

3次元CTによる製品検査システムの開発

大坊 真洋*、長谷川 辰雄*、熊谷 隆美*
藤澤 充**、南幅 留男*

A Development of Inspection System for Manufacturing Mass Product Using Three Dementional Computer Tomography

DAIBO Masahiro*, HASEGAWA Tatsuo*, KUMAGAI Takami*,
FUJISAWA Mitsuru**, MINAMIHABA Tomeo*

We report a status of developing new browsing X-ray CT system for the manufacturing product based on singular value decomposition. This paper presents reconstructed imaging that is obtained only 8 projections and 25 seconds processing time. We also developed a conventional 3D CT system that consists of Filtered Back-Projection and 3D visualization software. By combining with the conventional 3D CT system, this system offers high potential for both speed and precision.

Keyword : 3D-CT, Singular Value Decomposition, A Few Projection, 3D-CG

1 緒言

電子機械関連の工業製品の製造企業では、不良欠陥のない製品を大量に安価に製造しなければならず、X線装置や超音波装置による三次元非破壊内部検査が必要になっている。従来の典型的なCT (Computed Tomography) は、膨大な計算と精密な回転機構を要するため、特殊で非常に高価な装置が必要である。このため従来の典型的なCT装置は、医療などの用途には好都合であるが、非常に安価な電子部品を生産ライン上で全数検査するような用途には、検査コストがかかりすぎるので現実的ではなかった。

内部欠陥の有無を生産ライン上で高速に選別する用途には、高速に計算ができ、回転機構が簡単な少数投影による新しいCTシステムが必要である。少数投影によるCT法は岩手大学の田山グループによって詳細な理論的研究⁽¹⁻⁴⁾が行われている。その指導のもとに我々は特異値分解による最小二乗解を利用した方式を採用して、システム化への応用研究を行っている。このシステムは、画質を多少犠牲にするが、少数方向からの投影で、一般的な安価な装置で高速にCT画像の構成が可能である。

本論文では、高細密用の従来のCT法と高速用の少数投影法の2方法が利用でき、企業への開放が可能な小型のX線装置を用いた三次元CT装置の開発状況について報告する。

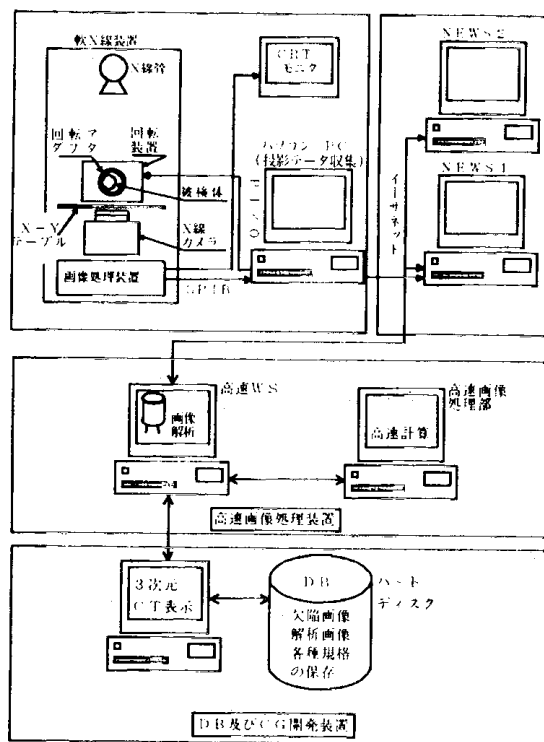


Fig.1 Block diagram of CT system setup.

This system consists of four blocks that are x-ray projection portion, projected data acquirer, CT execution workstation and visualization workstation. Each portion has been connected Ethernet or GPIB.

現在 * 岩手県工業技術センター 電子機械部 岩手県盛岡市飯岡新田3-35-2
** 岩手県工業技術センター 企画情報部 岩手県盛岡市飯岡新田3-35-2

2 研究方法

2-1 FBP法による高精細三次元CTシステムの構成

工業製品における不良解析などの場合には、空間分解能の高い検査が必要となる。このような検査に適した方法としてFBP(Filtered Back Projection)法があり、市販されているCT装置はほとんどがこの方式である。この方法は数十～数百方向からの投影が必要であり、長い測定時間を要するが得られる画質は良好である。

本研究のシステム構成の概要を図1に示す。

本システムでは、軟X線装置 (TOSMICRON3000:東芝製) 内で観測物を回転させながらデータ収集装置 (PC486MR:EPSON) で投影データをGPIBを通して収集し、この投影データを高速ワークステーション (HP720:HP) にイーサネットによって転送して、多数枚のCT像の計算を行い、さらにCG装置 (AS408:東芝) によって三次元CT像を生成できるようにした。三次元化のためのソフトウェアはAVS(Application Visualization System)を使用した。AVSのデータ処理は次のように行った。

- (1) CT画像データからAVSデータ・フォーマットに変換する。
- (2) 三次元配列データから二次元断面を抽出する。
- (3) 二次元配列データから三次元メッシュを作成する。
- (4) データの存在範囲を示すためのワイヤフレームを作成する。
- (5) データの等値面を生成する。
- (6) カラー表示を行うため、カラーマップを生成する。
- (7) 透明度を設定する。

2-2 特異値分解法による高速CTシステム

生産ラインにおける工程検査、出荷前の全数検査などの場合には、高速で回転機構が簡単な検査が必要となる。このような検査に適した方法として少数投影の特異値分解法によるCTについてシミュレーション検討した。さらに実測したX線投影データからCT画像を再構成した。

はじめに、田山グループによって提案されている少数投影アルゴリズムについて簡単に説明する。このアルゴリズムでは測定対象物体の濃度分布が緩やかに変化する標本化モデルを想定し、標本化定理に基づいて透過線投影値と標本点濃度値の関係を連立線形方程式で定式化して、これを特異値分解によって誤差が最小になるように最小二乗解を求めてCT画像を計算している。

標本化定理によると、遮断空間周波数 (ナイキスト周波数) w よりも高い周波数成分を含まない空間においては、 $T=1/2w$ の間隔で標本化した濃度値 $f(x_k, y_j)$

と標本化関数 $\Phi(x, y)$ によって、連続した空間の任意点が完全に再現することができることが知られている。

第2図に、2次元の場合の標本化関数を示す。この関数が各格子点に一つシフトして配置される。

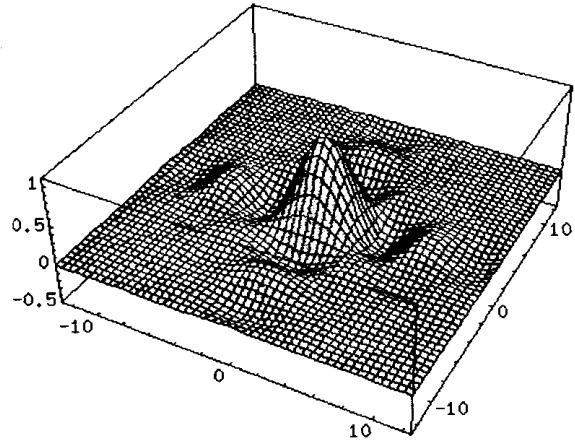


Fig.2 2D sampling function. This function is allocated each into the sampling point.

$$p = \int_0^H \sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^r f(x_k, y_j) \cdot \Phi(x - x_k) \cdot \Phi(y - y_j) \, dh \quad \dots(1)$$

図3にこのアルゴリズムの原理を示す。図3において同心円が規則的に並んでいるのは各格子の標本化関数 $\Phi(x, y)$ である。標本化関数の中心から飛び出ている棒の高さが各標本点での濃度値 $f(x, y)$ である。標本化関数と濃度値の積を透過線に沿って線積分すると投影値 p になる。式(1)は一本の透過線について示している。

透過線積分影響係数 $C_{k,j}$ の各要素には、各標本点での標本化関数の透過線に沿った線積分結果が入力される。 $C_{k,j}$ の物理的な意味は、各標本点が透過線の積分結果 (投影値) にどれだけ影響を与えるかを表わす係数である。

透過線の本数だけ方程式ができるので連立方程式とすると式(2)のように表現できる。

$$p_m = \sum_{n=1}^N C_{mn} \cdot f_n + e_m, \quad \dots(2)$$

$$m = 1, 2, \dots, M, \quad n = 1, 2, \dots, N$$

ここで、

M : 透過線の総数、 N : 標本点の総数、 P_m : 投影値、 C : 透過線積分影響係数、 f : 標本点濃度、 e_m : 誤差
一本の投影線について、項の数が格子の数だけあり、各々の項はある格子点にある標本化関数の線積分結果とその標本点の未知の濃度との積からなり、すべての

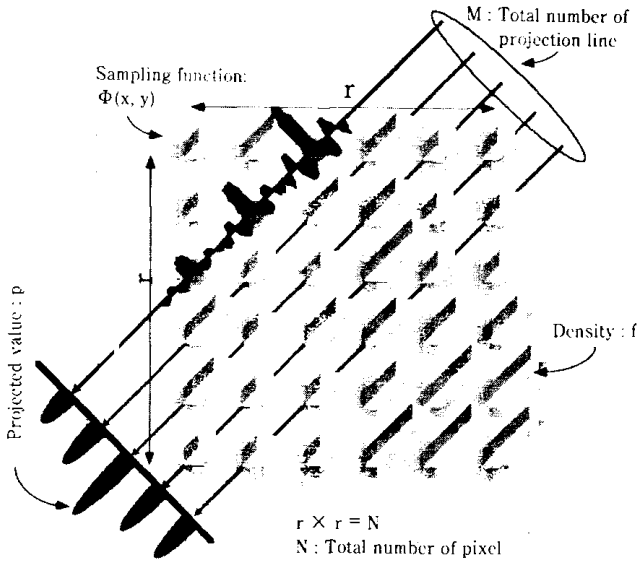


Fig.3 Principle of CT using by a few projection.

項は加算されて一本の投影線の投影値となる。それぞれの投影線について同様な1次方程式ができるので、これらの連立方程式を解いて未知の濃度値を求めればCT画像が構成できることになる。

特異値分解は、不能である方程式 $Ax=b$ に対する最小2乗解求める方法として利用されている。未知数よりも方程式が多い状態は過剰決定の状態であり、この場合は一部の方程式を満足する解が得られたとしても、すべての方程式を同時に満たす解は、測定誤差があるためにできない。このような過剰決定の状態では、測定誤差を考慮して測定値にもっとも近く当てはまるように未知数を決定する必要がある。一方、未知数よりも方程式の数が少ないときは、未知数の間に条件を導入する必要がある。特異値分解を利用すると、このような長方形の逆行列を求めることができるので、連立方程式の妥当な解を計算することができる。

それぞれの投影線について1次連立方程式を解くために、誤差ベクトル e を導入して、ノルムの2乗が最小になるように特異値分解によって解く。

$$P = C f + e \quad \dots(3)$$

$M \times N$ の長方形行列 C を特異値分解によって直交行列 U と V 、対角行列 Λ に分解する。

$$C = U \Lambda V^T \quad \dots(4)$$

式(3)において、 e が最小になるように f を求めるのが最終目的である。

$$\begin{aligned} \|e\|^2 &= \|p - Cf\|^2 = \|U^T(Cf - p)\|^2 \\ &= \|\Lambda V^T f - U^T p\|^2 \end{aligned} \quad \dots(5)$$

式(5)が最小になる条件は式(6)が成立する時である。

$$\Lambda V^T f = U^T p \quad \dots(6)$$

すなわち積分影響係数 C がフルランクならば標本点濃度 f は次式で計算することができる。ランクとは Λ の構成要素である特異値のゼロでない個数である。

$$f = V \Lambda^{-1} U^T p \quad \dots(7)$$

ここで重要なことは式(7)の V 、 Λ^{-1} 、 U^T は、投影方向と投影間隔、対象物体の標準化間隔を与えるだけで、あらかじめ計算しておくことができるので、実験の時は投影値を乗ずるだけで濃度値が再構成できることである。このことは従来になく高速なCT画像の構成が可能であることを示唆している。さらに最小2乗法による最適化を行っているので従来のCTと比較して投影方向を大幅に減少させても比較的良好な画像が得られることが期待できる。

図4に以上説明した行列計算の手法のブロック図を示す。

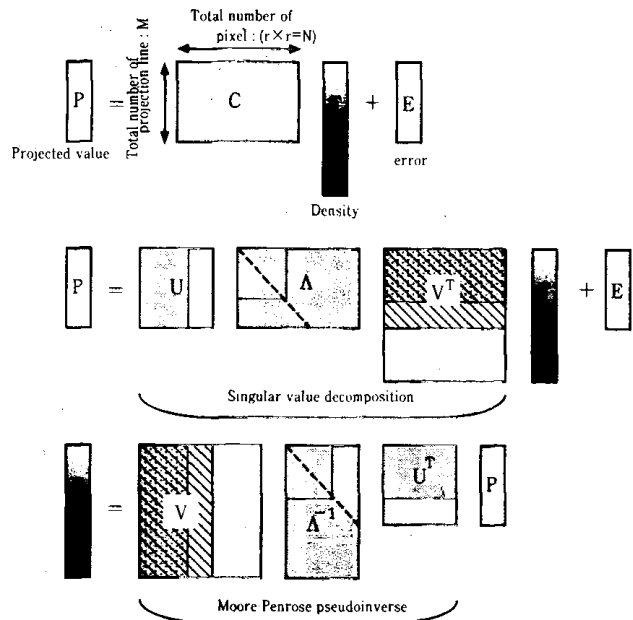


Fig.4 Block diagram of SVD method:

- (a) Calculating matrix C so called "Integration influence coefficient";
- (b) Decomposing matrix C by SVD;
- (c) Calculating Moore-Penrose pseudo-inverse using transposed matrix V , U^T and inverse rectangular diagonal matrix Λ^{-1} . Precomputing Moore-Penrose pseudo-inverse then matrix multiplication by projected data to get density.

シミュレーション、実験ともに、画素数と投影方向に対応した透過線積分影響係数を特異値分解して一般化逆行列 $V^{-1}U^T$ をあらかじめ計算しておき、その一般化逆行列に投影値を乗算してCT画像を構成した。特異値分解のアルゴリズムには、直交変換を行い、三角行列化するハウスホルダー変換を使用した。

シミュレーションでは、 16×16 の画素の原画像を画素長の $\frac{1}{2}$ の間隔で3または4方向から投影した場合の投影データを計算して、それに計算で求めておいた一般化逆行列を乗算して求めた。

また実験では 64×64 画素について、画素長の $\frac{1}{2}$ の間隔で8方向から投影した場合の逆行列をあらかじめ計算しておき、それに実測した投影値を乗算してCT画像を計算した。一般化逆行列の計算方法はフルランクの状態ではなく、いろいろな特異値で打ち切って、打ち切り値よりも小さい特異値の逆数をゼロとした Δ^+ から計算した。いろいろな打ち切り値からなる一般化逆行列を数種類用意して、画質がもっとも良好になる一般化逆行列を採用した。

3 研究結果および考察

3-1 FBP法とコンピュータ・グラフィックスによる3次元CT

観測試料として樹脂封止型の小型NPNシリコントランジスタと鉛筆を用い、管電圧27kV、投影角度2度毎、積分回数16回、フィルター有、CT像16枚の条件での投影データの収集時間は41分であった。CT像16枚の構成時間には7分を要した。鉛筆の時にはフィルター無しで同様の実験を行った。

図5に、トランジスタ及び鉛筆の16枚のCT像の結果を示す。三次元CT像を構成するために必要となる多断層CT像を鮮明に得ることができた。

図5(b)に示した16枚の鉛筆の断面を重ね合わせてAVSによって3次元化した結果を図6に示す。観測角度や閾値、切断面を任意に設定できるので、直感的にわかりやすく、2次元CTではわかりにくかった内部構造を観測することができるようになった。

3-2 特異値分解法による高速CTシステム

図7に特異値分解法による2次元CT画像再構成のシミュレーション結果を示す。図7(a)は原画像であり2つのガウス分布を使用した。画素数は 16×16 とした。同図(b)は、投影角度を0度、60度、120度の3方向から投影した場合の再構成画像である。同図(c)は投影角度を0度、45度、90度、135度の4方向から投影した場合の再構成画像である。従来のCT法では数百もの方向からの投影が必要なのに対して、このアルゴリズムではわずか3~4方向でも基本的な構造を再構成でき、この方法が少数投影で画像を再構成することに極

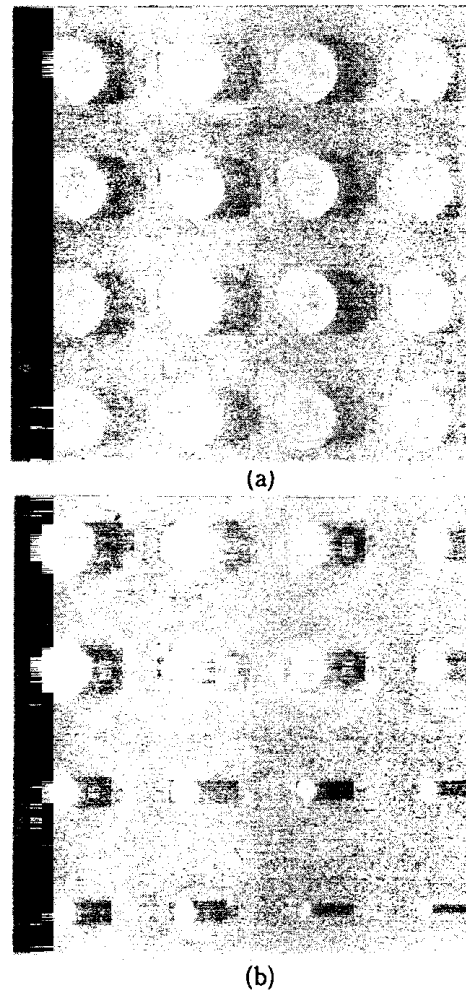
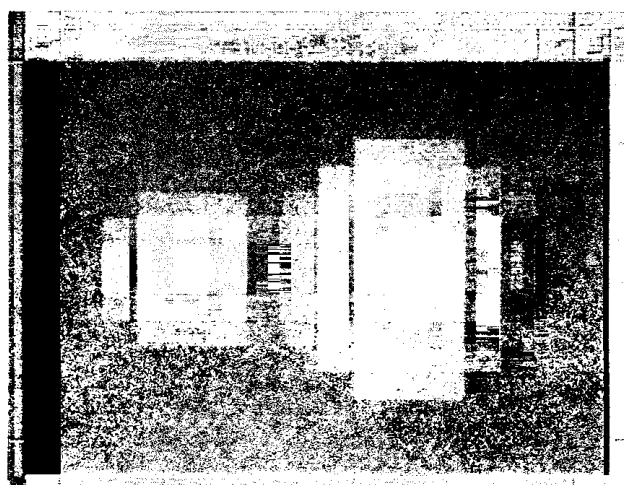


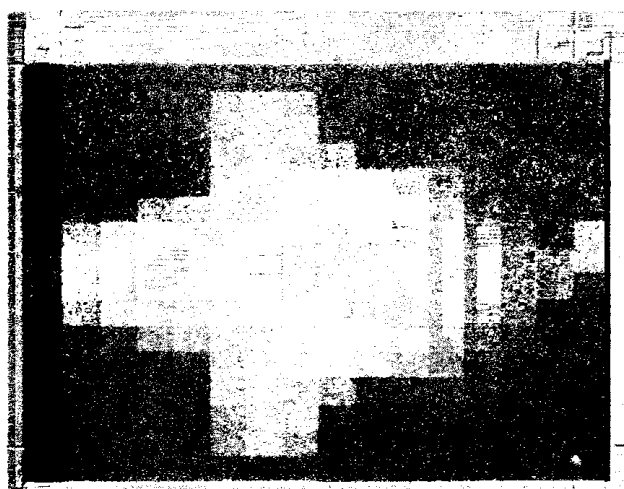
Fig. 5 Reconstructed image by FBP:
(a) 16 cross sections of the transistor by FBP,
(b) 16 cross sections of the pencil by FBP.



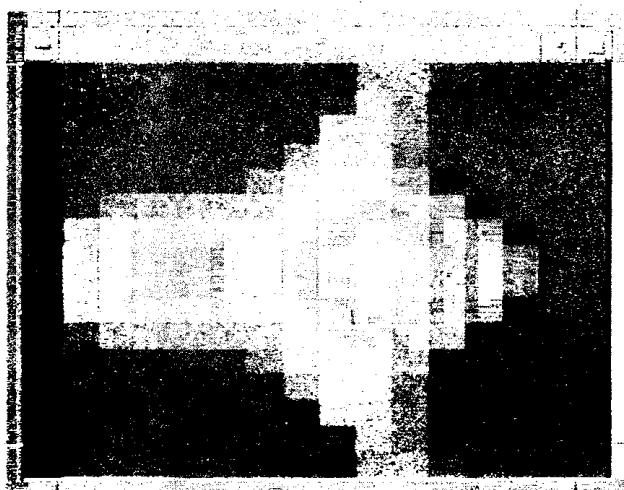
Fig. 6 Three-dimensional visualization of the pencil using AVS. This top view picture has been made by stacked 16 cross sections.



(a) Original



(b) Projected from 0, 60, 120 [degree]



(c) Projected from 0, 45, 90, 135 [degree]

Fig. 7 Simulation result showing two Gaussian distribution reconstructed by SVD method of (a) original image, (b) projected from three directions and (c) projected from four directions.

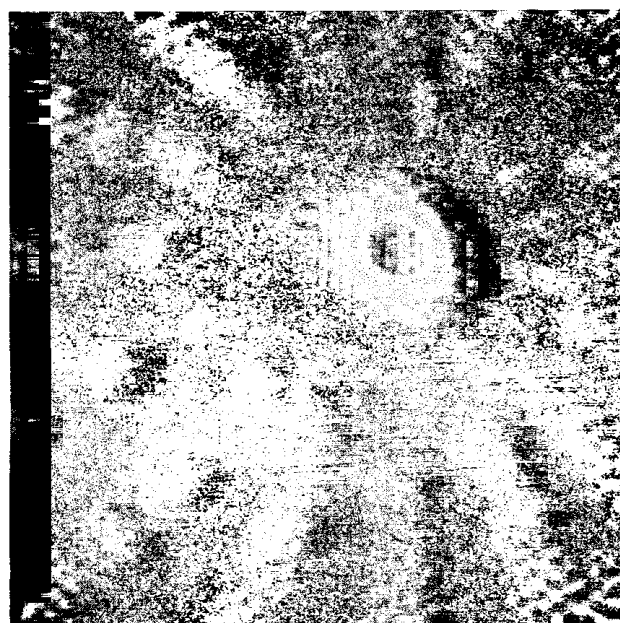


Fig. 8 Reconstructed cross sections of the pencil using by SVD method. The number of pixels and the projected directions are 64 by 64 and 8 respectively. This image has been reconstructed from x-ray experimental projected data and then visualized using AVS. Projection angles are 0, 22, 45, 67, 90, 112, 135, 157 [degree].

めて有効であることが確認できた。若干の画像のゆがみや放射状のartifact (虚像) が投影方向に発生するが、従来不可能であった2~3方向からの投影でCT画像が再構成できた。

鉛筆の投影データから特異値分解法により求めた2次元CT画像を図8に示す。画素数は64×64、投影角度は0, 22, 45, 67, 90, 112, 135, 157 [degree]で8方向から行った。256×256に補間してAVSで表示した。FBP法の結果と比較するとartifactが目立つが、内部構造の概形は十分に観測することができた。一断面のCT像を得るために要した計算時間はわずか25秒であった。artifactが大きすぎるが、投影データを対数化処理して改善する予定である。

4 考 察

FBP法で投影データの取り込み時間が長いのは、投影方向の数だけ観測対象物の回転、投影データの積分処理、データ転送の時間が必要な為であり、多数方向からの投影データを必要とするこの方式の短所である。投影データの取り込み時間がCT処理時間の6倍ほど要しており、投影方向を減少させることがシステム全体の高速化に非常に重要であることがわかる。

特異値分解を使用したCTでは、8方向の投影データ

を合計すると1,284個であり、このデータ数からそれよりもデータ量の多い4096画素の値を得ることができた。FBP法の場合と比較するとわかるように、8方向からの投影データでよいので、投影データの取り込み時間が短縮される分だけでもシステム全体で大幅な高速化が可能であることがわかる。FBP法では90方向からの投影データを使用した。特異値分解法ではその1/17以下の投影データからCT画像を得ることができた。この測定データ数の少なさと、CT画像を得るための最終計算の単純さのため、ハードウェア化が容易であり、超高速なCTが可能と思われる。また観測対象物の回転角度が細かいので、回転機構を単純化でき、生産ライン上に組み込んで、効率的なCT検査装置の実現が可能と思われる。

シミュレーションと実測結果を比較すると、実測の投影データからCT画像を計算した場合には、シミュレーションよりも大きなアーティファクトが発生している。この原因については、回転軸と採用投影データの中心位置が合わないことの偏心や、サンプリング時の想定よりも高い空間周波数の存在、使用する特異値の打ち切りランクなどを考えている。

高い空間周波数の問題については、投影値に低域通過フィルターを通して高周波をカットする方法で対策することを検討している。

また特異値の打ち切りランクについては、シミュレーションでは理想的な原画像があり、それと比較することによって最適の特異値を見つけることができるが、実測では原画像がないのでそれができない。そこで種々なランクの特異値で打ち切った一般化逆行列からなるデータベースを用意し、最も良好なCT画が得られる最大のランクを使用した一般化逆行列を選択できるようなシステムにする必要がある。現在は数種類の一般化逆行列を準備しているが、これをオブジェクトデータベースによって、他のパラメータや画像等と有機的に整理して格納できるようにする予定である。

5 結 言

高細密用のFBP法と高速用の特異値分解法の2つの方法が利用でき、小型のX線装置を用いた三次元CT装置を開発中であり、以下の結果を得た。

- (1) X線装置、データ収集装置、ワークステーション、3次元CG装置がネットワークで接続されたCTシステムを構築した。
- (2) FBP法により高精細なCT画像を得た。

- (3) コンピュータグラフィックス (AVS) による3次元CT表示を実現した。

- (4) 特異値分解法を応用すると、ごく少数方向の投影でもCT像が得られることをシミュレーションによって確認した。

- (5) 特異値分解法によって実際のX線投影データからCT画像を得た。

今後は計算に必要な一般化逆行列や、検査の基準となるJIS規格等をオブジェクトデータベース化し、ISDNのネットワーク回線を介して企業等に技術開放ができるようなシステムに発展させていく予定である。

6 要 約

工業製品の内部検査に使用する目的で開発中の特異値分解法を利用した新しい高速X線CTシステムの開発状況について報告する。わずか8方向からの少ない投影データから25秒で高速にCT画像を得ることができた。またFBP法と3次元可視化ソフトウェアからなる従来方式の3次元CTシステムも開発した。この2つのシステムを組み合わせることによって、高速性と高精細の両方の特徴をあわせもつことができた。

キーワード：CT 特異値分解 少数投影
3次元コンピュータグラフィックス

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および東北工業技術研究所金属素材部基礎物性研究室の鷺見新一室長に深く感謝いたします。

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。

参考文献

- (1) 田山典男, 船岡真: 可視化情報, Vol.14, No.52, pp.21-27 (1994)
- (2) N.Tayama, S.Saito and M.Miura: *Third Asian Symposium on Visualization Proc.*, G16, pp.681-686 (1994)
- (3) 田山典男, 楊学東: 非破壊検査, 第43巻1号, pp.41-47 (1995)
- (4) 田山典男: 非破壊検査, 第43巻7号, pp.435-443 (1995)