

X線フラットパネルセンサを用いる 産業用 3 次元 C T 実験システムの構成

Constitution of Three-dimensional CT Experimental System using X-ray Flat Panel Sensor

○中嶋 賢市郎, 佐藤 譲, 栗田 宏明, 杜 海清, 田山 典男

○Kenichiro Nakajima, Yuzuru Sato, Hiroaki Kurita, Haiqing Du, Norio Tayama

岩手大学

Iwate University

キーワード：画像再構成 (Image Reconstruction), C T (Computed Tomography),
標本化モデル (Sampling Model), ウェーブレット (Wavelet)

連絡先：〒020-8551 岩手県盛岡市上田 3-3-5 岩手大学工学部電気電子工学科 田山研究室
田山 典男 TEL/FAX：(019)621-6382 E-mail：tayama@pipe.elc.iwate-u.ac.jp

1. はじめに

医学分野に革命をもたらした X 線 C T 装置^{1~3)}は、「2 次元あるいは 3 次元の物体は、その投影データの無限の集合から一意的に再現できる」という原理に基づいている。医学分野では、高品質な画像を得ることに最大限の努力が払われており、投影方向数が 400~1000 と非常に多い。そのため、装置は大変複雑で高価になり、画像を再現するまでの時間も長い。

一方、産業分野⁴⁾では、ベルトコンベアの流れ工程で電子部品や自動車部品等の内部不良を検出するために、極少数方向からの投影

データにより、ある程度良好な画像を高速に得ることが要求されている。

本研究室では、産業分野向けの X 線 C T 装置の実現を目標とした研究を行っており、対象空間に標本化モデルを設定し特異値分解法と組み合わせる画像再構成手法として「FMR 法 (Fast Model Reconstruction)」を研究してきた^{5~10)}。しかしながら、この手法による再構成では、未知数である画素値の数が多すぎると、特異値分解の限界を超えてランク落ちが多くなり、良好な再構成画像が得られないという問題があった。

そこで本研究では、画像再構成手法として「WPR 法 (Wavelet Part Reconstruction)」

を新たに提案する. この手法では, 対象空間に多重ウェーブレットによる標本化モデルを設定し, X線投影ビームを一様に透過させる円弧スキャン方式を導入して, 各部分領域毎に特異値分解を行うことによって, 大型画像を部分的に再構成するものである^{11~15)}.

本研究では, ベルトコンベア上を流れる自動車部品にX線ビームを投射して, その投影データからWPR法により部品断面画像の系列を再構成する方法について計算機上でシミュレーションを行った後, 3次元X線CT実験システムの構成について検討する.

2. ウェーブレットによる画像再構成

2.1 ウェーブレット標本化関数

本研究室では, 対象空間に対して, ShannonのSinc標本化関数を用いて標本化定理の成立する標本化モデル物体を使用してきた. しかし, ShannonのSinc標本化関数は, 座標軸上で局在化しておらず, 無限の広い領域まで影響している. 実際に適用する場合には, 有限の領域で近似を行うことになり, 画像再構成の計算に誤差が生じる. もしも領域を狭めることができるならば, さらに投影ビーム数を減らせるので, 再構成の計算量を削減でき, 画像再構成の時間を大幅に短縮できる可能性がある. しかし, ShannonのSinc標本化関数を使用する場合には, 領域を狭めると, 画像再構成の計算誤差が極端に大きくなってしまいうという問題があった.

そこで, 影響領域を局在化する新たな標本化関数を見出すならば, 領域を狭めても, 画像再構成の誤差が増えずに, 投影ビーム数を減らせるので, 計算時間を大幅短縮でき, 画像再構成の高速化を図ることが出来るだろうと考えた. このような考えから, 影響範囲を局在化する関数としてMeyerのウェーブレット¹⁶⁾標本化関数を画像再構成へ導入することにした.

ShannonのSinc標本化関数 $S(x)$ を図2.1に, Meyerのウェーブレット標本化関数 $W(x)$ を図2.2に示す. 以下では, このウェーブレット標本化関数を用いて, 標本化定理を近似的に満たすウェーブレット標本化モデル物体を設定し, 特異値分解に基づく画像再構成の手順を示す.

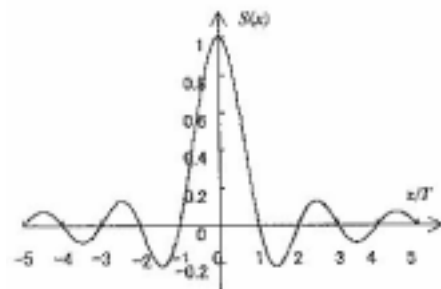


図 2.1 Sinc 標本化関数

Fig.2.1 Sinc sampling function

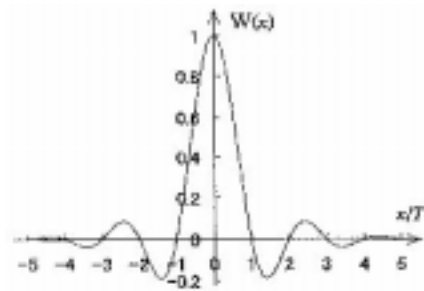


図 2.2 ウェーブレット標本化関数

Fig.2.2 Wavelet sampling function

2.2 標本化モデルの導入

対象とする2次元領域の空間周波数が遮断空間周波数 W_m よりも高い成分を含まないと仮定して, 標本化定理を満たす濃度分布モデルを導入する.

このような標本化定理の条件を満たす対象領域の連続空間においては, 任意の点での濃度値 $f(x, y)$ は $T = 1/2W_m$ の間隔で標本化された各標本点での濃度値 $f(x_i, y_j)$ と前述のウェーブレット標本化関数 $W(x)$ を用いて, 完全に表現できる. これは次式で表される.

$$f(x, y) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} f(x_i, y_j) \cdot W(x - x_i) \cdot W(y - y_j) \quad (2.1)$$

ウェーブレット標本化関数 $W(x)$ は $1/t$ で減衰するので、式(2.1)の無限領域を実際の有限物体領域($n \times n$)で近似すると、上式は次のように表される。

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} f(x_i, y_j) \cdot W(x - x_i) \cdot W(y - y_j) \quad (2.2)$$

これは、任意点における濃度値 $f(x, y)$ が、対象領域の各標本点での濃度値 $f(x_i, y_j)$ の影響を受けており、それら標本点濃度値を用いることで内捜できることを表している。この性質を濃度値影響関係という。

この濃度値影響関係から、透過線の投影値と各標本点との関係式を求める。透過ビームの単位方向ベクトルを (a_x, a_y) 、計測画像領域への突入点や脱出点を (b_x, b_y) 、 (e_x, e_y) とし、突入点から脱出点までの長さを L とすると、透過線分の方程式は l をパラメータとして次のように表される。

$$\begin{aligned} x &= b_x + a_x l \\ y &= b_y + a_y l \end{aligned} \quad (0 \leq l \leq L) \quad (2.3)$$

$$L = \sqrt{(b_x - e_x)^2 + (b_y - e_y)^2}$$

投影値 p は、対象領域の $f(x, y)$ を、ビームに沿って線積分した値に相当するので、次のようになる。

$$p = \int_0^L f(x, y) dl$$

ここで式(2.2)を代入すると、 p は次のようになる。

$$\begin{aligned} p &= \int_0^L \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} f(x_i, y_j) \cdot W(x - x_i) \cdot W(y - y_j) dl \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} f(x_i, y_j) \cdot \int_0^L W(x - x_i) \cdot W(y - y_j) dl \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} f(x_i, y_j) \cdot C_{ij} \end{aligned} \quad (2.4)$$

この C_{ij} は、透過線ビームの方程式(2.3)を用いて

$$C_{ij} = \int_0^L W(b_x + a_x l - x_i) \cdot W(b_y + a_y l - y_j) dl \quad (2.5)$$

と表される。この C_{ij} は、投影線上の濃度値積分値に対して、各標本点 (i, j) での濃度値がどの程度影響を与えるかを表しており、これを線積分影響係数と呼ぶ。ここで留意すべきことは、 C_{ij} が投影線の方程式にのみ依存しており、標本点の濃度値には無関係なことである。従って、様々な投影線に対する C_{ij} を予め計算して蓄えておくことができる。

2.3 特異値分解による再構成法

次に、各投影線毎に投影値に対する方程式を立てると、次のような線形連立方程式が得られる。

$$\begin{aligned} p_m &= \sum_{n=1}^N C_{mn} \cdot f_n + e_m \quad (2.6) \\ m &= 1, 2, \dots, M \quad n = 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

ここで、 M を投影線の総数、 N を標本点の総数とする。 p_m は m 番目の投影線の投影値であり、 f_n は n 番目の標本点濃度値、 C_{mn} は m 番目の投影線に対して n 番目の標本点濃度値が与える影響の程度を示す線積分影響係数である。 e_m は m 番目の投影線に関する誤差であり、投影値の測定誤差やモデルに当てはめるときの偏差を含む。

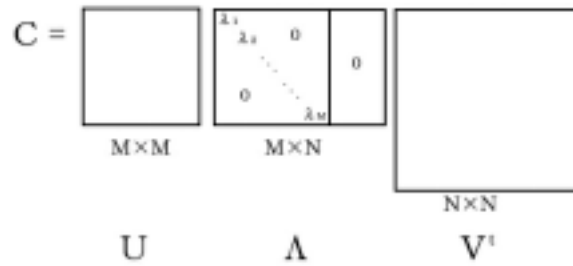
方程式(2.6)を行列で表すと次式のようになる。

$$p = C \cdot f + e \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & \cdots & \cdots & C_{1N} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & \cdots & \cdots & C_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{M1} & C_{M2} & C_{M3} & \cdots & \cdots & C_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ f_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ e_M \end{bmatrix}$$

C は $M \times N$ の長方形行列であり、その m 行 n 列要素が線積分影響係数 C_{mn} である。これを物体投影モデル行列と呼ぶ。この長方形行列 C を、式(2.8)のように $M \times M$ 直行列 U 、 $M \times N$ 対角行列 Λ 、 $N \times N$ 直行列 V^t の積の型に分解して表す。これを特異値分解という。

$$C = U\Lambda V^t \quad (2.8)$$



式(2.7)で表される再構成問題において、最小二乗解を求める問題は、誤差ベクトル $e = p - C \cdot f$ の二乗和 $\|e\|^2$ を最小にする解 f を求める問題に帰着する。

従って、物体投影モデル行列 C がフルランクならば、濃度ベクトル f は次式のように求められる。

$$f = V\Lambda^{-1}U^t p = C^{-1} p \quad (2.9)$$

C がランク落ちしているならば、最小二乗解は一意ではなく、 f は以下のようになる。

$$f = V\Lambda^+U^t p = C^+ p \quad (2.10)$$

即ち、濃度ベクトル f は、あらかじめ物体投影モデル行列 C について特異値分解を行って算出しておいた $C^{-1} (=V\Lambda^{-1}U^t)$ または $C^+ (=V\Lambda^+U^t)$ と、計測された投影値ベクトル p との行列演算だけで再構成できることになる。

3. ウェーブレット部分再構成WPR法

3.1 多重ウェーブレット標本化

画像サイズが大きくなると、未知数である画素値の数が膨大となるので、特異値分解でうまく解くことが難しくなる。つまり新たな課題として、未知数の数が膨大にならないようにする工夫が必要になる。

そこで、多重ウェーブレット標本化と呼ぶ概念を導入する。これは、ウェーブレットモデルをサイズが異なる多重ウェーブレットモデルで近似的に置き換えることによって、未

知数の数を大幅に削減して、特異値分解でうまく解けるようにする考え方である。

ウェーブレットでは、レベルによりウェーブレットのサイズを相似的に拡大できるという特色を持っている。また、そのウェーブレットの位置も任意に移動できる。このレベルによる拡大と、位置移動の性質を用いて、対象画素を中心として近くの画素には、サイズがいちばん小さいレベル0のウェーブレットを割当て配置し、段階的に遠くなるにつれてサイズの大きなウェーブレットを割当て配置する。割当て配置の一例を図3.1に示す。図では、中心からレベルが段階的に0, 1, 2, 3, ...と変化しており、ウェーブレットのサイズが1倍, 2倍, 4倍, 8倍, ...と大きくなっている。このようにサイズが異なるウェーブレットを割当て配置する方法をとると、注目する画素について正確にモデル表現することができ、しかも、未知数である画素値の数を大幅に削減することができる。この方法は、多数のサイズが異なるウェーブレットを割当て配置するので、「多重ウェーブレット標本化」と呼ぶ。

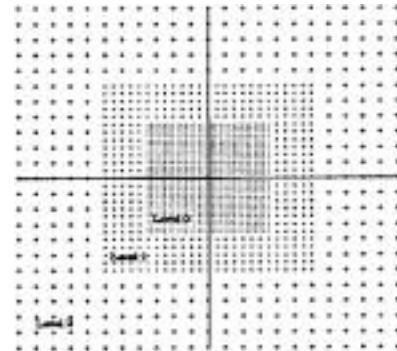


図 3.1 多重ウェーブレット標本点

Fig. 3.1 Multiple wavelet sampling points

3.2 円弧スキャン方式

X線の投影方法として、図3.2に示すように、X線源を円弧状に移動させながら、平行ビームを対象物体に照射し、固定のラインセンサーで投影データを計測する投影スキャン方式を提案する。

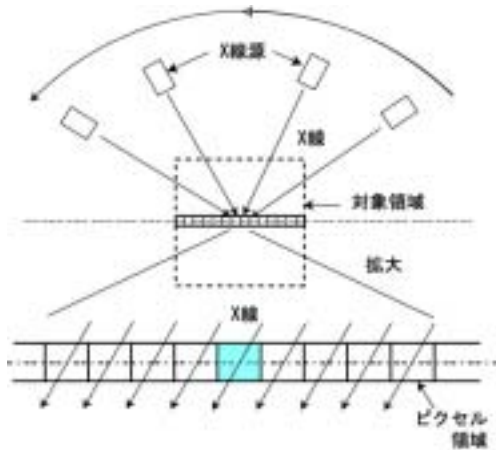


図 3.2 円弧スキャンによる X 線投影

Fig. 3.2 X-ray projection using a circular arc scanner

このような「円弧スキャン方式」を用いる場合には、次に述べるように一様透過の性質が保持されることになる。X線源からラインセンサーの各素子へ向かう平行ビームについて、各ビームの透過状態を考える。画素サイズをラインセンサーの素子間隔とすると、ラインセンサーに平行な画像の水平な層では、各画素において、その画素領域を透過するビームの入り方は同一となる。どの水平層の、どの画素においても、この一様透過の性質が保持されている。

また、投影の方向が変わっても、一様透過の性質は保持される。複数の方向から順に透過する場合には、画素領域に入射した全てのビームに関わる透過状態を考えると、画素の水平層毎に、各画素領域において、全く同じ透過状態となっていることがわかる。そこでこの性質を「一様透過性」と呼ぶ。

前述したように、画像再構成における画素値の計算方法は、その画素を中心とした再構成の影響領域を透過するビームに関して、ビームの投影値とそのビームに関する再構成係数の積和演算を行うものである。

従って、一様透過性が保持されているならば、各層では、どの画素においても、各ビームに関する再構成係数値も同じになるはずである。つまり、各層毎にどの画素においても、

一連の各ビームに関する再構成係数値の並びが同じになるということである。従って、一組の再構成係数値の並びだけで、その層の全画素値が計算できることになる。

3.3 部分再構成

1つの画素に注目してその部分領域で特異値分解を行う「部分再構成」の概念を提案する。それは、1つの画素に注目して、その画素に影響を及ぼす範囲として局所領域を設定し、その部分領域を透過するビームに関して2.2で述べた方程式を立てて、特異値分解を行ってその画素値を計算するという考え方である。この部分再構成の概念に基づいて、予め各層において再構成係数値の並びを算出してそれらを記憶しておけば、投影ビーム値を計測した時点で、即座に全画素を再構成できることになる。

なお、各層での再構成係数値の並びを算出するために特異値分解を行う画素としては、画像の中心線上に位置する画素を想定する。これらの画素について、上述の部分領域を設定して特異値分解を行う。3.2で述べた円弧スキャン方式を用いていけば一組の再構成係数値の並びだけで、その層の全画素が計算できるので、特異値分解の回数は層の数となる。

また、部分再構成については、図2.2より影響する範囲は両側に4程度なので、中心画素を含めて9画素領域でよい。部分再構成で使用する画素の数については、3.1で述べた多重ウェーブレット標本化を用いて未知数である画素値の数が増大しないようにし、特異値分解でうまく解けるように工夫する。

4. 画像再構成のシミュレーション実験

新たに提案した「ウェーブレット部分再構成WPR法」をまとめると次のようになる。すなわち、対象空間に多重ウェーブレットによる標本化モデルを設定し、X線投影ビーム

を一様に透過させる円弧スキャン方式を導入して、各部分領域毎に特異値分解を行うことによって、大型画像を部分的に再構成するものである。

以下では、ベルトコンベア上を流れる自動車部品にX線ビームを投射して、その投影データからWPR法により部品断面画像の系列を再構成する方法についてのシミュレーション実験を行う。

4.1 対象物体と投影方法

断面画像の系列を再構成する対象物体として図4.1のようなゴム製自動車部品の3次元データを用いた。またX線の投影方法としては、一様透過の性質を保持するために、図4.2に示すような傾斜スキャン方式を用いる。



図 4.1 対象物体
Fig. 4.1 Target body

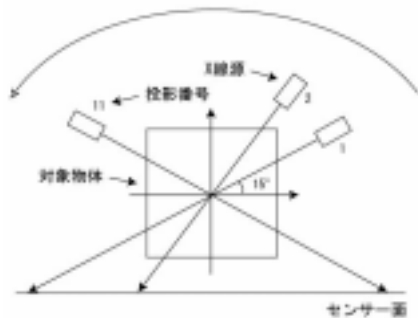


図 4.2 傾斜スキャン方式
Fig. 4.2 Slant scan system

4.2 対象物体の移動に対する工夫

対象物体に対して仰角15度より165度まで、11方向からの投影データを用いて断面画像の再構成を行う。ここで問題となるのは、対

象物体がベルトコンベア上で絶えず移動しているということである。ある角度で投影値を取り込んでから、次の角度で投影値を取り込むまでの間に、対象となる物体が移動してしまう。そのため、断面を再構成するのに必要な11方向からの投影値を集める工夫が必要になってくる。

そこで本研究では、投影値を取り込むラインセンサーに幅を持たせることを考えた。ここでは、次の2条件を満たしていることが必要となる。

- ① X線源が1方向分回転移動する時間と、対象物体が1センサー素子幅だけ移動する時間が同じであること。
- ② センサー素子数と投影の方向数が、整数倍の関係にあること。

これらを満たす図4.3のような条件の下で、投影データを取り込み、再構成したい断面がセンサー部を通り過ぎた後に、各方向毎の必要な投影データのみを選び出して、WPR法により断面画像の再構成を行った。

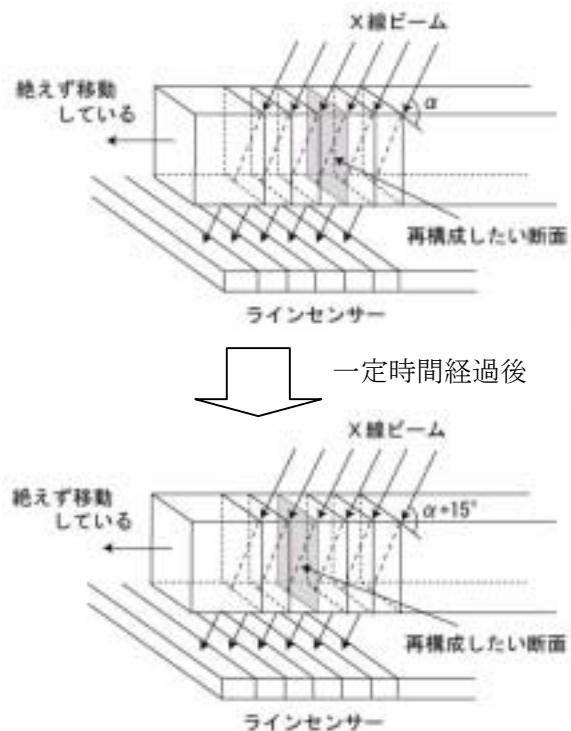


図 4.3 2つの条件を満たす投影
Fig. 4.3 Projection which satisfied two conditions



図 4.4 対象物体の正しい断面画像

Fig.4.4 Right section image of a target body



図 4.5 再構成した断面画像

Fig.4.5 Section image which reconstructed

4.3 再構成シミュレーション結果

対象となるゴム製自動車部品は $1024 \times 1024 \times 25$ の3次元データとした。対象物体の一部における正しい断面画像を図 4.4 に、それを再構成した断面画像を図 4.5 にそれぞれ示した。再構成誤差としての正規化誤差分散値は平均で 0.232 程度であり、非常に良好な再構成結果が得られた。

5. 3次元X線CT実験システムの構成

実験に用いるX線CTシステムの構成を図 5.1 に示す。この装置は、垂直スキャン方式で投影像および投影データを収集するものであり、それらを映像処理ボードを用いてコンピュータに転送し保存する。各構成要素は次の通りである。

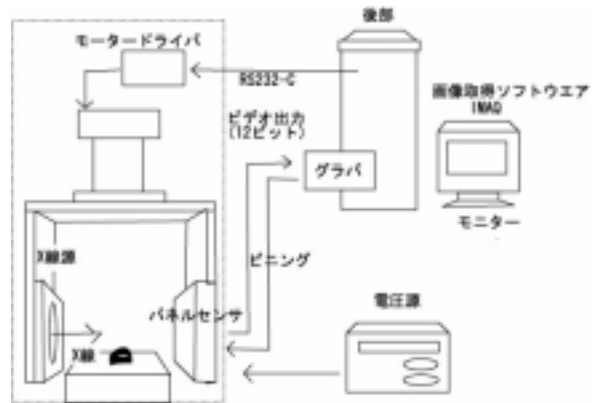


図 5.1 3次元X線CTシステムの構成

Fig. 5.1 Constitution of three-dimensional x-ray CT system

- 軟X線管 I-0602 ソフテックス社
 - ・ X線管電圧 0~50kV
 - ・ X線管電流 0~0.5mA
 - ・ 管球焦点 0.1×0.1mm
- X線フラットパネルセンサ C7942 浜松ホトニクス社

- ・画素サイズ 50 μ m
- ・解像度 8 ライン/mm
- ・有効素子数 2240×2368
- ・出力 デジタル 12bit
- 画像処理ボード IMAQ
 - National Instruments Corporation
- モータドライバ・ステッピングモータ
 - アブソデックス AX シリーズ[Htype]
 - CKD 社
 - ・インターフェイス RS-232C
- PC(AT 互換機)
 - ・OS Windows98 SE
- 計測制御プログラミングソフト
 - Microsoft Visual C++6.0
 - Microsoft Corporation

今回の構成ではX線フラットパネルセンサ C7942 を導入した。このセンサは、非破壊検査、バイオメディカル、X線顕微鏡などのキーデバイスとして開発されたデジタルX線イメージセンサであり、高分解能な 12 ビットのビデオ出力で、高品位な 2400×2400 のデジタル大型画像をリアルタイムで捕らえることができる。さらに、雑音が少なく、小型軽量であり、高解像度で扱いやすいという利点がある。



図 5.2 3次元X線CTシステム
Fig. 5.2 Three-dimensional x-ray CT experimental system



図 5.3 X線フラットパネルセンサ C7942
Fig. 5.3 X-ray flat panel sensor C7942

6. おわりに

本研究では、ベルトコンベア上を流れる自動車部品にX線ビームを投射して、その投影データからWPR法により部品断面画像の系列を再構成する方法についてのシミュレーション実験を行った。

新たに提案した画像再構成手法「WPR法」は、対象空間に多重ウェーブレットによる標本化モデルを設定し、X線投影ビームを一様に透過させる円弧スキャン方式を導入して、各部分領域毎に特異値分解を行うことによって、大型画像を部分的に再構成するものである。

このシミュレーション実験により、ベルトコンベア上を流れる自動車部品にX線ビームを投射し、得られた多くの投影値の中から必要なデータのみを選び出し、11方向からの投影データを用いて、WPR法により目的とする大型断面画像を再構成できることを確認した。

今後の課題は、構成した3次元X線CT実験システムを用いて投影データを収集し、各種の前処理を行って再構成を確認し、評価することである。

参考文献

- 1) 尾上守夫：医用画像処理，朝倉書店（1982）
- 2) 岩井，斎藤，今里（編）：医用画像診断装置，コロナ社（1988）
- 3) H.Hiriyannaiah：X-ray Computed Tomography for Medical Imaging, IEEE Signal Processing, **114**-2, 42/59（1997）
- 4) 江尻正員：画像処理産業応用総覧，フジ・テクノシステム（1995）
- 5) 田山，楊：緩やかな3次元濃度分布に対する投影からのパターン計測，可視化情報学会論文集, **27**-7, 741/748（1991）
- 6) 田山，船岡：緩やかな2次元濃度分布に対する特異値分解による可視化計測，可視化情報学会誌, **14**-52, 21/27（1994）
- 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**-7, 435/443（1994）
- 8) 田山，斎藤，氏家，渡邊：3方向又は4方向投影からの加速器ビーム断面強度分布を高速に画像化する一手法と仕組，画像電子学会誌, **24**-2, 145/152（1995）
- 9) 田山，加藤，大坊，長谷川，杜，栗田：傾斜スキャンによるX線投影データ取込みと3次元画像再構成の実験，画像電子学会誌, **28**-2, 152/160（1999）
- 10) 田山，他：FMR原理による産業用CT装置の開発試験研究，通産省中小企業創造基盤技術研究プロジェクト研究成果報告書, **1, 2, 3**, 1/864（1997-1999）
- 11) H. Du, N. Tayama, M. Daibo, T. Hasegawa and K. Seki : A Computed Imaging System Using Wavelets Sampling Model, Proc.MVA'98, 115/118（1998）
- 12) H. Du , N.Tayama and T.Watanabe : Image Reconstruction Method on Wavelets Sampling Model, Proc. ICARV'98, 1009/1012（1998）
- 13) N.Tayama, H.Du and M.Daibo : Development of Computed 3D Imaging System from a Few Projection, Proc. IASTED SIP'99, 119/123（1999）
- 14) 杜，田山，渡邊，関：V L S I 向き極少数方向投影によるウェーブレット部分画像再構成，画像電子学会誌, **30**-3, 233/241（2001）
- 15) 田山，杜，大坊：産業用実時間3次元CTの画像再構成プロセッサ，計測と制御, **40**-12, 907/910（2001）
- 16) Y. Meyer : Wavelets Algorithms and Applications, SIAM, Philadelphia（1993）