

3次元CTによる製品検査システムの開発Ⅲ*

長谷川 辰雄**、大坊 真洋**、南幅 留男**
熊谷 隆美**、多田 三郎**

特異値分解法による高速CT法、FFT法による高精細CT法及びマルチメディア・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。また、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 III

HASEGAWA Tatsuo, DAIBO Masahiro, MINAMIHABA Tomeo,
KUMAGAI Takami and TADA Saburo

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

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

1 結 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。X線による内部検査の必要性は高く、当所のX線テレビ装置は不良品の解析等に多用されている。しかし、従来法はX線装置で単一方向からの投影検査であり、手前も奥も重なり合って観測されるため、奥行き情報が分かりにくい状況にある。そこで、3次元CT画像を得るため、多方向投影による、断面及び内部の立体構造を計算するCT（計算機断層法）に注目し検討を進めた。この技術は主に医療分野で病巣の検査等に使用されるが、CT装置は、非常に高価であり、中小企業での導入は容易でない。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い。

さらに、岩手県は面積が広く、特に冬期間は交通アクセスが容易でなく、X線テレビ装置を開放しても、工業

技術センターまで足を運ばなければ利用できないといった利便性の問題がある。そこで我々は、市販のX線テレビ装置と試料回転装置を組み合わせて、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計算のプログラムを開発し、安価に簡易的なCT装置を実現した。さらに、そのCT装置で得られた断面画像をコンピュータ・グラフィクスにより三次元表示するとともに、インターネット接続で遠隔CT画像提供サービスが可能とする実用性の高い内部検査システムを構築した。

2 実験方法

2-1 システム利用形態

図1に内部検査システムの利用形態を示す。実線は、遠隔利用形態、鎖線は通常利用形態の手順を示している。遠隔利用形態では、企業は、不良解析等の目的でCT検査したい試料をセンターまで送付する。担当職員がCT検査を行い、その結果を画像データベースに保管す

*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

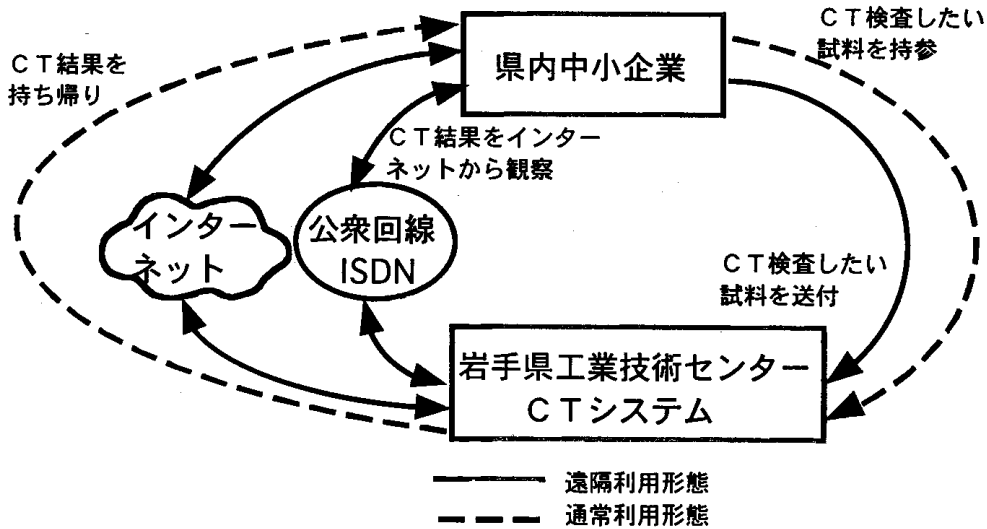


図1 内部検査システムの利用形態

る。DBへ登録済みの企業は、インターネットまたは公衆回線からセンター内のネットワーク・サーバにアクセスしCTの結果画像を観察することができる。

通常利用形態では、試料を企業が持参して、CT検査を行い、検査結果を持ち帰る。この形態でも、CT検査中にネットワークによりCT結果を企業側へ送信することにより、例えば企業側にいる他の技術者の判断を取り入れることが可能となる。

2-2 ハードウェア構成

3次元CTによる内部検査システムはX線テレビ装置、試料回転装置、画像処理装置、EWS2台、PC2台から構成される内部検査システムを構築した。図2にCT装置のハードウェア構成を示す。X線投影画像を撮影するため、市販のX線テレビ装置（東芝製 Tosmicron6125R）を使用した。この装置は125kV、0.5mAまでのX線が出力可能である。そのX線テレビ装

置中に、専用に設計した試料回転装置（2軸制御可能）を挿入し、試料を回転できるようにした。また、試料回転装置をXY移動テーブル上に設置して、回転中心と投影画像中心の位置合わせを可能にするため、試料を固定する回転治具の偏心が80ミクロン以下になるように設計し、その治具の陰影の両端エッジ座標の midpoint から回転中心を算出できるようにした。

X線投影画像は、イメージ・インテンシファイヤ（直径4インチ）で増幅してCCDカメラで撮像し、画像処理装置（日本アビオニクス製 ImageΣⅢ）により時間積算（16～32フレーム）を行い、量子ノイズを減少させた。試料回転装置のステッピングモータは、PC（Power Macintosh 9500）のシリアルポートからシーケンサーを介してを制御し、各回転ステップ（1度～2度）毎に、積算した投影画像の結果を、GPIBボード（National Instruments製PCI/GPIB/Mac）によりPCに取り込んだ。

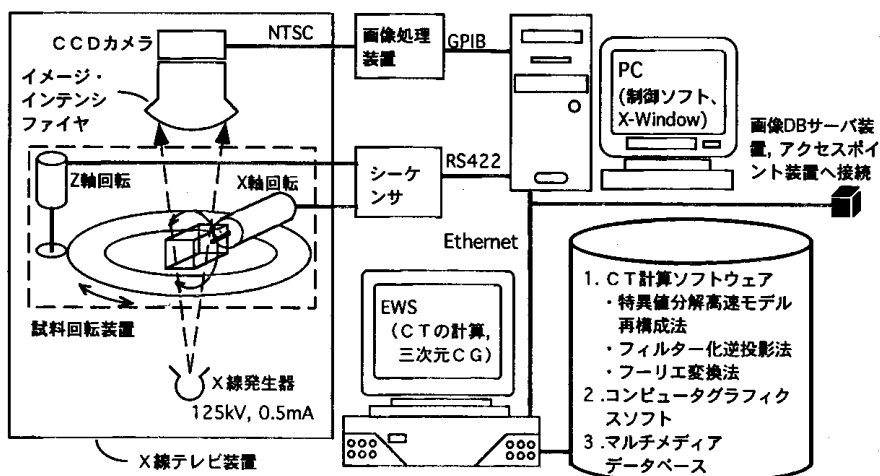


図2 CT装置のハードウェア構成

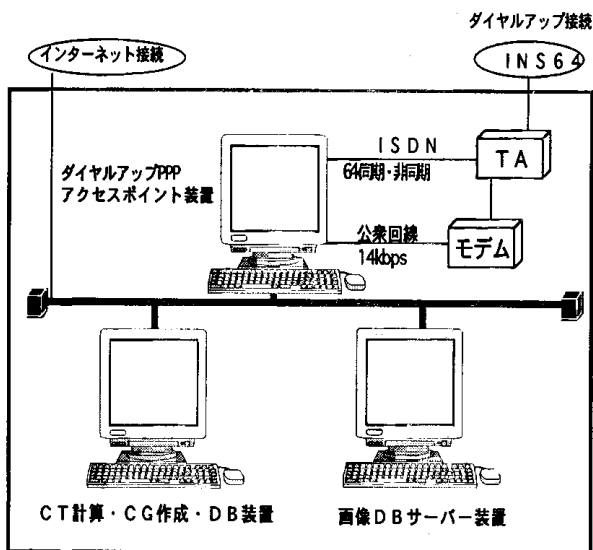


図3 ネットワーク装置のハードウェア構成

CTの計算 (C言語)、コンピュータグラフィクス (AVS社製 AVS)、マルチメディア・データベース (NTTデータ通信製 UniSQL) は、EWS (SPECrate_fp92=4645, SUN Sparc 20相当) で実行し、前述のPCをEWSにX-Window環境 (TENON製 MachTen) で接続した。ネットワークサーバは、DOS/V機 (Micron Pentium pro 200MHz)、画像サーバは、EWS (Silicon Graphics INDY R5000) で実現した。図3にネットワーク装置のハードウェア構成を示す。

2-3 ソフトウェア構成

2-3-1 CT計算ソフトウェア

この研究では、3種類のCT計算ソフトウェアを作成した。岩手大学で提案された特異値分解による高速モデル再構成法と、コンベンショナルな2方法のフィルタ逆投影法と高速フーリエ変換法 (FFT法) である。

2-3-1-a 特異値分解による高速モデル再構成法

岩手大 田山先生の提案した特異値分解による高速モデル再構成法を実現するために図4の計算アルゴリズムを試作した。この計算方法は、最初にモデル化した空間を順問題として線形連立一次方程式にして、その逆問題を特異値分解により逆行列を求めて、直接的に解く方法

である。1次方程式の係数は、投影経路とピクセル間の距離の関数として、各ピクセルの位置を中心を持つ2次元SINC関数を投影経路で線積分して求めた。

$$p = \int \sum \sum \text{SINC}(x) \cdot \text{SINC}(y) \cdot f(x,y) dl \quad \dots (1)$$

ここでpは投影値、f(x,y)は未知の濃度である。

実験に使用したX線装置のX線経路は、扇状に広がるファンビームであり、線積分経路はX線装置の幾何学的形状と光学系に一致するように算出した。線積分範囲は、十分に広い範囲 (計算空間の1.5~2倍) で行い、計算空間の端に位置するSINC関数のテールの線積分が不十分なことに起因する疑似画像を減少させた。この計算を全ての投影経路で行い、行列表現して影響係数行列Cを求めた。

$$P = C F \quad \dots (2)$$

ここでPは投影ベクトル、Fは濃度ベクトルである。次にこの係数行列Cを特異値分解した。

$$C = U \Lambda V^T \quad \dots (3)$$

U, Vは直交基底行列である。特異値から構成される対角行列Λ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Λ⁻¹を計算した。採用しなかった特異値に対応するΛ⁻¹の要素は値をゼロとする打ち切り操作を行い、VΛ⁻¹U^Tを計算して疑似逆行列C⁺を求めた。

$$C^+ = V \Lambda^{-1} U^T \quad \dots (4)$$

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。

$$F = C^+ P \quad \dots (5)$$

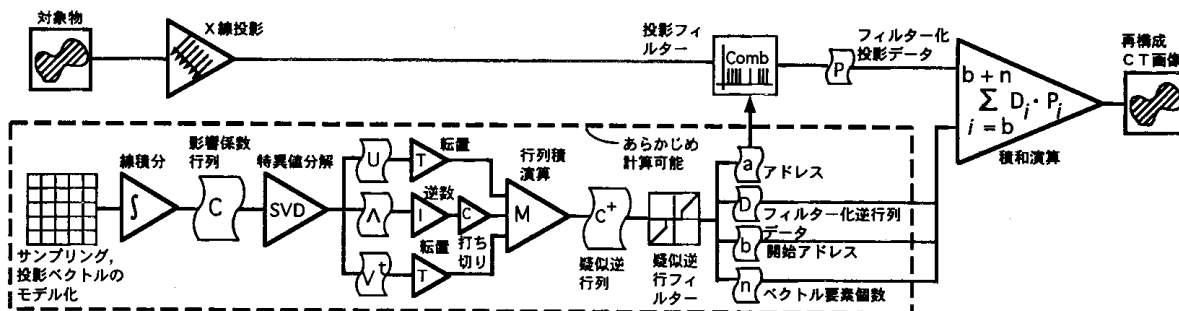


図4 開発した特異値分解による高速モデル再構成法の計算アルゴリズムのブロック図

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、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理を行った。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して、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た。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。

2・3・1・b フィルター化逆投影法 (FBP法)

平滑化フィルタとコンボリューション (畳込み) 演算により逆投影演算処理を行った。この方法は、高画質であるが演算時間を要する問題があった。

2・3・1・c 高速フーリエ変換法 (FFT法)

高画質である理由でフィルター化逆投影法が多く採用されているが、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法が見直されている。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、極座標から直交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。

2・3・2 遠隔CT画像提供サービスソフトウェア

2・3・2・a 画像処理機能の設計

部品内部を詳細に分析検査するために、CT画像の画素強調や拡大縮小を対話的に行う必要がある。これを実現するには、画像の保管・検索が主体だった従来の画像データベース機能に画像処理機能を追加する必要がある。また、これらの機能はネットワークで利用できなければならない。WWWサーバーは一方向的な情報発信だけでなく、ユーザー (クライアント) からの要求データを受信し、プログラムを実行する機能 (CGI: Common Gateway Interface) がある。この機能を使って、ユーザーからの画像処理要求に応えられるWWWシステムを構築した。CGIはHTML (Hyper Text Markup Language) の<FORM>タグにより、クライアントからの画像処理パラメータ・データと画像処理プログラム起動のイベントをサーバー側に知らせる機能である。この機能により、サーバーはクライアント要求を受け取り、画像処理を実行することが可能となる。画像処理結果はサーバー上にファイルとして一時的に保管され、クライアントに表示される。この全体の流れを図5に示す。

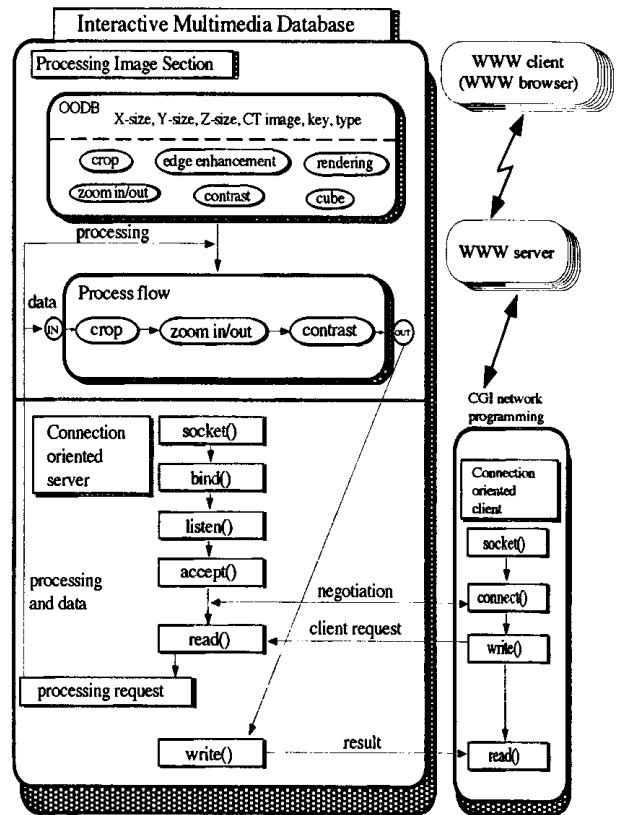


図5 ネットワーク構成図

2・3・2・b ネットワーク画像処理の実現

画像処理プログラムには市販ソフトであるAVSを使用した。これはCT画像に対して、様々な画像処理を対話的に実行可能できる画像処理ツールである。しかし、AVSはウィンドウ型のプログラムであるため、回線 (ISDN回線、一般公衆回線) を利用したネットワークでの利用は非常に時間がかかる。64kbpsのISDN回線で、AVSをリモート起動すると3分以上かかり、使用に耐えられなかった。そこで、AVSのネットワーク機能をバッチで起動させることでこの実行時間の問題を解決した。CLI (Command Language Interpreter) は、前述の機能を実現するAVSの機能である。このCLIをWWWサーバー側で実行させ、その画像処理結果をインターネットのWWWで配信する方法でネットワーク画像処理を実現した。

3 実験結果及び考察

3-1 特異値分解CT装置

構築したCTシステムの外観写真を図6に、試料回転装置の外観写真を図7に示す。観測可能な試料のサイズは最大が直径50mm、長さ70mm、最小は直径2mm、長さ2mmである。

1断面を検査するためのスキャン時間は、2度毎に32フレームを積算して180度回転させた場合190秒となる。CTの計算時間は、256×256画素を90方向

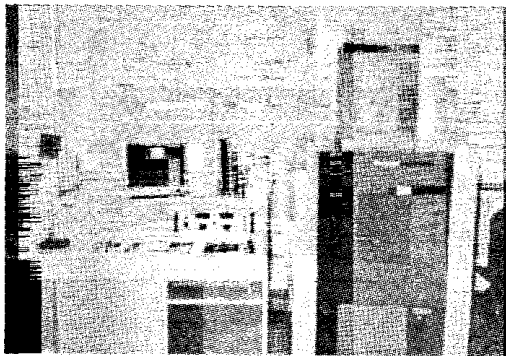


図6 構築したCT装置の外観写真

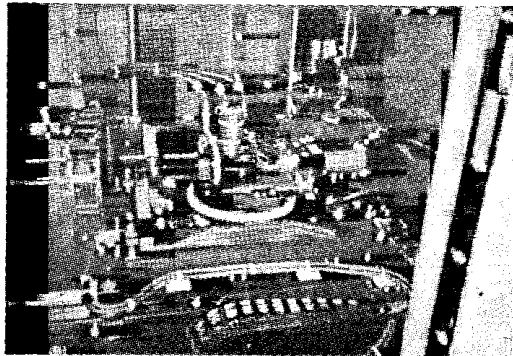


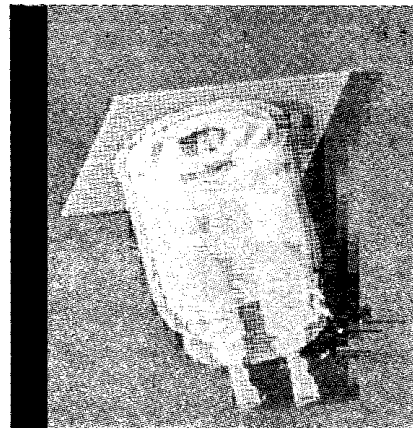
図7 試料回転装置の外観写真

(2度毎)の投影データから1断面を計算した場合、フィルター化逆投影法で5.56秒、高速フーリエ変換法で9.70秒であった。投影方向を増加するとフィルター化逆投影法の計算時間が増加し、投影数が180の時は逆転して高速フーリエ変換法の方が高速になった。これは高速フーリエ変換法では投影方向が少なくなると内挿計算に時間を要するためである。

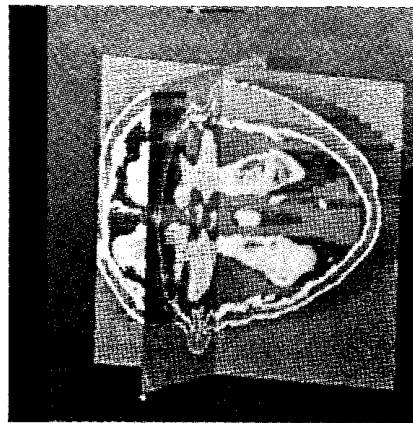
また、投影画像を投影方向毎に512×480ピクセル個で読み込み256×256画素で480断面を一度に計算する3次元CTも実現した。データ取り込み時間は約5分20秒、再構成時間はフィルター化逆投影法で約45分であった。図8に3次元CTの結果の二例を示す。図8(a)は電解コンデンサー、図8(b)はクルミである。

一方、特異値分解による高速モデル再構成法については、岩手大学でシミュレーション実験を行っていたが、実測によるX線投影データから、我々が初めてCT画像の再構成に成功した。図9(a)に再構成画像を示す。

対象物はアクリル製の部品で、寸法を図9(b)に示す。再構成条件は、64×64画素、9方向(投影線:1152本)である。再構成された画像は、サンプリングにより帯域制限され、さらにノルム最小二乗の働きにより、他の方法よりも滑らかになる。補間的要素は、影響係数を計算するときにSINC関数のテールの広がりを含めて線積分しているので、単純な積和演算だけで滑らかな画像の再構成が可能である。投影データを少なくしても、ある程度の妥当な断面を再構成することができ、生産ライン中での工程検査モニター等に期待できる。実効的な計算速度(ファイルI/O除く)を比較すると、64×64画素、



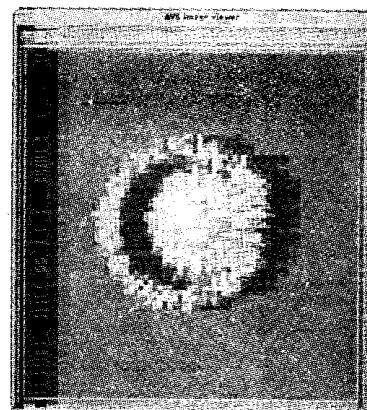
(a) 電解コンデンサー



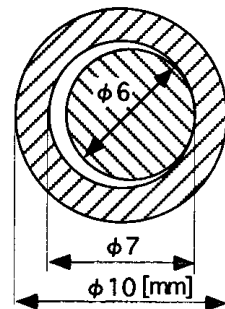
(b) クルミ

図8 フィルター化逆投影法による3次元CTの結果

9方向(20度毎)の場合で、フィルター化逆投影法が91ms、高速フーリエ変換法が450ms、高速モデル再構成法が74msであった。高速モデル再構成法は、最終計算が積和演算だけであるので、ハードウェアによる計算に好都合であり、さらに高速計算ができると考えられる。計算可能な画像サイズは、特異値分解の計算に大量の計算をする必要があるため、計算機メモリーの制限に

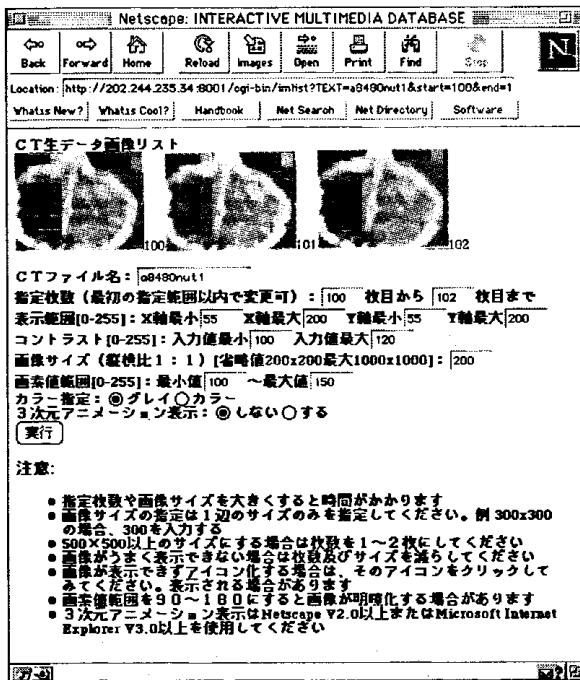


(a) アクリル製の部品



(b) アクリル製部品の寸法

図9 特異値分解高速モデル再構成法による再構成画像



(a) パラメータ入力画面



(b) 画像処理結果

図10 WWWブラウザを利用したCT用画像DB画面

http://202.244.235.34:8001/

より64×64画素、9方向(20度毎)に留まった。サイズの大きい影響係数行列になるほど、値がゼロに近い行列要素が増えるので、今後この特性を利用して、今までよりも大きな行列を特異値分解できる方法を導入していく。

一方、遠隔CT画像提供サービスは試験的にインターネット上で公開しており、CT画像の検索と画像処理が実行できる。利用形態は、通常のインターネットとダイヤルアップによる直接接続の2種類から接続可能とした。これにより、企業はインターネットプロバイダ経由、ISDN、一般公衆回線のどれかを使用しての接続が可能となった。今後、画像処理種類の拡張と企業への開放・展開を行っていく予定である。図11にCT用画像DBの操作画面を示す。図10(a)はWWWブラウザによる画像処理パラメータの入力画面、図10(b)は画像処理結果である。

4 結 言

市販のX線テレビ装置と試料回転装置を組み合わせ、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計算のプログラムを開発して、安価に簡易的なCT装置を実現した。この装置は、「CT装置」として平成7年12月6日に特許願第317686号の申請を行った。さらに、そのCT装置で得られた断面画像をコンピュータ・グラフィクスによって三次元表示するとともに、インターネット接続により遠隔CT画像提供サービスを可能とする実用性の高い内部検査システムを構築した。このことにより、安価にCT装置を実現する

手法を提供することができ、また、ネットワーク上からも開放して利便性を大幅に高めた検査サービスを提供することが可能になった。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、指導していただ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。

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).