

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

Band 14

Thomas Riedel

**Deterministic Simulation
of Arbitrary CT Measurements
with Experimental Verification**

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2005

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the internet at <http://dnb.ddb.de>.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2004

Copyright Shaker Verlag 2005

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-3707-0

ISSN 1616-0142

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Summary

Background and Goals

For many developments in computed tomography (CT) simulation tools have proven to be a valuable assistance. Unfortunately, Monte Carlo (MC) methods suffer from long computation times when trying to achieve sufficient accuracy. Available analytical simulation tools offer no possibility for modifications or are very limited in their flexibility. The aim of this thesis project was to develop a deterministic simulation tool providing high flexibility, i. e. allowing for different scan modes, detector shapes and spectra. The main focus was put on the establishment of accurate simulation within short computation time. After implementation and validation, two different studies were undertaken with our simulation tool.

The aim of the first simulation study was to evaluate the influence of the optimum contrast-to-noise ratio (CNR) depending on the voltage setting for different patient sizes, since both the contrast between different materials and the noise level are strongly energy dependent. In modern CT examinations calcium-scoring protocols are available to quantify the amount of calcifications in coronary arteries. These clinical protocols are specified for standard patients and only adjusted for small patients, such as children, by decreasing the tube current with respect to dose considerations.

The development of new CT detectors tends towards higher numbers of detector rows thus allowing for a larger volume coverage within shorter scan times and utilizing the x-ray tube power more efficiently. Therefore, the suitability of flat panel detectors (FPDs) which are in this respect superior to current multi-row CT detectors is a major topic in recent work of all main CT manufacturers. Within this thesis an FPD of amorphous silicon (a-Si) was to be evaluated with respect to CT image quality parameters. The simulation should be used to predict and validate the measurement results.

Methods

We developed a new analytical simulation tool designed for x-ray attenuation simulation, which is based entirely on deterministic calculations considering only the attenuation of x-rays along their linear path from source to detector. It is organized in a modular architecture including modules for object definition regarding geometry and material, different detector shapes and scan trajectories as well as different x-ray spectra. Regarding object geometry definition, the constructive solid geometry (CSG) approach was implemented thereby realizing accurate objects with arbitrary combination according to the implemented Boolean operations. Mass attenuation coefficients for a large variety of elements and materials were provided. Scan paths necessary for standard CT were implemented in connection with

cylindrical and flat-panel detector shapes.

For the simulations in the CNR study a virtual version of a cardio phantom [70, 71] was used. To account for different patient sizes the complete phantom was scaled, while for different patient obesity levels additional rings of fat were added. The contrast and noise levels of a calcification insert and the surrounding heart material were determined in reconstructions for sequence scans within a voltage range of 30–200 kV keeping the air kerma on the rotation axis constant with 20 mGy as reference.

The FPD was evaluated in an experimental system set-up with respect to spatial resolution and the achievable low-contrast detectability and the results compared with simulated results. The set-up consisted of a stationary detector and x-ray tube with the phantoms positioned on a rotation table. The detector offers a sensitive area of 960×960 pixels with a pixel spacing of $184 \mu\text{m}$. The a-Si photodiode array is coupled to a continuous phosphorescent layer of thallium-doped cesium iodide (CsI:Tl) of $600 \mu\text{m}$ thickness for x-ray absorption.

Results

A large library of simple and complex phantom objects was implemented. Calculation times vary between less than a second to several days depending on the complexity of calculation. Comparison of attenuation coefficients for various materials with data provided by NIST showed excellent agreement. Also the accuracy of the geometry definition was found to be within the limits defined by the precision of the calculation for simple and combined objects. The validation proved that the energy dependence of attenuation and noise levels as well as their absolute values was calculated with an acceptable accuracy when material parameters were known and scatter contributions were negligible.

The evaluation of calcification CNR with respect to x-ray tube voltage setting demonstrated a strong dependence on patient size and obesity. The simulations indicated an optimum voltage range of 50–60 kV for small patients such as children and of 70–80 kV for standard patients. The results also applied when dose contributions were taken into account roughly.

The FPD exhibited a spatial resolution of 2.8 Lp/mm for the 5 % MTF value which is superior to CT and in good agreement with predictions from simulations. Low-contrast details of 10 HU and 10 mm size were recognized for scan detector doses of 27.2 mGy. Here, the simulation slightly overestimated the low-contrast detectability, which might be caused by scatter contributions and details of the detection process.

Conclusions and Outlook

The tool ImpactSim constitutes a flexible and powerful tool for the generation of virtual x-ray attenuation data. For the future several extensions of the simulation system are planned such as the addition of further simple basic objects, such as hyperboloids, paraboloids and tori. Also, strategies to include the first scatter interaction inside the phantom in an analytical way should be considered. Although neglecting these contributions accounts for the main speed-up when compared to MC methods, this concept is for certain conditions not accurate enough to reproduce measurements as shown e.g. for the FPD imaging without anti-scatter grid. Furthermore, one could think of a graphical user interface to simplify the

simulation control for unexperienced users.

The results of the calcification CNR indicate that the currently used voltage range of about 120 kV for calcium screening is not the optimum. Since the simulation results were only compared with measurements within the provided voltage range of 80 to 140 kV, phantom measurements in connection with dose measurements are required to prove the indicated contrast benefit for the lower voltage ranges and to justify changes in clinical protocols for calcium scoring examinations.

The study with the experimental set-up indicated that CT imaging with a-Si flat-panel detectors is feasible and provides performance characteristics adequate for special applications. For example, the capability of C-arm systems could be expanded towards 3D CT imaging for applications in interventional radiology. Recent evaluations are performed to show if the results obtained with the test system set-up can be achieved with a commercial C-arm system.

Zusammenfassung

Hintergrund und Ziele

Für viele Entwicklungen in der Computer-Tomographie (CT) haben sich Simulationswerkzeuge als nützlich erwiesen. Allerdings benötigen Monte Carlo (MC) Methoden zu lange Rechenzeiten, um eine ausreichende Genauigkeit zu erreichen, und verfügbare analytische Simulationsmethoden bieten nur eingeschränkte Modifizierbarkeit und Flexibilität. Ziel dieser Arbeit war es daher, ein analytisches Simulationswerkzeug zur Verfügung zu stellen, welches hohe Flexibilität, d.h. unterschiedliche Scantrajektorien, Detektorformen und Spektren anbietet. Besonderes Augenmerk wurde auf die Einhaltung von korrekten Simulationsergebnissen innerhalb kurzer Berechnungszeiten gelegt. Im Anschluss an die Implementierung und Validierung sollten zwei unterschiedliche Studien mit Hilfe der Simulation behandelt werden.

Die erste Simulationsstudie sollte den Einfluss der Röhrenspannung für unterschiedliche Patientengrößen auf das optimale Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (CNR) untersuchen, da sowohl der Kontrast verschiedener Materialien als auch das Rauschen stark energieabhängig sind. In modernen CT-Untersuchungen des Herzens sind sogenannte “Calcium-Scoring”-Protokolle zur Quantifizierung der Größe von Kalzifizierungen in Koronararterien verfügbar. Diese klinischen Protokolle sind angelegt für Standardpatienten und werden für kleine Patienten, wie Kinder, nur durch eine Reduktion des Röhrenstroms aufgrund von Dosisgesichtspunkten angepasst.

Die Entwicklung neuer Detektoren für CT geht in Richtung von mehr Detektorzeilen, um größere Volumenbereiche in kürzeren Scanzeiten abzudecken und die Röhrenleistung effizienter auszunutzen. Aus diesem Grund ist die Untersuchung der Eignung von Flächendetektoren, welche in dieser Hinsicht aktuellen Mehrzeilendetektoren in der CT überlegen sind, ein wichtiges Forschungsthema aller führenden CT Hersteller. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Flächendetektor aus amorphem Silizium (a-Si) hinsichtlich der CT-Bildqualitätsparameter untersucht. Die Simulation sollte zur Vorhersage und Validierung der Messergebnisse benutzt werden.

Methoden

Es wurde ein analytisches Simulationswerkzeug entwickelt, welches völlig auf der deterministischen Berechnung der Schwächung von Röntgenstrahlen auf ihrem geradlinigen Weg von der Röntgenquelle zum Detektor basiert. Die Simulation ist in einer modularen Architektur aufgebaut, welche unterschiedliche Module zur Objektdefinition unter Berücksichtigung der Geometrie und Materialien, zur Definition verschiedener Detektorformen und Scantrajektorien, sowie unterschiedlicher Spektren enthält. Für die Definition der Objekt-

geometrie wurde das Prinzip der “Constructive Solid Geometry” (CSG) umgesetzt, welches exakte Objektdefinition mit beliebiger Objektkombination gemäß den implementierten Booleschen Operatoren vereint. Massenschwächungskoeffizienten für eine Vielzahl von Elementen und Materialien wurden zur Verfügung gestellt. Für die Standard-CT benötigte Scantrajektorien und Detektorformen wurden berücksichtigt.

Für die Simulationen in der CNR-Studie wurde eine virtuelle Version eines Kardiophantoms [70, 71] benutzt. Um unterschiedliche Patientengrößen zu berücksichtigen, wurde das gesamte Phantom skaliert, während für unterschiedliche Patientendicken zusätzliche Fettringe hinzugefügt wurden. Die Kontrast- und Rauschwerte eines Kalzifizierungseinsatzes und des umgebenden Herzgewebes wurden in Rekonstruktionen von Scans mit Spannungen zwischen 30 und 200 kV bestimmt, wobei das Luftkerma auf der Rotationsachse mit 20 mGy als Referenz konstant gehalten wurde.

Der Flächendetektor wurde in einem experimentellen Aufbau im Hinblick auf seine Ortsauflösung und erreichbare Niedrigkontrasterkennbarkeit untersucht und die Ergebnisse mit Simulationen verglichen. Der Aufbau bestand dabei aus einem stationären Detektor und Röntgenröhre, wobei die Phantome auf einem Rotationstisch platziert wurden. Der Detektor besitzt eine sensitive Fläche von 960×960 Pixeln mit einem Pixelmittelenabstand von $184 \mu\text{m}$. Das a-Si Photodiodenarray ist an eine Fluoreszenzschicht aus mit Thallium dotiertem Cäsiumiodid (CsI:Tl) von $600 \mu\text{m}$ Dicke zur Absorption der Röntgenstrahlung gekoppelt.

Ergebnisse

Eine umfangreiche Bibliothek aus einfachen und komplizierten Objekten wurde erstellt. Die Berechnungszeiten variieren dabei zwischen Subsekunden und einigen Tagen abhängig von der Komplexität der Berechnungen. Vergleiche der Schwächungskoeffizienten für verschiedene Materialien mit Daten von NIST zeigten sehr gute Übereinstimmung. Es konnte auch gezeigt werden, dass die Genaugkeit der Geometriedefinition für einfache und komplexe Objekte innerhalb der rechnungsbedingten Fehlergenauigkeit lag. Die Validierung zeigte darüber hinaus, dass die Energieabhängigkeit der Schwächungs- und Rauschwerte, ebenso wie ihre absoluten Größen, mit akzeptabler Genauigkeit berechnet werden konnten, sofern die Materialparameter bekannt waren und Streuung vernachlässigt werden konnte.

Die Untersuchung des CNR für Kalzifizierungen zeigte eine starke Abhängigkeit von der Patientengröße und -dicke. Die Simulationen deuten einen optimalen Spannungsbereich von 50–60 kV für kleine Patienten, wie Kinder, und von 70–80 kV für normale Patienten an. Die Ergebnisse behielten auch unter Berücksichtigung einer groben Abschätzung der Dosis ihre Gültigkeit.

Der Flächendetektor wies eine Ortsauflösung von 2.8 Lp/mm für 5 % MTF-Wert auf, welche im Vergleich zu Standard-CT überlegen und in guter Übereinstimmung mit Simulationen ist. Niedrigkontrastdetails von 10 HU und 10 mm Größe konnten bei einer Detektordosis der Aufnahme von 27.2 mGy erkannt werden. In diesem Fall wurde die Niedrigkontrasterkennbarkeit von der Simulation leicht überschätzt, was an Streustrahlungsbeiträgen und Details im Detektionsprozess liegen könnte.