Prinzipien und derzeitige Möglichkeiten der virtuellen Endoskopie

K.-H. Englmeier[1], M. Siebert[1], R. Brüning[2], J. Scheidler[2], M. Reiser[2]

1: GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Medizinische Informatik und Systemforschung, Ingolstädter Landstr. 1, 85758 Neuherberg
2: Institut für Radiologische Diagnostik der LMU München, Klinikum Großhadern, Marcioninistr. 15, 81377 München
Email englmeier@gsf.de

Zusammenfassung Mit den Begriffen virtuelle Realität und Cyberspace wird heute eine von Computern erzeugte und kontrollierte Umgebung für die Mensch-Maschine-Kommunikation bezeichnet. Wichtigste Grundlage der virtuellen Realität sind dreidimensionale Darstellungen und Interaktionstechniken, die dem Benutzer den Eindruck vermitteln sollen, er befände sich innerhalb des synthetisierten Szenarios. Die virtuelle Realität ist daher in der grafischen Datenverarbeitung verankert und als eine Weiterentwicklung von Visualisierungstechniken und Manipulationsverfahren von geometrischen Informationen mit Hilfe von Gesten und Körperbewegungen anzusehen. In der radiologischen Diagnostik gewinnt die virtuelle Realität einen zunehmenden Stellenwert, weil sie als intuitive Schnittstelle Methoden bereit stellt, die vollkommen neue Zugänge zur visuellen Exploration großer Bilddatenmengen bereit stellt. Vorgestellt wird die Methode der virtuellen Endoskopie, die die Vorgehensweise der Endoskopie und ihre Einblicke in Körperhöhlen simuliert. Sie wird mit Systemen und Beispielen aus VR-Bronchoskopie und VR-Koloskopie erläutert.

Schlüsselwörter: Spiral-CT, virtuelle Realität, 3D-Segmentierung, virtuelle Bronchoskopie, virtuelle Koloskopie, Interaktion, Immersion

1 Einleitung

Mit den Schwerpunkten dreidimensionale Präsentation und Benutzerinteraktion erhält die virtuelle Realität in der radiologischen Diagnostik einen besonderen Stellenwert: denn einerseits existieren in der Radiologie eine Vielzahl von digitalen bildgebenden Verfahren, die die dreidimensionale Anatomie, die Funktion und Durchblutungsverhältnisse von Organen des Menschen als räumliche/zeitliche Bildfolge erfassen und somit nach der Verarbeitung mit Bildanalyseverfahren eine dreidimensionale Repräsentation und Modellierung erlauben. Andererseits ist heute die computergestützte radiologische Diagnostik ein Anwendungsgebiet, das bei der Bearbeitung von Patientendaten eine Vielzahl verschiedener Interaktions- und Manipulationstechniken benötigt. Ein wichtiger Bereich der virtuellen Realität in der radiologischen Diagnostik stellt heute die virtuelle Endoskopie dar, die zur effektiven und

effizienten Bearbeitung von großen Bilddatenmengen aus Elektronenstrahltomographie- und Spiralröntgencomputertomographie geeignet ist, aber auch zur Vorbereitung, interoperativen Unterstützung und Therapiekontrolle verwendet werden kann. Im folgenden sollen zwei dieser Systeme erläutert werden, nämlich die virtuelle Bronchoskopie und Koloskopie.

2 Methode

2.1 Virtuelle Bronchoskopie

Das Bronchuskarzinom (Lungenkrebs) ist weltweit die häufigste krebsbedingte Todesursache [12, 5]. Die starre oder flexible Bronchoskopie, die beim Auftreten typischer Symptome durchgeführt wird [11], ermöglicht die direkte oder videovermittelte Inspektion der Atemwege bis in die Subsegmentebene [7]. Besonders wichtig ist der Einsatz der Bronchoskopie zur Unterscheidung zwischen tumorbedingten Raumforderungen und Stenosen, die durch Intubation, Entzündung oder Verletzung hervorgerufen wurden [11], sowie bei Patienten nach einer Lungentransplantation [6].

Heute eingesetzte Bronchoskopietechniken unterliegen jedoch einigen Beschränkungen: So ist selbst bei Verwendung eines flexiblen Endoskops die Eindringtiefe begrenzt und reicht maximal bis in die Mündung von Bronchien 3ter bis 5ter Ordnung [3, 7]. Hochgradige Stenosen sind nicht oder nur unter erhöhtem Risiko passierbar [14, 4]. Die Invasivität des Verfahrens ist unangenehm für den Patienten [2] und birgt Komplikationsrisiken (u. a. Infektion, Perforation [4, 9, 2, 1]. Während bei der starren Bronchoskopie eine Vollnarkose unbedingt erforderlich ist, ist der Erfolg der flexiblen bronchoskopischen Untersuchung stark von der Kooperationsbereitschaft und -fähigkeit des Patienten sowie der Erfahrung des untersuchenden Arztes abhängig [10, 11].

Aufgrund der genannten Limitationen der Bronchoskopietechnik wird in vielen Fällen als Ergänzung oder Ersatz eine Spiral-CT-Aufnahme der Lunge angefertigt [13, 6, 8]. Die Interpretation und mentale Rekonstruktion des komplexen räumlichen Aufbaus von Bronchien und Lungengefäßen anhand von Schichtbildern gestalten sich jedoch schwierig und fehleranfällig [6]. Die im folgenden vorgestellte virtuelle Bronchoskopie ermöglicht eine Aufbereitung und Präsentation der Tomographiedaten in einer für Internisten und Chirurgen gewohnten, intuitiven Form. Diese erlaubt eine gezielte Operationsvorbereitung einschließlich der Untersuchung des extraluminalen Tumorausdehnung, der Berücksichtigung von Blutgefäßen sowie der Durchführung einer morphometrischen Analyse [2].

Grundlage ist die Spiral-Röntgencomputertomographie die während eines Atemstillstandes aufgenommen wird. Der gewünschte Auflösungsgrad bestimmt dabei die Schichtdicke (3 mm und Tischvorschub 3 mm/sec). Auf der Basis einer volumenorientierten, automatischen Segmentation (Abb. 1a, 1b) des Bronchialbaumes und pathologischer Veränderungen wie raumfordernde Prozesse und Obstruktionen wird ein dreidimensionales Modell erzeugt.

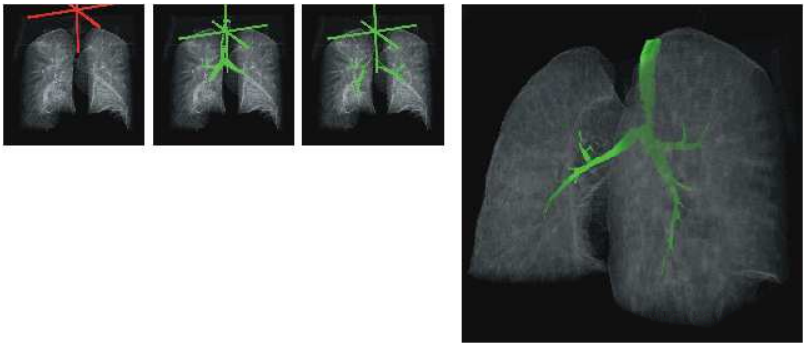

Abb. 1a: Segmentation des Bronchialbaumes mit Volume Growing in der virtuellen Realität

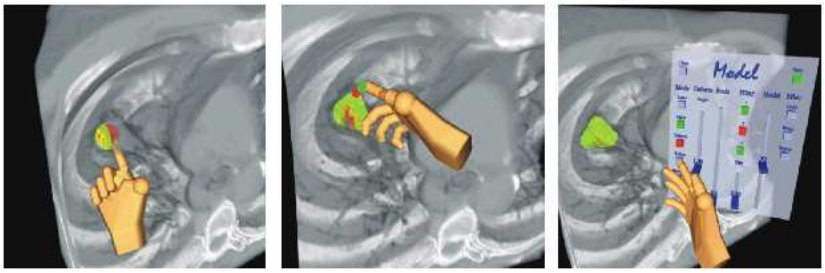

Abb. 1b: Segmentation eines Tumors mit deformierbaren Modellen

Darauf aufbauend wird mit hybriden dreidimensionalen Darstellungsmethoden (oberflächen- und volumenorientiert) die virtuelle Bronchoskopie durchgeführt. Zur Steuerung der virtuellen Bronchoskopie wird die Zentrallinie des Bronchialbaumsystems berechnet. Stereoskopische Darstellungen, die Verwendung von Videogroßprojektion, Datenhelm, Datenhandschuh und Hochleistungsgrafikeinheiten erlauben, die virtuelle Bronchoskopie in Echtzeit durchzuführen. Durch Integration volumenorientierter Darstellungsverfahren in die virtuelle Bronchoskopie (Abb. 2) gelingt nicht nur eine intraluminale Darstellung des Bronchialbaumsystems sondern in suspekten Bereichen, wie etwa Kalibersprünge des darzustellenden Bronchus, kann auf eine volumenorientierte, extra-bronchiale Darstellung zur genaueren Abklärung eines eventuell vorhandenen raumfordernden Prozesses umgeschaltet werden. Zu jeder Zeit kann die Position des Betrachters geändert werden bis hin zu einer Drehung von 180°, was mit in der Realität existierenden Optiken bei der Bronchoskopie nicht möglich ist.

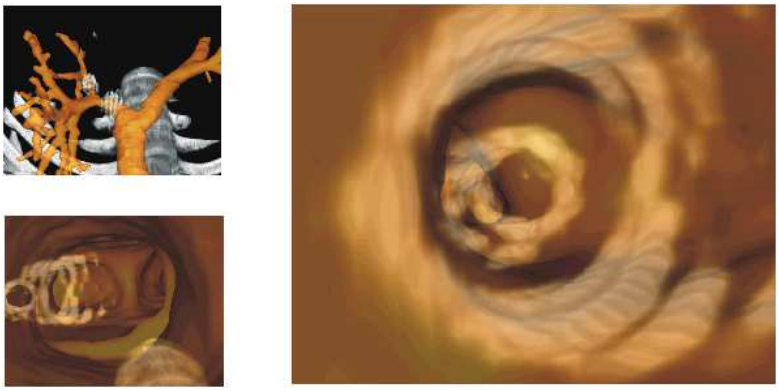

Abb 2: Virtuelle Bronchoskopie mit intra- und extraluminale Darstellung von implantierten Stents

Im Laufe der Entwicklung des Verfahrens wurden bisher 11 Patienten mit Bronchialkarzinomen, 2 Patienten nach Lungentransplantation untersucht. Ein Patient mit Bronchialkarzinom erhielt eine Stent-Implantation. Es gelang die Darstellung der raumfordernden Prozesse, d. h. der Kalibersprünge im Bronchus, der anastomose nach den lungentransplantation sowie die Visualisierung des implantierten Stents. Als vorteilhaft erwies sich die räumliche Wiedergabe peripherer Bronchialbaumabschnitte, die Darstellung extra-bronchialer Abschnitte nach Reformatierung und die Nichtinvasivität des Verfahrens. Bei einer Bearbeitungszeit mit dem Rechner von durchschnittlich 15 min für Bildaufbereitung und die 3D-Modellerstellung kann die virtuelle Bronchoskopie als ein effektives und effizientes Verfahren in der radiologischen Diagnostik eingesetzt werden. Auch als Planungsgrundlage bei Eingriffen in den komplexen Bereichen des zentralen Tracheobronchialsystems scheint ihr Einsatz gerechtfertigt zu sein.

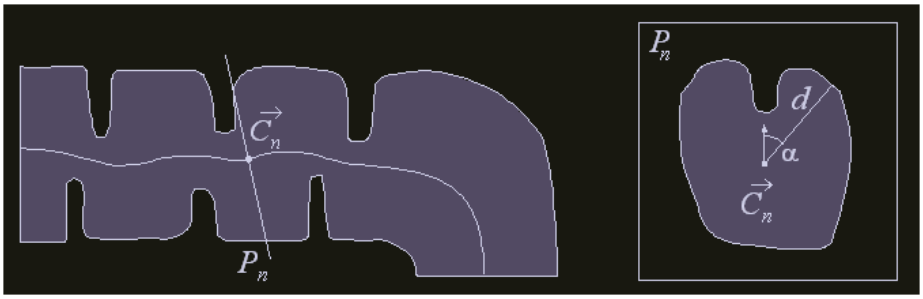

Abb 3: Konstruktion des Darmwandprofils entlang der definierten Zentrallinie mit Hilfe der Polarkoordinatentransformation

2.2 Virtuelle Koloskopie

In den Industriestaaten stellt das Kolonkarzinom die zweithäufigste krebsbedingte Todesursache dar [16, 15]. Der überwiegende Teil der Kolonkarzinome entsteht aus

adenomatösen Polypen, die größer als 10 mm sind. Die frühzeitige Entdeckung der Polypen durch ein verbessertes Screening und deren Entfernung kann das Risiko, am Kolonkarzinom zu sterben, deutlich verringern. Bei einer Darmspiegelung mit einem flexiblen Endoskop werden über 80% der mindestens 5 mm großen Polypen erkannt [17, 18]. Die relativ niedrige Erkennungsrate liegt vor allem daran, dass in 10 bis 15% aller Untersuchungen das Zökum nicht erreicht wird und Polypen hinter oder an Darmfalten möglicherweise nicht sichtbar sind. Ein neues Verfahren zu Untersuchung des Kolons bietet die virtuelle Koloskopie auf der Basis von Elektronenstrahl- oder Mehrzeilendetektor-Tomographie, die nicht nur die Endoskopie simuliert sondern zur visuellen Exploration das Profil der Darmwand darstellt oder als Abstandskarte visualisiert.

Nach Reinigung und Luftfüllung des Darmes stellt sich das Darmlumen mit hohem Kontrast gegenüber der Darmwand und dem umgebenden Gewebe dar [16]. Die Schichtbilder mit 512x512 Bildpunkten weisen eine Pixelgröße von 0,68 bis 1 mm auf. Bei einer Schichtdicke zwischen 1,0 bis 6 mm wurde ein Rekonstruktionsinkrement von 1,0 - 3 mm gewählt. Die Datensätze umfassen bis zu 590 Schichtbilder.

Die Segmentation des Darmlumens kann aufgrund des deutlichen Kontrastes automatisch mit einem Volumenwachstum durchgeführt werden. Dabei wird das Saatvoxel im Rektum platziert und dehnt sich bis zum Zökum aus. Zusätzlich zur Segmentation muss für die virtuelle Koloskopie und für die Berechnung der Abstandskarte eine Zentrallinie des Dickdarms berechnet werden. Dazu wird für jedes segmentierte Voxel des Darmes der Abstand zum Saatvoxel bzw. zur Darmwand berechnet. Diese Zentrallinie kann einerseits für eine automatische Navigation verwendet werden, andererseits dient sie für die Auffaltung des Darmes: dazu werden entlang der Zentrallinie in definierbaren Abständen Ebenen P_n berechnet, die die Zentrallinie senkrecht im Punkt C_n schneiden. Die Schnittkontur der Darmwand mit der jeweiligen Ebene P_n wird in Polarkoordinaten umgerechnet, d. h. durch Winkel α und Abstand d vom Zentralpunkt C_n repräsentiert. Für jeden Winkel wird der minimale Abstand zur Darmwand ausgewählt und gespeichert. Durch diese Vorgehensweise ergibt sich für die Ebene E_n eine eindimensionale Reihe von Werten, die jeden Winkelintervall einen Abstandswert zuordnet. Werden diese Reihen für die Schnittebenen entlang der Zentrallinie zusammen gesetzt, so ergibt sich eine zweidimensionale Abbildung des Darmwandprofils (Abb. 3).

Die Analyse des berechneten Darmwandprofils (Abb. 4) kann dann folgendermaßen vorgenommen werden: Diskontinuitäten in der Grauwertdarstellung des Darmprofils werden als Abstandsänderung der Darmwand interpretiert. Eine abrupte Abnahme des Grauwertes ist als eine lokale Erhebung in der Darmwand zu deuten, die eine Form für eine Darmfalte untypisch ist. Bei der simulierten Koloskopie wird die Struktur deutlich sichtbar, bei der es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um einen Polypen handelt.

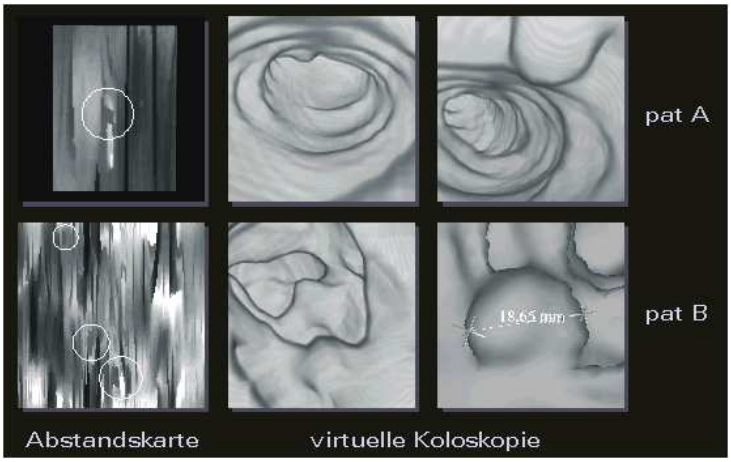

Abb. 4: Darmwandprofile und VR-Koloskopie an der korrespondierenden Lokalisation für zwei Patienten

3 Schluss

Virtuelle Realität definiert heute eine neue Form der Mensch-Maschine-Kommunikation, die es ermöglicht, den Menschen unmittelbar in eine künstliche, computergenerierte Umgebung zu integrieren.
Diese Technik Mensch-Maschine-Kommunikation gewinnt gerade in der medizinischen Bildgebung und ihrer Anwendung in der radiologischen Diagnostik besondere Bedeutung. Spiral-CT, Mehrzeilen-CT, Funktions-Untersuchungen mit der Kernspintomographie erzeugen heute Datenvolumina, die mit der klassischen Methode der Schnittbildpräsentation nicht mehr oder nur sehr zeitaufwendig zu befunden sind. Daher wurde hier ein VR-System für die Medizin entwickelt, das neue Untersuchungstechniken der virtuellen Bronchoskopie und Koloskopie integriert. Die Aufbereitung und Präsentation der Tomographiedaten erfolgt dabei in einer problemorientierten, für Internisten und Chirurgen gewohnten Form. Die realitätsnahe Simulation der endoskopischen Untersuchung ermöglicht die gezielte Diagnoseunterstützung und Operationsvorbereitung und macht Formveränderungen des segmentierten Tracheobronchialsystems bzw. des Darmlumens deutlich sichtbar. Das hybride Darstellungstechniken kann dabei das umgebende extraluminale Gewebe visualisiert und analysiert werden. Zusätzlich unterstützt die virtuelle Koloskopie durch eine Projektion des Darmwandprofils ein schnelles Auffinden von Strukturen, bei denen es sich möglicherweise um Polypen oder Tumoren handelt, wodurch sich das Verfahren möglicherweise in der Zukunft als Screeningmethode anbieten wird.

4 Literatur

1. Blezek DJ und Robb RA: Evaluating virtual endoscopy for clinical use. Journal of Digital Imaging, 10(3=: 51-55, August 1997
2. Blezek DJ, Robb RA und Prather CM: Virtual endoscopy vs. real endoscopy: A comparative evaluation. In: Kim Y (Herausgeber): Medical Imaging 1997: Image Display, Proceedings of SPIE, 542-552, Februar 1997
3. Dessl A, Giacomuzzi SM, Springer P, Stoeger A, Potoschnig C, Völklein C, Schreder SG und Jaschke W: Virtuelle Endoskopie mittels Postprocessing helikaler CT-Datensätze. Akt. Radiol., 7: 216-221, 1997
4. Fleiter T, Merkle EM, Aschoff AJ, Lang G, Stein M, Görich J, Liewald F, Rillinger N und Sokiranski R: Comparison of real-time virtual and fiberoptic bronchoscopy in patients with bronchial carcinoma: Opportunities and limitaions. American Journal of Roentgenology, 169: 1591-1595, Dezember 1997
5. Grundmann E: Einführung in die Allgemeine Pathologie. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, New York, 1992
6. Naidich DP, Gruden JF, McGuiness G, McCauley DI and Bhalla M: Volumetric (helical/spiral) CT (VCT) of the airways. Journal of Thoracic Imaging, 12: 11-28, 1997
7. Naidich DP and Harkin TJ: Airways and lung: Correlation of CT with fiberoptic bronchoscopy. Radiology, 197: 1-12, 1995
8. Prokop M, Schaefer-Prokop C und Galanski M: Spiral-CT der Lunge. Radiologie, 36: 457-469, 1996
9. Pue CA und Pacht ER: Complications of fiberoptic bronchoscopy at a university hospital. Chest, 107: 430-432, 1995
10. Rodenwaldt J, Kopka L, Roedel R und Grabbe E: Dreidimensionale Oberflächendarstellung des Larynx und der Trachea mittels Spiral-CT: Virtuelle Endoskopie. Fortschr. Röntgenstr., 165(1): 80-83, 1996
11. Rodenwaldt J, Kopka L, Roedel R, Margas A und Grabbe E: 3D virtual endoscopy of the upper airway: Optimization of the scan parameters in a cadaver phantom and clinical assessment. Journal of Computer Assisted Tomography, 21(3): 405-411, 1997
12. Stitik FP: The new staging of lung cancer. Advances in Chest Radiology, 32(4): 635-647, Juli 1994
13. Touliopoulos P und Costello P: Helical (spiral) CT of the thorax. Helical (spiral) computed tomography, 33(5): 843-861, September 1995
14. Vining DJ, Liu K, Choplin RH und Haponik EF: Virtual bronchoscopy. CHEST, 109(2): 549-553, Februar 1996
15. Hara AK, Johnson D, Reed JE, Ahlquist DA, Nielson H, Ehman RL, McCollough CH und Ulstrup DM: Detection of colorectal polyps by computed tomographic colography: Feasibility of a novel techniques. Gastroenterology, 110: 284-290, 1996
16. Hara AK, Johnson D, Reed JE, Ehman RL, Ulstrup DM: Colorectal polyp detection with CT colography: Two- versus three-dimensional techniques. Radiology, 200: 49-54, 1996
17. Hong L, Muraki S, Kaufman A, Bartz D und He T: Virtual voyage: Interactive navigation in the human colon. In: Computer Graphics (SIGGRAPH '97 Proceedings), 27-34, August 1997
18. Fenlon HM und Ferrucci JT: Virtual colonoscopy. American Journal of Roentgenology, 169: 453-458, August 1997