

# レイベース逆投影による少視点 X 線画像からの 多重包含構造物体のボリューム再構成

李 相善<sup>†</sup> 西川千代<sup>††</sup> 田中弘美<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 株式会社 ハンディソフト

<sup>††</sup> 立命館大学大学院 理工学研究科

現在，生体をはじめとする天体，流体などの 3 次元的広がりをもつ自然界の実体や現象の不可視な内部情報を対話的に立体表示する手法としてボリュームビジュアライゼーションが普及しており，対象の標本データや計測データから高精度の 3 次元ボリュームデータを再構成する問題がボリュームビジュアライゼーションの基本的かつ重要な研究課題である．本論文では，対象を観測した多視点距離画像と，任意方向から透視した少数の多視点 X 線投影画像を入力とし，多視点距離画像の統合により復元した 3 次元外形形状と投影画像間の幾何学的関係と投影画像分析に基づく反復的逆投影により，断面画像列を再構成せずに，直接に 3 次元ボリュームデータを再構成する方法を提案する．

Volume Reconstruction of Multiplex Inclusion Structured Object  
from a Small Set of Multi-view X-ray Images  
Based on Ray-based Back Projection

Sang Sun Lee<sup>†</sup>      Chiyo Nishikawa<sup>††</sup>      Hiromi T. TANAKA<sup>††</sup>

<sup>†</sup>HandySoft Co.,Ltd

<sup>††</sup>Department of Computer Science, Ritsumeikan University

Volume Visualization, which express interactively and three-dimensionally invisible internal structure or information of existing object or phenomenon, has lately attracted considerable attention as new visualization technology. In this field, it is essential and very important subject that reconstruct three-dimensional volume data of a high precision from sampling or measuring data of object. In this paper, we propose an algorithm that does not reconstruct the slice image set but directly reconstruct three-dimensional volume data from multi-view Range images and a small set of multi-view X-ray projection images.

## 1 はじめに

近年の高速大容量の計算資源の発達にともなって，生体をはじめとする天体，流体などの 3 次元的広がりをもつ自然界の実体や現象の不可視な内部情報を対話的に立体表示するボリュームビジュアライゼーション (以下，VV と略す) が新しい可視化技術として注目を集めている．特に医療分野においては X 線コンピュータ断層撮影 (X 線 CT)

の普及により，人体や脳の複雑な内部組織の断層画像から高精細な立体視が可能となり，診断や治療に威力を発揮している [5] ．

一方，人文科学分野においても，不可視な内部情報を記録し可視化することが要求されてきた [2],[6] ．文化財などの貴重な資料 (モノ) の調査や研究のためには非破壊式透視が望ましく，X 線透視投影が広範に用いられている．しかし，モノの

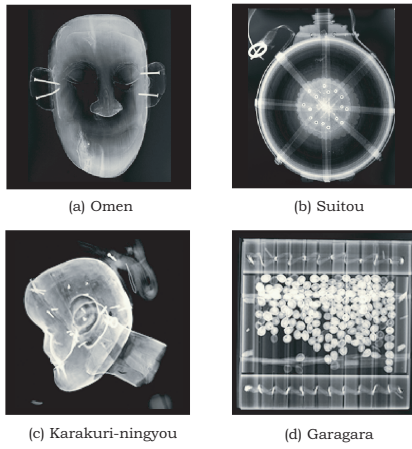


図 1: 人文科学分野における X 線画像データ

移動や運搬が困難であり、X 線の投影方向に制限が多い。このような限定された少数視点の投影画像から 3 次元ボリューム全体を再構成することは、解法に必要な入力が極めて不足した難解な不良設定問題であり、一般的な共役勾配法などの反復法の適用が困難とされている [7],[8]。

そこで本研究では、対象の内部構造を空洞を含む複数物質から成る多重包含構造とし、その 3 次元ボリュームデータを、対象の 3 次元形状を観測した多視点の距離画像と、対象の内部構造を任意方向から透視した少数の多視点 X 線透視画像をから、3 次元形状と X 線投影画像間の幾何学的関係と投影画像分析に基づく反復的逆投影により再構成する方法を提案する。

## 2 人文科学分野における X 線画像データ

人文科学分野において、従来より X 線透視は「モノを壊さずになかをのぞく」ことができる有効な手段であり、モノの記録保存技術研究の目的で、X 線透視調査が行われてきた。図 1 に示すように、X 線画像は外観から見えないモノの内部を写し出し、材質の種類の判定、作成方法・技術の推定、傷みの検出と原因の解明などの様様な目的に用いられている [6]。一般的に、人文科学分野における X 線画像の対象が人工物体であることが多く、特に生体を対象とする医学画像と比較して以下の特徴をあげることができる。

1. モノの全体が単独で撮影されている。
2. モノの内部に空洞が存在する。

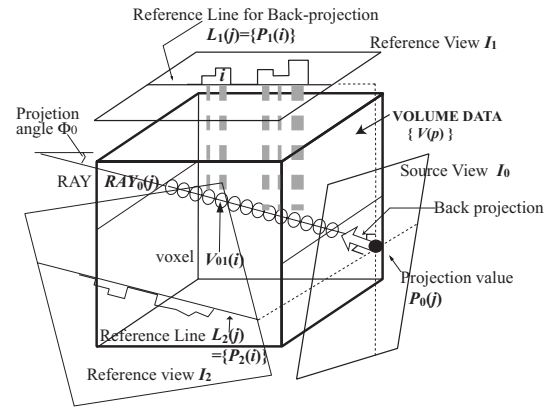


図 2: 多視点 X 線投影画像間の幾何拘束関係

3. 物質層間の境界が投影値の不連続に対応する。したがって、モノの X 線画像は医用画像と比較して、図地分離、境界線抽出、領域分割などの画像解析がより安定であることが期待される。

## 3 多視点 X 線投影画像間の幾何拘束関係

X 線平行透視投影により、任意の異なる  $K$  投影方向  $\{\Phi_k | 0 \leq k < K\}$  から獲得された対象の 2 次元画像を多視点投影画像  $\{I_k | 0 \leq k < K\}$  と呼ぶ。また、対象が占める 3 次元有限空間内の X 線吸収係数の 3 次元分布データをボリュームデータとし、ボクセルと呼ばれる空間構成単位と、非負のボクセル値の集合  $\{v(p) \geq 0 | 0 \leq p < N_V^3\}$  で表す。

図 2 に、対象を含むボリューム空間と多視点投影画像間の幾何学的関係を示す。ボリューム空間において、投影画像  $I_k$  の  $j$  番目の画素  $P_k(j)$  を通り、投影方向  $\Phi_k$  に平行で投影画像  $I_k$  と直交する直線上のボクセル集合をレイ  $RAY_k(j)$  とする。 $P_k(j)$  は、その画素を通るレイ  $RAY_k(j)$  上の各ボクセル値  $v_{kj}(i)$  の積分値を表す。

$$P_k(j) = \sum_i v_{kj}(i) \quad (1)$$

ただし、 $v_{kj}(i) \in RAY_k(j)$ 。

$RAY_k(j)$  は、 $\Phi_k$  と異なる投影方向  $\Phi_{k'} (\Phi_{k'} \neq \Phi_k)$  の投影画像  $I_{k'}$  において、 $RAY_k(j)$  を含み  $I_k$  と直交するボリューム空間の断面との交線上に直線状に投影され、これを  $RAY_k(j)$  の参照線  $L_{k'}(j) (k' \neq k)$  と呼ぶ。図 2 に示すように  $RAY_0(j)$  は  $I_1, I_2$  においてそれぞれ  $L_1(j) = \{P_1(i)\}$ 、 $L_2(j) = \{P_2(i)\}$  のように直線状に投影される。

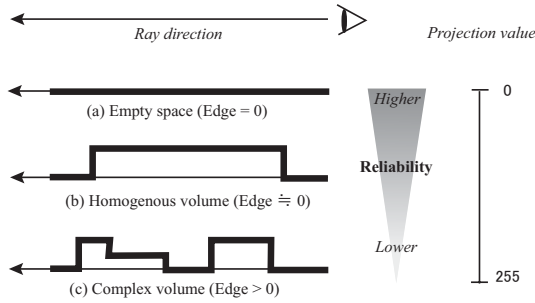


図 3: 参照線の複雑さに基づくレイの再構成の信頼性評価

$I_k$  を基準画像,  $I_{k'}$  を参照画像とすると,  $I_{k'}$  における参照線  $L_{k'}(j)$  上の投影値の変化は,  $I_k$  に直交する  $RAY_k(j)$  を含む各断面の状態を表すから,  $RAY_k(j)$  は他の  $K-1$  投影方向の  $K-1$  本の参照線集合  $\{L_{k'}(j)|k' \neq k\}$  により拘束される.

もし,  $RAY_k(j)$  上の X 線吸収係数の分布が参照線上の  $i$  番目のボクセル値  $v_{kk'}(i)$  は,  $L_{k'}(j)$  上の投影値の総和に対して  $i$  番目の投影値が占める比率  $r_k(i)$  から以下のように推定できる.

$$v_{kk'}(i) = P_k(j) \times r_{k'}(i) \quad (2)$$

$$r_{k'}(i) = P_{k'}(i) / \sum_i P_{k'}(i), P_{k'}(i) \in L_{k'}(j) \quad (3)$$

#### 4 投影値分析に基づくレイ再構成信頼度

式 (2) に基づく逆投影によりボクセル値を推定すると, レイ上の各ボクセルに対し, 異なる  $K-1$  視点の参照線により  $K-1$  個のボクセル値が推定される. このような多数の推定値から最適値を選択し安定なレイ再構成を導くには, 各推定値の信頼度を評価する必要がある. 図 3 に示すように, 逆投影の入力となる投影値の大きさと参照線の複雑さから, 以下が観測される.

図 3 に示すように, 投影値において, (a) 投影値が 0 であれば, レイ上のすべてのボクセル値は 0 である. (b) 投影値が小さければ, レイ上のボクセル値の変化も小さいと推測できる. (c) 投影値が大きいほどレイ上のボクセル値の変化も大きいと推測される. 参照線の複雑さにおいて, (a) 参照線の投影値の連なりが 0 であれば, 物質層を構成しない. (b) 参照線で投影値の変化が小さいければ, 断面は少数の物質層を含む. (c) 参照線が多数の様な投影値の連なり (以下, ランと呼ぶ)

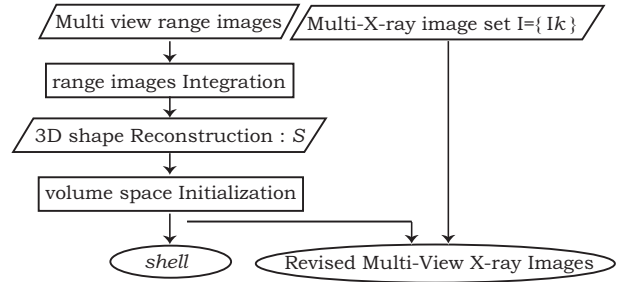


図 4: 前処理の流れ

で構成されているほど, 各ランは各物質層を表しており, 断面は複雑で多数の物質層を含む.

以上より, 投影値  $P_k(j)$  と参照線  $L_{k'}(j)$  を用いた逆投影により推定されたレイ  $RAY_k(j)$  の再構成信頼度  $w_{kk'}(j)$  を次のよう定義する.

$$w_{kk'}(j) = \left\{ \begin{array}{l} 1 : \text{if } P_k(j) = 0 \text{ or } \|L_{k'}(j)\| = 1 \\ 1 - \left( \alpha \times \frac{P_k(j)}{\max[P_k(j)]} + \beta \times \frac{E_{k'}(j')}{\max[E_{k'}(j')]} \right) \\ : \text{otherwise} \end{array} \right\} \quad (4)$$

ただし,  $\max[P_k(j)]$  は  $I_k$  における最大投影値,  $E_{k'}(j)$  は  $L_{k'}(j)$  と平行な直線集合の各直線上の最大エッジ数を表す. また,  $\alpha$  と  $\beta$  はそれぞれ投影値と参照線上の投影値変化に従う重みを表し,  $\alpha + \beta = 1$  とする. (本研究では  $\alpha = 0.5, \beta = 0.5$  とした). したがって, 投影値  $P_k(j)$  が 0 か, またはレイの (未確定部分の) ボクセル数が 1 であれば, その信頼度は 1 と評価する.

#### 5 多視点距離画像からの 3 次元形状復元

X 線投影画像の各投影値を, 対象が占める 3 次元有限ボリューム空間内に正確に逆投影するためには, 投影値分散範囲, つまり, 対象の外形状を忠実に復元することが重要である.

本研究では, 距離画像から抽出される特徴点を対応付けることにより, 多視点距離画像を統合し, 対象の 3 次元形状を復元する. さらに復元された外形を用いて, 各視点の X 線投影像の位置とスケールを補正し, 6 章の 3 次元ボリューム復元のための, 入力画像情報の前処理を行う. 図 4 に, 物体外形形状復元から逆投影までの処理の流れを示す. 各プロセスについて本章で説明する.

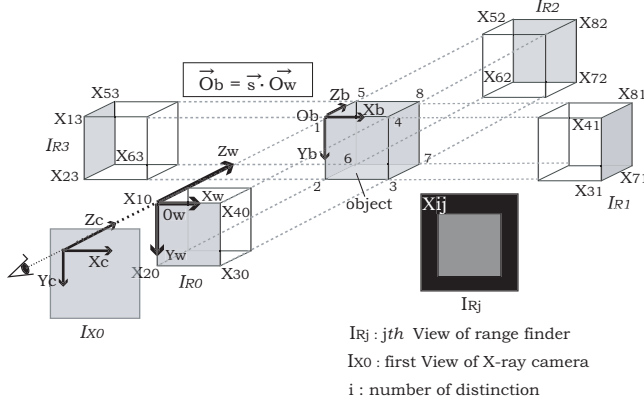


図 5: 多視点距離画像の統合

### 5.1 レンジファインダ座標系と X 線カメラ座標系の拘束関係

図 5 に示すように、本研究では (1) 物体座標系  $(O_b, X_b, Y_b, Z_b)$ , (2) レンジファインダ座標系  $(O_r, X_r, Y_r, Z_r)$ , (3) X 線カメラ座標系  $(O_x, X_x, Y_x, Z_x)$  の 3 つの直交座標系を用いる。レンジファインダ・X 線カメラそれぞれの第一番目の View  $V_{R0}$ ,  $V_{X0}$  の光軸は一致し、物体座標系  $(O_b, X_b, Y_b, Z_b)$  の  $Z_b$  軸に平行であるとする (図 5)。この条件より、2 番目以降の X 線カメラの View 0 のボリューム空間における視線方向ベクトルは一意に決まる。

### 5.2 多視点距離画像の統合

本研究では、各視点の距離画像から抽出される特徴点群を手動で対応付け、レンジファインダの最初の View  $V_{R0}$  の座標系  $(O_r, \vec{X}_{r0}, \vec{Y}_{r0}, \vec{Z}_{r0})$  を世界座標系として、2 枚目以降の距離画像から抽出される特徴点群を世界座標系に変換し、統合させていく。ただし、世界座標系は物体座標系を  $\vec{t}_0$  平行移動  $(O_b, \vec{X}_b, \vec{Y}_b, \vec{Z}_b) = (O_w, \vec{X}_w, \vec{Y}_w, \vec{Z}_w) + \vec{t}_0$  したものである。図 5 に示されるように、 $j$  枚目と  $(j+1)$  枚目の両距離画像に共通の特徴点  $i$  を基に、 $(j+1)$  枚目の距離画像の部分物体座標を世界座標系に変換する [10]。

$j$  枚目の距離画像から抽出された  $i$  番目の特徴点  $X_{ij}$  の世界座標系への変換後座標  $Xw_{ij}$  は

$$\mathbf{Xw}_{ij} = s_j(\mathbf{R}_j \mathbf{X}_{ij} + \mathbf{t}_j) \quad (5)$$

となる。ここで  $\mathbf{R}_j, \mathbf{t}_j$  は  $j$  番目の距離画像を世界座標系に変換するための回転行列と並進ベクトルである。 $s_j$  は  $j$  番目の距離画像のスケールを表す。 $i$  は世界座標系に変換された特徴点番号を表す。ただし、各特徴点は世界座標系において一意に番号付けられている。

統合には、各距離画像に写る部分物体の特徴点  $X_{ij}$  と、 $(j-1)$  番目の距離画像から変換された世界座標系における点  $Xw_{i(j-1)}$  が等しくなるよう、以下の評価関数  $C$  が 0 に収束するように、Levenberg-Marquardt 法 [9] を用いて  $\mathbf{R}_j, \mathbf{t}_j, s_j$  を決定する。

$$C = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \delta_{ij} \| \mathbf{Xw}_{i(j-1)} - \mathbf{Xw}_{ij} \|^2 \quad (6)$$

つまり、 $\mathbf{Xw}_{i(j-1)} - \mathbf{Xw}_{ij}$  が限りなく 0 に近づけばよい。

### 5.3 3次元形状ボリューム表現生成

ボリューム空間に  $N_3^V$  個のボクセル集合のボリュームデータ  $V = \{v^{(0)}(p) \geq 0 | 0 \leq p < N_3^V\}$  を定義し、各ボクセル値 (属性値/フィールド値) を  $\{X \text{線吸収係数 } v(p) = 0, \text{信頼度 } w(p) = 0\}$  とする。さらに、統合により得られた 3次元形状  $S$  をボリューム空間に投影し、 $shell$  を生成する。 $shell$  を構成するボクセル集合のボクセル値を  $\{v(p) = v_s (= shell), w(p) = 1\}$  とする。次に  $shell$  を用いて空の背景空間を検出する。検出されたボクセルのボクセル値を  $\{v(p) = 0, w(p) = 1\}$  として初期化する。

### 5.4 3次元形状を用いた X 線投影画像の補正

X 線投影値を  $shell$  内部に正確に逆投影するために、各 X 線投影画像の位置とスケールを補正する。ボリューム空間における  $shell$  と投影画像の相対位置と絶対スケールを一致させるため、X 線投影画像を補正する。

本研究で用いる X 線投影画像は平行投影画像に補正したものである。位置補正、スケール補正を行うために、X 線投影画像の各 View 方向への  $shell$  の平行投影遮蔽画像を合成する (図 6(a))。まず合成遮蔽画像と X 線投影画像から物体外輪郭 (遮蔽輪郭) 抽出を行い、物体領域の重心  $G_x, G_b$  を求める (図 6(b))。合成遮蔽画像の  $G_x$  に X 線投影画像の  $G_b$  を合わせ位置補正を行う (図 6(c))。次に両

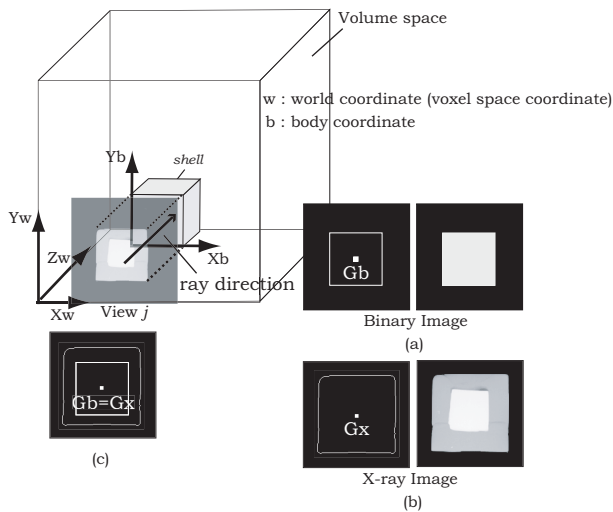


図 6: X 線投影画像の補正処理

画像の外輪郭を照合してスケール補正を行う。しかし X 線投影画像の外輪郭を高精度に抽出することは困難であるため、外輪郭で囲まれた物体領域の面積比を求め、X 線投影画像を  $G_x$  中心に拡大・縮小することにより、合成遮蔽画像の *shell* の外輪郭に一致させる。以上の補正処理を各 View の X 線投影画像に行うことにより、各 X 線画像の投影値を *shell* 内部のボリューム空間に逆投影することを可能にする。

## 6 アルゴリズム

### 6.1 アルゴリズムの概略

本アルゴリズムは、既知の  $K$  投影方向  $\{\Phi_k | 0 \leq k < K\}$  からの投影画像集合  $I = \{I_k | 0 \leq k < K\}$  と *shell* を入力とし、再構成されたボリュームデータ  $V = \{v(p) \geq 0 | 0 \leq p < N_V^3\}$  を出力する。

図 7 に、本アルゴリズムの流れを示す。

まず、step.1 にて、投影画像  $I_k$  の投影値  $P_k(j) = 0$  を通るすべてのレイ  $RAY_k(j)$  上の各ボクセル値を  $v(i) = 0, w(i) = 1$  として確定し、空洞部分を抽出する。

step.2 において、各投影画像の投影値を他視点の投影画像における参照線の投影値の変化に応じてレイ方向に分散し、反復的に逆投影することによりボリュームデータの近似解を推定する。

step.3 において、シードボクセルを抽出し、投影画像における近傍の投影値の類似性とボリューム

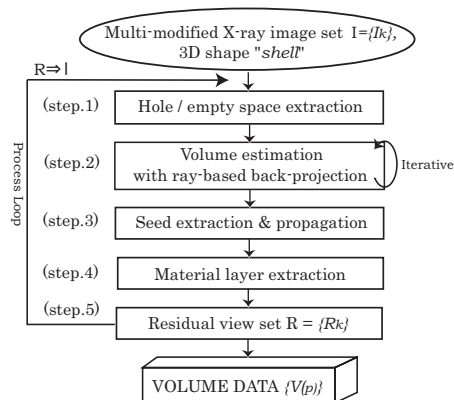


図 7: レイベース逆投影によるボリューム再構成

空間における推定値の類似性を基に、シードボクセルを近傍へ伝播し、step.4 において、物質層を抽出する。

step.5 において、入力投影画像から、抽出した物質層を除いた各視点の残差投影画像  $\{R_k\}$  を算出し、次ループの入力投影画像に用いる ( $R \Rightarrow I$ )。

以上の step.1 から step.5 までの処理ループを残差投影画像の全画素値が 0 になるまで繰り返し、対象の多重包含構造を表層から内部層へ順次抽出し、再構成を完成させていく。

図 8 に、レイベース逆投影により、2 視点の 1 次元投影データ  $\{I_k, I_{k'}\}$  から、2 次元画像を再構成する過程を示す図 8 の各番号は図 7 の各ステップを表す。まず、図 8(1) に示すように、既知の輪郭形状データを用いて、空の背景部分を抽出する。次に、反復的レイベース逆投影により 2 次元画像を推定後、図 8(3) に示すような、各 1 次元投影データ上で非零画素列の両端点から凸輪郭シードを抽出する。シード位置を入力輪郭形状データから決定し、伝播処理により、図 8(A) の表層部を抽出する。

次に、入力データから図 8(A) を除いた残差投影データから図 8 (1') に示す内部の空洞を抽出する。以後 step.2 ~ step.4 の処理を繰り返すことにより図 8(B) を抽出し、2 次元画像を再構成する。

### 6.2 空洞の検出

各入力 (残差) 投影画像  $I_k$  の投影値  $P_k(j) = 0$  を通るすべてのレイ  $RAY_k(j)$  上の各ボクセル値を  $v(i) = 0, w(i) = 1$  として確定し、物質層凹部分に囲まれた空洞部以外の、空洞部分を抽出する。毎回の処理ループにおいて反復されることにより、

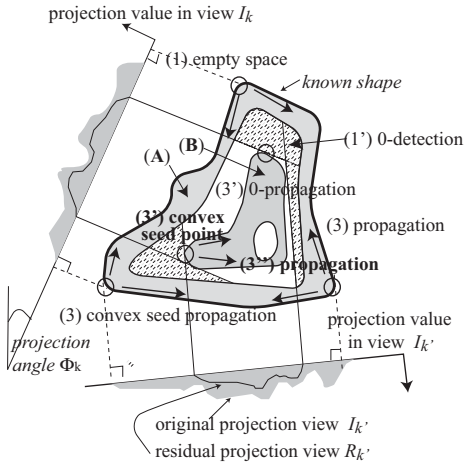


図 8: レイベース逆投影による画像再構成

内部の空洞部分も抽出される。

### 6.3 レイベース逆投影反復法

図 9 に、レイベース逆投影アルゴリズムを示す。

$K$  視点の残差投影画像集合  $I = I_k (= I_k^{(0)})$  を入力とし、式 (2) に基づき、参照線の投影値変化に基づいて、投影値をレイ方向に反復的に逆投影する。

$n$  回の反復において推定されたボリウム空間の再投影画像  $I_k^{(n)}$  と  $I_k^{(0)}$  との誤差  $\Delta I_k^{(n)} = I_k^{(0)} - I_k^{(n)}$  を減少させるように、ボクセル推定値を更新させていく。

アルゴリズムは、4~16 行の、 $K$  視点の入力画像集合  $I$  に対し、 $kk'$  が示す  $K(K-1)$  組の基準画像と参照画像対に対する反復的レイベース逆投影と、さらに 2~18 行の近似度向上のための繰返し処理の 2 階層の繰返しから構成される。

まず 7 行において各基準画像：参照画像対  $(I_k, I_{k'})$  に対して、式 (3) に基づいて再構成信頼度を評価する。ただし、ここで計算した再構成信頼度は次節の伝播の段階で伝播方向を決定するための重要な基準として用いられる。

indent 9~10 行において式 (2) に基づきボクセル値を推定し、13~14 行において、参照画像  $I_{k'}$  の投影方向  $\Phi_{k'}$  に再投影し、誤差画像  $\Delta I_{k'}^{(n)} \equiv \{\Delta P_{k'}^{(n)}(j)\}$  を更新する。

15 行に示すように、次回の反復処理においては参照画像の残差画像  $\Delta I_{k'}^{(n)}$  を基準画像として用いる。これは  $n$  回目の推定値  $v_{kk'}^{(n)}$  を  $n+1$  回目の推

```

1  $\forall k \in K, \Delta I_k^{(0)} \leftarrow I_k^{(0)}$ 
2 do
3  $n = 0$ 
4 for  $kk' \in \{(\Phi_k, \Phi_{k'}) | \Phi_{k'} \neq \Phi_k, k, k' \leq K\}$ 
5  $n = n + 1$ 
6 for  $\Delta P_k^{(n-1)}(j) \in \Delta I_k^{(n-1)}$ 
7  $w_{kk'}^{(n)} \leftarrow \text{Reliability\_Eval}(\Delta P_k^{(n)}(j), L_k'(j))$ 
8 for non-fixed voxel  $V_{kk'}(i) \in \text{RAY}_k(j)$ 
9  $r_{k'}(i) = P_{k'}^{(0)}(i) / \sum_i P_{k'}^{(0)}(i)$ 
10  $v_{kk'}^{(n)}(i) = v_{kk'}^{(n-1)}(i) + \Delta P_k^{(n-1)}(j) \times r_{k'}(i)$ 
11 endfor
12 endfor
13  $I_{k'}^{(n)} \leftarrow \text{re\_projection}(V_{kk'}^{(n)}, k')$ 
14  $\Delta I_{k'}^{(n)} \leftarrow I_{k'}^{(0)} - I_{k'}^{(n)}$ 
15  $k \leftarrow k'$ 
16 endfor
17  $\Delta E \leftarrow \text{total\_projection\_error}(\sum \Delta I_k^{(n)})$ 
18 while ( $\Delta E > \theta_E$ )

```

where,  $V(i)$  indicates a voxel, and  $v(i)$  dose its value, and  $N =$  number of voxels on the  $\text{RAY}_k(j) =$  number of pixels on the reference line  $L_{k'}(j) (= \{P_{k'}^{(0)}(i)\})$ .

図 9: レイベース逆投影反復法

定に直接反映させ、収束を促進させるためである。

17 行の  $\text{total\_projection\_error}(\sum \Delta I_k^{(n)})$  において、推定されたボリウム空間の再投影画像との差の総和  $\Delta E = \sum \Delta I_k^{(n)}$  から推定値の近似度を評価し、 $\Delta E$  が閾値  $\theta_E$  に至るまで繰返す。

#### 6.3.1 レイベース伝播

高信頼度推定値のボクセルをシードとして抽出し、その推定値と信頼度をその近傍に伝播することによりボリウム空間の確定部分を拡大させていく。

[シードボクセル抽出]

信頼度  $w = 1$  を持つ 2 種類のボクセルをシードとして抽出する。(1) 空シード：ボクセル値  $\{v(i) = 0, w(i) = 1\}$  を持つ空洞部のボクセル集合。(2) 凸境界シード：ボクセル値  $\{v(i) = P_k(j), w(i) = 1\}$  を持つ物質層凸境界面上のボクセル集合。

凸シードは残差投影画像において、物質層の境界を表す非零投影値領域の輪郭  $C$  上の投影値集合  $\{P_k(j) | j \in C\}$  から抽出できる。ボリウム空間においては物質層の境界面とレイ  $\{\text{RAY}_k(j) | j \in C\}$  との接点のボクセル集合である。そのボクセルの前後は抽出ずみの空洞であるから信頼度  $w = 1$  を

得る。

凸シードは、残差投影画像の更新により次第に内部の物質層の輪郭から抽出される。

[信頼度と伝播方向] シードの伝播の判定基準としては、

- 1) ボリューム空間の近傍における推定値の類似性、
- 2) 各投影画像の近傍における投影値の類似性、
- 3) 式 (3) から求めた推定値の信頼度、

が用いられる。

なお、各ボクセルの推定値の信頼度は、 $K$  視点の入力投影画像に対して算出された  $K(K-1)$  個の信頼度集合の最大値である。

まず、ボリューム空間においてシードの 26 近傍の各ボクセルに対して、上記 1) と 2) を判定し、推定値と投影値の類似性が高ければ信頼度を比較する。最大信頼度  $\max[w_{kk'}]$  を持つボクセルを選択し、伝播方向とする。次に、最大信頼度  $\max[w_{kk'}]$  を与えた  $RAY_k(j)$  の参照画像  $I_{k'}$  における参照線  $L_{k'}(j)$  上でシードと隣接するランを対象に、伝播を行う。

[凸空洞抽出のための空シードの伝播]

空シードのボクセル値  $\{v(i) = 0, w(i) = 1\}$  を、伝播判定基準に従って選択された方向の、各ボクセルのボクセル値として確定し伝播する。空シードの伝播により拡大された確定ボクセル集合から、物質層の凹部に囲まれた凸空洞部分を抽出する。

[物質層境界抽出のための凸シード伝播]

抽出された空洞に隣接する未確定ボクセル集合を対象に、凸境界シードのボクセル値  $\{v(i) = P_k(j), w(i) = 1\}$  を、伝播判定基準に従って選択された方向の、各ボクセルのボクセル値として確定し伝播する。凸境界シードの伝播により拡大された確定されたボクセル集合から、物質層の境界面を抽出する。

[物質層抽出のためのシードレイ伝播]

境界面を通り  $\theta_f$  個以上の確定ボクセル値集合となる境界レイ集合をシードレイ  $RAY_f$  として抽出する。また、ボリューム空間において、各  $RAY_f$  に隣接する直線上のボクセル集合を近接レイ  $RAY_u$  とする。 $RAY_f$  と  $RAY_u$  の間に以下のような類似性条件が満たされれば、 $RAY_f$  の各ボクセル値  $v(i), w(i) = 1$  を  $RAY_u$  の各ボクセル値として確定し伝播する。 $RAY_f$  と  $RAY_u$  の (1) 各ボクセル部

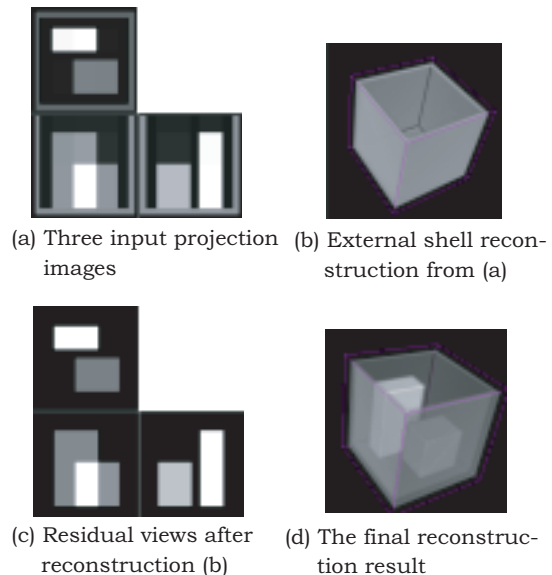


図 10: 残差投影画像の計算による段階的再構成過程

分が一致している。(2) 各ボクセルの投影値が類似している。(3) 参照線でのエッジの位置が類似している。(4)  $\|RAY_f\| \geq \|RAY_u\|$ 。ここで、 $\|RAY\|$  は空ボクセルを両端とする未確定ボクセルの個数を表す。シードレイの伝播により、物質層内部へ拡大された確定ボクセル集合から物質層を抽出する

## 7 実験結果

本実験では、距離画像撮影に MINOLTA 製非接触 3 次元形状計測器 VIVID700[11] を用いた。パーソナルコンピュータの PCAT 互換機 (CPU: AthlonMP1.4Ghz, Main Memory: 512 MB, OS: Win2000Pro) を用い、レンダリングソフトウェアとしては、フリーの C++ 言語によるプログラミング型ビジュアルライゼーションツールキット VTK[12] を用い、本アルゴリズムを実装した。

図 10 に、残差投影画像を用いた再構成過程を示す。まず、入力投影画像 (a) から、(b) に示す表層が再構成される。次に (c) に示す、(b) を除いた残差投影画像を用い、(d) の示す内部の物質層が再構成され、全体が表層から内部へ段階的に再構成される。

次に本アルゴリズムによるボリュームデータの再構成能力を評価するため、3 視点の投影画像を用いたシミュレーション実験を行った。

図 11(a) に実験データとして用いたボリューム

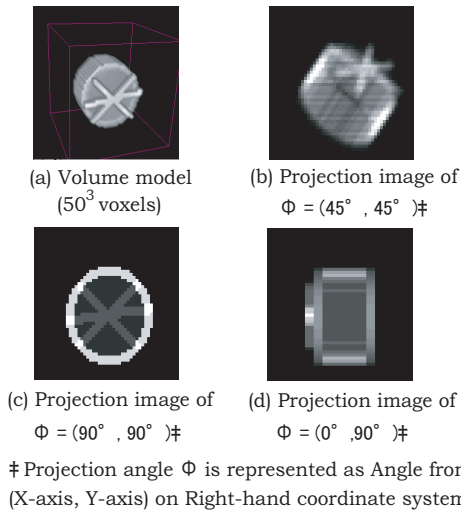


図 11: ボリュームモデルと入力 3 視点投影画像

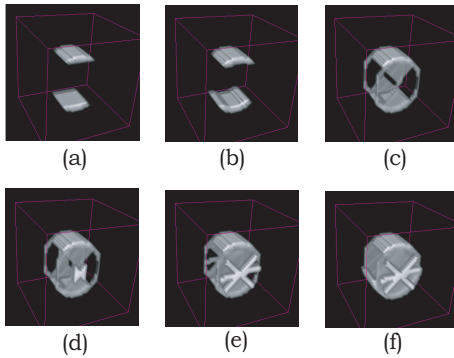


図 12: ボリュームデータの再構成過程

モデルを，図 11(b)，(c)，(d) に入力投影画像を示す．図 11(a) に示すボリュームモデルは，1) 複数の部室層（部分）から構成されており，各物質層は異なる X 線吸収係数を持ち，2) 内部に空洞の部分が存在し，3) 外形形状と内部構造が異なっている．

図 12 に，図 11(b)，(c)，(d) に示した入力投影画像から，段階的に内部構造が再構成された過程を示す．この図から，各投影画像から抽出された物質層の凸境界点から再構成が進行していくことが分かる．

## 8 おわりに

多視点距離画像を用いて復元した 3 次元外形形状に，対象を任意方向から透視した少数の多視点 X 線投影画像から，投影画像間の幾何学的関係と投影画像分析に基づく反復的逆投影により，断面

画像列を再構成せずに直接に 3 次元ボリュームデータを再構成する方法を提案した．各投影値を投影方向に分散し反復的に逆投影することにより，多視点投影画像間で整合性のあるボリューム再構成を実現した．3 視点の X 線投影画像を入力とした再構成結果を示し，提案手法の有効性を明らかにした．

## 参考文献

- [1] 李 相善, 内田順平, 細田泰弘, 田中弘美: 多視点 X 線画像を用いたボリュームの構築, 1999 年電子通信学会総合大会講演集, D-12-149, p.322 (1999)
- [2] 田中弘美, 李 相善, 松本 卓, 金子昇治: パーチャルミュージアムシステムのための画像情報を用いた 3 次元物体モデリング, 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.3, pp.931-938 (1999)
- [3] 李 相善, 田中弘美: レイベース逆投影による少視点 X 線画像からの多重抱構造物体のボリューム再構成, 情報処理学会論文誌, Vol.42, No.5, pp.1124-1133 (2001.5)
- [4] Kaufman, A.: Volume Visualization, IEEE Computer Science Press, USA (1991)
- [5] 鳥脇純一郎: 3 次元画像処理アルゴリズム 総論, Medical Imaging Technology, Vol.19, No.3, pp.135-141 (2001)
- [6] 森田恒之: なかはどうなってるの? 民族資料を X 線でみたら, 企画展資料, (日本) 国立民族学博物館, (1998.3)
- [7] 河田 聡, 南 茂夫: 科学計測のための画像データ処理, CQ 出版社, 東京 (1994)
- [8] 斎藤恒雄: 画像処理アルゴリズム, 近代科学社, 東京 (1993)
- [9] 徐剛, 辻三郎: 3 次元ビジョン, 共立出版, 1998
- [10] 松岡美希: 対応点情報を用いた多視点 3 次元形状データの統合, 2000
- [11] 糊田寿男: 高速光切断法を用いた 3 次元形状入力システム=デジタルカメラライクな 3 次元形状計測=, 計測技術, pp.38-42, (1996.8)
- [12] Schroeder, W., Martin, K. and Lorensen, B.: Teh Visualization Toolkit, 2nd Edition, Prentice Hall PTR, New Jersey, USA (1998)