

Diss. ETH 7585

Computertomographische Osteodensitometrie beim metallischen Kunstgelenk

ABHANDLUNG
zur Erlangung
des Titels eines Doktors der Naturwissenschaften
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von
PETER SEITZ
Dipl. Phys. ETHZ
geboren am 11. Oktober 1956
von Zürich (ZH) und Berneck (SG)

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. M. Anliker, Referent
Prof. Dr. J. Marti, Korreferent

1984

Zusammenfassung

Der künstliche Gelenkersatz hat sich in den vergangenen zwei Jahrzehnten sehr erfolgreich entwickelt. Nach wie vor nimmt jedoch die Prothesenlockerung unter den Komplikationen eine zentrale Stellung ein. Sie kann aber mit den heute zur Verfügung stehenden diagnostischen Methoden erst in einem sehr späten Stadium sicher nachgewiesen werden. Die Computertomographie (CT) sollte im Prinzip eine frühzeitige Erkennung einer Prothesenlockerung erlauben, ihre Schnittbilder werden aber durch die Anwesenheit von Metall stark gestört. Mit der Arbeit von Hinderling ist es 1978 erstmals gelungen, artefaktarme Querschnittsbilder in Anwesenheit von metallischen Hüftgelenkprothesen zu rekonstruieren, die für eine erfolgreiche Visualisierung von Knochen- und Zementverteilung um das Implantat eingesetzt werden konnten. Es wurde hingegen noch kein Versuch unternommen, die dazu entwickelte Methode für die Quantifizierung von Knochendichten einzusetzen. Die vorliegende Arbeit untersucht systematisch mathematische und messtechnische Lösungswege zur quantitativen Erfassung von Knochendichten in Anwesenheit von Metall. Basierend auf Arbeitshypothesen, die aus einem physiologischen Modell der Knochengewebsreaktionen bei Implantation eines Kunstgelenks folgen, wird anschliessend eine Pilotstudie an Patienten beschrieben, mit der die Quantifizierung der Verankerung von Kniegelenkprothesen erfolgte.

Für verschiedene Hauptkomponenten von Implantatswerkstoffen wird die minimale Röntgenenergie berechnet, welche nötig wäre, um mit konventionellen CT-Verfahren Untersuchungen durchführen zu können. Einzig für Titanlegierungen liegen diese Energien (60-70 keV) in der Nähe des für die Osteodensitometrie geeigneten Energiebereiches von 35-50 keV. Die am häufigsten eingesetzten Metalle Eisen und Kobalt setzen aber Energien von 100 keV und mehr voraus, die für Knochendichtuntersuchungen ungünstig sind. Werden andererseits für die Knochendensitometrie optimale Energien von 35-45 keV gewählt, so können die Röntgenphotonen das Prothesenmaterial nicht mehr durchstrahlen. Damit sind die Projektionsdaten nicht mehr vollständig und die Anwendung konventioneller CT-Bildrekonstruktionsverfahren unmöglich. Dies führt uns auf das mathematische Problem der Rekonstruktion aus unvollständig gemessenen Projektionsdaten. Die wichtigsten publizierten Verfahren zu diesem Thema werden in einheitlicher Notation zusammenfassend dargestellt. Anschliessend beschreiben wir einen eigenen Lösungsansatz, der Rekonstruktionen von Querschnittsbildern aus Daten erlaubt, die in beliebigen Projektionsbereichen unvollständig sind. Dieser neue Ansatz beruht auf der Ausnutzung der Linearität der in der CT vorkommenden Abbildungen und führt auf schlecht gestellte (singuläre) lineare Gleichungssysteme. Wir stellen regularisierende Methoden vor, mit denen diese Gleichungssysteme stabil gelöst werden können. Simulationen mit verrauschten Projektionsdaten realistischer Modelle dokumentieren, dass das neue Verfahren auch für die quantitative CT geeignet ist. Eine Analyse des Rechen- und Speicheraufwands der publizierten und des von uns entwickelten Verfahrens zeigt aber, dass die gegenwärtig zur Verfügung stehenden Minirechner zu langsam sind

oder zu wenig Speicherplatz aufweisen, um schon heute Patientenuntersuchungen mit vertretbarem Aufwand durchführen zu können. Basierend auf der linearen Interpolation wurde deshalb ein schnelles Verfahren entwickelt und verfeinert, das die Durchführung einer Pilotstudie an Patienten mit künstlichem Kniegelenk ermöglichte. Dieses Verfahren benützt, in Weiterentwicklung des von Hinderling vorgeschlagenen, die automatische Konturdetektion auch von komplexen Implantatsquerschnitten durch die Verwendung von Bildverarbeitungsalgorithmen in einem vorläufig rekonstruierten, artefaktbehafteten Bild. Dieses neue Verfahren erlaubt die Quantifizierung der Knochendichte, gemittelt über einen axialen Bereich von etwa 15 cm im Bereich des metallischen Kunstgelenks, mit einer Reproduzierbarkeit von 1.5% bei Patientenuntersuchungen im zeitlichen Verlauf.

Knapp 20 Patienten wurden wiederholt mit der Methode der verbesserten linearen Interpolation untersucht, unter Verwendung des am IBT speziell für Knochenuntersuchungen entwickelten Computertomographiesystems, mit einer mittleren Strahlenbelastung von etwa 0.15 mSv. Die Patienten waren in zwei Gruppen aufgeteilt : Die erste Gruppe wurde während der Reparatursphase überwacht (2 Wochen bis 6 Monate postoperativ), während die zweite Gruppe in der Stabilisationsphase untersucht wurde (ein Jahr postoperativ oder später). Die erste Gruppe zeigte Knochenverluste bis zu 15% in 4 Monaten. In der zweiten Gruppe war innerhalb der Messgenauigkeit keine Änderung der Knochendichte nachweisbar. Der absolute Verlust an Knochendichte erfolgt annähernd homogen sowohl in axialer Richtung längs des Implantatsschaftes als auch in radialer Richtung. Die relativen Abnahmen der Knochendichte hingegen nehmen gegen das Kniegelenk hin stark zu, in radialer Richtung werden sie innen, im Bereich der Spongiosa grösser. Wir konnten ausserdem Implantatsmigrationen nachweisen -mit und ohne gleichzeitigen Knochenverlust- die zum Teil auch in der Stabilisationsphase auftraten.

Der beobachtete Knochenverlust bei den Kniegelenkpatienten ist zumindest teilweise auf die Entlastung des operierten Beines zurückzuführen. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurde eine begleitende Studie an der distalen Tibia von Patienten mit (einseitigem) künstlichen Hüftgelenk durchgeführt. Diese Studie dokumentiert nicht nur den Links-Rechts-Unterschied in den Knochenparametern auf Grund der präoperativen Entlastung des operierten Beines, sondern beschreibt auch die Verläufe bis 8 Monate nach der Operation. Für das operierte Bein im Vergleich zum nicht operierten ergab sich (im Gruppenmittel) ein verschiedenes Verhalten : Der Verlust an Knochensubstanz ist im operierten Bein zuerst ausgeprägter als im nicht operierten, wird dann aber wahrscheinlich durch die Remobilisierung des Patienten reduziert. Innerhalb der betrachteten 8 Monate war kein Einfluss einer sportlichen Betätigung auf den Knochenverlust nachweisbar.

Mit Hilfe der in dieser Arbeit beschriebenen mathematischen und messtechnischen Verfahren konnte das Instrumentarium der quantitativen Computertomographie für die nicht-invasive Untersuchung von Knochendichteveränderungen im Bereich von Kunstgelenken nutzbar gemacht werden. Damit ist es nun möglich, die Verankerung von Implantaten bei Patienten über längere Zeit zu kontrollieren und eventuelle Osteolyseherde frühzeitig zu erkennen.

Abstract

Total joint arthroplasty has progressed very successfully during the last two decades. However, loosening of the implants is still one of the most serious problems. With existing diagnostic methods, this loosening can be reliably detected only in a very late stage. Computed Tomography (CT) could render it possible to detect the loosening of an implant at a much earlier time ; but in the presence of metallic objects the reconstructed cross-sections are severely contaminated by artifacts. Hinderling was in 1978 for the first time able to reduce these artifacts and to reconstruct cross-sections in the presence of metallic hip joint prostheses. This allowed the successful visualization of bone and cement distribution around the implant. Yet it has not been tried to apply this method to the quantification of bone densities. The present work investigates in a systematic way mathematical methods and measuring techniques for the quantitative evaluation of bone densities. We develop working hypotheses which are based on a physiological model of tissue reactions on implantation of a prosthesis. Subsequently we describe a pilot study where the anchorage of artificial knee joints in patients is to be quantified.

Computations for different main components of implant alloys establish minimal X-ray energies for the conventional application of CT. Only titanium-based alloys require energies (60-70 keV) that lie close to the energy range of 35 keV to 50 keV, suited for osteo-densitometry. The most often used metals iron and cobalt require energies of 100 keV and more which is inappropriate for the quantification of bone density. If we use energies suitable for bone densitometry the X-ray photons are almost completely absorbed in the implant. This results in incomplete projection data and prevents the application of usual CT image reconstruction algorithms. Therefore the problem of reconstructions from incomplete projections has to be solved. We present the most important published results on this problem using a coherent mathematical notation. Subsequently we describe our own new method for the reconstruction from incomplete projections, where the missing projection range is allowed to be arbitrary. This new algorithm is based on the linearity of the operators occurring in CT and leads to ill-posed (singular) systems of linear equations. We show regularizing methods for the stable solution of these systems of equations. Simulation studies using noisy projection data of realistic phantoms prove the applicability of this new method to the use in quantitative CT. An analysis of computation time and memory requirements of published and our new algorithm reveals that existing minicomputers are either too slow or provide insufficient memory capacity for an extended study of patients. Therefore we developed and implemented a fast algorithm based on linear interpolation in the missing projection range. This procedure uses, as a further improvement on the one proposed by Hinderling, an automatic contour detection algorithm which works reliably even with complex implant shapes. This is realized by applying image

processing algorithms to a preliminarily reconstructed picture where there are still artifacts present. We employed this method for a pilot study of patients with artificial knee joints. Using this procedure we achieved the quantification of mean bone densities in the vicinity of metallic implants with a reproducibility of some 1.5% in repeated examinations of patients.

We examined 20 patients repeatedly with the improved method of linear interpolation, using the special purpose low dose X-ray CT system that had been developed at the IBT for bone evaluations. Mean radiation dose was around 0.15 mSv per examination. The patients were divided in two groups : The first group was monitored during the reparation phase (2 weeks to 6 months postoperative) while the second group was examined in the stabilization phase (one year postoperative and later). The patients of the first group showed bone losses of up to 15% in 4 months. In the second group no change of bone density could be observed within the precision of our measurements. Absolute loss of bone is rather homogeneously distributed along the entire implant shaft and even beyond, as well as in radial direction. Relative loss of bone however is higher near the knee joint than in the distal tibia. In radial direction the relative decrease in bone density is higher in the inner spongy bone region than in the cortical bone. Furthermore we were able to demonstrate migration of implants - with and without simultaneous loss of bone - occurring sometimes even in the stabilization phase.

The observed loss of bone in the patients with artificial knee joints has to be attributed at least in part to the unloading of the operated leg. In order to investigate this influence we carried out a longitudinal study at the distal tibia of patients with a unilateral artificial hip joint. This study documents the left-right difference in the bone parameters presumably due to the preoperative unloading of the operated leg. We were able to monitor the changes of the bone parameters up to eight months after the implantation of the hip joint prosthesis. The operated leg shows different behaviour from the unoperated one : At first loss of bone (as a group mean) is more marked in the operated leg. Later on bone loss gets very much reduced, probably due to the patients' remobilization. During the eight months within we monitored our patients we could find no indication of exercise influencing bone loss.

The present work describes mathematical methods and measuring techniques which render it possible to apply quantitative Computed Tomography to the non-invasive examination of changes in bone tissue in the vicinity of metallic implants. Thus long-term monitoring of the anchorage of implants in patients and early diagnoses of possible osteolysis centres have become possible.