



Doctoral Thesis

## Joint kinematics of unconstrained ankle arthroplasties

**Author(s):**

List, Renate Barbara

**Publication Date:**

2009

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005910642> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 18404

**JOINT KINEMATICS OF UNCONSTRAINED ANKLE  
ARTHROPLASTIES**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
RENATE BARBARA LIST  
Dipl. Natw. ETH

born May 28 1977  
citizen of Pratteln, BL

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. E. Stüssi, examiner  
Dr. med. P. Rippstein, co-examiner

2009

## Abstract

Early designs of total ankle arthroplasties (TAA) in the 1970s showed a high failure rate. Based on the more promising mid- and longterm outcome results of the 2nd generation TAA, as well as due to the association of a higher risk of osteoarthritis in adjacent joints with arthrodesis, TAA has obtained more and more acceptance and the number of ankle replacements is increasing. One important design criterion of TAA is to recover normal anatomical function to master motion tasks of daily activities accompanied by less need for compensation and thereby a protection of adjacent joints. Thus, a crucial part of the evaluation of the functionality of a TAA is the in vivo analysis of its kinematic behavior. Previous investigations on TAA kinematics include cadaver studies and gait analyses by means of skin marker tracking. Cadaver studies do not simulate in vivo conditions accurately. Skin marker tracking is limited by skin movement artefacts and the difficulty to distinguish between motion at the TAA or at the subtalar joints caused by the inaccessibility of the talus. Recent technological developments, such as videofluoroscopy, enable the in vivo measurements of the three-dimensional (3D) kinematics of implant components more accurately than by means of skin marker tracking. However, up to now videofluoroscopy was only rarely used at the ankle and either limited by a small number of analyzed frames or by a restriction to static assessments.

The overall goal of this PhD thesis was to develop a technical procedure that allows gaining a better understanding of the joint mechanisms of unconstrained TAA during daily activities. Specifically, to evaluate the functionality of an unconstrained TAA (Mobility™ Total Ankle, DePuy) on the basis of the relative motion between the implant components.

Two videofluoroscopic in vivo procedures, one for TAA subjects and one for healthy normal subjects with tantalum markers, were developed and applied to assess the 3D ankle kinematics during five gait conditions (level gait, walking up- and downhill, walking over a side inclined slope, once inclined laterally once medially). Four good outcome TAA subjects having a Mobility™ Total Ankle and two healthy normal subjects with bone embedded tantalum markers were assessed during the stance phase of the five gait conditions.

The internal tracking of the TAA was achieved by videofluoroscopic image capture and a registration algorithm that fits a virtual projection of the CAD models of the TAA into the fluoroscopic images. The respective output was the 3D pose of the implant components with an accuracy of 0.4 mm and 0.2° in plane and 2.1 mm and 1.3° out of plane. Thus, a procedure was developed that enabled to accurately estimate TAA kinematics in vivo, without being limited by skin movement artefacts. Hereby isolating TAA motion from subtalar motion, which is not possible

with skin marker analysis.

The videofluoroscopic approach for the healthy normal subjects allowed the quantification of the 3D tibiotalar and talocalcaneal joint kinematics. To enable a comparison to the TAA subjects, the same measurement set up and conventions as in the approach for the TAA subjects were used. The internal tracking of the bones was accomplished by videofluoroscopic image capture of the bone embedded tantalum markers. The 3D reconstruction was computed as a three point spatial resection on the base of the geometrical tantalum marker arrangements determined by CT segmentation. Due to large out of plane translational inaccuracies, the out of plane motion path had to be restricted. An error analysis revealed the high influence of the tantalum image marker tracking precision and a smaller but not negligible effect of the CT segmentation precision.

Simultaneously to the videofluoroscopic image capturing, joint kinematics was assessed by means of skin marker tracking using a 12 camera VICON system. A whole body marker set including a two-segment foot model and functional approaches for the determination of joint centers, respectively axes was applied. This allowed a comparison between the external and the internal measurement approaches and made compensation mechanisms in the foot and the knee visible. The major motion of the TAA arose during all five gait conditions and for all four subjects around the talar construction axis. This is favorable for the wear characteristics of the implant, but it remains to be seen if it allows a physiological role of the surrounding ligaments. The TAA subjects showed, during level gait, comparable dorsi-/plantarflexion motion characteristics, as well only showed minor limitations in range of motion (ROM), compared to the healthy ankle. Restrictions were mainly seen during walking uphill, caused by a dorsiflexion restriction. The static available sagittal ROM showed generally a shift compared to the ROM that was functionally used during gait. Summarized, any restrictions were caused by a limitation in dorsiflexion, whereas plantarflexion was sufficiently provided. Contrary to expectations concerning the unconstrained design, hardly any motion occurred in the transverse and frontal planes. If this results in an unfavorable strain behavior of surrounding ligaments should be addressed in future investigations. If prevalent restrictions were due to a changed muscular activation pattern, caused by scarred connective tissue or by the implant design itself is unclear. However, since during level gait only minor limitations were found in predominant sagittal plane joint kinematics of the TAA one can conclude that compared to arthrodesis there was less need for compensation in adjacent joints. Summarized, the TAA allowed close to, but not in all parameters physiological motion.

The developed procedures are suitable for the assessment of the in vivo kinematics of the TAA and the healthy ankle during gait. By the videofluoroscopic tracking and the reconstruction methods, the 3D kinematics of the isolated tibiotalar joint is accessible without skin movement artefacts.

This work allowed a first insight into the joint kinematics and in vivo performance of the Mobility™ Total Ankle. With the application of the developed procedure on a larger number of subjects it has the potential to help clinicians and implant developers to evaluate current designs and future design modifications.

## Zusammenfassung

In ihren Anfängen in den 70er Jahren zeigten die Sprunggelenksarthroplastiken hohe Versagensraten. Basierend auf den vielversprechenden mittel- und langfristigen Ergebnissen der Sprunggelenksarthroplastiken der zweiten Generation, sowie aufgrund dessen, dass Arthrodesen mit einem erhöhten Risiko für die Bildung von Anschlussarthrosen in Verbindung gebracht wurden, haben die Sprunggelenksarthroplastiken jedoch in ihrer Akzeptanz gewonnen und die Anzahl implantierter Sprunggelenksarthroplastiken ist zunehmend. Ein wichtiges Design-Kriterium einer Sprunggelenksarthroplastik ist es, die natürliche Funktion des Sprunggelenks zurückzuerlangen, so dass alltägliche Bewegungsaufgaben gelöst werden können. Dies soll mit einer verminderten Erfordernis von Kompensationsmechanismen in umliegenden Gelenken und somit einem Schutze dieser einhergehen. Folglich ist die Analyse des kinematischen Verhaltens der Sprunggelenksarthroplastik ein entscheidender Faktor bei der Evaluierung ihrer Funktionalität. Bisherige Untersuchungen bezüglich der Kinematik von Sprunggelenksarthroplastiken beschränkten sich auf Kadaverstudien und Ganganalysen mittels Hautmarkern. Kadaverstudien ermöglichen es jedoch nicht, die in vivo Bedingungen genau widerzuspiegeln. Hautmarkeranalysen beinhalten eine Limitation durch Hautbewegungsartefakte und die Schwierigkeit die Bewegung des Implantats von der subtalaren Bewegung zu trennen, da der Talus für die Bestückung mit Hautmarkern nicht zugänglich ist. Kürzlich errungene technologische Entwicklungen ermöglichen es nun, mittels Videofluoroskopie die dreidimensionale (3D) Kinematik der Implantatkomponenten genauer zu verfolgen als mit Hautmarkermessungen. Jedoch wurde Videofluoroskopie bis heute nur selten für die Erfassung der Sprunggelenkskinematik benutzt und die Untersuchungen waren durch eine sehr kleine Aufnahmefrequenz sowie durch eine Einschränkung auf statische Aufnahmen beschränkt.

Das Gesamtziel dieser Dissertation war es, ein technisches Verfahren zu entwickeln, welches es ermöglicht das Verständnis über die Gelenksmechanismen von Sprunggelenksarthroplastiken mit kinematisch freiem Prinzip in Alltagsbewegungen zu verbessern. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Evaluierung der Funktionalität einer Sprunggelenksarthroplastik mit freiem kinematischem Prinzip (Mobility™ Total Ankle, DePuy) basierend auf der vorherrschenden Relativbewegung zwischen den Implantatkomponenten.

Es wurden zwei in vivo Verfahren entwickelt und angewendet, wobei mittels Videofluoroskopie die 3D Kinematik bei Patienten mit einer Sprunggelenksarthroplastik, sowie bei gesunden Probanden mit Tantalummarkern während fünf verschiedenen Gangbedingungen (ebenes Gehen, auf- und abwärts Gehen, Gehen über eine seitgeneigte Ebene, einmal medial abfallend, einmal la-

teral abfallend) gemessen wurde. Hierbei wurden die Gangdaten von vier Patienten mit einer Sprunggelenksarthroplastik sowie von zwei gesunden Probanden, die über in den Knochen integrierte Tantalummarker verfügten, während der Standphase der fünf obig genannten Gangbedingungen erfasst.

Die interne Messung der Bewegung der Sprunggelenksarthroplastik erfolgte mittels videofluoroskopischer Bildverfolgung und anschließender 3D Rekonstruktion. Diese wurde mit Hilfe eines Registrierungsalgorithmus berechnet, der eine virtuelle Projektion der CAD Geometrie der Sprunggelenksarthroplastik in die Fluoroskopiebilder einpasste. Hierbei konnte die 3D Position und Orientierung der Implantatkomponenten mit einer Genauigkeit von 0.4 mm und  $0.2^\circ$  in der Bildebene und 2.1 mm und  $1.3^\circ$  senkrecht zur Bildebene ermittelt werden. Es wurde somit ein Verfahren entwickelt, welches es ermöglicht, die 3D Kinematik von Sprunggelenksarthroplastiken in vivo mit hoher Genauigkeit und frei von Hautbewegungsartefakten zu bestimmen. Des Weiteren konnte mit diesem Ansatz die Bewegung der Arthroplastik isoliert, d.h. unabhängig von subtalarer Bewegung, betrachtet werden, was mit Hautmarkermessungen ebenfalls nicht möglich ist.

Bei den gesunden Probanden ermöglichte die videofluoroskopische Bildverfolgung die Bestimmung der tibiotalaren sowie der tibiocalcanealen 3D Gelenkskinematik. Dabei wurden, um einen Vergleich zu den Sprunggelenksarthroplastik-Patienten zu ermöglichen, dieselbe Versuchsanordnung und dieselben Konventionen zur Beschreibung der Kinematik wie für die Patienten mit Arthroplastik verwendet. Das interne Verfolgen der Knochen wurde durch videofluoroskopische Bildverfolgung der in den Knochen eingebetteten Tantalummarker erreicht. Die 3D Rekonstruktion erfolgte nach dem Prinzip des Rückwärtsschneidens im Raum, welches auf der geometrischen Anordnung der Tantalummarker, welche durch Segmentation von CT Aufnahmen bestimmt wurde, basierte. Aufgrund dessen, dass die rekonstruierten Daten mit einer grossen translatorischen Ungenauigkeit senkrecht zur Bildebene behaftet waren, musste die Bewegungsbahn-Kurve in ihrer Koordinate senkrecht zur Bildebene eingeschränkt werden. Eine Fehlerabschätzung zeigte einen grossen Einfluss der Genauigkeit der Bestimmung der Bildmarkerpositionen, sowie einen kleineren, jedoch dennoch nicht vernachlässigbaren Einfluss der Genauigkeit der CT Segmentation.

Simultan zur videofluoroskopischen Bildverfolgung wurde die Gelenkskinematik mittels Hautmarkern und einem 12 Kamera VICON System ermittelt. Die Hautmarkermessung erfolgte mit Hilfe eines Ganzkörpermarkersets, welches ein 2-segmentiges Fussmodell sowie funktionelle Ansätze zur Bestimmung der Gelenkszentren und -achsen beinhaltet. Dies ermöglichte einen Vergleich zwischen extern und intern gewonnenen kinematischen Daten sowie das Sichtbarma-

chen von Kompensationsmechanismen in Fuss und Knie.

Die Hauptbewegung der Implantate erfolgte unter allen fünf Gangbedingungen und für alle vier Patienten um die talare Konstruktionsachse. Für das Abriebverhalten des Implantats ist dies von Vorteil; ob dies jedoch ein physiologisches Verhalten der umliegenden Bandstrukturen erlaubt, sei dahingestellt. Die Sprunggelenksarthroplastik-Patienten zeigten während des ebenen Gehens vergleichbare Bewegungscharakteristik bezüglich Dorsal-/Plantarflexion, sowie ebenfalls nur geringe Limitationen bezüglich des Bewegungsumfangs (ROM) im Vergleich zum gesunden oberen Sprunggelenk. Einschränkungen waren hauptsächlich während des aufwärts Gehens, im Sinne einer Einschränkung in Richtung Dorsalflexion, sichtbar. Der statisch verfügbare sagittale ROM zeigte eine generelle Verschiebung im Vergleich zum funktionell während des Gehens benützten ROM. Zusammengefasst war ersichtlich, dass sämtliche Einschränkungen durch eine limitierte Dorsalflexion verursacht wurden, wohingegen die Plantarflexion in ausreichendem Masse vorhanden war. Entgegen der Erwartungen betreffend dem Design mit kinematisch freiem Prinzip, zeigten die Sprunggelenksarthroplastiken praktisch keine Bewegung in der transversalen und der frontalen Ebene. Ob dies ein ungünstiges Dehnverhalten der umliegenden Ligamente bewirkt, sollte Teil von zukünftigen Untersuchungen sein. Es ist zudem unklar, ob die aufgezeigten Einschränkungen durch ein verändertes Muskelaktivitätsmuster, durch vernarbtes Bindegewebe oder durch das Implantatdesign selbst hervorgerufen werden. Nichtsdestotrotz zeigten die Sprunggelenksarthroplastiken in der überwiegend sagittal vorherrschenden Gelenkskinematik nur geringfügige Limitationen, so dass man zum Schluss kommen kann, dass im Vergleich zu Arthrodesen weniger Kompensationsbewegungen in umliegenden Gelenken notwendig werden. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Sprunggelenksarthroplastik eine nahezu, aber wenn auch nicht in Bezug auf alle Faktoren, physiologische Bewegung erlaubte.

Die entwickelten Verfahren sind geeignet zur Erfassung der in vivo Kinematik von Sprunggelenksarthroplastiken und gesunden Sprunggelenken während des Gehens. Durch die videofluoroskopische Bildverfolgung und die anschliessende Rekonstruktionsmethodik wird die isolierte tibiotalare Gelenkskinematik ohne Beeinflussung durch Hautbewegungsartefakte zugänglich.

Die vorliegende Arbeit ermöglichte einen ersten Einblick in die Gelenkskinematik und das in vivo Verhalten der Mobility™ Total Ankle Arthroplastik. Mittels Anwendung auf ein grösseres Patientenkollektiv hat das entwickelte Verfahren das Potential, Klinikern und Implantatentwicklern zu helfen, heutige Designs sowie deren zukünftige Modifikationen zu evaluieren.