

Diss. ETH No. 16881

2D-3D Registration of Medical Images

A dissertation submitted to the

Swiss Federal Institute of Technology Zurich

for the degree of

Doctor of Science ETH Zürich

presented by

Xinhui Yang

M.S.E., Xi'an Jiaotong University, China

born October 15th, 1972

citizen of P.R. China

Zürich 2006

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Peter Niederer, examiner

ao. Prof. Dr. Wolfgang Birkfellner, co-examiner

Prof. Dr. Peter Bösiger, co-examiner

Summary

Accurate and robust 2D-3D registration of medical images has emerged as one of the key challenges of computer-assisted surgery. In this dissertation, the focus is particularly put on the registration of 3D Computed Tomography (CT) to 2D X-ray images since the overlaying of CT images onto X-ray images has several benefits. First, this will provide structure information for interventional guidance under real-time X-ray. Second, by registering CT images to X-ray images, it is possible to locate devices which are only visible in X-ray images.

2D-3D patient-to-computed-tomography (CT) is a method to determine a transformation that maps two coordinates systems by comparing a projection image rendered from CT to actual X-ray images. Iterative variation of the CT's position between rendering steps finally leads to exact registration. For this task, three major steps are necessary. The first is the generation of simulated X-ray images, which are called the digitally rendered radiographs (DRRs) which are computed by accumulating the linear attenuation of virtual X-rays that go through the CT volume under the constraint of the perspective projection model. The second step is the selection of a similarity measure to score the assembling between the DRR and the actual X-ray image. The last step is to use specific optimization methods to minimize (or maximize) the

value of similarity measure until the termination criterion is reached by iteratively changing the position and orientation of the CT volume.

The aim of our work was to develop and validate a robust, fast and accurate technique to register the intra-operative 2D X-ray images with pre-operative 3D CT images in a clinical scenario.

Since registration is an iterative process, a fast DRR generation technique is desirable. To this end, a simple and rapid method for generation of DRRs based on splat rendering was introduced, which produces DRRs much faster than the ray casting method if an appropriate voxel threshold is determined. As opposed to conventional splatting, antialiasing of the resulting images is not achieved by means of computing a discrete point spread function, but by stochastic distortion of either the voxel positions in the volume scan or by the simulation of a focal spot of the x-ray tube with non-zero diameter.

A rotation invariant similarity measure which is based on Zernike moments is also presented. This leads to a 5+1 degree of freedom registration method and may reduce the time consumption of registration thanks to a decoupling of the rotation around the beam axis of the imaging system from the other five transformation parameters. Furthermore, the characteristics of a similarity measure based on Tchebichef moment are explored. Due to its computation efficiency and possibility to choose a relatively low order for evaluating similarity

measure, it may be used as an alternative for the Zernike moment method when an optimization method such as estimation of multivariate normal algorithm (EMNA) is applied.

For optimization purpose, a novel direct/stochastic hybrid optimization method was presented in our early work, which integrated the merits of the Powell-type algorithm and the adaptive simulated annealing algorithm together. However, an important fact has not been given due attention in this algorithm and other published optimization algorithms in that the transformation parameters (three rotations and three translations) are not independent from one another. Based on the assumption of each parameter being a normal distribution, we proposed a new global optimization method derived from the estimation of multivariate normal algorithm (EMNA) for 2D-3D registration, which takes the dependence of transformation parameters into account during the registration process. The preliminary results on simulation data demonstrated that this method is quite promising.

The integration and validation of the proposed algorithms were finally carried out on phantom bone images. The gold-standard of 2D-3D registration was determined by using the implanted fiducial markers. The accuracy of gold standard was assessed by using the fiducial registration error (FRE). Three similarity measures, the Pattern Intensity, the Zernike moment based similarity measure and the Tchebichef moment based similarity measure were evaluated by

applying the optimization method derived from the estimation of multivariate normal algorithm (EMNA) and the voxel wobbled splat DRR rendering technique on three bone samples. The performance of the similarity measures when the fluoroscopic image is partially occluded by foreign objects is evaluated. The influence of the initial guess range on the registration accuracy and the time consumption are also investigated. Finally, a series of experiments were made whereby a local Powell optimization method was used in order to make a comparison with the results obtained with the EMNA optimization method.

Although true real-time performance was not reached, in conclusion, the proposed splat DRR rendering algorithm in combination with the Pattern Intensity similarity measure and the EMNA optimization procedure provide a promising on-line 2D/3D registration algorithm of preoperative CT image to intraoperative fluoroscopic X-ray images.

Zusammenfassung

Die genaue und robuste 2D-3D Registrierung von medizinischen Bildern entwickelte sich zu einer grossen Herausforderung in der computergestützten Chirurgie. In dieser Arbeit wurde der Schwerpunkt hauptsächlich auf die Registrierung von präoperativ aufgenommenen 3D Computer Tomographie (CT) Bildern zu intraoperativ erstellten 2D Röntgenbildern gelegt, da die Überlagerung von solchen Bildern für die klinische Anwendung von grossen Nutzen ist. Damit lässt sich in Echtzeit strukturelle Informationen für die Führung von Instrumenten während eines Eingriffes gewinnen. Zweitens ermöglicht die Registrierung von CT- zu Röntgenbildern die Ortung von Instrumenten, die nur auf Röntgenbildern sichtbar sind.

Für die 2D-3D Patient-zu-Computer-Tomographie Registrierung ist es notwendig, eine Transformation zwischen zwei Koordinatensystemen zu kennen. Diese lässt sich durch einen Vergleich von gerenderten Projektionen von CT Bildern und den entsprechenden Röntgenbildern finden. Eine iterative Variation der Position des CT Volumens zwischen den einzelnen Renderingschritten führt zu einer genauen Registrierung. Für diesen Vorgang sind drei Hauptschritte nötig. Der erste besteht in der Erzeugung von simulierten Röntgenbildern aus der CT data, welche digital gerenderte Röntgenbilder (DRRs) genannt werden. Diese werden durch die Akkumulierung der linearen Abschwächungskoeffizienten von virtuellen Röntgenstrahlen, die unter der Einschränkung des perspektivischen Projektionsmodells das CT Volumen durchdringen, berechnet. Der zweite

Schritt beschäftigt sich mit der Auswahl eines Ähnlichkeitsmasses, um das Zusammenfügen von DRRs und Röntgenbildern bewerten zu können. Beim letzten Schritt werden spezifische Optimierungsmethoden angewandt, um den Ähnlichkeitswert solange zu minimieren (oder maximieren), bis das Abbruchkriterium erfüllt ist. Dabei werden Position und Orientation des CT Volumens iterativ geändert.

Das Ziel unserer Arbeit war die Entwicklung und Validierung einer robusten, schnellen und genauen Technik, welche es erlaubt, in einer klinischen Umgebung die intra-operativen 2D-Röntgenstrahlbilder mit den pre-operativen 3D-CT-Bildern zu registrieren.

Da es sich bei der Registrierung der Bilddaten um einen iterativen Prozeß handelt, ist eine schnelle Generierung der DRRs wünschenswert. Zu diesem Zweck wurde eine einfache und schnelle Methode für das Erzeugung der DRRs basierend auf der „splat rendering“-Methode eingeführt. Diese Methode generiert die DRRs wesentlich schneller als die „ray casting“-Methode, wenn ein passender Threshold (Schwellwert) festgelegt wird. Im Vergleich mit der herkömmlichen „splat casting“-Methode wird das Antialiasing der resultierenden Bilder nicht mittels Berechnung einer diskreten Pointspread-Funktion erzielt, sondern durch stochastische Verschiebung der Voxelpositionen im Volumenscan oder durch die Simulation eines Brennpunktes der Röntgenröhre mit Durchmesser ungleich Null.

Auch ein rotationsinvariantes Ähnlichkeitsmaß, basierend auf den Zernike Momenten wird vorgestellt. Man erhält damit für die Registrierungsmethode 5+1 Freiheitsgrade sowie eine Rechenzeitverkürzung, welche man der

Entkopplung der Rotation um die Achse des Bildraums von den fünf anderen Transformationsparametern verdankt. Außerdem wird die Beschreibung von Ähnlichkeitsmaßen mittels Chebychew Norm untersucht. Dank ihrer Recheneffizienz und der Möglichkeit eine relativ kleine Ordnung für die Evaluierung von Ähnlichkeitsmaßen zu wählen, kann sie als Alternative zu den Zernike Momenten dienen, falls eine Optimierungsmethode für eine Abschätzung in der Form eines multivariaten Norm-Algorithmus (EMNA) angewendet wird.

Aus Optimierungsgründen wurde eine neue direkt/stochastisch hybride Optimierungsmethode in einer früheren Arbeit eingeführt, welche die Vorteile von Powell Algorithmen und adaptivem „Simulated Annealing“ Algorithmen vereint. Allerdings berücksichtigt dieser Algorithmus, sowie andere publizierte Optimierungsalgorithmen die Tatsache nicht, dass die Transformierungsparameter (3 Translationen und 3 Rotationen) nicht unabhängig voneinander sind. Unter der Annahme, dass alle Parameter normalverteilt sind, leiteten wir eine neue globale Optimierungsmethode von der Abschätzung von multivariaten Norm-Algorithmus (EMNA) für die 2D-3D Registrierung ab, welche die Abhängigkeit der Transformationsparameter in den Registrierungsprozess mit einbezieht. Die vorläufigen Ergebnisse auf simulierten Daten lassen auf eine viel versprechende Methode schließen.

Die Integration und die Validierung der vorgestellten Algorithmen erfolgte schliesslich an Bildern eines Knochenphantoms. Anhand der implantierten Bezugsmarken wurde der Gold-Standard der 2D-3D-Registrierung bestimmt. Die Genauigkeit des Gold-Standards wurde über den Fiducial-Registration-Error (FRE) beurteilt. Drei verschiedene Übereinstimmungsmetriken, namentlich die Pattern-Intensity, die Zernike-Moment-basierte

Ähnlichkeitsmetrik, sowie die Tchebichef-Moment-basierte Metrik wurden durch Anwendung der Optimierungsmethode auf drei Knochenproben evaluiert. Die Optimierungsmethode wurde aus dem Estimate-of-Multivariate-Normal-Algorithmus (EMNA) und der Voxel-Wobbled-Splat-DRR-Renderingtechnik abgeleitet. Im Weiteren wurde das Verhalten der Übereinstimmungsmetriken für jenen Fall geprüft, dass die Fluoreszenzbilder durch Fremdobjekte zum Teil verdeckt sind. Ebenso wurde der Einfluss des Startwertebereichs auf die Registrierungsgenauigkeit und die zeitliche Dauer untersucht. Schliesslich wurde eine Serie von Experimenten durchgeführt, wobei eine lokale Powell-Optimierungsmethode verwendet wurde, um Vergleiche mit den Resultaten der EMNA-Optimierungsmethode anzustellen.

Obschon kein tatsächlicher Echtzeit-Betrieb erreicht werden konnte, stellt der vorgeschlagenen Splat-DRR-Rendering-Algorithmus in Kombination mit der Pattern-Intensity-Übereinstimmungsmetrik und der EMNA-Optimierungsmethode eine vielversprechende Technik für die Online 2D/3D-Registrierung von prä-operativen CT-Bildern oder intra-operativen Fluoroskopie-Röntgenbildern dar.