



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Institut für Photogrammetrie und Kartographie
Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung

Bildgestützte 3D-Vermessung von Patienten zur Positionierung für die radiologische Krebstherapie

Boris Peter Selby

Dissertation

2012

Kurzfassung

In den letzten Jahren konnten bedeutende technologische Fortschritte bei der strahlentherapeutischen Tumorbehandlung gemacht werden. Das noch relativ junge Gebiet der Partikelbestrahlung setzt sich, seitdem 1990 die erste klinische Einrichtung den Betrieb aufgenommen hat, immer mehr als überlegene Behandlungstechnik durch. Dies liegt daran, dass die Vorteile, die gegenüber der herkömmlichen Behandlung wesentlich zielgenauere Dosisapplikation, die Nachteile des höheren Aufwandes bei weitem überwiegen. So kann Tumorgewebe gezielter behandelt werden, während umliegendes Gewebe weniger in Mitleidenschaft gezogen wird. Patienten können allerdings nur von der höheren Genauigkeit profitieren, wenn es gelingt, ihre Lage in der Bestrahlungsanlage exakt zu bestimmen und sie relativ zum Behandlungsstrahl so zu positionieren, dass die Strahlendosis genau auf den Tumor abgegeben wird.

Deshalb ist es Ziel dieser Arbeit, automatische Verfahren zu entwickeln, die ein hohes Maß an Genauigkeit und Zuverlässigkeit bei der röntgenbasierten Lagemessung gewährleisten. Da die Verfahren in unterschiedlichen Anlagen und für verschiedene Körperregionen einsetzbar sein sollen, wird Wert auf Vielseitigkeit und Toleranz gegenüber Störeinflüssen, wie etwa nichtoptimaler Bildqualität gelegt. Neben einem auf direktem Bildvergleich und einem auf Rückwärtsprojektion basierenden Ansatz zur 2D-3D Registrierung, wird ein neues, gemischtes Verfahren vorgestellt, welches eine höhere Zuverlässigkeit bieten soll. Durch Einsatz einer radiometrischen Registrierung simulierter Röntgenbilder wird das Verfahren weiter verbessert. Über die Registrierungsverfahren hinaus wird ein neues Ähnlichkeitsmaß für den Bildvergleich vorgestellt, das ebenfalls dazu dient, die Zuverlässigkeit gegenüber anderen existierenden Maßen zu verbessern.

Da neben der Lagemessung, die Kalibrierung der verwendeten Röntgenkamerasysteme für die erreichbare Genauigkeit von entscheidender Rolle ist, wird ein Algorithmus zur automatischen Kalibrierung vorgeschlagen, der die Detektion von Kalibriermarkern in Röntgenbildern beinhaltet und die Schätzung stochastischer Fehler im Gauß-Helmert Modell erlaubt. Die Kamerakalibrierungen für einzelne Ansichten werden in ein Gesamtmodell für die rotierbare Bestrahlungsanlage eingebettet, das die Bewegungsbahnen der Kamerakomponenten nähert und Rückschlüsse auf die Kameraparameter und ihre zufälligen Fehler bei beliebigen Anlageneinstellungen ermöglicht.

Darüber hinaus wird gezeigt, welchen Einfluss zufällige Fehler verschiedener Systemkomponenten auf die gemessene Patientenlage haben. Unsicherheiten des Messsystems werden für in Betrieb befindliche Anlagen ermittelt und können z. B. dazu verwendet werden, bei der Bestrahlungsplanung die Sicherheitsabstände der Tumordefinition anzupassen.

Schließlich wird erstmals ein Ansatz vorgestellt, der eine Selbstdiagnose des Messsystems ermöglicht. Basierend auf einem an ein Hidden Markov Modell angelehntes Konzept, werden Beobachtungen der Zwischenergebnisse einzelner Systemkomponenten verwendet, um eine Gesamtdiagnose zu erstellen und Rückschlüsse auf wahrscheinliche Fehlerursachen zu erlauben.

Zur Evaluierung der Methoden werden Phantomdaten und klinische Daten verschiedener Partikeltherapiezentren verwendet. Die vorgestellten Registrierungsverfahren werden untereinander und mit anderen existierenden Verfahren nach gängigen Kennzahlen verglichen. Die Erstellung markerbasierter Goldstandards erlaubt die Genauigkeit zu quantifizieren.

Mit der neuen Registrierungsverfahren kann eine Verringerung der Fehlerrate bei der Lagemessung an klinischen Daten erzielt werden. Das vorgeschlagene Ähnlichkeitsmaß zeigt sich im Vergleich zu zahlreichen anderen Maßen als sehr robust bei der Registrierung von Röntgenbildern und dürfte auch für den Einsatz in anderen Registrierungsverfahren geeignet sein.

Mit der Methode zur geometrischen Kalibrierung kann, zusammen mit einer Fehlerfortpflanzung für andere beteiligte Systemkomponenten, eine Bestimmung der zu erwartenden Fehler bei der Lagemessung und Positionierung des Patienten durchgeführt werden. Der Selbstdiagnoseansatz ist in der Lage, Fehlmessungen der Patientenlage zuverlässig als solche zu erkennen. Zudem erlaubt er, Fehlmessungen auf ihre Ursache zurückzuführen.

Abstract

In the last few years great technological advances could be accomplished in radiotherapeutic treatment of tumours. The relatively new field of particle irradiation is more and more established as a superior treatment technology, since the first clinical facility went operational in 1990. This is because the benefits of much more accurate dose delivery with respect to conventional treatment outweigh the disadvantages of the higher expense by far. It allows tumour tissue to be treated more targeted, whilst surrounding tissue is spared. However, patients can only benefit from the higher accuracy, if it is possible to determine their exact location in the treatment machine and align them so that the radiation dose is delivered precisely onto the tumour.

Therefore, the objective of this work is to develop automated methods that ensure a high degree of accuracy and reliability in x-ray-guided patient alignment measurement. Since the methods shall be utilized in different treatment systems and for different regions of the body, they are required to be versatile as well as tolerant with respect to non-optimal image quality. In addition to an approach that is based on direct image comparison and a backward-projection approach for 2D-3D registration, a new, combined method is presented, which is intended to provide improved reliability. By using a radiometric registration of simulated X-ray images, the method is further improved. Besides the registration procedure, a novel similarity measure for image comparison is presented, which serves to improve the reliability over other existing measures.

Besides the alignment measurement, the calibration of the X-ray camera systems used plays a crucial role for the achievable accuracy. Hence, an automatic calibration method is proposed, which includes the detection of calibration markers in X-ray images and allows estimating the influence of stochastic errors in a Gauß-Helmert Model. The calibrations for single viewing angles are integrated into a model for the rotating treatment device. Estimating the path of the motion of camera components allows determining the camera parameters and their random errors at arbitrary device settings.

Furthermore, the influence of stochastic errors of different system components on the measured patient alignment is evaluated. Uncertainties of the measurement system are determined for operational treatment devices and can be used e.g. to adjust the safety margins for the tumour definition in the treatment planning process.

For the first time, an approach is presented, that allows self-diagnosis of the measurement system. Based on a concept similar to a Hidden Markov model, observations of the intermediate results of individual system components are used to perform a whole-system diagnosis and to provide conclusions on probable error causes.

For evaluation of the presented methods, both phantom and clinical data from different particle therapy centres are used. Common metrics are used to compare the presented registration methods with each other and with other existing approaches. Marker-based gold standards allow quantifying the achievable accuracy.

With the new registration method, reduction of the error rate of the patient alignment measurement can be achieved for clinical data. It is shown, that the proposed similarity measure is very robust in comparison to many other measures for registration of X-ray images. It should also be suitable for use in other image registration applications.

The method of geometric calibration and the proposed error propagation for other involved system components allow determining the errors to be expected from alignment measurement and patient positioning. The approach for self-diagnosis is able to reliably detect erroneous measurements of the patient alignment. Furthermore, it is able to trace back a faulty measurement to its cause.