Theoretische und experimentelle Untersuchung eines Verfahrens zur Schätzung von Attributen der Grauwertkanten in 2D CT/MR-Bildern

Alexander Hagemann, Karl Rohr und H. Siegfried Stiehl

Universität Hamburg, Fachbereich Informatik, AB KOGS
Vogt-Kölln-Strasse 30, D-22527 Hamburg
Email:hagemann@informatik.uni-hamburg.de

Zusammenfassung. Die Merkmale von Grauwertkanten in CT/MR-Bildern liefern wichtige Informationen für eine nachfolgende Bildanalyse. Basierend auf einem Modell für sigmoide Grauwertkanten existiert ein Verfahren zu deren Schätzung. Neben einer experimentellen und theoretischen Evaluierung der Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens werden Erweiterungen zur Erkennung von Modellabweichungen sowie zur Ermittlung der lokalen Grauwertkantenkrümmung vorgestellt.

Schlüsselwörter: Kantendetektion, Skalenraum, Schätzung von Kantenattributen

1 Einleitung

Grauwertkanten definieren signifikante Bildstrukturen und stehen i.a. in direkter Beziehung zu physikalischen Objekten oder Phänomenen. Die Extraktion der Merkmale von Grauwertkanten, im folgenden als Attribute bezeichnet, liefert Informationen, die im Rahmen einer der Kantendetektion nachfolgenden medizinischen Bildanalyse wichtig sind. Beispielsweise können die Attribute als zusätzliche Information für landmarkenbasierte Registrierungsansätze dienen oder die Gruppierung unterstützen.

In dieser Arbeit wird die Leistungsfähigkeit eines differentiellen Skalenraumverfahrens untersucht, das sowohl die automatische Detektion der im Bild auftretenden Grauwertkanten als auch die Schätzung der jeweiligen Attribute Breite (d.h. Ausdehnung der Kontrastvariation in Gradientenrichtung), Kontrast und Orientierung erlaubt. Die Notwendigkeit eines Multiskalenansatzes ergibt sich dabei zwingend aus der Tatsache, daß entlang von Organkonturen i.a. verschieden skalierte Grauwertkanten auftreten, die für ihre optimale Detektion entsprechend skalierter Differentialoperatoren bedürfen.

2 Multiskalenkantenextraktion

Das Skalenraumverfahren von Back et al. [1] erlaubt, basierend auf der Fehlerintegralkurve als Kantenmodell, eine Schätzung der Attribute realer CT/MR-Grauwertkanten. Mittels eines über die Standardabweichung σ parametrisierbaren, normalisierten Differentialoperators $\nabla G(\sigma)$ wird ein Skalenraum über der Intensitätsfunktion I aufgebaut. Dabei definieren die Positionen der lokalen Maxima der Operatorantwort $M(x, \sigma) = I \otimes \nabla G(\sigma)$ auf verschiedenen

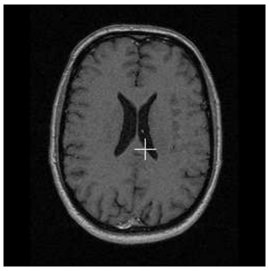

Abb. 1. MR-Bild

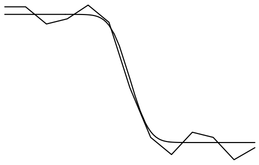

Abb. 2. Überlagertes Kantenprofil aus Abb. 1

Skalen mögliche Grauwertkantenorte, von denen nur die nicht rauschinduzierten Antworten betrachtet werden.

Der Aufbau des diskreten Skalenraums erfolgt für jede Grauwertkante inkrementell durch Operatoren zunehmender Breite (wobei $\triangle\sigma = \sigma_{i+1} - \sigma_i$), bis das auf Basis der Modellfunktion entwickelte Abbruchkriterium für $\sigma_{i+1} > \sigma_i$,

$$\frac{M(x,\sigma_{i+1}) - M(x,\sigma_i)}{M(x,\sigma_i)} < \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{2\sigma_i}, \tag{1}$$

erstmalig erfüllt ist. Die dieses Kriterium erfüllende Skala wird als Maß für die Breite der Grauwertkante angesehen, deren Kontrast durch $c = \sqrt{2}M(x,\sigma_i)$ bestimmt werden kann. So werden bei einer Anwendung des Verfahrens auf Abb. 1 für die markierte Kante die Attributwerte $x = 138.1$, $y = 140.9$, Orientierung $144.6°$, Breite 0.73 und Kontrast 74.6 ermittelt, siehe auch Abb. 2 und [2].

3 Experimentelle Untersuchungen

Zur experimentellen Validierung des Verfahrens wurde der in [3] durchgeführte Vergleich zwischen Signaturverfahren [4] und Modellanpassungsverfahren [5] um das Verfahren [1] erweitert. Im Vordergrund der Untersuchung steht dabei die Genauigkeit der erreichten Ergebnisse für Kontrast- und Breitenschätzung.

3.1 Synthetisches Bildmaterial

Untersucht wurden synthetische Bilder mit sigmoiden Grauwertkanten der Breite $\tau_0 = 0.5, 1.0, 2.0, 5.0$ und Kontrast 84, welche sowohl unverrauscht, als auch mit überlagertem Gaußschen Rauschen ($\sigma_{\text{noise}} = 15, 30$) vorlagen. Bei den in Tab. 1 zusammengefaßten Ergebnissen weist das Verfahren von Back et al. [1] für $\tau_0 = 0.5$ bei zunehmendem Rauschen eine immer stärkere Abweichung auf. Die Ursache liegt in den zu geringen Abtastraten der Grauwertkante und des Differentialoperators. Die dadurch entstehenden Diskretisierungseffekte verfälschen die Operatorantworten, welche dann zu den beobachteten Abweichungen führen.

3.2 Reales Bildmaterial

Die Ergebnisse der Verfahren bei Anwendung auf die in Abb. 3 markierten Grauwertkanten sind in Tab. 2 zu finden. Trotz der unbekannten wahren Attributwerte können Aussagen bezüglich der Schätzgenauigkeit getroffen werden, indem entsprechend parametrisierte Fehlerintegralkurven den realen Grauwertkanten überlagert werden, siehe Abb. 4. Insgesamt liefert das Verfahren von Back et al. [1] gute Ergebnisse, wobei aufgrund der geringen Breite der Kante

	Breiten			Kontraste		
	$\sigma_{\text{noise}} = 0$	$\sigma_{\text{noise}} = 15$	$\sigma_{\text{noise}} = 30$	$\sigma_{\text{noise}} = 0$	$\sigma_{\text{noise}} = 15$	$\sigma_{\text{noise}} = 30$
	Skalenraumverfahren					
$\tau_0 = 0.5$	0.69	0.75	1.06	87.8	86.1	97.4
$\tau_0 = 1.0$	1.02	1.13	1.34	83.8	84.5	94.0
$\tau_0 = 2.0$	2.01	1.91	1.85	83.8	83.2	84.3
$\tau_0 = 5.0$	5.00	5.07	5.16	83.6	84.4	85.8
	Signaturverfahren					
$\tau_0 = 0.5$	0.50	0.66	0.86	83.9	84.9	84.3
$\tau_0 = 1.0$	0.99	0.90	1.02	83.9	84.3	85.4
$\tau_0 = 2.0$	2.00	1.92	1.71	84.1	84.3	84.0
$\tau_0 = 5.0$	4.87	3.85	3.24	82.3	74.1	73.0
	Modellanpassungsverfahren					
$\tau_0 = 0.5$	0.50	0.49	0.47	84.0	84.0	84.1
$\tau_0 = 1.0$	0.98	1.01	1.07	84.0	84.2	84.7
$\tau_0 = 2.0$	2.01	2.03	2.03	84.2	84.4	84.7
$\tau_0 = 5.0$	4.92	4.89	5.15	82.9	82.7	86.9

Tabelle 1. Geschätzte Übergangsbreiten und Kontraste für synthetische Bilder

Nr. 2 Diskretisierungseffekte das dortige Ergebnis verfälschen. Für die Schattenkanten 5 und 6 ist durch Profilüberlagerung nicht zu entscheiden, ob das Verfahren [1] oder das Modellanpassungsverfahren [5] die besseren Ergebnisse liefert. Das Signaturverfahren [4] liefert bei beiden Kanten relativ schlechte Ergebnisse, siehe auch [3].

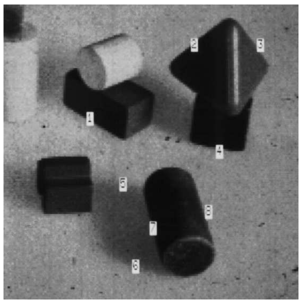

Abb. 3. Realbild

	Skalenraumv.		Signaturv.		Modellanpassungsv.	
Kante	τ	c	τ	c	τ	c
1	1.33	131.5	0.81	124.8	1.34	138.7
2	0.70	132.3	0.59	129.8	0.53	130.7
3	0.70	49.5	0.73	52.0	0.37	48.5
4	0.73	129.6	0.63	119.2	0.73	136.1
5	2.85	56.3	1.37	38.5	3.27	56.5
6	2.31	55.5	1.63	48.4	3.14	62.3
7	0.97	90.3	0.95	93.3	1.04	96.8
8	1.04	101.0	1.02	101.1	0.87	97.0

Tabelle 2. Ergebnisse der Verfahren für die in Abb. 3 markierten Grauwertkanten.

4 Theoretische Untersuchungen

4.1 Untersuchung des Einflusses der Skalenraumdiskretisierung

Die beim Verfahren [1] notwendige Diskretisierung des Skalenraums erlaubt nur dann eine exakte Schätzung der Breite τ, wenn diese einer der berechneten Ebenen σ_i des Skalenraums entspricht. Anderenfalls kann durch nähere Betrachtung des Abbruchkriteriums (1), das auf einem Vergleich der Tangentensteigung der Operatorantwort am Ort $\sigma = \tau$ mit der durch zwei Operatorantworten aufeinanderfolgender Skalen $\sigma_i < \sigma_{i+1}$ gebildeten Sekantensteigung beruht, die

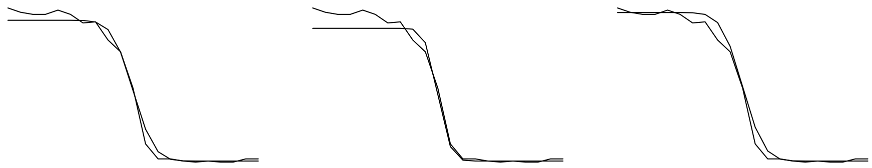

Abb. 4. Überlagertes Profil der Kante 1 aus Abb. 3 mit einer Fehlerintegralkurve, deren Parametrisierung durch das Skalenraumverfahren (links), das Signaturverfahren (mitte) bzw. das Modellanpassungsverfahren (rechts) ermittelt wurde.

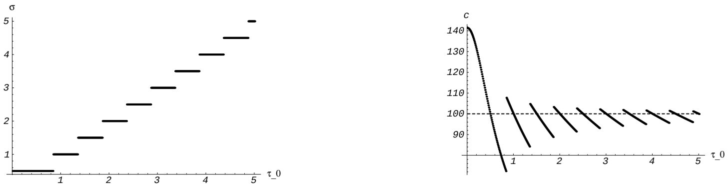

Abb. 5. Linke Seite: Durch das Abbruchkriterium (1) ermittelte Breiten $\sigma_i = \tau$ in Abhängigkeit von der realen Breite τ_0. Rechte Seite: Geschätzte Kontrastwerte für Fehlerintegralkurven unterschiedlicher Breiten τ_0, deren Kontrast $c_0 = 100$ beträgt (gestrichelte Linie).

das Verfahren terminierende Skala bestimmt werden. Dem *Mittelwertsatz der Differentialrechnung* entsprechend, existiert zu jeder Skala σ_i ein umgebendes Intervall von Breiten τ, durch deren Tangentensteigungen erstmalig das Abbruchkriterium erfüllt wird, siehe Abb. 5. Da die Kontrastschätzung unter der Annahme $\tau = \sigma_i$ durch $c = \sqrt{2}M(x, \sigma)$ erfolgt, setzt sich die Ungenauigkeit auch hier fort. Eine Verbesserung der Schätzung kann erreicht werden, indem nach Abbruch des Verfahrens die Breite aus dem Verhältnis t der zuletzt berechneten Operatorantworten über

$$\tau = \sigma_i \sigma_{i+1} \sqrt{\frac{1 - t^2}{t^2 \sigma_{i+1}^2 - \sigma_i^2}} \tag{2}$$

bestimmt wird.

4.2 Erkennung von Modellabweichungen

Treten bei einer Grauwertkante Abweichungen von der zugrundeliegenden Modellfunktionen auf, entsprechen die Ergebnisse i.a. nicht den realen Werten. Da im Falle sigmoider Grauwertkanten deren Breite über Gl. (2) exakt bestimmt werden kann, erlaubt die Anwendung im Skalenraum, Modellabweichungen zu erkennen. Diese äußern sich dabei in einer Variation der Ergebnisse auf verschiedenen Skalen.

Aufgrund des durch Rauschen gestörten Verlaufs der Operatorantwort bezüglich σ ergeben sich i.a. auch für die korrekte Modellfunktion Variationen in den jeweils berechneten Breiten. Wie in Abb. 6 für zwei der getesteten Fälle dargestellt, ist bei der korrekten Modellfunktion die Variation der normierten Schätzergebnisse jedoch deutlich geringer als bei einem abweichenden Modell.

Abb. 6. Normierte Ergebnisse der Breitenschätzung (2) für aufeinanderfolgende Skalen. Die Standardabweichung des Gaußschen Rauschens betrug $\sigma_{\mathrm{noise}} = 1.0$ (punktiert), 3.0 (gestrichelt) und 5.0 (längere Striche). Linke Seite: Fehlerintegralkurve. Rechte Seite: Modellabweichung

Die Erkennung von Modellabweichungen kann durch Einführung eines Schwellwertes erfolgen, welcher die maximale, rauschinduzierte Abweichung festlegt, die innerhalb der berechneten Breiten auftreten darf.

4.3 Krümmungschätzung

Durch Berechnung der zweiten Ableitung der Intensitätsfunktion senkrecht zur Gradientenrichtung kann die lokale Krümmung einer Grauwertkante über

$$\kappa = \frac{\left(2\cos\phi\ \sin\phi\ \hat{G}_2^{45^\circ} - \cos^2\phi\ \hat{G}_2^{0^\circ} - \sin^2\phi\ \hat{G}_2^{90^\circ}\right) \otimes I(x)}{M(x,\sigma)} \tag{3}$$

bestimmt werden. Hier bezeichnen $\hat{G}_2^{0^\circ}$ etc. die zur Berechnung der Richtungsableitung des Differentialoperators notwendigen Basisfilter.

5 Zusammenfassung

Grauwertkantenattribute liefern zusätzliche Informationen für die nachfolgende Bildanalyse. Wir haben ein differentielles Skalenraumverfahren zur Attributschätzung untersucht und Erweiterungen zur Detektion von Modellabweichungen sowie zur Krümmungsschätzung vorgestellt.

Literatur

1. S. Back, H. Neumann, H.S. Stiehl. On Scale-Space Edge Detection in Computed Tomograms. In H. Burkhard, K.-H. Höhne, B. Neumann (Hrsg) *Mustererkennung 1989*, Informatik Fachberichte 219, Seiten 216-223, Springer-Verlag Berlin, 1989.
2. G. Gabrielides, H. Neumann, H.S. Stiehl. Estimating Partial Volume Induced Local Blurring of Organ Contours in Computed Tomograms. Aus H.U. Lemke, M.L. Rhodes, C.C. Jaffe, R. Felix (Hrsg) *Computer Assisted Radiology*, Seiten 556-562, Springer-Verlag, 1991.
3. F. Bergholm, K. Rohr. A Comparsion between Two Approaches Applied for Estimating Diffuseness and Height of Step Edges. Computational Vision and Active Perception Laboratory (CVAP) 83, University of Stockholm, Schweden, 1991.
4. F. Bergholm, W. Zhang. An Extension of Marr's "Signature" Based Edge Classification. Aus *Proceedings of The 7th Scandinavian Conference on Image Analysis*, Aalborg, Seiten 435-443, 1991.
5. K. Rohr. Recognizing Corners by Fitting Parametric Models. Aus *International Journal of Computer Vision*, Vol. 9:3, Seiten 213-230, 1992.