Freiheitsgraden und Unsicherheiten in der konventionellen Ausführung und Kontrolle des Operationsverfahrens zu erlangen. Darauf aufbauend wird ein computerassistiertes Messsystem konzipiert, das dem eingangs identifizierten Unterstützungsbedarf in der operativen Prozedur Rechnung trägt und eine kontinuierliche, objektive Messung der relevanten Korrekturparameter während der Operation erlaubt. Wesentlich für den hier realisierten Systementwurf ist der Anspruch, ein hinsichtlich des etablierten Arbeitsablaufs und der erforderlichen Systeminteraktionen möglichst transparente Lösung zu realisieren, um eine optimale Akzeptanz bei den ausführenden Chirurgen zu erreichen.

Zur Realisierung eines innovativen Messsystems wird die vielversprechende, im intraoperativen Einsatz bislang jedoch kaum etablierte, elektromagnetische Trackingtechnologie (EMT) eingesetzt und ihre Anwendung in der FDO systematisch erschlossen. Die günstigen Eigenschaften bezüglich der verfügbaren Sensorbaugrößen werden

in einem speziell gestalteten Messaufbau vorteilhaft genutzt, um die relative Lagebeziehung zweier zuvor osteotomierter Knochensegmente des Femurs ohne traumatisierende Fixierungsmaßnahmen zu erfassen. Im Unterschied zur konventionellen optischen Trackingtechnologie wird der begrenzte Platz im Operationsgebiet dabei nicht zulasten der Operationsdurchführung blockiert und keine Festinstallation des Systems im OP-Saal benötigt.

Eine zentrale Softwarekomponente ermöglicht in Einheit mit dem Messaufbau und einer geeigneten Systemintegration in die OP-Prozedur die erfolgreiche intraoperative Nutzung. Sie implementiert die in dieser Arbeit entwickelten Rekonstruktionsverfahren für die benötigten Umstellungsparameter aus den Rohdaten der Trackingsensoren und die Steuerung der Trackinghardware sowie eine Benutzeroberfläche für den assistierten Arbeitsablauf in der FDO und studienbezogene Datenanalysen. Die korrekte Systemfunktion, Gebrauchstauglichkeit und Qualität der Parameterbestimmung wurde in kontrollierten Experimenten und Laborstudien untersucht und ist aktuell Gegenstand einer klinischen Pilotstudie mit 10 Patienten, die eine FDO erhalten.

Das bei EMT-Systemen gegebene Risiko fehlerhafter Positions- und Lagemessungen in Anwesenheit metallischer Störkörper stellt eine der wesentlichen Herausforderung für den intraoperativen Messbetrieb dar. Ihr wird im Rahmen dieser Arbeit mit einem hohen technischen Prüfungsaufwand und speziell entwickelten Fehlererkennungsverfahren begegnet, um eine adäquate und reproduzierbare Messqualität herzustellen und intrinsisch im laufenden Betrieb zu überprüfen. Voruntersuchungen zur statischen Messwertlinearität im Operationssaal mit Hilfe eines speziell angefertigten Messphantoms und applikationsspezifische Verfahren zur intrinsischen Erkennung und Schätzung dynamisch auftretender Messfehler im laufenden Betrieb konnten zeigen, dass sich die elektromagnetische Trackingtechnologie bei entsprechenden Vorkehrungen adäquat für die vorgesehene Aufgabe nutzen lässt.

Zuletzt wird die Systemkonzeption innerhalb vergleichbarer Ansätze eingeordnet und der operative Nutzen der prototypischen Realisierung des Messsystems besprochen. Eine kritische Reflexion über derzeit bestehende Grenzen des Messsystems hinsichtlich seiner Gebrauchstauglichkeit, Lösungsvorschläge und Ansätze zur Weiterentwicklung sowie ein Ausblick auf die Transfermöglichkeiten des Systemkonzepts auf komplexere Operationsverfahren runden die Ausführungen ab.