Segmentierung und Volumetrie von Tumorentitäten mit CT-Datensätzen

Christoph Räth, Wolfram Bunk, Britta Schulte*, Natalie Sorger*, Carl Ganter*, Hermann Helmberger* Alexander Horsch**, Paul Gerhardt* und Gregor Morfill

Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik
Giessenbachstraße, 85740 Garching
*Institut für Röntgendiagnostik der TU München
Ismaninger Straße 22, 81675 München
**Institut für Med. Statistik und Epidemiologie
Ismaninger Straße 22, 81675 München
E–mail: cwr@mpe.mpg.de

Zusammenfassung. Die Tumorvolumetrie ist für die Onkologie von großer Bedeutung. Sie dient insbesondere der exakten Bestimmung des Ausgangswertes bei geplanter neoadjuvanter Therapie. Hiermit wird die Kontrolle der Therapie gewährleistet, so daß entsprechend der Ansprechrate der Behandlungsplan beibehalten oder geändert werden kann.
In diesem Beitrag wird ein Volumetrieverfahren vorgestellt, das es erlaubt, in wenigen Minuten das exakte Volumen einer Tumorentität zu bestimmen. Zur Segmentierung werden Konzepte der Wasserscheidentransformation als auch nichtlineare Filtermethoden verwendet. Die Methodik wurde an Phantommessungen und durch Vergleich mit dem Goldstandard getestet.
Die entwickelten Verfahren wurden auf einem PC mit einer graphischen Benutzerschnittstelle implementiert. Ein erster Prototyp befindet sich in der klinischen Evaluierung.

Schlüsselwörter: Bildsegmentierung, Volumetrie, Computertomographie, Onkologie, Therapieverlaufskontrolle

1 Medizinische Problemstellung

Aus Sicht des onkologischen Therapeuten ist eine exakte, gut reproduzierbare und breit anwendbare volumetrische Erfassung von Tumormanifestationen von großer Bedeutung. So ist die Tumorausdehnung bei malignen Erkrankungen von prognostischer und therapeutischer Konsequenz. Vor allem aber ist die exakte Überprüfung des therapeutischen Ansprechens auf eine systematische Chemotherapie ein entscheidender Parameter für Therapieentscheidungen wie Therapiedauer oder Wechsel des Therapiekonzeptes.
Hierbei wird der Erfolg der durchgeführten Therapie sowie die Entscheidung über eine eventuelle Umstellung des Therapieschemas anhand der Änderung des Gesamttumorvolumens beurteilt. In diesem Kontext fällt der bildgebenden Diagnostik die Aufgabe zu, sowohl den Ausgangsbefund metrisch exakt zu dokumentieren, als auch Veränderungen unter Therapie in Verlaufskontrollen möglichst

exakt zu erfassen [1, 2].Bisherige Methode zur Volumenbestimmung erstrecken sich auf grobe planimetrische Abschätzungen oder sie erfordern zeitintensive Interaktionen (bis zu $1,5$ Stunden) durch den Benutzer. Mit geeigneten Bildverarbeitungsverfahren soll eine schnelle, exakte und reproduzierbare Volumenbestimmung von Tumormanifestationen weitgehend automatisch realisiert werden, so daß die Tumorvolumetrie für die klinische Routine erschlossen werden kann.

2 Material

Um die Untersuchungsgenauigkeit sowie die Reproduzierbarkeit der verwendeten Verfahren zu beurteilen, wurden zahlreiche Untersuchungen an einem organischen Phantom durchgeführt. Eine isolierte Rinderleber wurde hierbei als realistische Simulation der menschlichen Leber gewählt. Tumorgewebe in der Leber wurde durch verschiedene Arten von Implantaten (gefüllte Tischtennisbälle, andere Fleischentitäten) simuliert. Das Volumen der Implantate wurde mittels Ausmessung oder Wasserverdrängungsmethode bestimmt. An diesem Phantom wurden CT-Messungen durchgeführt und die Datensätze volumetrisch ausgewertet.
Aus der klinischen Routine wurden vollständige Sätze von CT-Schnittbildern für Lebertumore, Magentumore, Bronchialkarzinome sowie Lymphomen bereitgestellt. Jeder Datensatz umfaßt zwischen 10 und 90 Schnittbilder der Größe 512×512 Pixel.
Für die Lebertumore wurde durch zeitaufwendige manuvisuelle Inspektion der Schnittbilder von einem erfahrenen Radiologen ein Goldstandard definiert, mit dem die Segmentierungsergebnisse für diese Tumorentität verglichen wurden.

3 Methoden der Bildbearbeitung

Die Auswertung der CT-Daten mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung untergliedert sich in drei Verarbeitungsschritte, die im folgenden beschrieben werden.

3.1 Vorsegmentierung

In diesem ersten Bildbearbeitungsschritt wird manuell ein Teilvolumen des vollständigen Datensatzes, das das tumoröse Gebiet enthält, ausgewählt. Dadurch werden der Speicherplatz- und Rechenzeitbedarf für die nachfolgende Bearbeitung der Volumendaten erheblich verringert.

3.2 Segmentierung

Der Segmentierungsalgorithmus kombiniert Elemente des Bereichswachstums- und des Wasserscheiden-Verfahrens [3]. Dabei erfolgt die Bestimmung der für die Anwendung des Wasserscheiden-Verfahrens notwendigen Grauwertgradienten mit Hilfe nichtlinearer Filtermethoden [4] (Skalierungsvektormethode) in

einem vierdimensionalen künstlichen Darstellungsraum, der durch die drei Ortskoordinaten und den Grauwert der Voxel aufgespannt wird. Diese Verfahren der Bildanalyse erlauben es, auch sehr kleine Grauwertschwankungen bzgl. aller drei Raumrichtungen quantitativ zu erfassen.
In dem entwickelten Verfahren zur 3D-Bildsegmentierung wird ein "Bildsegment" als eine zusammenhängende, homogene Region definiert. Diese ist entweder von inhomogenen Bereichen (Kanten) oder von anderen Segmenten mit anderen mittleren Grauwerten umgeben. Um das betrachtete Volumen in seine Segmente einzuteilen, beginnt somit das Wachstum bei Voxeln mit kleinen Dichtegradienten und erstreckt sich dann auf die Kantenregionen mit hohen Gradienten. Die Zuordnung von Voxeln zu Segmenten während des Bereichswachstumsprozesses wird durch ein Voxel-Segment-Homogenitätskriterium gesteuert: Grenzt ein Voxel an ein schon definiertes Bildsegment und weicht sein Grauwert nur um einen vorgegebenen Betrag von dem des Ausgangsvoxels des Segments ab, so wird dieses Voxel dem Segment zugeordnet. Andernfalls bildet es den Ausgangspunkt eines neuen Bildsegments.
Zur Vermeidung von Übersegmentierung werden benachbarte Segmente, die einer Segment-Segment-Homogenitätsbedingung genügen, d.h. deren mittlere Grauwerte sich nur um einen vorgegebenen Betrag voneinander unterscheiden, miteinander verschmolzen.

3.3 Nachbearbeitung und Volumetrie

Auf der Basis des Segmentierungsergebnisses wählt der Benutzer Gebiete, die er als Tumor oder Metastase identifiziert, durch das Setzen von Saatpunkten aus. Durch das sich anschließende Bereichswachtumsverfahren wird das tumoröse Gebiet segmentiert. Ist ein Tumor nicht von dem ihn umgebenden Gewebe abgrenzbar (Dies ist gerade bei Magenkarzinomen häufig der Fall.), so ist eine abschließende manuelle Nachbearbeitung des Segmentierungsergebnisses möglich.
Die Bestimmung des Tumorvolumens erfolgt durch Auszählen der segmentierten Voxel und Multipklikation der Voxelanzahl mit dem Einheitsvolumen eines Voxels.

4 Implementierung

Ein Prototyp für einen PC wurde unter Verwendung der Visualisierungsoftware IDL im klinischen Umfeld implementiert. Die einzelnen Bildverarbeitungskomponenten sind in einer Benutzerumgebung eingebettet, die dem Radiologen ein leichtes Arbeiten mit der Bildverarbeitungssoftware ermöglicht.

5 Ergebnisse und Diskussion

Bei den Phantommessungen konnten die Volumina der Implantate durch Auswertung der CT-Daten mit dem Segmentierungsverfahren mit einer Genauigkeit von ein bis drei Prozent reproduziert werden (siehe Abb. 1).

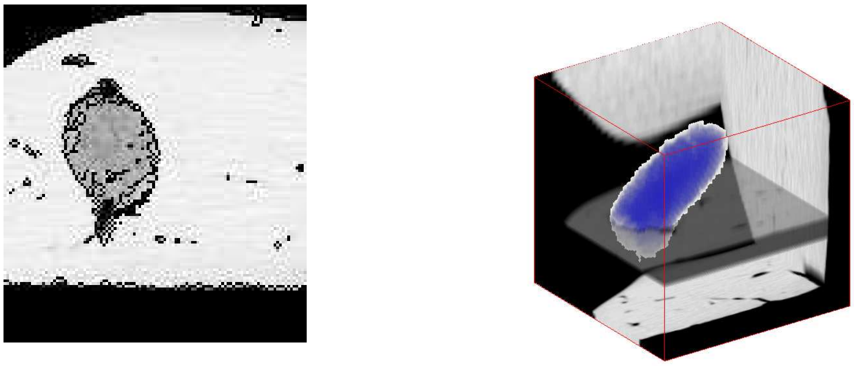

Abb. 1. Links: Schnittbild des Rinderleberphantoms mit implantierten Fremdgewebe. Die schwarze Linie markiert die Segmentgrenzen. Rechts: 3D-Rekonstruktion des segmentierten Implantats. Das rekonstruierte Volumen beträgt $18,4$ ml. Für das Implantat wurden $18,1$ ml gemessen.

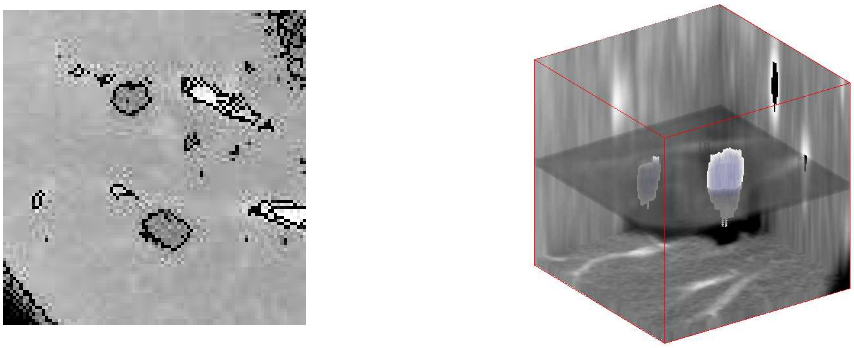

Abb. 2. Links: Schnittbild einer Leber mit tumorösen Gebieten. Die schwarzen Linien markieren die Segmentgrenzen. Rechts: 3D-Rekonstruktion des segmentierten Tumors. Das rekonstruierte Volumen beträgt $0,75$ ml. Von einem Radiologen wurden $0,77$ ml für das Tumorvolumen bestimmt.

Die Bearbeitungszeit (einschließlich der Rechenzeit für die Segmentierung) beträgt hierbei wenige Minuten.
Eine weitere Evaluierung der Methode fand durch die Gegenüberstellung der Segmentierungsergebnisse mit dem Goldstandard, d.h. mit den handsegmentierten Ergebnissen eines erfahrenen Radiologen statt. Im Falle von Lebertumoren wurde eine Genauigkeit von drei Prozent erzielt (siehe Abb. 2). In diesem Falle beträgt die Bearbeitungszeit ebenfalls nur wenige Minuten.
Derzeit wird das Segmentierungsmodell zur volumetrischen Analyse von Magenkarzinomen im Verlaufe einer Chemotherapie im Rahmen einer klinischen Studie mit mehr als 40 Patienten eingesetzt. Ebenso wird das Segmentierungsmodell auf die Erkennung von Bronchialkarzinomen sowie malignen Lymphomen ausgeweitet.

Literatur

1. Helmberger H, Bautz W, Fink U, Vogel U, Lenz M, Kersting-Sommerhoff B, Gerhardt P: Spiral CT arteriography via hepatic port catheder: a technique for monitoring of liver metastases? In: Tan L (ed.) ICR 94 Singapore: Handbook, Continental Press, Singapore, 104, 1994.
2. Helmberger H, Bautz W, Sendler A, Fink U, Gerhardt P: Volumetrie abdomineller Tumoren: Problemstellung - Lösungsansätze. Radiologie, 35, 587–591, 1995.
3. Vincent L, Soille P: Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 13 (6): 583–598, 1991.
4. Räth C, Morfill G: Texture detection and texture discrimination with anisotropic scaling indices. Jour. Opt. Soc. Am. A, 14: 3208–3215, 1997.