

Roboterassistiertes Assistenzsystem zur medizinischen Navigation

Carsten Born¹, Thomas Freundlich¹, Detlef Richter¹ und Gerd Straßmann²

¹Fachhochschule Wiesbaden, Fachbereich Information, 65197 Wiesbaden

²Philipps Universität, Universitätskliniken Marburg, 35032 Marburg

Email: carsten.born@epost.de

Zusammenfassung. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein roboterassistiertes Assistenzsystem entwickelt, das sowohl bei der extrakorporalen Tumorbestrahlung als auch bei der interstitiellen Brachytherapie zum Einsatz kommen soll. Dabei sollen einerseits die Genauigkeit der Bestrahlung erhöht, andererseits aber auch die Abläufe der Behandlung vereinfacht und beschleunigt werden. Der Roboter soll Landmarken auf der Haut von Patienten einzeichnen und Biopsienadeln in ein Tumorzentrum führen können. Alle dazu erforderlichen Positionierungsdaten werden aus den CT-Aufnahmen des Patienten bestimmt.

1 Problemstellung

Die Dosisapplikation im Rahmen einer externen Radiotherapie von malignen Tumoren wird im allgemeinen mittels 25-35 Einzelfractionen innerhalb mehrerer Wochen durchgeführt. Anfänglich wird eine CT-Untersuchung der Tumorregion gemacht, um eine 3D-konforme Bestrahlungsplanung zu erstellen. Durch die Bestrahlungsplanung wird eine Optimierung der Dosisverteilung durch die Festlegung der Einzelstrahlen, d.h. der Gantry-Winkel des Linearbeschleunigers, der Bestrahlungsfeldgröße und der Photonenergie erreicht. Im Rahmen einer darauf folgenden konventionellen Röntgensimulation wird die Bestrahlung mittels einer Röntgenröhre, die die gleiche Geometrie wie der Linearbeschleuniger hat, am Patienten simuliert. Die Lage des Patienten muss hierbei so lange korrigiert werden, bis sie seiner Lage während der Aufnahme am CT entspricht. Liegt der Patient radiologisch richtig, wird seine Position durch drei Laserkreuze von Wandlasern, die auf den Patienten projiziert werden, definiert und durch die Anbringung von Hautmarkierungen entsprechend der Laserkreuze festgehalten. Dieser Prozess ist sehr zeitaufwendig und personalintensiv. Ziel unserer Arbeit ist es, die Hautmarkierungen zur Patientenpositionierung direkt nach der Aufnahme noch am CT von einem Roboter auf die Patientenoberfläche zeichnen zu lassen.

2 Stand der Forschung

Zurzeit erfolgt vor jeder Bestrahlung im Beschleunigerraum mit Hilfe der gleichen externen Wandlasergeometrie und den Hautmarkierungen die korrekte Positionierung des Patienten in Bezug auf die Strahlenquelle. Mit Hilfe bereits

zur Verfügung stehender kommerzieller Softwaresysteme kann die virtuelle Bestrahlungssimulation im Rahmen einer Ablaufoptimierung des Therapieprozesses angewendet werden. Diese ermöglichen die präzise Bestrahlungsplanung direkt nach der CT-Untersuchung, nach der der Patient weiterhin auf dem CT-Tisch liegen bleibt. Zur Definition seiner Position werden dann bewegliche Laser am CT eingesetzt, die die Laserkreuze zum Einzeichnen der Hautmarkierungen in Bezug zur Strahlenquelle auf den Patienten projizieren. Diese sind mit hohen Anschaffungskosten verbunden. Dieser Prozess ersetzt die zuvor beschriebene zeitaufwendige Röntgensimulation. Bei diesem Verfahren ist es jedoch lediglich möglich, den Zielpunkt, d.h. das Isozentrum als Kreuzungspunkt aller Zentralstrahlen der Bestrahlungsfelder, auf dem Patienten zu markieren. [1,2]

3 Wesentliche Fortschritte durch den Beitrag

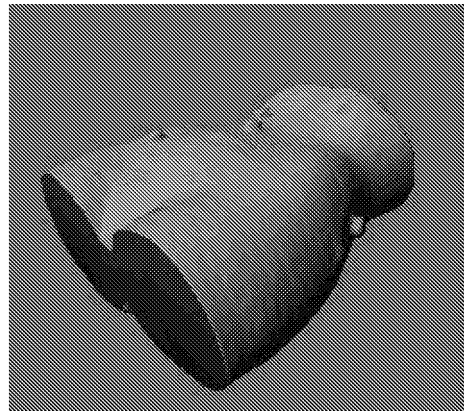
Bei der herkömmlichen Röntgensimulation wird die Ortsgenauigkeit der CT-Daten größtenteils verschenkt, da der Patient vom CT-Tisch aufsteht und sich zum Röntgensimulator begibt, wo er vom Radiologen nach Augenmaß in die richtige Lage gebracht werden muss, bevor die Hautmarkierungen aufgebracht werden können.

Bei in Verbindung mit der virtuellen Bestrahlungsplanung eingesetzten kommerziellen Systemen, bestehend aus einem automatischen beweglichen Punktlasersystem, werden die Zielkreuze Punkt für Punkt eingezeichnet. Diese Methode ist relativ ungenau und zeitintensiv. Durch die Verwendung eines Robotersystems kann die Einzeichnenzeit deutlich verringert werden. Dem entsprechend stellt ein Robotersystem zur Einzeichnung der Hautmarkierungen das optimale Werkzeug zur Umsetzung der virtuellen Bestrahlungsplanung dar. Durch diesen Einsatz kann die konventionelle und teure Röntgensimulation ersetzt werden. Darüber hinaus ist auch eine sehr präzise Zielpunkteinzeichnung auf nicht-invasiven Patientenfixationen (Masken) für die Hochpräzisionsbestrahlung möglich. Hierdurch entfällt auch die teure Anschaffung eines stereotaktischen Lokalisationsystems. Als Voraussetzung für das robotergestützte Einzeichnen der Hautmarkierungen ist die virtuelle Bahnplanung unter Einsatz einer Kollisionskontrolle notwendig.

4 Methoden

Die kommerzielle Bestrahlungsplanungs-Software EXOMIO extrahiert aus den im DICOM-Datenformat vorliegenden CT-Bildern Punkte der Körperoberfläche des Patienten. In Verbindung mit dem Software-Hersteller wurde eine Schnittstelle für den Datenexport definiert, wobei die Patientenoberfläche als Dreieck-basiertes Gitternetz (Mesh) im VRML97 Format übergeben wird.

Der für dieses Projekt verwendete Roboter Typ RV3-AL der Fa. Mitsubishi verfügt über eine Multi-Tasking-fähige Steuereinheit. Zwischen der Steuereinheit und dem verwendeten PC wurde eine Datenkommunikation aufgebaut. Hierzu

Abb. 1. CT-Datensatz als VRML File

wurde eine Controller-Software entwickelt, die die Daten vom PC empfängt und den Roboterarm steuert.

Die gewünschten Hautmarkierungen, die der Roboter zeichnen soll, entsprechen dem Rand der Bestahlungseintrittsfläche, die aus der Bestahlungsplanungs-Software in Bezug zum Oberflächenmodell bekannt ist. Die Felder werden in Form einer Eckpunktliste übergeben. Zur Wegfindung wird die Strecke zwischen zwei benachbarten Eckpunkten als gerade Linie ermittelt. Auf dieser Linie wird 2 mm in Richtung Zielpunkt vorgerückt. Für den so gefundenen Punkt wird der am nächst liegende Punkt auf der Patientenoberfläche ermittelt. Dieser Oberflächenpunkt wird als nächstes von Roboter angefahren. Mit der so erreichten Position als Startpunkt wiederholt sich die Berechnung so lange, bis der Zielpunkt erreicht ist. Für jeden Punkt auf dieser Strecke erfolgt eine isolierte Kollisionsprüfung zwischen der Körperoberfläche des Patienten und dem Roboterarm.

Zur Kollisionskontrolle ist es notwendig, die Patientendaten in geeigneter Form aufzubereiten. Zunächst erfolgt die Generierung eines Voxelmodells aus den Oberflächendreiecken der Patientenkontur, wobei die benachbarten Voxel sukzessive zu größeren Quadern zusammengefasst werden, bis am Ende nur noch ein quaderförmiges Element die gesamte Oberfläche einschließt. Die eigentliche Kollisionskontrolle wird nun durch eine Tiefensuche im Voxelmodell bei Überschneidungen eines Quaders des Patientenmodells mit dem ähnlich aufgebauten Voxelmodell des Roboters realisiert. Eine Kollision tritt auf, wenn der gesamte binäre Suchbaum des Patienten voxelmodells durchlaufen wurde und das Ursprungsdreieck des Oberflächenmodells als unterste Ebene mit dem Voxelmodell des Roboters rechnerisch in Berührung kommt, also eine räumliche Überschneidung auftritt. Wird durch die Kollisionskontrolle an einem Streckenpunkt eine Überschneidung gefunden, so erfolgt automatisch die Ermittlung des dem Punkt am nächsten gelegenen Oberflächendreiecks. Danach wird der Punkt solange entlang der Flächennormale des Dreiecks nach außen verschoben, bis keine Kollision mehr auftritt. Danach erfolgt die Überprüfung des nächstens

Streckenpunktes nach der gleichen Methode. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis der Endpunkt der zu zeichnenden Strecke erreicht wird. Ist die Bahnplanung ohne Kollision abgeschlossen, werden die Daten der endgültigen Streckenführung an den Roboter übermittelt und der Roboterarm bewegt.

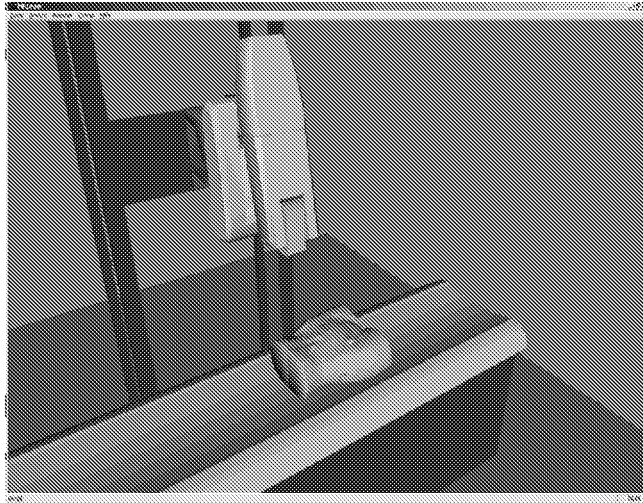
Auch nach der virtuellen Bahnplanung für den Roboterarm findet die beschriebene Kollisionskontrolle als Echtzeitüberwachung der Roboterbewegung während des Aufzeichnens der Bestrahlungsfelder auf der Körperoberfläche statt. Sobald der Roboterarm eine Bewegung ausführt, wird kontinuierlich seine momentane Position von der Steuereinheit an den Rechner übertragen. Dabei wird jetzt zusätzlich ein Sicherheitsabstand eingehalten, der so groß gewählt wird, dass der Arm die Distanz zur Körperoberfläche während der Rechenzeit für die Kollisionskontrolle nicht zurücklegen kann.

Zur visuellen Kontrolle kann der gesamte Bewegungsablauf des Roboterarms und die Körperoberfläche vorab auf dem Bildschirm unter OpenGL maßstabsgetreu als Animation dargestellt werden. Dadurch können Arzt und Patient die geplante Bewegung des Roboterarms analysieren und auf Durchführbarkeit prüfen. Darüber hinaus findet eine Echtzeitvisualisierung der Bewegungen statt. Zusätzlich zur Darstellung innerhalb des Programms kann die Animation auch als VRML97 File exportiert werden und über einen VRML-Browser ablaufen.

5 Ergebnisse

Die Bahnberechnung und Kollisionsprüfung läuft auf einem Standard PC mit 1 GHz Pentium III Prozessor unter Windows 2000. Die anfangs notwendige interne Aufbereitung der Patientendaten zur Kollisionskontrolle nimmt etwa 30 s in Anspruch. Der Gesamtvorgang einer einzelnen Kollisionsprüfung (Berechnung der Roboterposition im Raum, Transformation des Robotermodells und Prüfung auf Kollision mit dem Patienten) dauert durchschnittlich 33 ms. Somit wären etwa 30 Kollisionsprüfungen pro Sekunde möglich. Der Roboter ist auf eine Bahngeschwindigkeit von maximal 2 mm pro Sekunde eingestellt. Da der Roboter-Kontroller nur etwa 3 bis 4 mal pro Sekunde die aktuelle Roboterposition an den PC übermitteln kann, wird bei Bewegung des Roboters in Abständen von ca. 0,5 mm auf Kollision geprüft. Als Sicherheitsabstand für die Kollisionserkennung wurden 5 mm gewählt.

Der durchschnittliche Positionsfehler der Kollisionskontrolle lag bei den von uns ausgewerteten Testdaten bei 2,5 mm. Die Fehler liegen dabei modellbedingt immer zugunsten des Patienten. Die Kollisionskontrolle stellt also im Schnitt 2,5 mm bevor der Roboter den Patienten berührt eine Kollision fest. Die Absolutgenauigkeit der Positionierung konnten wir bisher nicht vermessen, da wir dazu direkt am CT-Tisch arbeiten müssten. Der Roboter erreicht eine Positioniergenauigkeit von 0,2 mm und eine Genauigkeit der räumlichen Ausrichtung von $0,6^\circ$. Dazu kommen die Messgenauigkeit der Positionsangaben im CT-Datensatz und der Fehler innerhalb der Bestrahlungsplanungssoftware bei der Umwandlung der Daten in ein Oberflächenmodell. Wir erwarten eine absolute Positioniergenauigkeit im Bereich von 1-1,5 mm zu erreichen.

Abb. 2. Visualisierung von Roboter und CT-Daten

Ein erster labormäßiger Test des Systems ist für 2005 geplant.

6 Diskussion

Für die Kommunikation mit den Programmen verschiedener Hersteller für die virtuelle Bestrahlungsplanung beziehungsweise für die 3D-konformale Bestrahlungsplanung muss eine Schnittstelle entwickelt werden, die einen schnellen Datenimport und -export ermöglicht. Eine erste Systemanbindung an die CT-gestützte Softwaresimulation EXOMIO wurde erfolgreich durchgeführt und getestet.

Prinzipiell ist die Anwendung dieser robotergestützten Einzeichnung auch für invasive Eingriffe wie die Biopsie und Markierung von optimalen operativen Zugängen im Sinne einer interdisziplinären Zusammenarbeit mit der Radiologie und Chirurgie möglich.

Literaturverzeichnis

1. Thilmann C et al., The use of a standardized positioning support cushion during daily routine of breast irradiation, *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys* 1998; 41: 459–63
2. Fein D et al. Intra and interfractional reproducibility of tangential breast fields: a prospective on-line portal imaging study, *Int. J. Radiation Oncology Biol. Phys* 1996; 3: 733–40