

DISS. ETH NO. 24137

# **Computer-Assisted Methods for Complex Reconstructions in Orthopaedic Surgery**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

**Lazaros Vlachopoulos**  
Doctor of Medicine  
RWTH Aachen University  
born on 19.10.1978  
citizen of Greece and Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Gábor Székely, examiner  
Prof. Dr. Jess Gerrit Snedeker, co-examiner  
Dr. Philipp Fürnstahl, co-examiner

2017

# Abstract

Restoration of the normal anatomy is one of the ultimate goals in orthopaedic surgery. Computer-assisted methods become, thereby, increasingly important as they support the surgeons to achieve this goal. The transfer of computer vision and engineering methods to the medical domain offers new opportunities for traditional orthopaedic surgery. The benefits of computer-assisted surgery have been well accepted in the last decades, in particular for the treatment of posttraumatic deformities. The combination of an accurate preoperative quantification of a deformity, the generation of a preoperative plan and tools for the intraoperative navigation is the key element for a patient-specific quantitative orthopaedic surgery. However, the basic pre-requisite for a successful surgical treatment is a precise preoperative assessment of the pathological condition.

The aim of this work is to provide new computer-assisted methods for the reconstruction of complex fractures and posttraumatic deformities of the humerus. The presented methods are based on patient-specific bone models, created from computer tomography data. A set of tools will be presented to tackle a wide range of treatment options, i.e., for fracture reconstruction and for corrective osteotomies of the humerus.

First, algorithms are developed to quantify the anatomy of the humerus in 3D in a standardized fashion. Bilateral differences of the humeral anatomy are measured on a set of 140 paired humeri. This enables to identify the anatomical characteristics that may be reliably carried over from the contralateral side and to evaluate the reliability of the contralateral anatomy as a reconstruction template.

Thereafter, the preoperative assessment of a humeral deformity for corrective osteotomies of the humerus is improved with two proposed approaches. A novel segment selection strategy is presented for the registration-based approach that compensates bilateral differences better than the state-of-the-art approach, yielding an improved method for the 3D assessment of posttraumatic deformities of the proximal and distal humerus. Further, a statistical shape model of the humerus is generated that accurately predicts the pretraumatic anatomy from the healthy parts of the posttraumatic bone model in order to replace the contralateral anatomy as a reconstruction template.

The main part of the thesis focuses on the development of a computer-assisted fracture reconstruction algorithm for the reconstruction of complex proximal humeral fractures. The pose-invariant algorithm performs the reconstruction solely based on the information of the fracture surfaces obtained from the posttraumatic condition. The fractures of the proximal humerus are automatically reconstructed based on iterative pairwise reduction of the fragments and automatic selection of the best solution. The performance of the presented algorithm is evaluated on a consecutive series of patients treated for a proximal humerus

fracture or on cadaver experiments. Furthermore, the results are compared with the state-of-the-art method.

# Zusammenfassung

Die Wiederherstellung der normalen anatomischen Verhältnisse ist eines der wichtigsten Ziele in der orthopädischen Chirurgie. Computergestützte Techniken gewinnen dabei zunehmend an Bedeutung, da sie den Chirurgen beim Erreichen dieses Zieles unterstützen können. Die Verwendung von Verfahren aus Computer Vision und den Ingenieurwissenschaften im medizinischen Bereich eröffnet neue Möglichkeiten für die traditionelle orthopädische Chirurgie. Dabei sind die Vorteile der computergestützten Chirurgie in den letzten Jahrzehnten weitgehend akzeptiert worden, insbesondere für die Behandlung von posttraumatischen Deformitäten. Die Kombination aus einer präzisen präoperativen Analyse einer Deformität, der Erstellung eines präoperativen Plans und eines intraoperativen Navigationssystems sind der Schlüssel für eine patientenspezifische quantitative orthopädische Chirurgie. Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche chirurgische Behandlung ist jedoch die genaue präoperative Analyse der zugrundeliegenden Pathologie.

Diese Dissertation setzt sich das Ziel, neue computergestützte Techniken für die Rekonstruktion von komplexen Frakturen und posttraumatischen Deformitäten am Humerus zur Verfügung zu stellen. Die dargestellten Methoden basieren auf patientenspezifischen Knochenmodellen aus computertomographischen Daten. Es wird eine umfassende Zusammenstellung von Methoden dargestellt, um eine breite Palette von Behandlungsoptionen abzudecken, d.h. im Speziellen sowohl für die Rekonstruktion von Frakturen als auch für die Korrektur von Deformitäten am Humerus.

Zunächst werden Algorithmen entwickelt, um die Geometrie des Humerus in 3D standardisiert zu quantifizieren. Bilaterale Unterschiede in der Anatomie des Humerus werden an einem Satz von 140 gepaarten Humeri bestimmt. Dies ermöglicht es, die anatomischen Eigenschaften zu identifizieren, welche von der kontralateralen Seite übernommen werden können, und somit die Zuverlässigkeit der kontralateralen Anatomie als geometrische Vorlage zu beurteilen.

Anschließend wird die präoperative Analyse einer posttraumatischen Deformität des Humerus mit zwei vorgeschlagenen Planungsansätzen verbessert. Eine neue Strategie wird vorgestellt, um Segmente für die Registrierung von Knochenmodellen zu selektieren, die es ermöglicht, die bilateralen Unterschiede besser auszugleichen als der aktuelle Stand der Technik. Dies führt zu einer genaueren Wiederherstellung der prätraumatischen Anatomie am proximalen und distalen Humerus. Darüberhinaus wird ein statistisches Modell des Humerus präsentiert, das die prätraumatische Anatomie aus den nicht pathologischen Anteilen des

posttraumatischen Knochenmodells genau vorhersagt mit dem Ziel, die kontralaterale Anatomie als Rekonstruktionsvorlage zu ersetzen.

Der Hauptteil dieser Arbeit widmet sich der Entwicklung eines computergestützten Algorithmus für die Rekonstruktion von komplexen Frakturen am proximalen Humerus. Der Algorithmus ermöglicht die Rekonstruktion von Frakturen ausschließlich basierend auf der Information der Bruchflächen anhand von posttraumatischen Knochenmodellen. Die Frakturen des proximalen Humerus werden dabei durch eine iterative, paarweise Reposition der Fragmente automatisch rekonstruiert und die optimale Lösung wird automatisch bestimmt. Die Leistungsfähigkeit der Methode wird an einer konsekutiven Serie von Patienten mit einer proximalen Humerusfraktur und mit Kadaverexperimenten verifiziert. Darüberhinaus, werden die Ergebnisse dem aktuellen Stand der Technik gegenübergestellt.