

Aus dem
Institut für Medizinische Physik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Direktor: Prof. Dr. W. A. Kalender

**Multidimensionale adaptive Filterung
zur Rauschreduktion
in der Computertomographie:
Vergleich und Kombination
faltungs- und splinebasierter Verfahren**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
(Dr. rer. biol. hum.)

vorgelegt von
Maria Henke
aus
Kiel



Gedruckt mit Erlaubnis der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Institut für Medizinische Physik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Henkestr. 91
91052 Erlangen
www.imp.uni-erlangen.de

Dekan: Prof. Dr. med. Dr. h.c. J. Schüttler

Referent: Prof. Dr. M. Kachelrieß

Korreferent: Prof. Dr. P. Steffen

Tag der mündlichen Prüfung: 15. 12. 2008

Berichte aus dem Institut für Medizinische Physik der Friedrich-
Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Band 19

Maria Henke

**Multidimensionale adaptive Filterung zur
Rauschreduktion in der Computertomographie:
Vergleich und Kombination faltungs- und
splinebasierter Verfahren**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2009

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2009

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8753-5

ISSN 1616-0142

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
Summary	3
1 Einleitung	5
1.1 Computertomographische Bildgebung in der Medizin	9
1.1.1 Datenakquisition	10
1.1.2 Berechnung der Schnittbilder (Rekonstruktion)	12
1.1.3 Beurteilung der Bildqualität	18
1.2 Rauschen in computertomographischen Bildern	19
1.2.1 Entstehung des Rauschens	20
1.2.2 Modellierung des Rauschens	21
1.2.3 Möglichkeiten zur Reduktion des Rauschens	22
2 Rauschreduktion in Projektionsdaten	25
2.1 Glättung durch Faltung	26
2.1.1 Multidimensionale adaptive Filterung (MAF^{KWK})	26
2.2 Glättung mit Splines und statistikbasierten Verfahren	28
2.2.1 Spline- und statistikbasierte adaptive Filterung ($SSAF^{RB}$)	38
3 Material und Methoden	41
3.1 Ausgangspunkt dieser Arbeit	41
3.1.1 Verschiedene Rekonstruktionskerne und Gaussglättung	41
3.1.2 MAF^{KWK}	42
3.1.3 $SSAF^{RB}$	42
3.2 Faltungsbasierte adaptive Filterungsverfahren (CAF)	43
3.3 Spline- und statistikbasierte adaptive Filterungsverfahren	45
3.3.1 Statistikbasierte adaptive Filterung (StAF)	46
3.3.2 Maximierungsproblem in allgemeiner B-Splinedarstellung ($SSAF^B$)	46
3.3.3 Maximierungsproblem in natürlicher B-Splinedarstellung ($SSAF^{NB}$)	50
3.3.4 Maximierungsproblem für zweidimensionale Daten ($SSAF^{B\ 2d}$)	52
3.4 Kombination faltungsbasierter sowie statistik- und splinebasierter Verfahren	55
3.5 Bewertungsverfahren	56
3.5.1 Projektionsdaten	56
3.5.2 Visuelle Bewertung	58

3.5.3	Beurteilung der Ortsauflösung	58
3.5.4	Beurteilung der Rauschänderung	60
3.5.5	Die Änderung des Rauschens in Bezug zur Änderung der Ortsauflösung	61
3.6	Klinische Beispiele	61
3.6.1	Daten aus der konventionellen CT	62
3.6.2	Daten aus der FD-CT	64
3.6.3	Filterparameter in Abhängigkeit von der untersuchten Körperregion	64
4	Ergebnisse	65
4.1	Allgemeine Eigenschaften der adaptiven Filter	65
4.2	Faltungsbasierte adaptive Filterung	69
4.2.1	Vergleich von MAF^{KWK} und CAF^{Bin}	69
4.3	Statistik- und splinebasierte Algorithmen	75
4.3.1	Statistikbasierte adaptive Filterung (StAF)	75
4.3.2	Vergleich von $SSAF^{RB}$, $SSAF^B$ und $SSAF^{NB}$	76
4.4	Hybridverfahren $Hybrid^{CAF}$	79
4.5	Anwendung der Verfahren in der C-Bogen-CT	80
4.6	Klinische Beispiele	81
5	Diskussion und Ausblick	93
	ANHANG	95
A	Glättungsfunktionen	95
B	Scangeometrien	97
B.1	Parallelstrahlgeometrie	97
B.2	Fächerstrahlgeometrie	97
C	Auftreten gerichteten Rauschens	99
D	Herleitungen zur SSAF	101
D.1	Iterationsvorschrift zur Maximierung der Zielfunktion der $SSAF^{RB}$	101
D.2	Hilfsproblem für das mehrdimensionale Newtonverfahren	101
D.3	Straftermatrix für zweidimensionale Daten	102
E	Algorithmen- und Parameterübersicht	105
	Abbildungsverzeichnis	109
	Literaturverzeichnis	111
	Symbole und Abkürzungen	117
	Danksagung	119
	Lebenslauf	121

Zusammenfassung

1 Hintergrund und Ziele

Neben der konventionellen Röntgen-Computertomographie (CT) gibt es seit wenigen Jahren auch die Möglichkeit der tomographischen Bildgebung mit dem C-Bogen. Durch den Flachdetektoreinsatz bietet die C-Bogen-CT eine hohe isotrope Ortsauflösung. Neben der Verkürzung der Untersuchungsdauer stehen die Verringerung der Dosis und die Verbesserung der Bildqualität ganz oben auf der Wunschliste der klinischen Anwender. Um die Bildqualität bei konstanter Dosis zu verbessern bzw. eine Verringerung der Dosis bei gleichbleibender Bildqualität zu ermöglichen, werden in der konventionellen CT Verfahren zur Rauschreduktion eingesetzt. Um die Gesamtmes- und Rekonstruktionszeit zu verkürzen, werden sogenannte *online*-fähige Systeme entwickelt, die mit der Rekonstruktion schon vor Abschluss der Messung beginnen. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Algorithmen zur Reduktion des Rauschens in den Projektionsdaten, die speziell in der Flachdetektor-CT Anwendung finden und sich in *online*-fähige Systeme einfügen sollen.

2 Methoden

Zu den bisher bekannten Verfahren zur Rauschreduktion gehören die faltungs-basierte multidimensionale adaptive Filterung nach Kachelrieß, Watzke und Kalender (MAF^{KWK}) und die spline- und statistikbasierte adaptive Filterung nach La Rivière und Billmire (SSAF^{RB}). Erstere kann nicht für die *online*-Rekonstruktion eingesetzt werden, letztere kann nur auf eindimensionale Daten angewendet werden. Beide Verfahren werden so weiterentwickelt, dass diese Einschränkungen überwunden werden. Außerdem wird ein Hybridverfahren aus der Kombination eines faltungs-basierten sowie des spline- und statistikbasierten Ansatzes entwickelt. Die Wirkung der Algorithmen auf Rauschen und Ortsauflösung wird mit sogenannten σ -FWHM-Kurven aus simulierten und gemessenen ein- bzw. zweidimensionalen Daten charakterisiert. Die Veränderung von Rauschdruck und -struktur durch die Verfahren wird an Hand von Schichtbildern betrachtet. Beispiele der Anwendung auf klinische Daten runden den Vergleich der Algorithmen ab.

3 Ergebnisse und Beobachtungen

Ergebnisse dieser Arbeit sind eine neue faltungs-basierte adaptive Filterung (CAF), die *online*-fähig ist, eine spline- und statistikbasierte adaptive Filterung für zweidimensionale Daten ($\text{SSAF}^{\text{B 2d}}$) und ein Hybridverfahren ($\text{Hybrid}^{\text{CAF}}$). Diese neuen adaptiven Algorithmen zur Rauschreduktion

erfüllen die gestellten Anforderungen. Für alle hier untersuchten adaptiven Algorithmen gilt: Je isotroper das Rauschen durch die Filterung wird, desto anisotroper wird die Ortsauflösung. Bezüglich des Verlaufs der σ -FWHM-Kurven unterscheiden sich die Verfahren nur wenig. Sie grenzen sich in der Wirkungsweise und dem entstehenden Gesamtrauschindruck gegeneinander ab.

4 Praktische Schlussfolgerungen

Aus den Ergebnissen ergeben sich Empfehlungen für die Auswahl eines Filterverfahrens: Wenn die Projektionsdaten vor Beginn der Rekonstruktion komplett vorliegen und ein unstetiger Übergang zwischen verändertem und unverändertem Bereich im Schichtbild toleriert werden kann, bietet die Verwendung der MAF^{KWK} die Möglichkeit, den Anteil der maximal veränderten Projektionsdaten vorzugeben. Soll die Rekonstruktion vor Abschluss der Messung begonnen werden, kann je nach weiterer Anforderung aus den folgenden Algorithmen ausgewählt werden: Wird ein möglichst glatter Übergang zwischen verändertem und unverändertem Bereich im Schichtbild gewünscht oder soll nur ein Filterparameter einzustellen sein, ist für zeitunkritische Rekonstruktionen die SSAF der Algorithmus der Wahl. Soll der Anteil der veränderten Projektionsdaten möglichst gering gehalten werden, so sollte die $\text{Hybrid}^{\text{CAF}}$ eingesetzt werden. Für zeitkritische Rekonstruktionen steht die CAF^{Tanh} mit zwei Filterparametern zur Verfügung.

Diese Arbeit, in der neue Filterverfahren zur Rauschreduktion entwickelt, die Eigenschaften der Verfahren aufgezeigt und daraus Anwendungsempfehlungen abgeleitet wurden, verbreitert die Basis für klinische wie auch technische Weiterentwicklungen auf dem Gebiet.

Summary

1 Background and Aims

Since a few years there is the possibility of tomographic imaging with a C-Arm-system in addition to the conventional X-Ray- Computed Tomography. By the use of a Flatpaneldetector the C-Arm-CT offers a high isotropic resolution. Besides the reduction of dose the improvement of image quality is on the top of the user's list of wishes. To improve the image quality at constant dose or allow dose reduction at changeless image quality methods of noise reduction are used in conventional ct-imaging. To reduce overall measurement- and reconstruction-time so-called on-line-compliant systems are developed which start reconstruction before the measurement is completed. The aim of this work is the development of algorithms for noise reduction in projection data which shall be applied especially to flatpanel-CT and fit in into online-compliant systems.

2 Methods

Among the so far known noise reduction methods are the convolution based multidimensional adaptive filtering by Kachelrieß, Watzke and Kalender (MAF^{KWK}) and the spline and statistic based filtering by La Rivière and Billmire (SSAF^{RB}). The former can not be applied for on-line-reconstruction, the latter can be applied to one-dimensional data only. Both methods are developed further to overcome these restrictions. In addition a hybrid method from a combination of a convolution based and the spline and statistic based approach is developed. The impact of the algorithms to noise and resolution is characterized using so-called σ -FWHM-curves from simulated and measured one- and twodimensional data, respectively. The change in noise impression and structure is considered by means of slices. Examples of the application to clinical data rounds out the comparison.

3 Results and Observations

The results of this work are a new convolution based adaptive filtering (CAF), which is on-line-compliant, a spline and statistic based filtering for two-dimensional data (SSAF^{B 2d}) and a hybrid method (Hybrid^{CAF}). These new adaptive algorithms for noise reduction conform with the given requirements. For all examined adaptive algorithms applies: The more isotropic the noise becomes by the filtering the more anisotropic becomes the resolution. The methods differ only little in terms

of the characteristics of the σ -FWHM-curves. They separate in function and the resulting noise impression.

4 Practical Conclusions

The results yield recommendations for the choice of a filtering method: If the projection data is complete before the reconstruction starts and a discontinuous transition from modified to unmodified parts of the slices is tolerable, the use of the MAF^{KWK} gives the possibility to set the maximum fraction of modified data. Is the reconstruction to be started before the acquisition is complete, one can choose from the following algorithms according to the additional needs: If the transition from modified to unmodified parts of the slices has to be as smooth as possible or if only one parameter should be given the SSAF is the method of choice for time-uncritical reconstructions. If the fraction of modified projection data is to be as small as possible, the $\text{Hybrid}^{\text{CAF}}$ should be used. For time-critical reconstructions there is the CAF^{Tanh} with two parameters available. This theses, within which new filtering methods for noise reduction were developed, the properties of the methods were shown, and hence usage recommendations were derived, broadens the basis for clinical as well as technical advancements in the field.