Interaktive Bildsegmentierung von CT- und MR-Daten auf Basis einer modifizierten hierarchischen Wasserscheidentransformation

Thomas Schindewolf und Heinz-Otto Peitgen

MeVis – Centrum für Medizinische Diagnosesysteme
und Visualisierung an der Universität Bremen
Universitätsallee 29, D-28359 Bremen
Email: schindewolf@mevis.de

Zusammenfassung. Die Segmentierung in medizinischen Aufnahmen ist ein fundamentaler Arbeitsschritt in der digitalen Bildverarbeitung. Die Segmentierung ist die Voraussetzung für zahlreiche Visualisierungsarten und für weitergehende quantitative Analysen, wie planimetrische Vermessungen und Volumetrie. In diesem Beitrag wird ein Segmentierungsverfahren vorgestellt, das auf den Konzepten der Wasserscheidentransformation beruht und diese um neue Mechanismen zur interaktiven Bildsegmentierung erweitert. Von zentraler Bedeutung sind dabei der Verzicht auf ein Gradientenbild und das automatische Analysieren von interaktiv gesetzten Markern im Bild für ein korrektes Segmentierungsergebnis. Das so entwickelte Bildverarbeitungswerkzeug wird bereits erfolgreich in verschiedenen klinischen Anwendungen eingesetzt.

Schlüsselwörter: Algorithmen, Segmentierung, Wasserscheidentransformation, Watershed

1 Einleitung

Die Bildsegmentierung von Objekten, z. B. von Organen und Läsionen, in medizinischen CT- oder MR-Aufnahmen ist ein fundamentaler Verarbeitungsschritt in der digitalen Bildverarbeitung. Die Segmentierung ist die Voraussetzung für zahlreiche Visualisierungsarten und für weitergehende quantitative Analysen, wie planimetrische Vermessungen und Volumetrie.

Während in der klinischen Routine zur Zeit Segmentierungen hauptsächlich manuell oder mit einfachen Schwellenwertverfahren erfolgen, sind andere Verfahren aktueller Forschungsgegenstand in der digitalen Bildverarbeitung. Bei den kantenbasierten Verfahren sind Live-Wire und Snakes zu nennen. Aber auch regionenbasierte Verfahren wie die Wasserscheidentransformation werden erfolgreich in der medizinischen Bildverarbeitung eingesetzt.

In diesem Beitrag wird ein Segmentierungsverfahren vorgestellt, das auf den Konzepten der Wasserscheidentransformation beruht und diese um neue Mechanismen zur interaktiven Bildsegmentierung erweitert. Das so entwickelte Bildverarbeitungswerkzeug wird bereits erfolgreich in mehreren klinischen Anwendungen eingesetzt.

2 Methoden

Die klassische Wasserscheidentransformation wird bei zahlreichen Segmentierungsproblemen zur Vorverarbeitung verwendet. Für die vollständige Segmentierung der Bilddaten erweist sich die Wasserscheidentransformation jedoch aufgrund ihrer bekannten Nachteile, wie beispielsweise der Übersegmentierung, oft als ungeeignet.

Die hier vorgeschlagenen Erweiterungen zur Wasserscheidentransformation ermöglichen den Aufbau eines robusten, vielseitigen und eigenständigen Segmentierungsverfahrens.

2.1 Die klassische Wasserscheidentransformation auf Pixelebene

Der Grundgedanke der klassischen Wasserscheidentransformation - wie bei Vicent und Soille beschrieben [1] - besteht darin, daß die Grauwert-Intensitätsunterschiede zwischen benachbarten Bildpunkten klein sind, solange diese zu demselben Objekt gehören. Große Gradienten sind dagegen ein Indiz für eine Objektgrenze. Bei der klassischen 2D-Wasserscheidentransformation werden daher zuerst die Gradientenbeträge im Bild berechnet. Auf dem Gradientenbild werden alle weiteren Operationen ausgeführt. Ausgehend von den lokalen Minima im Gradientenbild werden mit einem Flutungsverfahren Einzugsgebiete der Gradientenminima ermittelt. Diese Vorgehensweise wird oft in einem Gedankenexperiment mit einem topografischen Relief verglichen, das ausgehend von den lokalen Minima mit Wasser geflutet wird. An Stellen, an denen bereits existierende Wasserflächen zusammenstoßen, werden gedanklich Dämme errichtet, die die Einflußgebiete der Minima voneinander abgrenzen.

Als Ergebnis dieses Flutungsprozesses entsteht eine Aufteilung des Bildes in Einflußzonen. Innerhalb dieser Zonen sind die Gradienten zu benachbarten Bildpunkten relativ niedrig. Größere Gradienten befinden sich an den Grenzlinien zwischen zwei Zonen. Allerdings führt dieser Ansatz zu einer Übersegmentierung des Bildes. Um das Ergebnis der bisherigen Transformation für eine Segmentierung nutzen zu können, müssen sich weitere Verarbeitungsschritte anschließen.

2.2 Die hierarchische Wasserscheidentransformation auf Graphebene

Eine Möglichkeit, die auftretende Übersegmentierung zu kontrollieren, besteht in der iterativen Anwendung einer Wasserscheidentransformation. Zentrale Voraussetzung bei der klassischen 2D-Wasserscheidentransformation ist die Existenz eines Gradientenbildes. Um die Transformation iterativ anwenden zu können, werden folgende Erweiterungen vorgeschlagen [2]:

Aus dem Ergebnis der Transformation im ersten Verarbeitungsschritt auf Pixelebene wird eine Graphstruktur erzeugt. Jede Einflußzone hat dabei einen korrespondierenden Knoten. Kanten in dem Graphen spiegeln die Nachbarschaftsbeziehungen der Einflußzonen wieder. Als Attribut erhält jeder Knoten den mittleren Grauwert der Einflußzone im Ursprungsbild.

Dementsprechend läßt sich der Basisalgorithmus der Wasserscheidentransformation modifizieren und übertragen. An die Stelle der Gradienten treten die Grauwertdifferenzen benachbarter Knoten, der Flutungsprozeß findet analog auf Graphebene statt. Der Flutungsprozeß startet bei den Knoten mit geringster Differenz zu einem Nachbarknoten. So kann die Graphstruktur analog in zusammenhängende Einflußgebiete

aufgeteilt werden. Knoten werden zu Gruppen zusammengefaßt. Innerhalb dieser Gruppen sind die Differenzen zu Nachbarknoten gering. Zwischen den Gruppen gibt es höhere Differenzen bezüglich des Attributs "mittlerer Grauwert".

Um das Verfahren iterieren zu können, wird schrittweise ein neuer Graph mit weniger Knoten aufgebaut, der die Nachbarschaftsbeziehungen und die mittleren Grauwerte der Einzugsgebiete auf dem Ursprungsbild korrekt wiedergibt. So entsteht in dem iterativen Prozeß eine Datenpyramide. Die Iteration terminiert, wenn ein Graph mit nur einem Knoten entstanden ist, der den mittleren Grauwert des Ursprungsbildes als Attribut trägt. Eine Darstellung der einzelnen Iterationsergebnisse zeigt Abb. 1.

Nachfolgend werden die wichtigsten Erweiterungen der modifizierten hierarchischen Wasserscheidentransformation vorgestellt, die zu einem eigenständigen und vielseitig einsetzbaren Segmentierungsverfahren führen.

2.3 Transformation ohne Gradientenbild

Die klassische Wasserscheidentransformation arbeitet auf Pixelebene mit einem vom Originalbild abgeleiteten Grauwertbild, in dem Gradientenbeträge abgelegt sind, dem sogenannten Gradientenbild. Ein mit Standardoperatoren berechnetes Gradientenbild - z. B. durch einen Sobel- oder Laplaceoperator mit nachfolgender Absolutwertbildung - hat jedoch entscheidende Nachteile: Die pixelgenaue Lokalisation einer Objektgrenze im Bild ist nach diesem Schritt nicht mehr möglich.

Bei der Umsetzung des hier beschriebenen Verfahrens auf Graphebene wird mit Differenzen zwischen den verschiedenen Einflußgebieten gearbeitet. Dies motiviert die Überlegung, das Gradientenbild auf Pixelebene ebenfalls durch Pixeldifferenzen zu ersetzen: Für jedes Pixel des originalen Grauwertbildes wird zu jedem direkten Nachbarn der Betrag der Grauwertdifferenz berechnet. Unter den berechneten Differenzen wird das Minimum ermittelt und anstelle des üblicherweise verwendeten Gradientenbetrages betrachtet. So läßt sich ebenfalls ein Bild in Originalgröße erzeugen, das die Funktion des üblicherweise verwendeten Gradientenbildes besser erfüllen kann. Dunkle Bereiche in diesem Bild repräsentieren Pixel, bei denen zumindest zu einem direkten Nachbarn eine geringe Grauwertdifferenz besteht. Solche Pixel müssen in dem Verschmelzungsprozeß zuerst zusammengelegt werden. Der Algorithmus zur Wasserscheidentransformation auf Pixelebene wurde entsprechend so modifiziert, daß er mit dem eben definierten Differenzenbild eine pixelgenaue, korrekte Zerlegung des Originalbildes in Einflußgebiete ermöglicht.

2.4 Erweiterung auf 3D-Datensätze

Eine Erweiterung des Verfahrens auf dreidimensionale Datensätze ist leicht möglich. An die Stelle der 4-Nachbarschaft auf Pixelebene tritt die 6-Nachbarschaft zwischen Voxeln. Differenz- und Minimumermittlung sind übertragbar. Die Transformation auf Graphebene wird nicht beeinflußt.

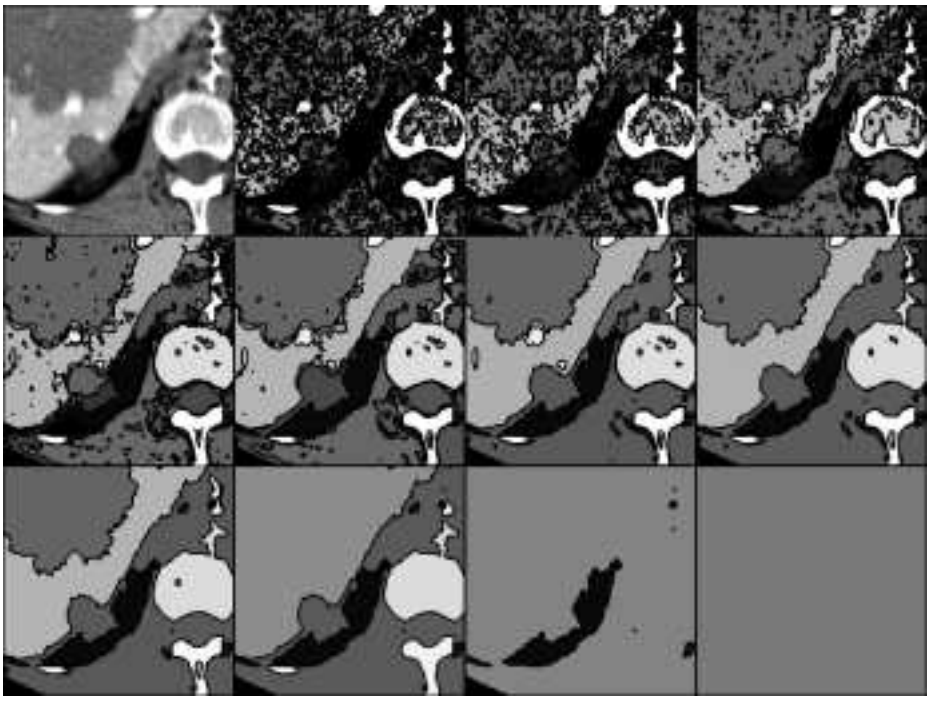

Abb. 1: Das erste Bild zeigt einen Ausschnitt einer Leber-CT mit einer Läsion in der linken oberen Ecke. Die nachfolgenden Aufnahmen zeigen von links nach rechts und von oben nach unten das Verschmelzen benachbarter Gebiete. Innerhalb der Hierarchiestufen der hier beschriebenen modifizierten Wasserscheidentransformation tritt die Läsion als separierbares Objekt auf (Bild links unten) und läßt sich somit mit nur einem Include- und einem Exclude-Point segmentieren.

2.5 Interaktionsmechanismen mit Markern

Um sinnvolle Segmentierungen zu bestimmen, wird ein halbautomatisches Verfahren vorgeschlagen. Dazu werden im Bild zwei verschiedene Arten von Markierungen gesetzt: Markierungen, die in zum Objekt gehörenden Bildbereichen liegen - sogenannte Include-Points -, und Markierungen, die den Objekthintergrund identifizieren - die Exclude-Points.

Aufgrund der in einem Bild gesetzten Marker wird die Datenpyramide analysiert und solche Bildbereiche identifiziert, die zu einer widerspruchsfreien Aufteilung des Bildes in Regionen führen, die nur Include- oder Exclude-Points beinhalten. Die Regionen um die Include-Points sollen dabei maximal groß sein.

3 Implementierung und Anwendung

Das hier vorgestellte Segmentierungsverfahren wurde in C++ für die Bildverarbeitungsplattform ImgLab von MeVis entwickelt. Es repräsentiert ein Softwaremodul,

das mit anderen Bildverarbeitungsoperatoren unter einer graphischen Benutzungsoberfläche zu komplexen Bildverarbeitungsnetzwerken verbunden werden kann [3].

Der Vorgang der Segmentierung läuft in einer Anwendung wie folgt ab: Die Bildtransformation wird zu Beginn der Verarbeitung einmal angestoßen und liegt danach für alle Segmentierungsvorgänge vor. In einer Schichtdarstellung des Originaldatensatzes lassen sich z. B mit der Computermaus einzelne Punkte markieren. Die Art der Markierung (Include oder Exclude) wird bei jeder Markierung durch den Benutzer bestimmt. Das Ergebnis der Segmentierung unter Berücksichtigung aller bisher gesetzten Marker wird sofort angezeigt.

4 Ergebnisse und Diskussion

Das hier vorgestellte Segmentierungsverfahren erlaubt die interaktiv gesteuerte Anwendung der Wasserscheidentransformation auf 2D- und 3D-Bilddaten. Es wurde bei verschiedenen Projekten in der medizinischen Bildanalyse eingesetzt, wie der Segmentierung und Volumetrie der Hirnventrikel, der Tumorvolumetrie und der Segmentierung des Leberparenchyms [4,5]. Es ist Bestandteil von HepaVision – einem Bildverarbeitungssystem zur präoperativen Planung in der Leberchirurgie [6]. Dieses System wurde mehrfach national und international ausgezeichnet.

5 Literatur

1. Vincent L, Soille P: Watersheds in Digital Spaces: An Efficient Algorithm Based on Immersion Simulations. IEEE Trans Patt Anal Machine Intell 13: 583-598, 1991.
2. Wegner S, Stalling D, Hege HC, Oswald H, Fleck E: Die 3D-Wasserscheidentransformation auf Graphebene - eine Anwendung für die Hyperthermieplanung. In: Arnolds B, Müller H, Saupe D und Tolxdorff T (Eds.). Digitale Bildverarbeitung in der Medizin. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, 1997, pp. 31-36.
3. Schenk A, Breitenborn J, Selle D, Schindewolf T, Böhm D, Spindler W, Jürgens H, Peitgen H-O: IlabMed-Workstation - Eine Entwicklungsumgebung für radiologische Anwendungen. In: Evers H, Glombitza G, Lehmann T und Meinzer H-P (Eds.). Bildverarbeitung für die Medizin 1999. Springer, Berlin, 1999, pp. 238-242.
4. Schindewolf T, Frese U, Meissner J: Segmentierung und Volumetrie der Hirnventrikel mit MRT-Datensätzen. In: Evers H, Glombitza G, Lehmann T und Meinzer H-P (Eds.). Bildverarbeitung für die Medizin 1999. Springer, Berlin, 1999, pp. 92-96.
5. Oldhafer KJ, Högemann D, Stamm G, Raab R, Peitgen H-O, Galanski M: 3-D Visualisierung der Leber zur Planung erweiterter Leberresektionen. Chirurg 70: 233-238, 1999.
6. Selle D, Schindewolf T, Evertsz CJG, Peitgen H-O: Quantitative Analysis of CT Liver Images. In: Doi K, MacMahon H, Giger ML und Hoffman KR (Eds.). Computer-Aided Diagnosis in Medical Imaging. Proceedings of the First International Workshop on Computer-Aided Diagnosis, Chicago, 20-23 September 1998. Elsevier, Amsterdam, 1999, pp. 435-444.