

Diss. ETH No. 14262

# Locating Implants with respect to the Bone in Diagnostic X-ray Images of the Pelvis

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
for the degree of  
Doctor of Technical Sciences

presented by  
Kathrin Valentine Burckhardt  
Diploma in Physics, Ludwig-Maximilians-Universität, Munich  
born on August 13, 1969  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of  
Professor Gábor Székely, examiner  
Professor Leo Joskowicz, co-examiner  
Professor Jürg Hodler, co-examiner

June 2001

# Abstract

This thesis is about the assessment of the migration of artificial hip sockets in clinical x-ray images. “Migration” means the displacement of the bony implant with respect to the bone in time. It is seen as the most objective indicator for an implant loosening, which is the main problem in hip replacement. The data source are the standard anterior-posterior pelvic radiographs which are usually acquired for the post-operative examination of the replacement. According to the general case, it is assumed that no computer tomograms of the pelvis are available. Due to the lack of 3D information of the bone, only the components of the migration parallel to the plane of the radiographic film can be observed.

It is assumed that a migration of only 0.5 to 1.0 millimeter in the first two postoperative years implies an increased risk of later loosening. This correlation is especially important if a new type of cup or implantation technique is introduced. It means that a precise assessment of migration allows for an early judgement of the fixation properties and for the prevention of the use of implants with a high tendency to loose in many patients. Hence, a useful method for measuring migration should allow for the observation of implant displacements in the sub-millimeter range. The precision of the previously proposed methods for cup migration assessment was analysed theoretically considering the errors entering the measurement. Standard deviations in the range of 0.6 mm to 3.0 mm resulted. Based on the theoretical analysis, a computerized system for a more precise assessment of the migration was designed. In this system, which is named XIMIT, the sensitivity of the measurement towards the variable position and orientation of the pelvis at exposure is minimized. The most relevant of the remaining sources of error is the uncertainty in determining the position of the necessary bony landmarks and of the implant in the image. It is reduced by the use of image analysis tools.

The precise localization of the bony landmarks is achieved by applying a state-of-the-art template matching algorithm. The user roughly determines the position of a landmark in all images of a pelvis and chooses the template, i.e. a region of interest containing the respective bony feature in the first post-operative radiograph. The algorithm finds the exact landmark coordinates in the later radiographs by geometrically fitting the bony structures in these images to the template. The implant is located based on the principle of Analysis-by-Synthesis. Using the CAD model of the artificial hip socket, a synthetic radiograph of the cup depending on its approximate 3D position and orientation in the x-ray system is generated. The exact 3D parameters are recovered by matching the synthetic image to the original one while virtually translating and rotating the cup.

For testing the system, series of x-ray images of a validation unit bearing a bony pelvis phantom were acquired. During the acquisition, the pelvis was tilted and translated, and a migration was simulated. The performance in locating the bony landmarks proved to be strongly dependent on the shape of the matched anatomical structure. The principle of Analysis-by-Synthesis was found to allow for a reliable localization of the cup. The experimental and theoretical error estimation demonstrated that XIMIT allows for a determination of the cup migration with the targeted standard deviation in the sub-millimeter range. The conditions for this precision are that an extreme orientation of the pelvis at exposure is avoided, and that the anatomical structure used as bone reference can be clearly identified in the x-ray image.

# Zusammenfassung

In dieser Arbeit geht es um die Bestimmung der Migration von künstlichen Hüftpfannen unter Verwendung von klinischen Röntgenaufnahmen. "Migration" bezeichnet die zeitliche Verschiebung eines Implantats relativ zum Knochen. Sie wird als der objektivste Indikator einer Implantat-Lockerung, das Hauptproblem bei künstlichen Gelenken, betrachtet. Als Datenquelle dienen die anterior-posterior Röntgenbilder des Beckens, die üblicherweise zur Nachuntersuchung der Implantation angefertigt werden. Es wird dabei vom allgemeinen Fall ausgegangen, dass kein Computertomogramm vom Beckenbereich zur Verfügung steht. In Ermangelung von 3D-Daten des Beckenknochens können nur die Migrationskomponenten parallel zur Ebene des Röntgenfilms beobachtet werden.

Es wird angenommen, dass eine Migration von nur 0.5 bis 1.0 Millimeter in den ersten zwei Jahren nach der Implantation auf ein erhöhtes Risiko späterer Lockerung schliessen lässt. Dieser Zusammenhang ist besonders wichtig, wenn ein neuer Pfannen-Typ oder eine neue Implantationstechnik eingeführt wird. Mittels einer genauen Migrationsmessung ist demnach eine frühe Beurteilung der Fixierungseigenschaften möglich, und die Verwendung von Implantaten mit hoher Tendenz zur Lockerung bei vielen Patienten kann verhindert werden. Deshalb sollten mit einer nützlichen Migrationmessungs-Methode Verschiebungen des Implantats im Sub-Millimeter-Bereich beobachtet werden können. Die Genauigkeit der bestehenden Methoden zur Migrationsbestimmung wurde unter Berücksichtigung der Fehler, die in die Messung eingehen, analysiert. Es resultierten Standardabweichungen im Bereich von 0.6 mm bis 3.0 mm. Basierend auf der theoretischen Analyse wurde ein rechnergestütztes System zur genaueren Beobachtung der Pfannenverschiebung entwickelt. Bei diesem System genannt XIMIT ist die Sensibilität der Messung gegenüber der variablen Position und Orientierung des Beckens bei der Aufnahme minimiert. Die Ungenauigkeit der Lokalisierung der benötigten Knochenpunkte und der Pfanne im Bild, die die relevanteste der restlichen Fehlerquellen darstellt, wird durch die Verwendung von Bildanalysetechniken reduziert.

Die genaue Lokalisierung der Knochenpunkte wird durch die Anwendung eines Template-Matching-Verfahrens erreicht. Der Benutzer gibt die ungefähre Position eines Punktes in allen Aufnahmen eines Beckens vor und bestimmt das Template, d.h. die Bildregion im ersten post-operativen Röntgenbild, die das jeweilige Knochen-Merkmal enthält. Die genauen Punktkoordinaten in den späteren Aufnahmen werden von dem Verfahren mittels der geometrischen Anpassung der Knochenstrukturen in diesen Bildern an das Template bestimmt. Das Implantat wird mit Hilfe des Prinzips "Analyse-durch-Synthese" lokalisiert.

Unter Verwendung des CAD-Modells wird ein synthetisches Röntgenbild der Pfanne in Abhängigkeit ihrer Position und Orientierung im Röntgensystem generiert. Die genauen 3D-Parameter werden dadurch bestimmt, dass die Pfanne solange virtuell im Röntgensystem verschoben und gedreht wird, bis ihre synthetisierte Abbildung mit der im Originalbild übereinstimmt.

Um das entwickelte System zu testen, wurden Röntgenbild-Serien einer Validierungseinheit mit Beckenknochen und Pfanne angefertigt. Während der Aufnahme der Serien wurde sowohl das Becken gekippt und verschoben als auch eine Migration der Pfanne simuliert. Es konnte beobachtet werden, dass die Eignung des Matching-Algorithmus zur Lokalisierung der Knochenpunkte stark von der Form der verwendeten anatomischen Struktur abhängt. Analyse-durch-Synthese erwies sich als geeignetes Prinzip für die zuverlässige Lokalisierung der Pfanne. Die experimentelle und theoretische Abschätzung des Gesamtfehlers zeigte, dass XIMIT eine Bestimmung der Pfannenverschiebung mit der angestrebten Sub-Millimeter-Genauigkeit ermöglicht. Die Bedingungen dabei sind, dass eine extreme Orientierung des Beckens bei der Röntgenaufnahme vermieden wird, und dass die anatomische Struktur, die als Knochenreferenz verwendet wird, im Röntgenbild klar erkennbar ist.