



Doctoral Thesis

Stacked fan-beam scanning for fast high-resolution computed tomography

Author(s):

Kohlbrenner, Adrian

Publication Date:

2000

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004041584> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH No. 13781

Stacked Fan-Beam Scanning for Fast High-Resolution Computed Tomography

A thesis submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

Doctor of Technical Sciences

Presented by

Adrian Kohlbrenner
Dipl. El.-Ing. ETH
Born May 25, 1969
Citizen of Basel-Stadt, Switzerland

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Peter Niederer, examiner
Prof. Dr. Peter Rügsegger, co-examiner

2000

Abstract

The focus of this thesis is computed tomography (CT) applied to bone research in general, and *osteoporosis* in particular. The diagnosis of osteoporosis is challenging: osteoporosis progresses slowly, and it is therefore difficult to detect the disease and to document its progression and the effect of a treatment. The diagnostic tools available today have severe limitations and the development of advanced diagnostic procedures is imperative.

The move from two-dimensional to three-dimensional analysis, and increased spatial resolution characterize recent improvements in CT-based structure assessment. *Microtomography* is an increasingly popular method to image complex structures with features in the micrometer range. Today's microtomographic systems typically assess a sample in 3D at high spatial resolution, and thus allow unobstructed visual access to the sample's inner structure. Regardless of whether *in vivo* or *in vitro* measurements are to be performed, high spatial resolution is the prime factor guiding today's CT scanner developments; dose and scanning speed become important issues for *in vivo* measurements. Since motion artifacts have a strong influence on image resolution, the scanning speed of *in vivo* CT systems has continuously been improved.

In this thesis a novel approach to the problem of high-speed scanning is presented: the *stacked fan-beam* scanning scheme. Stacked fan-beam scanning combines the advantage of high volume acquisition speed of cone-beam scanners with the accuracy offered by scanners using standard fan-beam algorithms. A stacked fan-beam scanner uses a collimated X-ray source in combination with an area X-ray detector to collect a complete two-dimensional projection of a three-dimensional object with a single acquisition. A line-focus X-ray tube and a foil or grid collimator form a wedge-shaped radiation field which enables the instrument to produce undistorted three-dimensional CT images at very high speed. A low-noise area CCD sensor bonded to a fiber-optic light guide acts as X-ray image detector. Stacked fan-beam scanning offers high scanning speed and high detection efficiency, and thus lends itself to high-resolution *in vivo* scanning of humans and laboratory animals.

Two fast, CCD-based three-dimensional CT scanners have been developed: the 3D- μ CT and the 3D-PQCT. They are used for *in vitro* and *in vivo* examinations. The 3D- μ CT is designed to scan small laboratory animals and has a voxel size of 20 μm , while the 3D-PQCT with a voxel size of 80 μm , is used for human

examinations. Both instruments acquire a complete set of projections with one single rotation in as little as 2 minutes. The projections are reconstructed into a $1024 \times 1024 \times 255$ voxel array, which delivers a three-dimensional image containing a quarter of a billion voxels. Such volumetric images are 6.6 mm in height and can be stacked on top of each other, which allows the systems to scan objects of almost arbitrary length.

The scanners' high scanning speed and high resolution at moderately low radiation dose are the basis for *in vivo* analyses and time serial measurements. It has been established that bone quality cannot be assessed reliably with bone density alone, and that bone microarchitecture has to be considered as well. The 3D- μ CT and the 3D-PQCT allow reliable assessment of human and animal bone such that accurate fracture risk prediction becomes possible.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Computertomographie (CT) als Werkzeug in der Knochenforschung im allgemeinen und für *Osteoporose* im speziellen. Die Diagnose von Osteoporose stellt eine besondere Herausforderung dar: Osteoporose verläuft sehr langsam und es ist deshalb ausgesprochen schwierig eine Erkrankung frühzeitig festzustellen, ihren Verlauf zu beobachten und die Auswirkungen einer Therapie zu beurteilen. Die diagnostischen Werkzeuge welche heute zur Verfügung stehen haben stark eingeschränkte Möglichkeiten und die Entwicklung neuer Diagnoseverfahren ist absolut zwingend.

Der Schritt von zweidimensionaler zu dreidimensionaler Analyse und eine erhöhte räumliche Auflösung kennzeichnen neuere Verbesserungen in CT-basierter Strukturanalyse. *Mikrotomographie* ist ein immer beliebteres Verfahren zur Abbildung komplexer Strukturen mit Details im Mikrometerbereich. Aktuelle Mikrotomographiesysteme erfassen eine Probe typischerweise in 3D mit hoher räumlicher Auflösung und ermöglichen so ungehinderten visuellen Zugang zur Struktur im Inneren einer Probe. Ungeachtet ob *in vivo* oder *in vitro* Messungen durchgeführt werden müssen, hohe räumliche Auflösung ist heute der wichtigste Faktor für die Entwicklung neuer CT Scanner; Dosis und Abtastgeschwindigkeit sind wichtige Aspekte sobald es um *in vivo* Messungen geht. Weil Bewegungsartefakte einen starken Einfluss auf die Auflösung eines Bildes haben, ist die Geschwindigkeit von *in vivo* CT Systemen laufend verbessert worden.

In der vorliegenden Arbeit wird ein neuer Ansatz in der Entwicklung von schnellen CT Scanner vorgestellt: Das *stacked fan-beam* Abtastverfahren. Es verbindet die Vorteile hoher Volumenerfassungsgeschwindigkeit von cone-beam Scannern mit der Genauigkeit welche man von fan-beam Systemen her kennt. Ein *stacked fan-beam* Scanner verwendet eine kollimierte Röntgenquelle in Verbindung mit einem Flächensensor für Röntgenstrahlung um vollständige zweidimensionale Projektionen von dreidimensionalen Objekten mit einer einzigen Aufnahme zu erfassen. Eine Röntgenröhre mit einem Linienfokus und ein Folien- oder Gitterkollimator formen ein keilförmiges Strahlungsfeld, welches es erlaubt unverzerrte dreidimensionale CT Bilder mit hoher Geschwindigkeit aufzuzeichnen. Ein rauscharmer CCD Sensor verbunden mit einer Glasfaseroptik arbeitet dabei als Röntgenbilddetektor. Das neue Verfahren bietet hohe Abtastgeschwindigkeit gepaart mit hoher Detektoreffizienz und eignet sich deshalb für hochauflösende *in vivo* Messungen von Menschen und Labortieren.

Zwei schnelle, CCD-basierte dreidimensionale CT Scanner sind während dieser Arbeit entwickelt worden: Der 3D- μ CT und der 3D-PQCT. Sie werden sowohl für *in vitro* wie für *in vivo* Untersuchungen verwendet. Der 3D- μ CT wurde entwickelt um kleine Labortiere untersuchen zu können und hat eine Voxelgrösse von 20 μ m. Der 3D-PQCT, mit einer Voxelgrösse von 80 μ m, kann zur Untersuchung von Menschen verwendet werden. Beide Instrumente erfassen einen kompletten Satz von Projektionen mit einer einzigen Rotation in gerade mal 2 Minuten. Aus den Projektionen wird ein Volumen mit $1024 \times 1024 \times 255$ Elementen, also gut einer Viertelmilliarde Voxel, rekonstruiert. Solche dreidimensionale Modelle sind jeweils 6.6 mm hoch, lassen sich stapeln und es ist deshalb möglich Objekte von nahezu beliebiger Länge zu erfassen.

Die hohe Abtastgeschwindigkeit und hohe Auflösung bei mässiger Strahlenbelastung ist die Basis für *in vivo* Analysen und Verlaufstudien. Es wurde gezeigt, dass Knochenqualität unter Verwendung von Knochendichte alleine nicht zuverlässig beurteilt werden kann, und dass es nötig ist die Mikroarchitektur eines Knochens mit in die Betrachtungen einzubeziehen. Der 3D- μ CT und der 3D-PQCT ermöglichen eine zuverlässige Beurteilung von menschlichem und tierischem Knochen, so dass eine präzise Aussage über Bruchrisiko möglich wird.