

産業用 CT の並列画像処理プロセッサ VLSI の構成

A VLSI Construction of Parallel Image Reconstructing Processor for Industrial CT

○ 加藤 弘典, 雷 俊, 栗田 宏明, 長田 洋, 田山 典男

○ Hironori Kato, Jun Rei, Hiroaki Kurita, Hiroshi Osada, Norio Tayama

岩手大学

Iwate University

キーワード: 産業用 CT (industry-oriented computer tomography), ウェーブレット (wavelet),

非破壊検査 (non-destructive inspection), 並列処理 (parallel processing)

連絡先: 〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5 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

近年, X線CT(Computer Tomography)に代表されるようなコンピュータを用いた不可視物体の可視化技術^{1~3)}は, 医療の分野のみならず他の分野においても需要が高まってきている. 産業分野⁴⁾の流れ作業工程では, ベルトコンベア上で電子部品や自動車部品等を高速に安価に内部再現して, 非破壊検査を行いたいという要求が多い. 現存の産業用CTは, 装置が高価であり, 検査時間も非常に長く, 全数検査には向かない実状がある.

そこで, 当研究室では, 新しい再構成原理を考えて極少数方向の投影データから, 高速にある程度良好な画像を再構成する手法としてFMR法(Fast Model Reconstruction)^{5~9)}を提案してきた. この方法では, 計測物体空間に標本化定理の成り立つ緩やかな濃度分布モデルを想定している. 前もって大量の演算を行っておき, 画像再構成時には投影値に積和演算を施すことによって高速に再構成画像を得ることができるという特徴を持ってい

る. 本研究では, X線が一様透過する投影スキャン方式を想定して, Meyer ウェーブレット標本化関数¹⁰⁾を導入する. ウェーブレット部分再構成法(Wavelet Part Reconstruction, WPR 法)^{11~15)}に基づいて, 並列画像処理プロセッサのVLSI設計と評価を行う.

2. 高速画像再構成法

WPR 法では, 計測対象物体に標本化定理の成り立つ緩やかな濃度分布モデルを想定している. この標本化定理に基づいて, 任意点での濃度値と各標本点での濃度値との影響関係を活用して, 観測される投影データと各標本点に対する連立方程式を立てる. そして, このラドン変換に対応する“物体投影モデル行列 C ”に対して特異値分解を行い, 一般逆行列 C^+ (再構成影響係数)を求める. これにより画像再構成時には投影値 P と再構成影響係数 C^+ との積和演算のみで再構成可能となる.

2次元画像領域に, 図 2.1 のような Mayer ウェー

ブレット標本化関数を導入する。ウェーブレット標本化関数は減衰の特性から見ると、画像の任意点での濃度値 $f(x,y)$ の影響領域を有限領域($n \times n$)で近似できる。

$$f(x,y) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} f(x_i, y_j) \cdot W(x-x_i) \cdot W(y-y_j) \quad \text{式(2.1)}$$

式(2.1)では、任意点における濃度値が、物体領域の各標本点での濃度値 $f(x_i, y_j)$ から影響を受けることを示しており、それら標本点濃度値を用いて、内挿できることを表している。これを濃度値影響関係という。

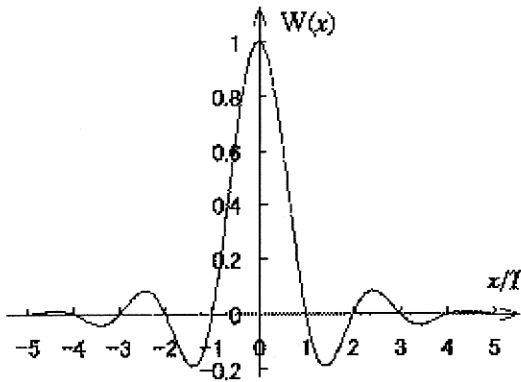


図 2.1 ウェーブレット標本化関数
Fig. 2.1 Wavelet sampling function

この濃度値影響関係から、透過線の投影値 P と各標本点との関係式を求める。透過線の単位方向ベクトルを (a_x, a_y) 、計測対象物体領域への侵入点を (b_x, b_y) 、脱出点を (e_x, e_y) として、侵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。

$$\begin{aligned} x &= b_x + a_x l \\ y &= b_y + a_y l \quad (0 \leq l \leq L) \\ L &= \sqrt{(b_x - e_x)^2 + (b_y - e_y)^2} \end{aligned} \quad \text{式(2.2)}$$

投影値 P は対象物体を、ビームに沿って線積分した値に相当するので、次のように表される。

$$P = \int_0^L f(x,y) dl \quad \text{式(2.3)}$$

この式に式(2.1)を代入すると、投影値 P は次のようになる。

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

この C_{ij} は、透過線の方程式(2.2)を用いて次のように表される。

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

式(2.4)を行列で表わすと

$$p = C \cdot f + e \quad \text{式(2.6)}$$

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

さらに、その行列 C に対して特異値分解手法を行って一般逆行列 C^+ を求めると、次の行列式が得られる。

$$f = C^+ p \quad \text{式(2.7)}$$

f : 濃度値ベクトル
 C^+ : 再構成係数の行列
 p : 投影値ベクトル

すなわち、ウェーブレット標本化関数を用いたWPR法では、その標本点周囲の各投影値 P と再構成係数 C^+ との積和演算によって、標本点の画像値を再構成可能となる。

また、WPR法では、円弧スキャン方式(図 2.2 を参照)を採用し、X線ビームを並行投射しているので、再構成画像内の各水平層ごとに、どの標本点においても一様透過性の性質を持つ。つまり、各層ごとにどの標本点においても、一連の各ビームに対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。よって、一組の再構成係数値の並びだけで、その層の全標本点が計算できることになる。

さらに、一つの標本点に注目して、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、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、即座に全標本点を再構成できることになる。部分領域については、ウェーブレット標本化関数(図 2.1)より、影響する範

囲は両側に4程度なので、中心標本点を含めた9標本領域でよい。従って、画像再構成方程式は、次のようになる。

$$f_{ij} = c_{i1}^+ p_{i(j-4)} + c_{i2}^+ p_{i(j-3)} + c_{i3}^+ p_{i(j-2)} + c_{i4}^+ p_{i(j-1)} + c_{i5}^+ p_{ij} \\ + c_{i6}^+ p_{i(j+1)} + c_{i7}^+ p_{i(j+2)} + c_{i8}^+ p_{i(j+3)} + c_{i9}^+ p_{i(j+4)} \quad \text{式(2.8)}$$

ウェーブレット部分再構成法(WPR法)によって、一標本点を再構成するには、その標本点の左右4ピクセルを通る計9個の標本点投影値と、再構成係数との積和演算となる。また、一様透過性によって、各層ごとの影響係数が統一され、投影方法(方向数、角度、画像サイズ、標本点間隔)さえ決まっていれば、前もって再構成影響係数 C^+ を求め蓄えておくことができる。

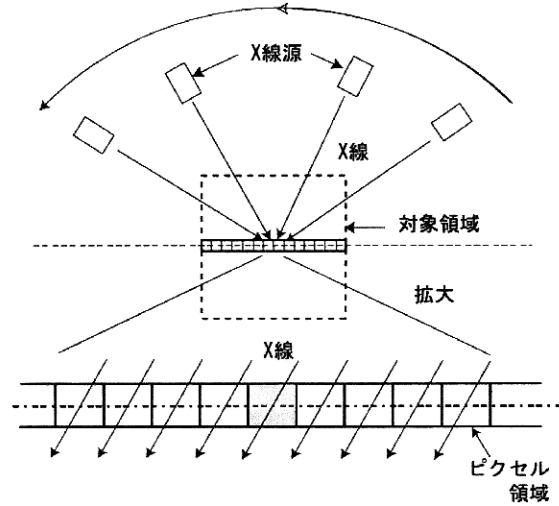


図 2.2 円弧スキャンによる X 線投影
Fig. 2.2 X-ray projection using a circular arc scanner

3. WPR 法に基づく CT 装置

当研究室では、WPR 法に基づいて 3 次元 CT スキャン装置の開発を行ってきた。本研究では、再構成演算装置の VLSI 化について検討しており、VLSI の並列化手法によってリアルタイム画像再構成を目指した並列画像処理プロセッサを提案する。

まず、3 次元 CT スキャン装置の仕組みについて説明する。図 3.1 のような垂直センサー型円弧スキャンでは、X 線ビームとセンサー面は常に垂直を保ちながら、計測物体に対して、11 方向から投影データを採取する。(併せて図 2.2 参照)

これによって、一断面ごとに 11 方向からの再構成値を累算して 2 次元画像を再構成する。そして、各断面の再構成濃度値をホストコンピュータに転送して、AVS システム (Application

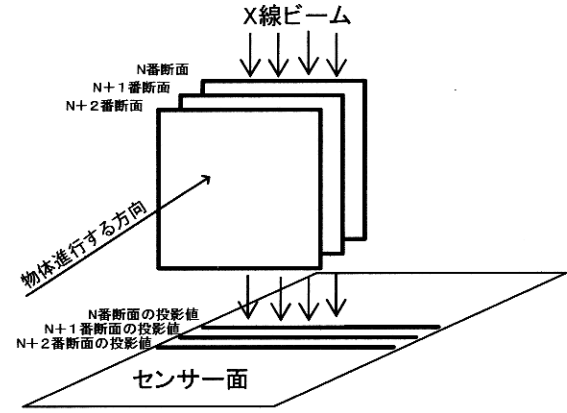


図 3.1 垂直センサー円弧スキャン方式
Fig. 3.1 Vertical sensor circular arcscan system

Visualization System) によって立体画像を表示する。

本論文では、物体の進行軸に垂直な一断面ごとに再構成を行う並列処理方式を採用する。すなわち、一断面ごとに再構成して、再構成濃度値を AVS システムへ転送し、次の断面再構成を開始する。断面内の各層の並列再構成する方法は、並列度に応じた再構成システムを構成できるものとした。(図 3.2 参照)

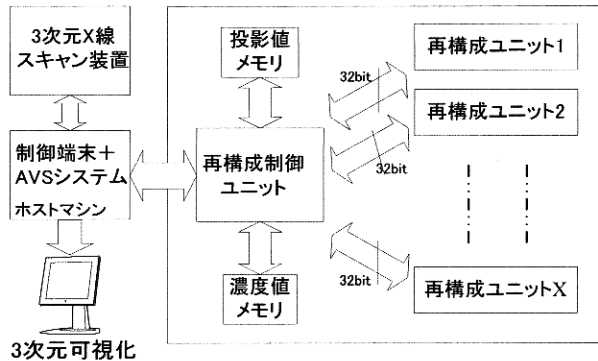


図 3.2 産業用 3 次元 CT システム
Fig. 3.2 3 dimensional CT system for industry

今回は、再構成モデルを $1024 \times 1024 \times 200$ の 3 次元データと仮定する。すなわち、 1024×1024 の 2 次元画像を順番に 200 断面再構成する。並列度は 1 から 1024 まで対応できる。1 例を挙げると、再構成システム内で、256 並列度とするならば、ひとつの再構成ユニットでは 2 次元画像の 4 層分を再構成する、よって、2 次元画像の再構成時間は、4 層分の再構成にかかる時間である。従って、3 次元画像再構成の時間 t は次式で表せる。

$$t = 200 \cdot T \cdot D \cdot \frac{1024}{x} \quad \text{式(3.1)}$$

T : 再構成ユニットで1層分を再構成する所要時間

x : 再構成システムの並列度

D : 投影方向数

ちなみに, $N \times N$ の2次元画像に対してのベルトコンベアの移動速度 S は次式で表せる.

$$S = \frac{1}{T \cdot D \cdot N / x} [\text{Voxel/s}] \quad \text{式(3.2)}$$

4. 並列画像処理プロセッサの提案

式(3.1)により, リアルタイムな再構成をするためには, 並列度 x を上げる方法と, 再構成ユニットの時間 T を短くする方法が考えられる. よって, リアルタイム演算向きの, 最適な並列画像処理プロセッサ(専用 VLSI 再構成ユニット)が必要である.

1 方向分の標本点再構成式(2.8)より, 図 4.1 のようなツリー型並列再構成ユニットを構成できるが, いくつかの問題が生じてくる.

- ① 乗算器に続いて, 複数ステージの足算が行われる. VLSI 内部演算時間が長くなる.
- ② 9 個の乗算器の入力係数が異なる. 投影値を分配するためのレジスタが必要である.

ここでは, 新たな並列累算方式による再構成ユニットの構成方法を提案する. 図 4.2 に, 本方式の標本点再構成演算手順を表す.

再構成演算テーブルを横方向から見ると, 同一の投影値を 9 個の再構成影響係数と掛算している. 従って, 9 個の掛算モジュールを用意して, 同一の投影値をこの 9 個のモジュールに入力して, 個々

の再構成影響係数と乗算する. 従って, 図 4.3 のような専用 VLSI 再構成ユニットを構成できる. 毎回入力してきた投影値と 9 個の影響係数との掛算を行い, その結果を 9 個のレジスタに累算する. そして, 次の積和演算までに待機する. この手順を 9 回繰り返したら, 再構成累算値を VLSI 内部の再構成値メモリへ保存する. こうして, システム演算の 9 ステップ目から第一標本点での再構成累算値を算出し, 10 ステップ目には次標本点での再構成累算値を算出する.

並列累算再構成によって, 乗算器の結果を一つのレジスタに累算される. VLSI 回路で複数の足算を省略されるため, 再構成システムの演算周期を大幅上げられる. また, 並列再構成の乗算器に

Pを注目 →	$P_{n+4} \times C_1$																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														</
-----------	----------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----

リアルタイム3次元画像再構成装置向きである。
ベルトコンベア上の物体内部を、リアルタイムに画像化する手ごろな価格の非破壊検査 CT 装置の実現可能性が期待されている。

参考文献

Device: EPF10k200sfc484-3(Altera)
 $f_{\max}$: VLSI 回路演算の最高クロック周波数
 LCs: VLSI 回路のロジックセル数

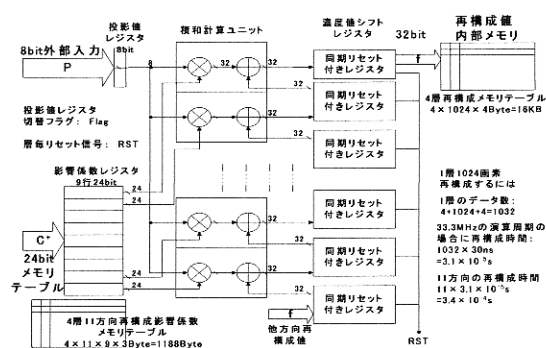
- 1) 尾上守夫：医用画像処理，朝倉書店（1902）
- 2) 岩井，斎藤，今里（編）：医用画像診断装置，コロナ社（1988）
- 3) H.Hiriyannaish：X-ray Computed Tomography for Medical Imaging，IEEE Signal Processing，114-2，42/59（1997）
- 4) 江尻正員：画像処理産業応用総覧，富士・テクノシステム（1995）
- 5) 田山，楊：緩やかな 3 次元濃度分布に対する投影からのパターン計測，可視化情報学会論文集，27-7，741/748（1991）
- 6) 田山，船岡：緩やかな 2 次元濃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，齋藤，氏家，渡邊：3 方向または 4 方向投影から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その仕組み，画像電子学会誌，24-2，145/152（1995）
- 9) 田山典男，他：FMR 原理による産業用 3 次元 CT 装置の開発試験研究，通産省中小企業創造基盤技術プロジェクト研究成果報告書 1，2，3，1/864（1997-1999）

- 10) Y.Meyer : Wavelets Algorithms and Applications, SIAM, Philadelphia (1993)
- 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.ECARV'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, 渡辺, 関 : VLSI 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)

VLSI 内部の 9 台の積和演算モジュールは 33.3MHz の速度で演算を実行する. 1 層の投影値の数は $4+1024+4=1032$ [個], よって 1 方向の 1 層を再構成する時間 T は

$$T=1032 \times 30[\text{ns}] \doteq 3.1 \times 10^{-5}[\text{s}]$$

式(3.1)による, 256 並列度の 3 次元再構成システムで, $1024 \times 1024 \times 200$ の 3 次元標本空間を 11 方向の投影値から再構成する所要時間 t は, $0.27[s]$ となる.



6. おわりに

本論文では、WPR 法に基づく並列画像処理プロセッサとして、並列累算方式を新たに提案した。並列累算方式による再構成ユニットの演算速度はツリー型に比べ 2.5 倍となり、産業用