

Ein regionenbasiertes morphologisches Multiskalenverfahren zur Segmentierung medizinischer Bilder

Christian Thies, Volker Metzler, Thomas Lehmann*, Til Aach

Institut für Signalverarbeitung und Prozeßrechentechnik
Medizinische Universität zu Lübeck, 23538 Lübeck

*Institut für Medizinische Informatik, RWTH Aachen, 52057Aachen
{thies|metzler}@isip.mu-luebeck.de

Zusammenfassung. Die Komplexität biomedizinischen Bildmaterials und die darin oftmals schlecht dargestellten Konturen erschweren die Segmentierung relevanter Bildregionen. Deshalb betrachtet der Multiskalenansatz die Bilder in verschiedenen Skalen (Auflösungsstufen). Die morphologische Partitionierung ermöglicht hierbei die größenselektive Dekomposition des Bildes anhand form- und intensitätsspezifischer Kriterien. Die lokale Information feiner Skalen wird dann zur Segmentierung kleiner Objekte genutzt, während grobe Skalen die globale Information zur Extraktion großer Objekte bereitstellen. Dieser Beitrag beschreibt die unüberwachte Segmentierung mittels eines form- und positionstabilen morphologischen Skalenraums, der die Einschränkungen des linearen Skalenraumes, wie Kantenverwischung und -verschiebung, kompensiert und zu verbesserten Ergebnissen führt.

1 Einleitung

Der Multiskalenansatz zur Bildsegmentierung geht davon aus, daß komplexe Bilder in einer Auflösung nicht adäquat segmentiert werden können, da jedes Objekt einen individuellen optimalen Skalenbereich zur Detektion besitzt. Dieser Ansatz, der in der menschlichen Perzeption sein Vorbild findet, basiert auf der Erzeugung eines Skalenraums durch die sukzessive Anwendung detailreduzierender —meist linearer— Filter [1], so daß feine Skalen noch Details enthalten, während grobe Skalen homogene Regionen beschreiben. Die Segmentierung erfolgt dann anhand der Analyse des Skalenverhaltens geeigneter bildbeschreibender Merkmale, die dazu ein reproduzierbares monotonen Verhalten über die Skalen aufweisen müssen.

Da kein lineares Filter existiert, daß diese Kausalität für Bilder sicherstellt [2], wird hier ein morphologischer Skalenraum vorgeschlagen, der aufgrund der formhaltenden Eigenschaften rekonstruktiver Filter die Kausalität der Bildextrema garantiert [3]. Da sich die Extrema im Skalenraum ortsinvariant verhalten, repräsentieren die zugehörigen Wendestellen kausale Regionen mit ortsstabilen Konturen. Das Skalenverhalten dieser Merkmale wird durch geeignete statistische und morphologische Attribute ermittelt und zur Segmentierung ausgenutzt. Dabei kann vorausgesetzt werden, daß Merkmale, die über große Skalenbereiche stabile Attribute aufweisen, signifikante Bildregionen repräsentieren.

2 Morphologische Skalenraumfilterung

Die Multiskalen-Segmentierung lässt sich in drei Arbeitsschritte einteilen: (i) Aufbau der Skalen durch ein detailreduzierendes Filter, (ii) Extraktion kausaler Merkmale aus den Skalen und schließlich (iii) die Segmentierung aufgrund der Analyse des Skalenverhaltens der Merkmale.

Aufbau der dualen Teilräume. Die Detailreduktion wird mit morphologischen Rekonstruktionsfiltern durch die sukzessive Vergrößerung der Templates erreicht. Die Erosion und anschließende bedingte Dilatation bis zur Idempotenz entspricht dem rekonstruktiven Opening (\mathcal{RO}) mit dem rekonstruktiven Closing (\mathcal{RC}) als dualem Filter [4]. Aufgrund dieser Dualität morphologischer Filter erhält man zwei duale Teilräume [5], wobei im \mathcal{RO} -Teilraum helle Strukturen und im \mathcal{RC} -Teilraum dunkle Strukturen ortstabil manipuliert werden (Abb. 1). Daraus resultiert die Kausalität der regionalen Maxima/Minima bezüglich des $\mathcal{RO}/\mathcal{RC}$ -Filters, wodurch die gesamte Bildinformation erfaßt wird.

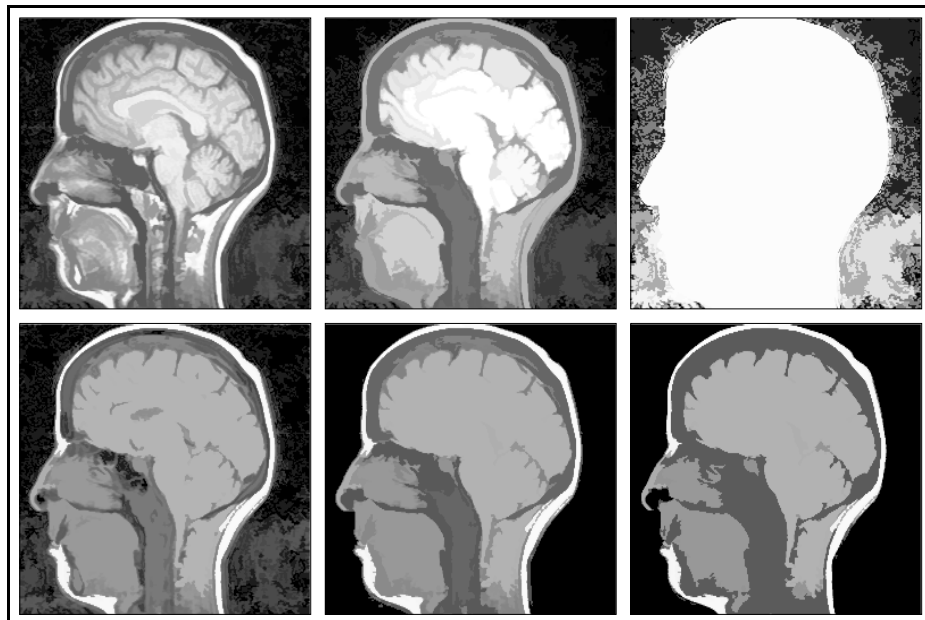


Abb. 1. Der rekonstruktive Skalenraum besteht aus dem \mathcal{RO} -Teilraum (*oben*) und dem \mathcal{RC} -Teilraum (*unten*). Die Detailreduktion wird durch die dualen Skalen 2 (*links*), 9 (*Mitte*) und 29 (*rechts*) veranschaulicht.

Merkmalsextraktion in den Skalen. Prinzipiell ist zur Segmentierung die Partitionierung eine geeignetere Bildbeschreibung als die Menge der regionalen Extrema, deren Kausalität die Rekonstruktionsfilter sicherstellen. Aus diesem Grund werden den Extrema eines Teilraums eindeutige Regionen zugeordnet, die bei Kombination mit den Regionen der dualen Skala eine vollständige

Partitionierung des Bildes ergeben. Dazu werden im \mathcal{RO} -Teilraum die Maxima durch den positiven morphologischen Gradienten umschrieben und im \mathcal{RC} -Teilraum entsprechend die Minima durch den negativen. Anschließend errechnet die Watershed-Transformation (WST) eindeutige Extremumkonturen dieser skalenweisen Ableitungen. Diese Wendestellenkonturen entsprechen der zweiten Ableitung des Bildes, und können durch die eineindeutige Zuordnung zu den Extrema als kausale bildbeschreibende Merkmale interpretiert werden [3], die im Skalenraum form- und ortsstabil sind (Abb. 2).

Beginnend mit der größten Skala, werden die WST-Skalenräume zur Analyse des Skalenverhaltens in zwei duale Teilbäume umgesetzt. Der Zerfall einer Region der Skala $n + 1$ in einige Teilregionen der Skala n ist ein Skalenraumereignis, welches in einem Baumknoten dokumentiert wird. Durch diese eindeutigen räumlichen und skalaren Relationen unter den Regionen eines Skalenraums, enthält man zwei wichtige Attribute zur Analyse des Skalenverhaltens: Den Geburtszeitpunkt der Region und ihre Überlebenszeit, also die Anzahl der Skalen in denen sie ungeteilt existiert. Darüberhinaus werden zur nachfolgenden Analyse weitere geometrische, statistische und histogrammbasierte Attribute ermittelt.

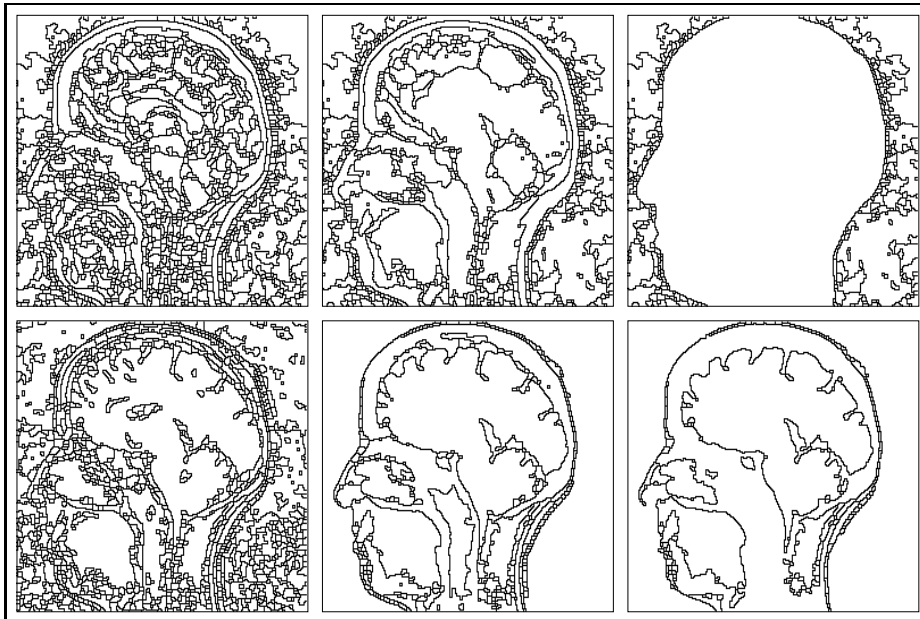


Abb. 2. Die WST der dualen Teilräume extrahiert für den \mathcal{RO} -Teilraum helle (*oben*) und für den \mathcal{RC} -Teilraum dunkle Regionen (*unten*) als Wendestellenkonturen der entsprechenden Extrema. Die Skalen entsprechen denen aus Abb. 1.

Die duale Merkmalsanalyse. Zur Segmentierung eines Bildes werden die Regionen der beiden Teilbäume schließlich in einer zweiphasigen Auswahl rekombiniert. Dazu werden die Teilbäume zunächst top-down durchlaufen, um die

Regionen mit maximaler Signifikanz auszuwählen. Die Signifikanz einer Region ergibt sich aus den Attributausprägungen und allgemeinen Regeln, wie dem Verhältnis von Regionenalter zur Skalenzahl. Um das Verfahren zu spezialisieren, können durch weitere Regeln Regionen mit bestimmten Attributwerten ausgeschlossen oder bevorzugt werden, indem man beispielsweise die Größe der zu segmentierenden Regionen einschränkt. Abbildung 3 zeigt das Ergebnis einer solchen Teilbaumanalyse. Das Teilergebnis des \mathcal{RO} -Raums enthält die bezüglich der gewählten Attribute signifikanten hellen Regionen (*links*), während das Teilergebnis des \mathcal{RC} -Raums dual dazu die dunklen Regionen berücksichtigt (*rechts*).

In der zweiten Phase werden die beiden Teilergebnisse kombiniert. Dabei ermöglichen die ortsstabilen Regionen die konturerhaltende Kombination beliebiger Regionen der beiden Teilräume zu einer Segmentierung. Die geringfügigen Überlappung von Regionen werden dabei intensitätsspezifisch bezüglich ihres Teilraumes bewertet. Das Ergebnis wird in einer bottom-up Analyse verfeinert.

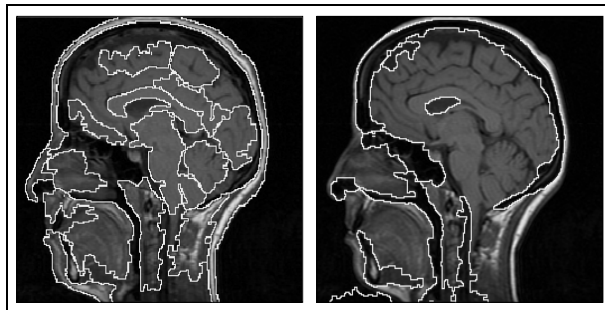


Abb. 3. Ergebnisse der top-down Analyse des \mathcal{RO} Teilbaumes (*links*) und des \mathcal{RC} -Teilbaumes (*rechts*).

3 Verifikation und Ergebnisse

Die im Baum repräsentierten Konturen entsprechen weitestgehend den im Bild zu findenden Einzelobjekten, da sie sich durch Form und Kontrast von ihrer Umgebung abheben. Die automatische Analyse wählt also relevante Konturen durch spezifische Regeln aus, die der entsprechenden Anwendung angepaßt sind. Hierzu werden die Attributwerte einer Region in der vom Anwender vorgegebenen Weise zu einem Signifikanzmaß akkumuliert. Die Segmentierung wird dann automatisch durch Vergleich der Signifikanzmaße ermittelt. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 4 exemplarisch veranschaulicht. Die Segmentierung der sagittalen Schädeltomographie (*links*) ergibt sich direkt als Kombination der Teilergebnisse aus Abbildung 3. Die Skalenräume umfaßten jeweils 30 Skalen und die Attribute Fläche (200–3000 Pixel), Alter (2–13 Skalen) und Geburt (in Skala 1–5) wurden sinnvoll eingeschränkt. Eine Region wurde ins Endergebnis übertragen, wenn bei der top-down Analyse alle Attributwerte innerhalb der spezifizierten Intervalle lagen. Für andere Anwendungen sind jeweils entsprechende Regelwerke zu formulieren. So wurden zur Segmentierung des Thorax-CT (*Mitte*) ausschließlich Formattribute und Größenverhältnisse ausgewertet, während zur Segmentierung der Zellpopulation (*rechts*) nur der \mathcal{RC} -Teilbaum analysiert werden mußte.

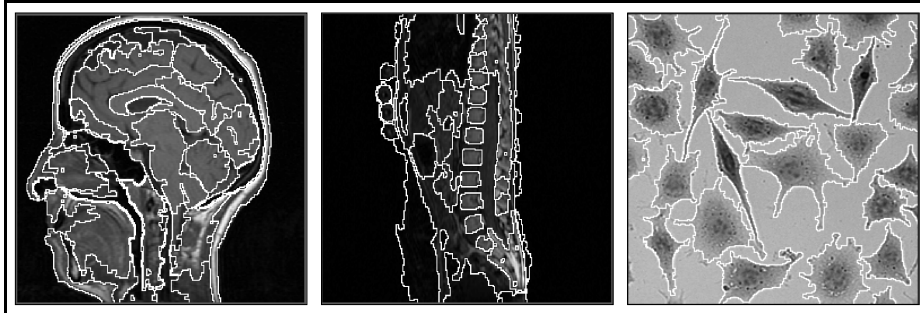


Abb. 4. Segmentierung einer sagittalen MR-Tomographie eines menschlichen Kopfes (*links*), eines Thorax-CTs (*Mitte*) und einer lichtmikroskopisch aufgenommene Zellpopulation (*rechts*).

4 Diskussion und Ausblick

Das vorgestellte Segmentierungsverfahren basiert auf der morphologischen Dekomposition eines Bildes in visuell relevante Regionen. Die kantenerhaltende morphologische Filterung im Rahmen der dualen Bildanalyse erlaubt die robuste Segmentierung auch kontrastschwachen Bildmaterials aufgrund einer größen- und formselektiven Dekomposition. Dabei findet die automatische Extraktion von Formparametern beispielsweise in der quantitativen Mikroskopie oder der morphologischen Gewebebeurteilung Anwendung.

Oftmals ist eine befriedigende Segmentierung bereits mit allgemeingültigen Regeln zu erzielen. Durch spezialisierte anwendungsbezogene Regelsätze können die Ergebnisse allerdings noch verfeinert werden.

Derzeit werden unterschiedliche Regelsätze für verschiedene medizinische Fragestellungen untersucht. Langfristig soll eine systematische Regelabstraktion kombiniert mit einem automatischen Lernverfahren zur einfachen Verfahrensanpassung verwendet werden.

Literatur

1. Witkin AP: Scale space filtering - A new approach to multi-scale description. Ullman S, Richards W (Eds.), *Image Understanding*, Ablex, Norwood, NJ, 79–95, 1984.
2. Lifshitz LM, Pizer SM: A multiresolution hierarchical approach to image segmentation based on intensity extrema. *IEEE PAMI* 12(6):529–540, 1990.
3. Metzler V, Thies C, Lehmann T, Aach T: Segmentation of medical images by feature tracing in a self-dual morphological scale-space, *SPIE Proc.* 4322, 2001, in Druck.
4. Salembier P, Serra J: Morphological multiscale image segmentation. *Visual Communication and Image Processing, SPIE Proc.* 1818, 620–631, 1992.
5. Jackway PT, Deriche M: Scale-space properties of the multiscale morphological dilation-erosion. *IEEE PAMI* 18(1):38–51, 1996.