

## 傾斜投影による3次元X線CT装置の開発\*

大坊 真洋\*\*、長谷川 辰雄\*\*、田山 典男\*\*\*

岩手大学、県内民間企業3社((株)東洋工機、本多エレクトロン(株)、ラピラス電機(株))と共同で3次元CT装置を開発した。CTのアルゴリズムに岩手大学で開発したFMR原理を用いている。シールド筐体、精密スキャン機構、制御システム、可視化システム、ASIC、超並列計算機を開発した。スキャンは、試料とX線受光面を水平に回転させながら、斜め45度方向からX線投影する独自の機構により実現されている。超並列計算機は、224個の専用ASIC、DSP、FPGAを、7枚の8層配線基板に分散させて構成している。システムの接続調整の作業が若干残っているが、3次元CT装置の基本的機能を確認した。

キーワード：計算機断層法、傾斜投影、超並列計算機、ASIC

## A New type of Three-dimensional X-ray Computed Tomography System by a Gradient-projection Method

DAIBO Masahiro, HASEGAWA Tatsuo and TAYAMA Norio

A new type of three-dimensional computed tomography system have been developed by collaboration: local companies who are Toyokoki Co., LTD; Honda Electron Co., LTD; Rapias Co., LTD, Iwate University and us. The Fast Model Reconstruction (FMR) algorithm proposed by Iwate University is applied for CT reconstruction. We developed an x-ray shielding chamber, precision scanning mechanism, a control system, a visualization system, ASIC LSI and a super parallel computer. The scanning mechanism has unique configuration that an x-ray projection is carried out gradient angle of 45 degree toward a specimen during synchronous horizontal rotation of the specimen and an x-ray detector. The super parallel computer consists of 224 ASIC LSI, 7 DSP and some FPGA. These parts are distributed on 7 boards. Although we still need some coordination, the 3-D CT system is functional.

key words: CT, Gradient-projection, super parallel computer, ASIC

### 1 緒 言

近年、PL法が制定されて製品の信頼化高品質化が厳しく問われるなか、製品や部品の小型高精密化や複合化などの急進展により、表面検査だけでは品質判定が困難となり、内部検査の必要性が高まっている。食品業界や農産物においても製品の安全衛生と品質保持の面から内部の検査が求められている。このような検査には従来からX線透過法が使われてきたが、複雑な内部構造や3次元的な構造を検査するには十分ではなく、産業用X線CT装置の開発が重要になっている。医療分野では、人体内部の診断にX線CT装置が広く用いられ技術的にも確立されているが、高価であるために工業製品及び食品分野への直接的な流用は困難である。

こうした背景から、筆者らは岩手大学の基礎研究(FMR原理)を基に平成6年度からCT技術に関する実施化研究を取り上げ、市販の軟X線装置を利用した産業用CTシステムを構築して、実験を進めてきた。その過程で、FMR原理によるCT法は、投影方向数を少なくしても画像劣化が少なく、投影方向が限定され易い工業製品の検査工程にも適しており、高速な産業用CTとしての可能性を示した<sup>1, 2)</sup>。

本論文では、中小企業創造基盤技術研究事業(平成8-10年度)において、画像再構成アルゴリズムを担当した岩手大学、装置の基本設計と調整と担当した岩手県工業技術センター、ASICによる専用LSIと超並列計算機を開発した本多エレクトロン(株)、スキャン制御と画像表示を担当したラピラス電機株(株)、X線装置本体の製作を担当した(株)東洋工機の5機関で共同開発した「FMR 3次元CT装置」の試作結果について報告する。

### 2 実験方法

#### 2-1 システム構成

システム構成を図1に示す。それぞれの機能要素は、LANあるいは専用信号ケーブルで接続されている。制御・表示装置は独立3軸のモータ制御をしてスキャンを行う。スキャン制御は、モータコントロールボードIBX-7208(インタフェース製)と、5相パルスモータ、モータドライバ(オリエンタルモータ製)を使用した。X線ラインセンサーTH9588DU(トムソン製)を、対象物に対して相対運動させることによってX線投影画像が得られる。X線投影画像の収集は、インターフェースボードTH9512(トムソン製)を介して、イメージグラバボード

\* FMR原理による産業用3次元CT装置の開発試験研究(中小企業創造基盤技術研究事業)

\*\* 電子機械部、\*\*\* 岩手大学工学部

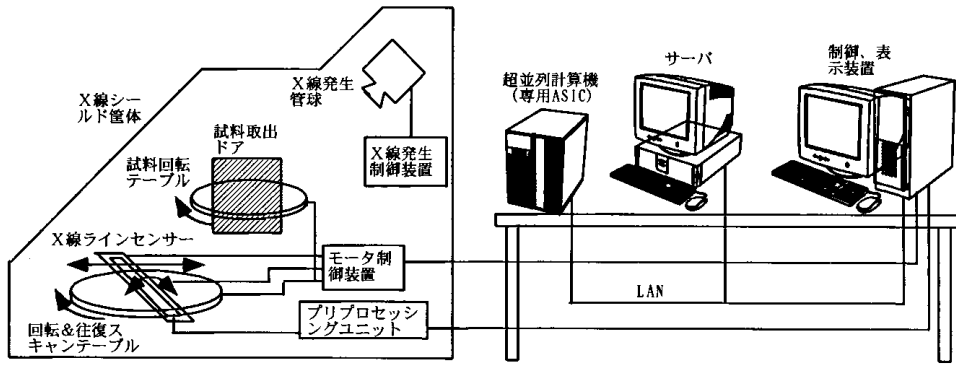


図1 3次元CTのシステム構成

AM DIG-16D(Imaging Technology製)で行った。画像補正が施された後、専用ASIC-LSIによる超並列計算機で3次元CTの計算が行われ、その結果は制御・表示装置でコンピュータグラフィクス表示される。

2-2 スキャン方法

(1) 傾斜回転スキャン

スキャン方式を図2に示す。斜め45度から投影することによって、縦横両方向の情報を持った投影画像を一度に収集することが可能である。大面積のX線受光面を安価に実現するために、X線ラインセンサー(有効長さ230mm)を機械的にスキャンする方式を採用した。X線ラインセンサーが一往復(軸1)する毎に、X線ラインセンサーを搭載した回転&往復スキャンテーブルが回転(軸2)する。試料回転テーブルと回転&往復スキャンテーブルは同期して同じ角度で回転する。この機構により、ラインセンサーが収集する画像の座標系とCT再構成する物体の座標系の相対的な回転が無くなるので、座標回転と補完の計算が不要となり、ハードウェアによる計算に都合になる。また、このスキャン方法では、45度から投影するのでX線シールドボックスの対角線部分を有効に使うことができ、遮蔽用鉛の削減と、小型軽量化が可能となる。

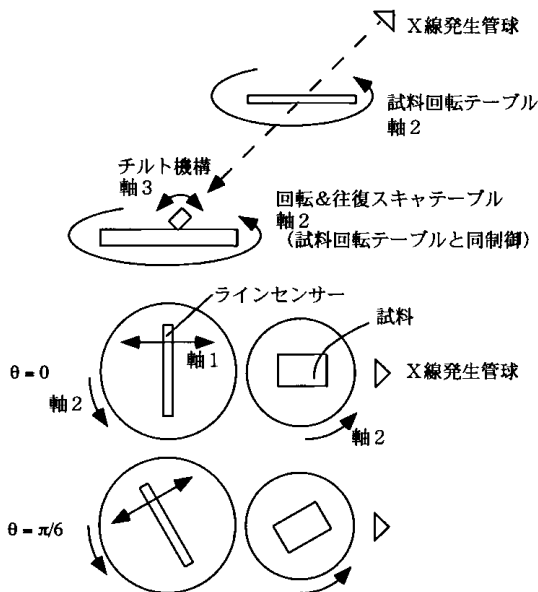


図2 傾斜回転スキャン方式

(2) チルト機構

一般的にX線ラインセンサーには、散乱線除去のため、スリット状のコリメータが付加されている。そこでX線センサーが常にX線発生管球の方向を向くように、X線ラインセンサーを傾斜させるチルト機構(軸3)を設けた。また、回転&往復スキャンテーブルの回転により、最適なチルト角度が変わるので、回転運動中に同時に所定の角度に設定されるように制御した。

(3) 投影画像補正

使用したX線ラインセンサーは、全1024画素がブロック単位で分割されており、ブロック間および各素子間で微妙な誤差を有する。そこで、各センサーのばらつき補正が必要となる。まず、X線を減衰させる物体を置かず、何も無い状態での投影画像 $p_0$ を測定する。次に物体を置いてX線投影画像 $p_1$ を収集する。X線は物体を透過する時に指数関数的に減衰しているので、実効的な投影画像 $p_2$ は次式で与えられる。

$$p_2 = \log_e(p_1) / \log_e(p_0) \quad (1)$$

さらに、全投影画像の濃度値の最小、最大を探し出し、これを0~255階調に割り振る。これによりダイナミックレンジを有効利用した。

$$p = 255(p_2 - p_{2min}) / (p_{2max} - p_{2min}) \quad (2)$$

ただし、 $p$ : 補正後の投影値、 $p_{2min}$ : 最小値、 $p_{2max}$ : 最大値である。

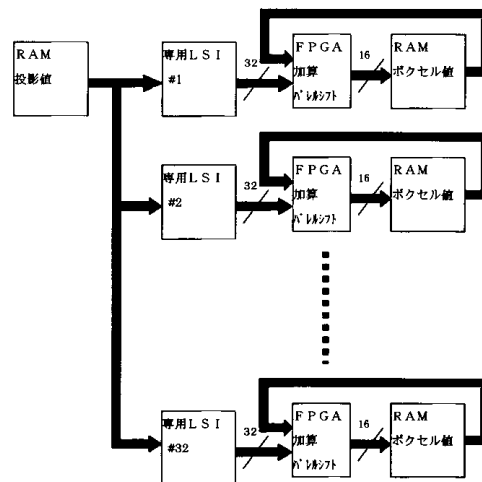


図3 計算ボードのブロック図

### 2-3 超並列計算機の構成

3次元CTの超並列計算装置は、CPUボード1枚と、0.35ミクロン30万ゲートレベルの専用ASIC-LSIを32個搭載した計算ボード7枚から構成され、コンパクトPCラックに実装されている。図3に、計算ボード1枚分のブロック図を示す。計算機全体の入力は、(1)投影データ(1024×1024ピクセル×17投影方向数=17Mbyte)と、(2)係数データ(81個(3byte)×224層×17投影方向数=900kbyte)である。専用ASIC-LSI1個あたり、1層分の再構成計算を行う。1ボクセルを再構成するために、(周辺9×9=81個)の投影データと、対応する係数データとの積和演算を、17方向分(合計1377回)を行う。3byteの係数データと、1byteの投影データを、整数型で積和し、得られた4byteの計算結果を2byteにダウンサイズして出力する。途中の結果は計算ボード上のRAMに一時保存する。FPGAで投影方向毎の加算とベレルシフトによるダウンサイズの機能を実現している。1基板あたり32個ある専用ASIC-LSIへの投影データの転送は、開始時間を少しづつずらして設定し、転送中に他の専用LSIが計算できるように効率を高めた。DSPは計算ボード上でのデータフロー制御を行う。全体の出力は(縦512×横512×高224ボクセル×2byte=)112Mbyteとなる。

### 2-4 可視化ソフトウェアの構築

市販の3次元可視化ソフトウェア「AVS」を使用して、可視化システムを構築した。「read field」、「crop」、「downsize」、「geometry viewer」、「isosurface(等値面形成)モジュール」などのモジュールを接続して、ポリゴンモデルを構築して表示するモジュール設計を行った。

### 2-5 実験試料の作成

光造形装置で樹脂製の疑似実験試料(ファントム)を製作した。ファントムの幾何学的な形状を図4に示す。

## 3 結果

図5に3次元X線CT装置本体の外観を示す。外形サ

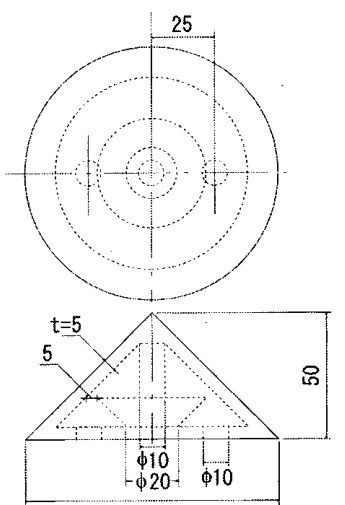


図4 ファントムの幾何学的な形状

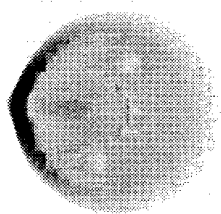


図7 回転傾斜スキャンによるファントムのX線投影像

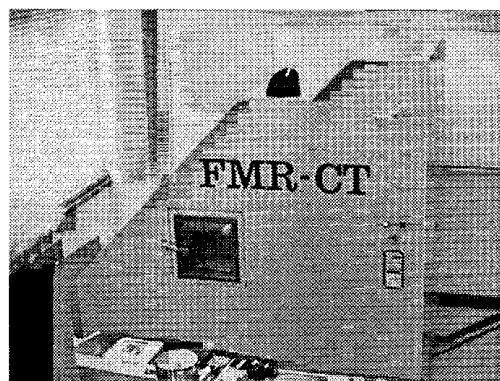


図5 3次元X線CT装置本体の外観

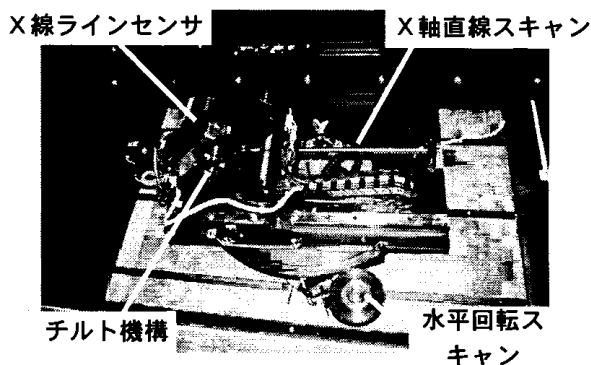


図6 スキャン、チルト機構

イズは、幅1901mm、奥行き1179mm、高さ1901mm、重量は2400kgである。X線の漏洩を防止するために、全面を鉛板(厚さ4mm)でシールドし、特に直接照射される部分は2重にした。さらに装置全体を厚さ1.6mmの鉄製の化粧カバーで覆い、X線シールドと外観美化を図った。また、試料取り出し用のドアには、鉛ガラス(厚さ7mm、2重)を使用し、内部の状態が見えるようにした。X線発生管を最大出力(100kV)で運転している状態で、X線サーベータにより装置全面にわたり漏洩X線を検査したところ、1μSV/h以下であり漏洩は認められなかった。インターロックも正常に動作していることを確認し、安全性に問題は認められなかった。

図6にスキャン機構とチルト機構の外観を示す。マシニングセンターによる筐体側板の一体加工により、3次元CTを行うための十分な位置合わせ精度を実現でき、頑強な3次元CT装置を製作できた。

X線投影に要する時間の内訳を表1に示す。

表1 X線投影に要する時間の内訳

X線ディテクタのライン画像の取り込み時間	5ms
1024ラインの画像取り込み時間	5.12sec
一方向あたりのスキャン時間(往復)	12sec
1回転あたりのスキャン時間 (17方向/360度、原点復帰含む)	230sec
画像補正、対数変換	180sec
1対象物あたりの総スキャン時間	410sec

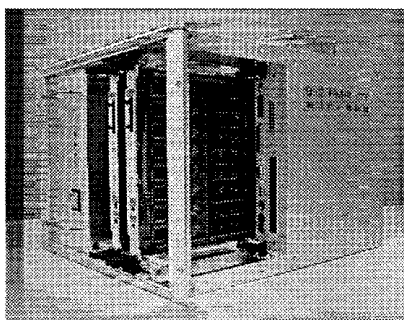


図8 超並列計算機の外観

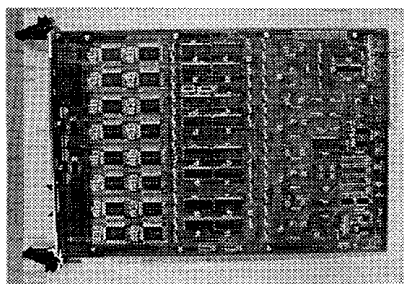


図9 計算ボードの外観

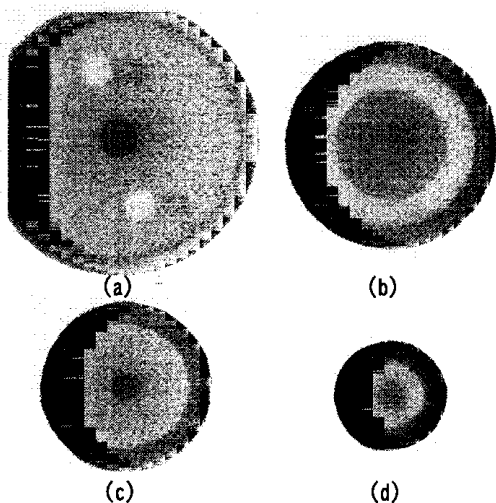


図10 3次元CT画像

(a) 1層目, (b) 80層目, (c) 120層目, (d) 180層目

試作したCT装置で実測した投影画像の1方向分を図7に示す。投影画像収集と補正は良好に機能している。

次に、試作した超並列計算機の外観を図8、計算ボードの外観を図9に示す。これらは、現時点で単体での動作を確認しているが、3次元X線CT装置本体との接続調整の課題がまだ残っている。図7の投影画像セットから、超並列計算機と同様のFMRアルゴリズムを用いて、ワークステーションで計算した3次元CT画像を図10に示す。縦512×横512×高224個のボクセル画像が再現されることを確認できた。

#### 4 考 察

今回開発した装置は、大面積の投影画像を安価に得るために、ラインセンサーを機械的に移動させる方法を採用した。ラインセンサーは、ナイフエッジ状のコリメータを有するなど、投影方向に対して異方性があるため、チルト機構を組み込んだ機械的に複雑な構成となった。

チルト機構を設けても、センサーに対して斜め方向からX線が入射する場合があります。この時は受光効率が70%に低下する。補正により良好に復元されているが、実効的な濃度分解能を犠牲にしている。2次元のセンサーを使用すれば、異方性の問題は解決する。しかしながら、現在においても大面積の2次元X線センサーは非常に高価であり、価格と面積はトレードオフ関係である。

また、試作機ではシステムの整合性にまだ問題が残っている。複数のシステムがLANで接続されているため、データ転送に時間がかかり、システムの相互の同期もとれていない。次の段階では、1つの制御系に組み込むシステム化が必要と思われる。

#### 5 結 論

岩手大学、県内民間企業3社((株)東洋工機、本多エレクトロン(株)、ラピラス電機(株))と共同で3次元X線CT装置を試作した。その装置のCTのアルゴリズムにはFMR原理が用いられ、シールド筐体、精密スキャン機構、制御システム、専用ASIC、超並列計算機、可視化システムが開発された。スキャンは、斜め45度方向からX線を照射しながら、試料とX線受光面を水平に回転させる独自の機構により実現されている。超並列計算機は、224個の専用ASICを、7枚の8層基板に分散させ、さらにDSP、FPGAを搭載して構成されている。

システムの接続調整の作業が若干残っているが、3次元CT装置の基本的機能を確認しており、非常に高いレベルの技術を結集したシステムを製作できた。

本研究により岩手大学と地域中小企業と工業技術センターの間に従来よりも密接な技術コミュニティーが形成されたことを記しておきたい。今後の新製品開発や新技術開発においても有益な技術協力が行われることが期待される。

装置の詳細設計と製作は、(株)東洋工機の佐藤好夫社長、千田繁氏、本多エレクトロン(株)の蛭沢秀一氏、田口陽一氏、ラピラス電機(株)の大島千里氏、奥寺敏幸氏、佐藤健至氏、高梁肇氏 他が行い、装置の具現化が実現した。ファントムの製作は、岩手県立デザインセンターの町田俊一氏、長島宏之氏の協力により行われた。ここに記して心から感謝の意を表する。

本事業は、中小企業事業団の中小企業創造基盤技術研究事業の受託によって実施された。

#### 文 献

- 1) M. Daibo, T. Minamihaba, T. Hasegawa, T. Kumagai, M. Fujisawa and N. Tayama: Developments of CT system using singular value decomposition method, proc. SCAR96 Computer Applications to Assist Radiology, 475 (1996)
- 2) 大坊真洋、田山典男、長谷川辰雄、南幅留男: 2次元標準化モデルと特異値分解によるX線CT画像再構成アルゴリズム、計測自動制御学会論文集、34 (12)、1937 (1998)