

Sarina Thomas
Dr. sc. hum.

Automatic image analysis of C-arm Computed Tomography images for ankle joint surgeries

Fach/Einrichtung: DKFZ (Deutsches Krebsforschungszentrum)
Doktorvater: Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Klaus Hermann Maier-Hein

Die offene Reposition und die anschließende osteosynthetische Versorgung gelten als Standardverfahren zur operativen Behandlung von Sprunggelenksfrakturen. Da diese Frakturen oft mit einer Verletzung der Syndesmose einhergehen, ist es unerlässlich, die korrekte Lage zwischen Fibula und Tibia operativ wiederherzustellen. Eine Fehlstellung der Fibula kann zu einer Instabilität der Syndesmose führen und damit einhergehend eine frühzeitige Arthritis und Schmerzen am Sprunggelenk begünstigen oder gar eine Revision der Operation erfordern.

Der Einsatz intra-operativer 3D C-Bögen ermöglicht eine räumliche Interpretation und umfassende Analyse des Repositionsergebnisses. Die objektive Beurteilung wird jedoch durch die hohe inter-individuelle Varianz der Form und Lage der am Sprunggelenk beteiligten Knochen erschwert. Ein kontralateraler Seitenvergleich mit dem unverletzten Sprunggelenk des Patienten wird zwar empfohlen, aber aufgrund der zusätzlichen Strahlenbelastung und dem erhöhten Zeitaufwand bisher nicht in der klinischen Routine eingesetzt.

Ziel dieser Arbeit war es, Methoden für ein Computer-gestütztes intra-operatives Assistenzsystem zum kontralateralen Seitenvergleich des Sprunggelenks zu entwickeln. Die vorliegende Arbeit umfasst das Design, die Entwicklung und die Validierung eines softwarebasierten automatisierten Prototyps. Der entwickelte Ansatz erfordert keinen zusätzlichen 3D C-Bogen Scan des unverletzten Sprunggelenks, um sowohl die Zeit des Eingriffs als auch die Strahlenbelastung zu reduzieren.

Um ein 3D Oberflächenmodell des gesunden Sprunggelenks aus drei 2D Projektionsbildern zu rekonstruieren, wird ein 3D Statistisches Formmodell (SSM) verwendet. Zu diesem Zweck wird zunächst eine 3D-SSM Segmentierung des 3D Volumens des verletzten Sprunggelenks durchgeführt, um eine gute erste Annäherung des zu rekonstruierenden Modells zu erhalten. Die 3D-SSM Segmentierung wird mit einem 3D Convolutional Neural Network (CNN) kombiniert, welches zum einen zur Initialisierung des Formmodells und zum anderen zur Anpassung während der Segmentierung eingesetzt wird. Somit können zwei wesentliche Herausforderungen des konventionellen 3D-SSMs, die Anfälligkeit gegenüber Metallartefakten und Ungenauigkeiten aufgrund einer ungünstigen Initialisierung, gelöst werden. Die Qualität der Segmentierung kann so im Vergleich zu einer rein auf Bildintensitäten basierenden Segmentierung verbessert werden.

Ein 2D-CNN wird verwendet, um Konturen und Landmarken aus allen 2D Projektionsbildern zu extrahieren. Dieser Schritt ermöglicht eine automatische Initialisierung des Formmodells und generiert gleichzeitig Landmarken für den nachfolgenden Rekonstruktionsschritt. Es wurde eine 2D-3D Rekonstruktionsmethode entwickelt, welche aus den 2D Landmarken generierte Distanzkarten verwendet, um eine simultane, schnelle und genaue

Korrespondenzoptimierung und Formanpassung aller beteiligten Knochen zu ermöglichen. Die Rekonstruktion ist der zentralste und wichtigste Schritt des vorgestellten Ansatzes. Dies ist das erste Mal, dass eine Rekonstruktionsmethode auf das komplexe Sprunggelenk angewendet wird. Die Arbeit stellt gleichzeitig die erste Rekonstruktionsmethode vor, die CNN-basierte Segmentierungen in den Rekonstruktionsschritt integriert.

Das rekonstruierte Formmodell des unverletzten Sprunggelenks kann nach der Rekonstruktion rückprojiziert und mit dem frakturierten Sprunggelenk überlagert dargestellt werden. Dieser Schritt ermöglicht einen direkten Vergleich des kontralateralen und des frakturierten Sprunggelenks, um eine mögliche Fehlstellung der Fibula zu identifizieren.

Die entwickelten Methoden wurden mit Hilfe von Datensätzen aus einer Kadaverstudie und repräsentativen klinischen Daten ausgewertet. Eine systematische Evaluation wurde durchgeführt, um die Ungenauigkeiten des Systems und seiner Teilkomponenten zu bewerten und wesentliche Fehlerquellen zu identifizieren. Eine Auswertung des Gesamtsystems wurde auf elf Datensätzen durchgeführt, die im Rahmen eines manuellen kontralateralen Seitenvergleichs in der klinischen Routine akquiriert wurden. Die Auswertung zeigte, dass das System in der Lage ist, 3D-Oberflächenmodelle des unverletzten Sprunggelenks aus drei Projektionsbildern zu rekonstruieren. Das System zeigte vielversprechende Ergebnisse auf den verfügbaren Daten. Beim Vergleich des Rekonstruktionsergebnisses mit der Referenzsegmentierung wurde ein mittlerer Hausdorffabstand von 1,72 mm gemessen, welcher die geforderte hohe klinische Genauigkeit, die zwischen 1 - 2 mm angegeben wird, bereits fast erreicht. Der Gesamtfehler konnte hauptsächlich auf Ungenauigkeiten in der 2D-CNN-Segmentierung zurückgeführt werden.

Die in dieser Arbeit entwickelten Methoden stellen den ersten Ansatz für den automatischen Computer-gestützten kontralateralen Seitenvergleich in der Sprunggelenkschirurgie dar. Es konnte gezeigt werden, dass eine gute Annäherung der Oberfläche mit nur drei kontralateralen Projektionsbildern erreicht werden kann. Die Realisierbarkeit des vorgeschlagenen Ansatzes wurde an einer begrenzten Anzahl von klinischen Fällen nachgewiesen und hat bereits zu vielversprechenden Ergebnissen geführt. Der nächste wichtige Schritt besteht darin, die identifizierten Fehlerquellen zu reduzieren. Durch die Erweiterung der Trainingsdatenmenge und der Auswertung auf einer größeren Datenmenge soll das Verfahren in Zukunft weiter verbessert und validiert werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der vorgestellte neue Ansatz die Möglichkeit bieten kann, den Chirurgen während des Reduktionsprozesses zu unterstützen und gleichzeitig eine zusätzliche Strahlenbelastung zu vermeiden mit dem Ziel die Qualität der Operation zu verbessern und die Anzahl der Revisionseingriffe langfristig zu reduzieren.