

## 3次元CTによる製品検査システムの開発Ⅱ\*

大坊 真洋\*\*、長谷川 辰雄\*\*、南幅 留男\*\*  
熊谷 隆美\*\*

特異値分解法による高速CT法と、FFT法による高精細CT法と、マルチメディア・データベースの技術を組み合わせた内部検査システムを開発した。特異値分解を利用した新しいCT法により高速CTを実現できた。またFFT法によって、細密な映像を再現できた。さらに、CT画像と関連するデータを整理するオブジェクト指向のマルチメディア・データベースを構築した。さらに、新概念の遠隔利用可能なCT装置について検討した。

キーワード：計算機断層法、マルチメディア、データベース、コンピュータ・グラフィクス、インターネット

## Development of Inspection System Using Three Dimensional Computer Tomography II\*

DAIBO Masahiro\*\*, HASEGAWA Tatsuo\*\*, MINAMIHABA Tomeo\*\*,  
KUMAGAI Takami\*\*

This paper describes developed inspection system which consists of three technologies. These are a fast CT using our newly developed singular value decomposition method, a high resolution CT by modified FFT method and an object oriented multimedia database. The Experimental CT images are demonstrated. We also discuss new concept remote accessible CT system.

key words : computed tomography, multimedia, database, computer graphics, internet

### 1 緒言

PL法が施行され、工業製品の信頼性や安全性への要求は、ますます厳しくなっている。その一方では、市場の要求により製品の高機能化が進み、部品の構造が複雑になっている。このような内部構造が複雑な部品は、不良が発生した際に、再度分解して不良内容や原因を調査することが困難であることが多い。従来は、単一方向からX線装置で投影して検査することがほとんどであった。しかし、単一方向からの投影では、内部構造の奥行き情報がないため、欠陥が手前にあるか奥にあるか分からなかった。そこで、奥行き情報を得るために、いろいろな方向から投影して、断面や内部の立体構造を計算するCT（計算機断層法）に注目した。この技術は主に医療分野で病巣の検査等に使われている<sup>1)2)</sup>が、CT装置は、非常に高価なため中小企業で導入することは容易ではない。特に機械部品、電子デバイス、プラスチック部品、農林水産物などの安価な対象物の内部検査に利用す

る場合には、コスト高となり現実的でなかった。

そこで我々は、市販のX線テレビ装置とステップングモータを組み合わせて、CT装置のハードウェアを構成し、その制御プログラムやCT数値計算のプログラムを開発して、安価なCT装置を実現した。さらに、CT装置で得られた断面画像を積み重ねて三次元表示するCG（コンピュータ・グラフィクス）と、画像と関連データを取りまとめるマルチメディアDB（データベース）を設計開発し、これらとCT装置を組み合わせた柔軟で実用性の高い内部検査システムを構築した。さらに、インターネットや電話回線から、このDBにアクセスするシステムも検討した。

この報告では、このシステムの構成と、高速性と高画質の2種類のCT法の原理、それぞれの計算方法で得られたCT画像、コンピュータ・グラフィクスによる画質改善、マルチメディア・データベースの機能について述べる。

\*三次元画像による製品検査技術の高度化に関する研究（東北・北海道ブロック広域共同研究事業）

\*\* 電子機械部

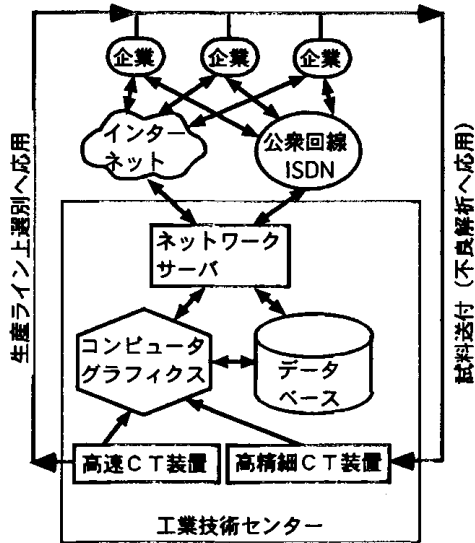


図1 CTによる製品検査システムの全体構成

2 実験方法

図1にCTによる製品検査システムの全体構成を示す。CTで内部検査を行い、CGやDBを利用して処理し、インターネットや電話回線からDBにアクセス可能にする。CTの計算方法として、目的別に2種類の方法を使ったX線CT装置をそれぞれ開発した。一つは、生産ライン上で不良選別の用途に利用可能な高速CT法であり、これは特異値分解<sup>3)</sup>(SVD)を原理とする新しい計算方式<sup>4-7)</sup>であり、岩手大学と共同で開発<sup>8,9)</sup>した。もう一つは、不良解析などに威力を発揮する高精細CTであり、フーリエ変換法(FFT)に改良を加えた方式で実現した。

2-1 特異値分解CT装置

図2に構築したSVD法CT装置の構成を示す。X線の投影画像を撮影するために、X線テレビ装置(東芝製 Tosmicron6125R)を使用した。この装置の解像度は15  $\mu\text{m}$ 、画素数は640×480画素、階調は256、最大管電圧は125kVである。回転装置は、PCのシリアルポートからシーケンサーを介してステッピングモータを制御して実現した。この回転装置は2軸の回転が可能であり、回転分解能は0.1度である。回転装置の回転制御と、画像処理

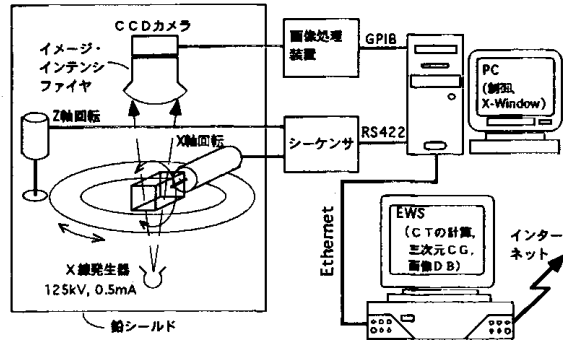


図2 特異値分解CT装置の構成

装置の制御及び投影データの収集プログラムは、LabVIEW(ナショナル・インスツルメンツ製)で開発した。また、このPC上に、X-Window環境を同時に実現して、CTの計算を行うEWSとEtherNetで接続した。

このSVD法CTの数学的な原理はすでに報告した<sup>10)</sup>ので詳細は割愛する。図3に開発したSVD法CTアルゴリズムのブロック図を示す。サンプリングによって帯域制限した空間の各ピクセルが、X線からどれくらいの影響を受けるか(影響係数)を、投影経路からの距離を関数として線積分によって求めた。次に、各ピクセルに対応した影響係数と未知数である各ピクセルの濃度の積の総和に、誤差を加えたものが、実測した投影値と等しくなる一次方程式をたてた。全ての投影角度でX線投影経路毎に、この一次方程式をたて、式の数に投影経路数と等しく、未知数の数がピクセル数と等しい、連立一次方程式を定式化した。この連立一次方程式は、誤差を含み、未知数と方程式の数が一致しないので、特異値分解法によって最小二乗で妥当な解を求めた。次に特異値から構成される対角行列 $\Lambda$ の、各要素の値の大きさの変化を調べて、急激に減少する直前までの特異値を採用し、逆行列 $\Lambda^{-1}$ を計算した。採用しなかった特異値に対応する $\Lambda^{-1}$ の要素は値をゼロとする操作を行った。そして、 $V \Lambda^{-1} U^T$ を計算して疑似逆行列 $C^+$ を求めた。

ここで、 $C^+$ と投影ベクトル $P$ をかけ算すれば、CT画像を再構成できるが、さらに再構成時間を高速化させるために、疑似逆行列の値の大きさを調べて、その絶対値が閾値よりも大きい行列要素だけを選び出すフィルター処

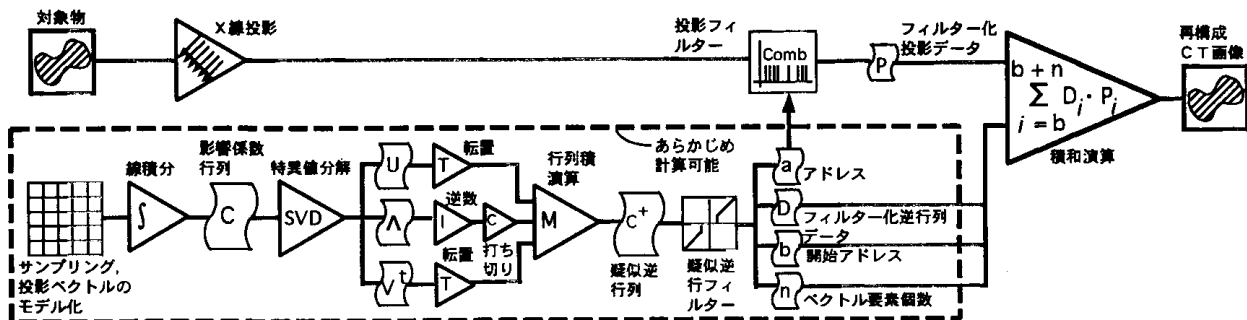


図3 特異値分解CTのアルゴリズムのブロック図

理<sup>11,12)</sup>を行った。疑似逆行列と投影ベクトルのかけ算は、積和演算となるので、疑似逆行列の絶対値が小さい要素は、積和演算結果に大きな影響を与えない。そこで、適当な閾値を選んでフィルター処理すれば、CT画像の劣化をほとんど生じさせずに、計算量を大幅に減少させることができる。投影ベクトルには、採用した疑似逆行列に対応する要素を抜き出すフィルター処理を行った。積和演算とフィルター処理は、EWS (SPECrate\_fp92=4645)で実行した。

2-2 高速フーリエ変換CT装置

FFT法によるCT装置の基本構成は、図2と同様である。X線テレビ装置は(東芝製Tosmicron3000)を使用した。前回までは投影データを、断層毎(走査線毎)に収集し、1方向毎に積分処理を行っていた。このため、積分処理総数は、投影方向数×断層数となり、例えば16枚のCT像の投影データの収集では積分時間が8割を占め、高速化を制限していた。今回改良を加えて投影データ収集を高速化した方法を図4に示す。1方向毎に、全断層の投影データを一度に収集できるようにした。積分回数は投影方向数と同じn回に削減できる。

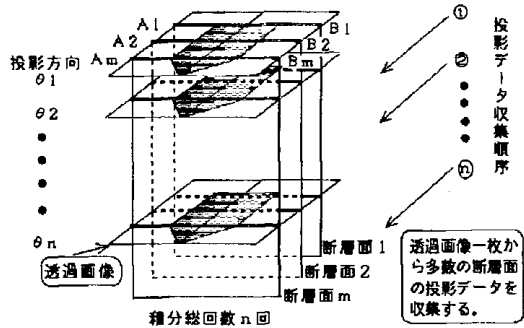


図4 マルチライン投影データ収集法

前回までは、CT像の構成に高画質である理由でFBP法(逆投影法)を採用していた。しかし、この方法は、投影データが増えると急速に計算時間が長くなる問題があり、FFT(高速フーリエ変換)法が見直されている。低画質であった従来のFFT法の欠点を改善する方法が提案<sup>(13,14)</sup>されている。FFT法によるCT像の構成過程では、極座標で得られた投影データのフーリエ変換の結果を直行座標に変換する際に、内挿計算の精度の不十分さが原因で疑似画像が発生する。このため、内挿計算の精度向上を図る方法として、投影データの両端に"0"を付加し、みかけ上投影データを2倍にしてフーリエ変換の周波数精度を2倍にした。また、極座標から直角座標への変換に直線補間を用いた。この2つの方法により、画質の低下を抑えた。図5に、改良したFFT法によるCT像構成の処理方法を示す。

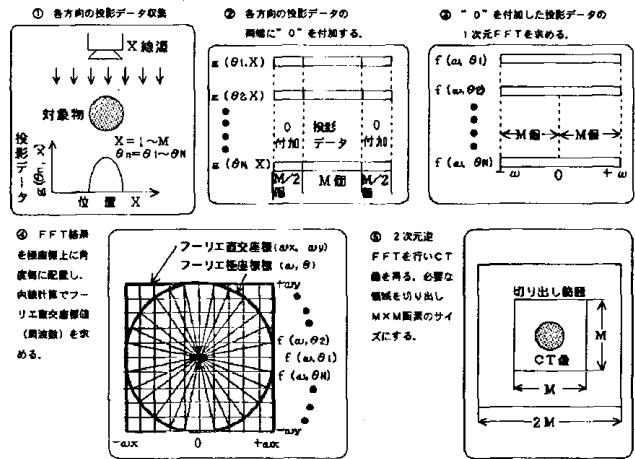


図5 改良した高速フーリエ変換によるCT法

2-3 コンピュータ・グラフィックスとデータ・ベース

前回、3次元の等値面形成やレンダリングの際にノイズがあり、画質が不鮮明であった。今回はこの問題を解決するために、2次元CT画像の濃淡値の差が明確になるような強調処理を行ってから3次元画像化した。

さらに、これらのCT画像をコンテンツとする2種類の画像データベースを検討した。1つは、当センター内のX線装置で測定物を観測し、その場で現測定物と過去の測定物を比較するための画像データベースである。このデータベースは3次元CG(コンピュータ・グラフィックス)と組み合わせているので、3次元CT画像の回転等を、自由に操作することが可能である。もう1つは、各企業から電話回線を利用して当センターにアクセスする場合に対応した画像データベースである。電話回線は通信速度が遅いため、3次元CGのデータを直接通信することが困難である。このため、WWWブラウザとデータベースを組み合わせて、外部からのアクセス可能な画像データベース<sup>15)</sup>を設計した。

また、ユーザーが会話的に作業を進めてデータや画像の処理まで可能とする、インタラクティブなマルチメディア・データベース<sup>16-18)</sup>と、CTとCGに、ネットワーク機能を付加する為の接続形態と、接続後にどのようなことが可能になるかを検討した。

3 実験結果

3-1 特異値分解CT装置

開発したCT装置の制御プログラムにより、PCの画面上のダイヤルやスライドスイッチを、マウスで動かして装置を制御できるグラフィカルな操作環境を実現した。このCT装置の投影データの収集時間は、回転角度刻み値:2度、回転範囲:180度、画像積分回数:64回の条件で、約4min10secであった。この時間は、ビデオレートと画像処理装置の処理能力により制限されており、この装置でのほぼ限界のスキャンスピードである。

新しく開発した特異値分解CT法により再構成したC

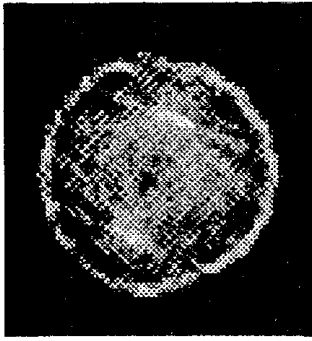
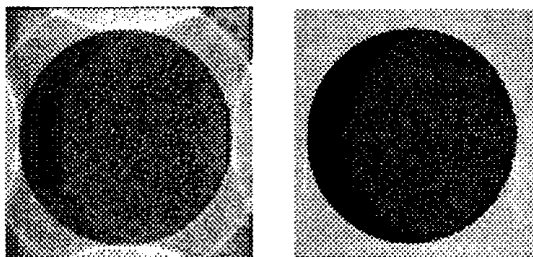


図6 特異値分解CT装置によるCT画像  
(観測物は電解コンデンサ)

T画像を図6に示す。観測した対象物は電解コンデンサである。投影方向: 8 (22.5度毎)、画素数: 64×64の条件で投影した。疑似逆行列を計算する時の特異値の打ち切りは、総ランク数1276のうち特異値の大きい方から500個を採用した。また疑似逆行列の要素をフィルタ処理する閾値は±0.001として、全体の約20%の数の行列要素を採用した。フィルタ処理による画質の劣化は、負の値の行列要素も取り入れることにより改善され、フィルタ処理を行わない画像と同等の画像が得られた。このフィルタ処理によって、再構成時間が1/5に短縮できた。再構成に要した時間は、540msであった。従来法では不可能な高速性を実現できた。

### 3-2 高速フーリエ変換CT装置

前回の報告では、投影データ収集に40分、CT像構成に7分要し、実用性が不十分であった。そこでデータ



(a) (b)

図7 投影データに"0"を追加して疑似画像を除去した結果 (a) 除去前 (b) 除去後

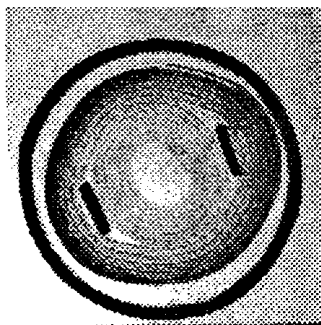


図8 改良したFFT法によるCT画像  
(観測物は電解コンデンサ)

収集方法をマルチライン法に改良し、再構成にFFT法を使用することにより、投影データ収集からCT構成及び表示まで約11分(16枚)にでき、実用上支障のない速度に高速化できた。

FFT法において投影データに"0"を付加した場合と付加しない場合を、同一のサンプル(アクリル丸棒φ8)用いてCT像で比較した結果を図7に示す。"0"付加により疑似画像が除去された鮮明なCT像が得られた。"0"付加が多いほど精度が向上したが、投影データと同数の"0"付加で十分な画質が得られた。

図8に、電解コンデンサ(50V,100μF)のCT画像を示す。渦巻き状の複雑な内部構造を非常に高精細に再現できた。

表1に開発したSVD法とFFT法のそれぞれのCTシステムの性能比較を示す。

項目	FFT法	SVD法
管電圧	25~150kV	25~125kV
焦点	500×500 μm <sup>2</sup>	10×10 μm <sup>2</sup>
観測視野	9×7 mm <sup>2</sup>	60×60mm <sup>2</sup>
投影角度刻み	1,2,3,5度	0.1~2.0,3,4,5度
回転軸数	1軸	2軸
CT枚数	1~32枚	1~480枚
最小スライス幅	20 μm	15 μm
最大CT画像サイズ	512×512画素	64×64画素
データ収集時間	8min/16枚	4.2min/64枚
CT構成時間	2min/16枚	0.6sec/枚

表1 CTシステムの性能比較

### 3-3 コンピュータ・グラフィクスとデータ・ベース

2次元CT画像の強調処理後に、3次元画像化したCT画像を図9に示す。試料はディスクリット・トランジスタである。3本の内部電極を鮮明に表示することができた。

画像データベースは、2つの利用形態(センター内用と外用)に対応できるように設計した。図10、図11にそれぞれのDBの操作画面を示す。センター内用画像データベースは、CGとリンクして動作可能である。

次に、ネットワークの接続形態を検討した結果について述べる。接続形態は、インターネットと併設して、電話回線から直接的にデータベースに接続できる2系統を設

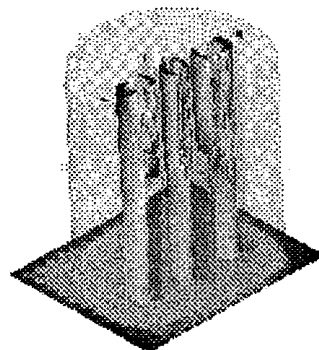


図9 コンピュータ・グラフィクスにより3次化したトランジスタのCT像

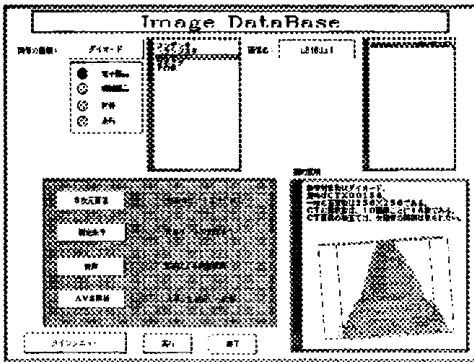


図10 センター内からアクセスする画像データベースの操作画面



図11 センター外からインターネットや電話回線でアクセスする画像データベースの操作画面

けることが理想的である。インターネットは、オープンな環境でアクセスに便利である反面、セキュリティや通信の混雑などが問題となっており、このCT装置が不良解析等に利用されることを考慮すると、通信におけるセキュリティは最も重要な要素である。

また、ネットワーク接続の活用方法を検討した結果、CT装置の遠隔利用に大きな効果が期待できる。ネットワークによって画像データベースにアクセス出来るようになると、企業が観測物を当センターに郵送後、職員が測定結果を画像DBへ登録することによって、企業は直ちに測定結果を見ることができるようになる。また一般的なDBは、データの閲覧や登録しかできないが、インタラクティブなマルチメディアDB<sup>16-18)</sup>をネットワークで開放することによって、ユーザがエッジ抽出や強調処理などの処理を選択すると、自動的に処理が施された画像を返送できるようになる。岩手県は県土が広大なため、企業が当センターへ足を運ぶことが困難であることがあるが、この技術によって出張することなく試験、検査、処理が実現可能になる。

## 4 考 察

### 4-1 特異値分解CT装置

特異値の打ち切りの目安をどこにすればよいか、いろいろな打ち切り値で計算した疑似逆行列を使って、CT画像を再構成して調査した。特異値の値は、およそ600番目付近から急激に小さくなっていった。打ち切りを600番目以降にすると再構成画像は急激にノイズが増加した。この原因は、疑似逆行列を計算するとき、特異値の逆数がかけ算されるので、特異値の値が小さいものほど、疑似逆行列の値に与える影響が大きくなるためである。

一方、Vt行列の行ベクトルを折り畳んで画像化した結果、幾何学的な基本パターンが現れた。このパターンは、行番号が大きくなるほど複雑になり、最後はランダムノイズ的になった。この基本パターンが特異値の逆数で重みづけされて、疑似逆行列に含まれるので、打ち切り値を大きくしすぎると、大きな重みづけされたランダムノイズ的画像が重畳されて、再構成画像がノイズに埋もれることが分かった。いろいろな特異値で打切った疑似逆行列の列ベクトルを折り畳んで画像化したものを図12に示す。適切な打ち切りを行った場合は、投影線に対応した鮮明な経路が現れたが、大きすぎる値で打ち切りを行った場合は複数の経路が現れ、背景のノイズレベルも高くなっている。これらのことから、打ち切りの目安は、特異値の値が大きく一定である領域から値が減少し始める付近とすれば良いことが分かる。

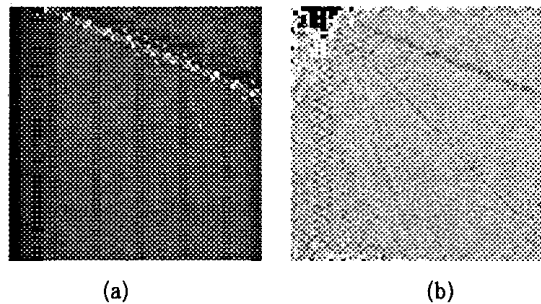


図12 異なる特異値で打ち切りを行った場合の疑似逆行列の列ベクトルを折り畳んで画像化した結果

(a) 打ち切り値=600, (b) 打ち切り値=700

### 4-2 高速フーリエ変換CT装置

投影数と再構成時間の関係について、CT画像サイズをパラメータにして、ワークステーション(16MIPS)でFBP法とFFT法の速度比較を行った結果を図13に示す。FFT法は投影数が90以上(投影角2度以下)であればFBP法より高速になった。特に、投影数が180の時は、FFT法の処理速度はFBP法の約半分になり、この傾向は投影数の増加とともに更に大きくなった。

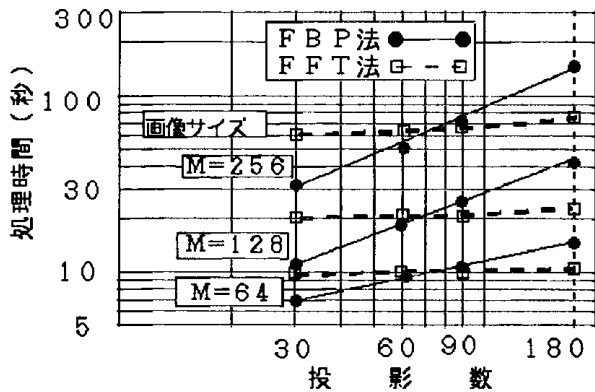


図13 逆投影法(FBP)と高速フーリエ変換法(FFT)のCT計算速度の比較

### 5 結 語

特異値分解法による高速CT法と、FFT法による高精細CT法と、マルチメディア・データベースの技術を組み合わせた内部検査システムを開発した。特異値分解を利用した新しい計算方法により、生産ライン上での全数検査に使用可能な高速CT法を実現できた。また改良を加えたFFT法によって、不良解析の用途に最適な高精細CT法を確立できた。コンピュータ・グラフィクスにより、3次元表示が可能となり、欠陥等の空間位置を特定できるようになった。これらのCT画像と関連するデータを整理するオブジェクト指向のマルチメディア・データベースを構築した。さらに、ネットワークにより、企業からのアクセス可能な、新しい概念のインタラクティブ・マルチメディア・データベースについて検討し、利用形態と開発目標を明確にした。さらに、ユーザーが会話的に作業を進めることができるインタラクティブなマルチメディア・データベースを作成する予定である。

本研究を遂行するにあたり、指導して頂きました岩手大学工学部の田山典男教授、東北工業技術研究所の鷲見新一室長および北海道工業技術研究所の池上真志樹主任研究官に深く感謝いたします。また、ネットワークやデータベース構築に協力して頂いた企画情報部の藤澤充主任研究員に感謝します。本研究は、中小企業庁技術開発研究費補助事業(東北・北海道ブロック広域共同研究推進事業)として実施したものです。

### 文 献

- 1) 隅崎, 小林, 新世代3次元CT診断, 南江堂(1995).
- 2) 岩井: CTスキャナ, コロナ社(1981).
- 3) G. ストラング, 線形代数とその応用, 産業図書, 151-167(1995).
- 4) 田山, 船岡: 緩やかな2次元濃度分布に対する打ち切り

特異値分解による可視化計測, 可視化情報, 14, No.52, 21-27(1994).

- 5) N. Tayama, S. Saito and M. Miura: Fast Visualization for 3D Smooth Density Distribution from a Few Projections, *Third Asian Symposium on Visualization Proc.*, G16, 681-686(1994).
- 6) 田山, 楊: 緩やかな濃度分布の線形計画法による非破壊検査, *非破壊検査*, 43, 41-47(1995).
- 7) 田山: 緩やかな濃度分布に対する最小二乗法による非破壊検査, *非破壊検査*, 43, 435-443(1995).
- 8) 大坊, 長谷川, 熊谷, 藤澤, 南幅, 田山: 少数投影によるCT装置の開発, *第56回応物学会予稿集*, 26a-G-7, 51(1995).
- 9) 大坊, 長谷川, 熊谷, 藤澤, 南幅, 田山: 特異値分解を利用したCT装置の開発, *応物学会東北支部第50回予稿集*, 19B-4, 99-101(1995).
- 10) 大坊真洋, 長谷川辰雄, 熊谷隆美, 藤澤充, 南幅留男: 3次元CTによる製品の検査システムの開発, *岩手工技セ研報*, 2, 1-6(1995).
- 11) 大坊, 長谷川, 熊谷, 藤澤, 南幅, 田山: 特異値分解法によるCT装置の開発, *第43回応物学会予稿集*, 28p-B-2, 53(1996).
- 12) M. Daibo, T. Minamihaba, T. Hasegawa, T. Kumagai, M. Fujisawa and N. Tayama: Developments of CT System Using Singular Value Decomposition Method, *SCAR96 Computer Applications to Assist Radiology*, 475-476(1996).
- 13) 井上: 計算機トモグラフィーにおける画像処理, *信学論*, 63, 600-607(1980).
- 14) 仁木, 水谷, 高橋, 井上: 二次元フーリエ変換法によるCTの高速画像再構成, *信学論*, J66-D-6, 707-714(1983).
- 15) 長谷川, 南幅, 大坊, 熊谷, 藤澤, 田山: X線CT用画像データベースの構築, *第3回画像情報処理学会東北支部予稿集*, (1995).
- 16) 小林, 小池: オブジェクト指向言語C++のクラスライブラリ視覚化に関する研究, *インタラクティブシステムとソフトウェアI*, WISS'93, 25(1993).
- 17) 清水, 荒川: インタラクティブ変更に容易化をめざしたGUIアプリケーション設計法の提案, *インタラクティブシステムとソフトウェアI*, WISS'93, 105(1993).
- 18) 石井, 佐々木, 金田: インタラクティブ・オフィスシステムのための制約型プログラミング手法, *インタラクティブシステムとソフトウェアI*, WISS'93, 121(1993).