

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ポリウム再構成

李 相善[†] 田中弘美[†]

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ポリウムビジュアライゼーションが新しい可視化技術として注目を集めており、対象の標本データや計測データから高精度の3次元ポリウムデータを再構成する問題が重要な研究課題である。本論文では、3次元外形形状が既知の対象を、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次元ポリウムデータを再構成する方法を提案する。3視点の X 線画像を入力とした再構成実験結果と従来法との比較を示し、提案手法の有効性を明らかにする。

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[†] and HIROMI T. TANAKA[†]

Volume visualization, which expresses 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 small set of multi-view X-ray projection images, on which image the shape-known object(s) is parallel projected from an arbitrarily decided direction. Our algorithm is using an iterative ray-based back-projection technique based on some analysis of projection images and geometrical relationship among projection images. It is shown that our proposing algorithm is effective and useful by representing experimental comparisons with some proposed approaches through experiments with input of three-view X-ray 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 3 次元の広がりを持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ポリウ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^{4),15)}。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になり、診断や治療に威力を発揮している。

VV においては、対象が占める 3 次元有限空間内の、温度、密度、濃度などの内部属性の 3 次元分布データ

をポリウムデータと呼び、ボクセルと呼ばれる空間構成単位とそのボクセル値の集合として離散的に表現する。したがって、対象の標本データや計測データから高精度の 3 次元ポリウムデータを再構成する問題（reconstruction）が VV の基本的かつ重要な研究課題として位置づけられている。

一般的に医療分野においては、図 1 に示すように、計測データは X 線 CT スキャナや MRI センサなどの計測機器により獲得され、対象の平行な断層画像列として与えられる。各断層画像は、図 1 (a) に示すように、断面を多方向から計測された 1 次元投影データの集合から再構成し、次に、これらの断層画像間を補間し統合する、2 段階の再構成によりポリウムデータを再構成する。断層画像列を用いれば、ポリウム再構成は隣接画像間の 1 次元データ補間問題に帰着される。しかし、高精度のポリウムデータを再構成する

[†] 立命館大学理工学部情報学科コンピュータビジョン研究室
Computer Vision Laboratory, Department of Computer
Science, University of Ritsumeikan

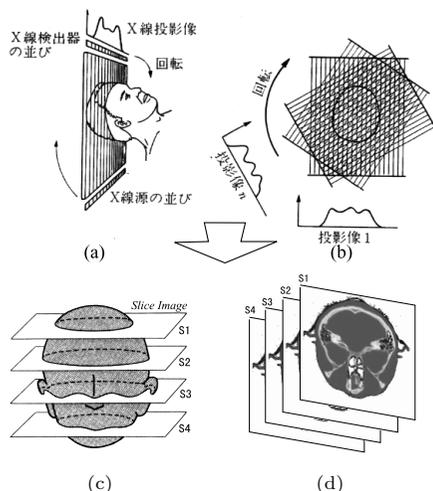


図 1 断面画像列からの 2 段階再構成法 (図の一部は文献 8) の p.22 から引用)

Fig. 1 Stepwise reconstruction approach from cross section images.

ためには、密な断層画像列が要求され、専用の計測機器による膨大な計測データを必要としている。

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),11)}。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かわ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^{8),9)}。

そこで本論文では、3 次元形状が既知の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する。

まず、対象の内部構造を、空洞を含む複数物質からなる多重包含構造とし、そのボリュームデータを X 線吸収係数の 3 次元分布として表す。

図 2 に示すように、X 線平行透視投影により、対象を少数の任意方向から透視して獲得した対象の各 X 線投影画像の各画素値は投影値であり、各画素を通る投影線(以下、レイと呼ぶ)に沿った X 線吸収係数の積分値を表している。また、各レイに沿った X 線吸収係数の分布は他の視点の投影画像において直線状に投影される。たとえば、投影画像 *XView1* の 1 画素に投影されたレイ *RAY1* は、他視点の投影画像 *XView2* と

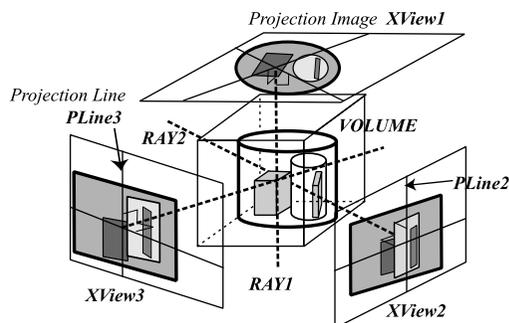


図 2 多視点 X 線画像からの直接再構成法

Fig. 2 Our direct reconstruction approach from multi-view X-ray images.

XView3 においてそれぞれ *PLine2* と *PLine3* に投影される。このような多視点投影画像間の幾何学的関係に基づき、各投影値を、他の視点の投影画像におけるレイの直線状の投影値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、多視点投影画像間で整合性のあるレイを再構成する。

レイの再構成過程は、まず、対象表面の既知 3 次元形状と、各入力投影画像の縁から対象の外輪郭までの投影値を用いて空の背景空間を抽出する。次に、外輪郭に沿った投影値から対象の表面を通る表層レイを高精度に推定する。さらに、外輪郭から順次内側の投影値を用いた反復的レイベース逆投影により、表層レイの推定値とその信頼度を表面から表層内部に伝播させる。同時に、既知 3 次元形状情報を表層内境界まで伝播することにより、表層を抽出する。抽出された表層を除いた各視点の残差投影画像に対して、同様の処理を繰り返すことにより、多重包含構造を成す各物質層を表層から次第に内部へ 1 層ずつ推定・抽出し、再構成を完成させていく。

以下本論文において、2 章に人文科学分野における X 線画像データ、3 章に多視点 X 線投影画像間の幾何拘束関係、4 章に投影画像分析に基づく再構成信頼度、5 章に本手法のアルゴリズム、6 章にアルゴリズムの収束性と安全性を示す。また、7 章の実験において、従来法との比較結果と 3 視点の X 線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 3 に示すように、X 線画像

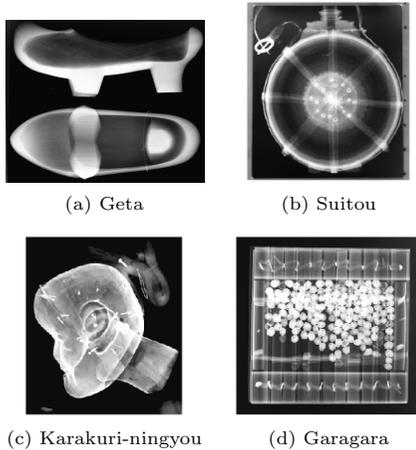


図3 人文科学分野における X 線画像データ¹¹⁾

Fig.3 X-ray images from Humanity Research.

は外観から見えないモノの内部を写し出し、材質の種類判定、作成方法・技術の推定、傷みの検出と原因の解明などの様々な目的に用いられている¹¹⁾。

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用画像と比較して以下の特徴をあげることができる。

- (1) モノの全体が単独に撮影されている。
- (2) モノの内部に空洞が存在することが多い。
- (3) 物質層間の境界は投影値の不連続に対応する。

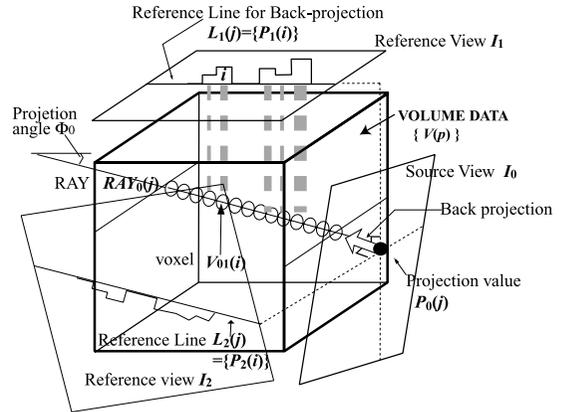
したがって、モノの X 線画像は医用画像と比較して、図地分離、境界線抽出、領域分割などの画像解析がより安定であることが期待される。

5 章において、上記のモノの X 線画像特徴に基づいたボリューム再構成法を提案する。

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 $\{\Phi_k \mid 0 \leq k < K\}$ から獲得された対象の 2 次元画像を多視点投影画像 $\{I_k \mid 0 \leq k < K\}$ 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 $\{v(p) \geq 0 \mid 0 \leq p < N_V^3\}$ で表す。

図 4 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 Φ_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。



' I_k ' indicates a projection view of projection angle Φ_k .

図4 多視点 X 線投影画像間の幾何拘束関係

Fig.4 Geometry among multi-view X-ray images.

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

ただし、 $v_{kj}(i) \in RAY_k(j)$ 。

$RAY_k(j)$ は、 Φ_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 4 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。

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 $\{L_{k'}(j) \mid k' \neq k\}$ 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 $L_{k'}(j)$ 上の投影値の変化に従うとすれば、 $RAY_k(j)$ 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。

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

ただし、 $r_k(i) = P_{k'}(i) / \sum_i P_{k'}(i)$, $P_{k'}(i) \in L_{k'}(j)$ 。

4. 投影画像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て、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に導くには、各推定値の信頼度を評価する必要がある。図 5 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

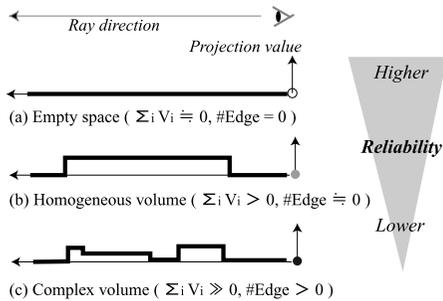


図 5 参照線の複雑さに基づく、レイ再構成の信頼性評価

Fig. 5 The status of the ray would be evaluated from the projection pattern on the reference line.

される。

- (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 (図 5 (a)) .
- (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。また、参照線で投影値の変化が小さければ、参照線に投影された断面の変化が小さい、つまり、断面は少数の物質層を含む (図 5 (b)) .
- (c) 投影値が大きいくほど、また、参照線が多数の投影値不連続点で分割されているほど、つまり、多数の様な投影値の連なり (以下、ランと呼ぶ) 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 (図 5 (c)) .

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 $w_{kk'}(j)$ を次のように定義する。

$$w_{kk'}(j) = \begin{cases} 1 : \text{if } P_k(j) = 0 \text{ or } \|L_{k'}(j)\| = 1 \\ 1 - \left(\begin{array}{l} \alpha \times \frac{P_k(j)}{\max[P_k(j)]} \\ + \beta \times \frac{E_{k'}(j')}{\max[E_{k'}(j')]} \end{array} \right) \\ : \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

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、 α と β 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、つまり、参照線の長さ $\|L_{k'}(j)\|$ が 1 であれば、その信頼度は 1 と評価する。

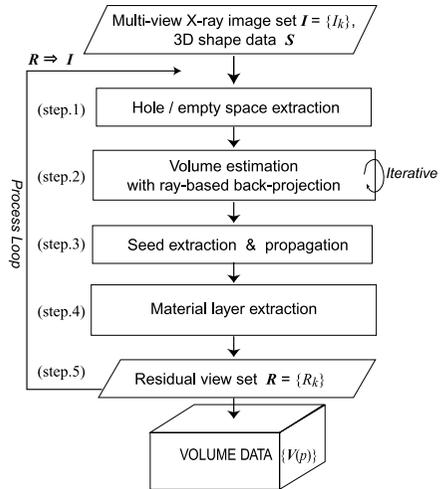


図 6 レイベースの逆投影によるボリュームの再構成

Fig. 6 Volume reconstruction with ray-based back-projection.

5. アルゴリズム

5.1 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 $\{\Phi_k \mid 0 \leq k < K\}$ からの投影画像集合 $I = \{I_k \mid 0 \leq k < K\}$ と対象表面の 3 次元形状 S を入力とし、再構成されたボリュームデータ $V = \{v(p) \geq 0 \mid 0 \leq p < N_V^3\}$ を出力する。

図 6 に、本アルゴリズムの流れを示す。

まず、step.1 で、対象表面の既知 3 次元形状 S と、各入力投影画像 $I = \{I_k\}$ の縁から対象の外輪郭までの 0 投影値集合を用いて空の背景空間を抽出する。

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 7 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

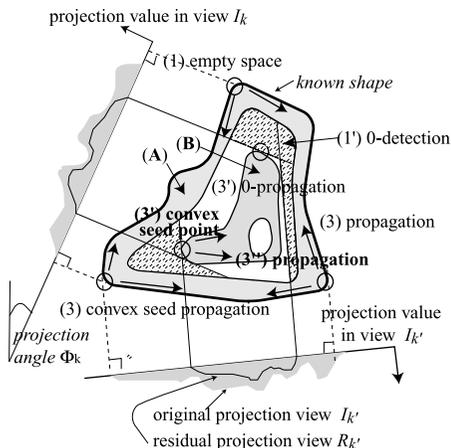


図7 レイベース逆投影による画像再構成

Fig. 7 Stepwise image reconstruction by ray based back-projection.

る過程を示す(図7の各番号は図6の各ステップを表す)。まず、図7(1)に示すように、既知の輪廓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7(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廓シードを抽出する。シード位置を入力輪廓形状データから決定し、伝播処理により、図7(A)の表層部を抽出する。

次に、入力データから図7(A)を除いた残差投影データから図7(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7(B)を抽出し、2次元画像を再構成する。

5.2 3次元形状を用いるポリウムデータ初期化

対象を含むポリウム空間の、 N_v^3 個のボクセル集合のポリウムデータ $V = \{v^{(0)}(p) \geq 0 | 0 \leq p < N_v^3\}$ を定義し、各ボクセル値(属性値/フィールド値)を $\{X$ 線吸収係数 $v(p) = 0$, 信頼度 $w(p) = 0\}$ とし、さらに、入力の対象表面の3次元形状 S を用いて、空の背景空間を検出し、そのボクセル値を $\{v(p) = 0, w(p) = 1\}$ として初期化する。

5.3 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、内部の空洞部分も抽出される。

5.4 レイベース逆投影反復法

図8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

```

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   $w_{kk'}^{(n)}(j) \leftarrow Reliability\_Eval(\Delta P_k^{(n)}(j), L_{k'}(j))$ 
8  for non-fixed voxel  $V_{kk'}(i) \in RAY_k(j)$ 
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  $I_{k'}^{(n)} \leftarrow re\_projection(v_{kk'}^{(n)}, k')$ 
14  $\Delta I_{k'}^{(n)} \leftarrow I_{k'}^{(0)} - I_{k'}^{(n)}$ 
15  $k \leftarrow k'$ 
16 endfor
17  $\Delta E \leftarrow total\_projection\_error(\Sigma \Delta I_k^{(n)})$ 
18 while(  $\Delta E > \theta_E$  )
    
```

図8 レイベース逆投影反復法

Fig. 8 Ray-based iterative back-projection.

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

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ポ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(5.5.2項「信頼度と伝播方向」を参照)。

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。

ただし、9行と10行に示すように、差分 $\Delta P_k^{(n-1)}(j)$ を分散しボクセル値 $v_{kk'}^{(n)}(i)$ を推定する際には、 $\Delta P_k^{(n-1)}(j) > 0$ の場合は入力 X 線画像上の参照線で高画素値として表されている参照画素に対応するボクセル値をさらに増加させる。また、 $\Delta P_k^{(n-1)}(j) < 0$ の場合は、参照線で低画素値として表されている参照

画素に対応するボクセル値をさらに減少させる．ここで高（低）画素値とは，参照線上の他画素に比べ相対的に高い（低い）画素値として表されている参照画素のことを指す．

15 行に示すように，次の反復処理においては参照画像の誤差画像 $\Delta I_{k'}^{(n)}$ 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 $n+1$ 回目の推定に直接反映させ，収束を促進させるためである．

17 行の $total_projection_error(\Sigma \Delta I_k^{(n)})$ において，推定されたボリューム空間の再投影画像との差の総和 $\Delta E = \Sigma \Delta I_k^{(n)}$ から推定値の近似度を評価し， ΔE が閾値 θ_E に至るまで繰り返す．

5.5 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，以下の順に，その近傍に伝播することによりボリューム空間の確定部分を拡大させていく．

- 1) 凸空洞抽出のための空ボクセルの伝播
- 2) 物質層境界抽出のための凸境界ボクセル伝播
- 3) 物質層抽出のための内部方向へのレイの伝播

5.5.1 シードボクセル抽出

信頼度 $w = 1$ を持つ以下の 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．ボリューム空間においては物質層の境界面とレイ $\{RAY_k(j) | j \in C\}$ 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済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．

5.5.2 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．

5.5.3 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，5.5.2 項の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．

5.5.4 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，5.5.2 項の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ボクセル集合から，物質層の境界面を抽出する．

5.5.5 物質層抽出のためのシードレイ伝播

5.5.4 項で抽出された，境界面を通り θ_f 個以上の確定ボクセル値集合から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：

- (1) $\|RAY_f\| \geq \|RAY_u\|$ ．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．
- (2) RAY_f と RAY_u の確定ボクセル部分が一致している．
- (3) RAY_f と RAY_u の各ボクセルの投影値が類似している．
- (4) RAY_f と RAY_u の参照線でのエッジの位置が類似している．

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．

6. アルゴリズムの収束性と完全性

提案反復法は， n 回めの逆投影後の再投影値 $\{P_k^{(n)}(j)\}$ と入力投影値 $\{P_k^{(0)}(j)\}$ との間の差 $\{\Delta P_k^{(n)}(j)\}$ を減少させるように投影方向に沿って分散していく過程である．この過程において，投影方向のレイ上のボクセル値の分布を参照線での画素値の分布に漸近させる．具体的には， $\Delta P_k^{(n)}(j) > 0$ の場合は参照線で高画素値で表されている部分に対応するボクセル値をもっと増加させる．また， $\Delta P_k^{(n)}(j) < 0$ の場合は参照線で低画素値で表されている部分に対応

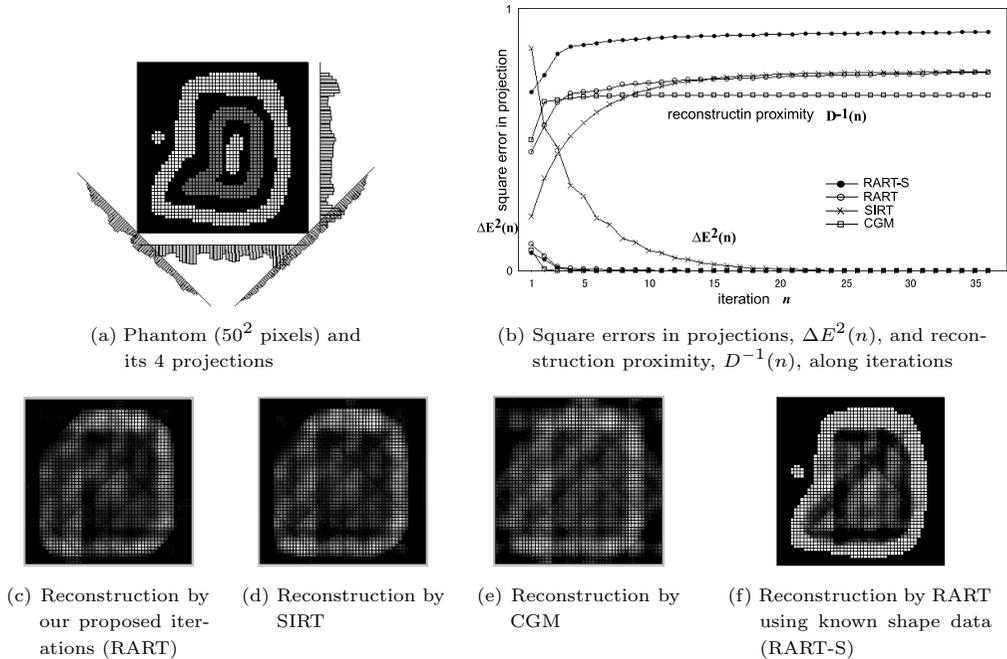


図9 投影データからの再構成反復法の性能比較
Fig.9 Iteration techniques for reconstruction from projections.

するボクセル値をもっと減少させる．この処理を反復することにより，差分全体 $\sum_{k,j} \|\Delta P_k^{(n)}(j)\|$ は徐々に小さくなり，最終的には再投影画像が入力投影画像に収束することになる．

一方，図8の10行に示すように，更新される反復解（推定値） $v_{kk'}^{(n)}$ は，1基準投影画像内では，方程式（レイ）が評価される順番に依存しない．しかし，投影画像 $\{\Delta I_k\}$ 間では，評価される投影画像の順番に依存する．提案反復法では，(1) 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，(2) $n+1$ 回の反復処理においては参照画像の誤差画像 $\Delta I_{k'}^{(n)}$ を基準画像として用い， n 回目の反復解（推定値） $v_{kk'}^{(n)}$ を $n+1$ 回目の推定に直接反映させる，ことにより，収束を促進させている．

本アルゴリズムは，全体的には（残差）投影画像から，最大信頼度 $w=1$ のボクセルをシードとして抽出し，そのシードボクセルを近傍に伝播することにより，確定部分空間を拡大させ，対象を再構成していく過程である．したがって，シードボクセルが抽出可能な（残差）投影画像が存在する限りでは，対象を完全に再構成できる．すなわち，視線方向と垂直な方向に凸しているシードボクセルを抽出するための視線方向が必要となる．

7. 実験と考察

7.1 実験環境

本実験では，パーソナルコンピュータの Optiplex GX1 (DELL社，CPU: 400 MHz PentiumII，Main Memory: 256 MB) と，グラフィックスワークステーションの OCTANE (SGI社，CPU: 225 MHz MIPS R10000，Main Memory: 256 MB) を用いた．

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 VTK¹⁸⁾ を用い，本アルゴリズムを実装した．

7.2 従来の反復的再構成法との性能比較

レイベース逆投影反復法 (RART: Ray-based Arithmetic Reconstruction Technique) と代表的な従来法，同時反復法 (SIRT: Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) と共役勾配法 (CGM: Conjugate Gradient Method⁸⁾) との性能を比較するために (提案手法と従来法に適用可能な) 同一投影データ (図9(a)) を用いて比較実験を行った．SIRT は，各回の反復計算量が小さいが，収束が遅く，また，CGM は，入力が不足する不良設定状態に有効であり収束性は保証されるが，計算量が大きいことが報告されている．

実験では，図9(a)に示す2次元ファントムモデル

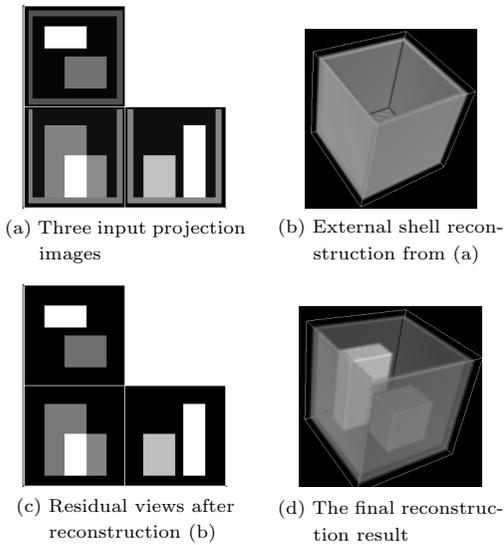


図 10 残差投影画像の計算による段階的再構成過程
Fig. 10 Shell-by-shell stepwise reconstruction.

(ファントムサイズは 50^2 画素)に基づき、4 方向からの 1 次元投影データを作成し、入力データとして用いた。各投影データの投影角は、水平線を基準に各々 $\Phi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ にした。

図 9 (c), (d), (e) に、RART, SIRT, CGM の各手法を用い再構成した結果を示す。また、図 9 (f) に、既知の形状データをも用いたレイベース逆投影反復法 (RART-S) からの再構成結果を示す。

図 9 (b) に、 $n = 36$ 回までの反復による再構成画像の、再投影データと入力投影データとの誤差 ΔE^2 と、再構成画像とファントムとの近似精度 D^{-1} の推移を示す。同図から、提案反復法 RART が CGM と同様に収束が早く、さらに、SIRT とほぼ同様の近似精度が得られることが分かる。

7.3 残差投影画像の更新による段階的再構成

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。

7.4 3 視点投影画像を用いた再構成シミュレーション

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) 複数の物質

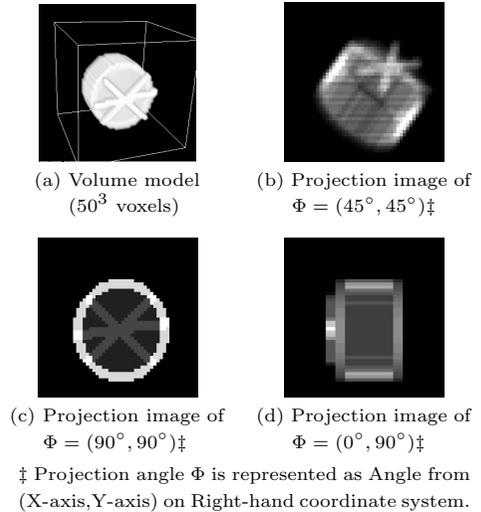


図 11 ボリュームモデルと入力 3 視点投影画像
Fig. 11 Volume model and input projection images.

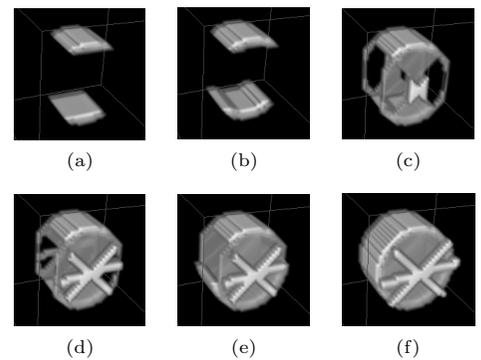


図 12 ボリュームデータの再構成過程
Fig. 12 The sequence of reconstruction from projections of Fig. 11.

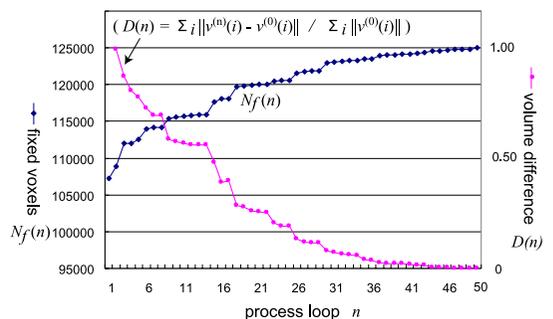


図 13 再構成段階別の進捗度
Fig. 13 Reconstruction progress along iteration.

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) 外部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.

図 13 に, 各処理ループの反復による, 確定ボクセル数の増加と, ポリュームデータの誤差の減少を示す. この図では, 処理ループ n を繰り返すことにより, モデルと同値の確定ボクセル数 $N_f(n)$ が増加し, モデルとの誤差 $D(n)$ が減少し, 50 回の処理で再構成が完成できることを示す.

8. おわりに

3 次元外形形状が既知の対象を, 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 次元ポリュームデータを再構成する方法を提案した. 多視点投影画像間の幾何学的拘束関係に基づき, 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ポリューム再構成を実現した. 従来法との比較実験と, 3 視点の X 線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.

本論文では, 特別な環境の下で利用可能となる最小限の多視点 X 線投影画像を用いることを前提にしているため, 多重包含構造物体のパーツ内で物理量が不規則に変化する場合や異種物質間の境界が曖昧な場合には良い結果が得られない場合もある. また, 本手法では外部形状の初期推定が重要な役割を果たすため, 推定した外部形状が元の形状と大きく違う場合にも再構成に限界があると考えられる. しかし, 入力データに関する前提条件として, 1) 内部構造が単純で, X 線画像上で隣接する領域間の区別が明確であり, 領域分割などの画像処理が容易である, 2) 各投影画像から対象物の全体が観察可能である, 3) 再構成する対象物の 3 次元外形が既知である, などの条件を満たす人工物体に対しては成功的に再構成できることを実験を用いて確認しており, 限られた環境の中で人工物体を対象にした再構成作業には実用的に応用できると思慮する.

謝辞 本論文の整理および修正において, 立命館大学情報学科若林広紀君から多大に協力していただきましたので, 深い感謝の意を表します.

参 考 文 献

- 1) 李 相善, 内田順平, 細田泰弘, 田中弘美: 多視点 X 線画像を用いたポリュームデータの構築,

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: 適応格子構造表現を用いた 3 次元物体モデリングに関する研究, 学位論文, 立命館大学理工学部 (2000.6).
- 4) 藤代一成, 茅 暁陽, 国井利泰: ボクセル指向 3 次元データ表現とその表示技術, 情報処理, Vol.34, No.3, pp.285-297 (1993).
- 5) 藤代一成, 茅 暁陽: コンピュータデータビジュアルリゼーション, 日本 AEM 学会誌, Vol.6, No.3, pp.23-27 (1998).
- 6) 尾川浩一, 高橋昌寛: Ordered Subsets を用いた期待値最大化法における投影データの選択と計算順番が再構成画像に与える影響, 信進学 (D-II), Vol.J82-D-II, No.6, pp.1093-1099 (1999).
- 7) テレビジョン学会: 不可視情報の可視化, 昭晃堂, 東京 (1979).
- 8) 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).
- 9) 斎藤恒雄: 画像処理アルゴリズム, 近代科学社, 東京 (1993).
- 10) 工藤博幸, 斎藤恒雄: 凸射影法による不完全な投影データからの CT 画像再構成, 電子通信学会論文誌 (D-II), J72-D-II, 12, pp.2137-2145 (1989).
- 11) 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) 国立民族博物館 (1998.3).
- 12) 長谷川里美, 長谷川秀彦, 藤野清次 (訳): 反復法 Template, 朝倉書店, 東京 (1996).
- 13) 藤野清次, 張 紹良: 反復法の整理, 朝倉書店, 東京 (1996).
- 14) 仁木 滉, 河野敏行: 楽しい反復法, 共立出版, 東京 (1998).
- 15) Kaufman, A.: *Volume Visualization*, IEEE Computer Science Press, USA (1991).
- 16) Levoy, M.: Efficient ray tracing of volume data, *ACM Trans. Graphics*, Vol.9, No.3, pp.245-261 (1990).
- 17) Lacroute, P.G.: Fast volume rendering using a shear-warp factorization of the viewing transformation, Technical Report, CSL-TR-95-678, Stanford Univ. (1995).
- 18) Schroeder, W., Martin, K. and Lorensen, B.: *The Visualization Toolkit*, 2nd Edition, Prentice Hall PTR, New Jersey, USA (1998).

(平成 12 年 10 月 2 日受付)

(平成 13 年 4 月 6 日採録)



李 相善

1983 年韓国ソウル大学自然科学卒業．1985～1991 年韓国科学技術院・システム工学研究所．1992 年より韓国(株)ハンディソフト．2000 年立命館大学情報学科博士後期課程修了．工学博士．電子情報通信学会会員．



田中 弘美(正会員)

1975 年お茶の水女子大学理学部物理学科卒業．1975～1978 年(株)富士通勤務．1981 年米国ロチェスター大学大学院コンピュータサイエンス学科修士課程修了．1988 年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了．工学博士．1988～1994 年 ATR 通信システム研究所客員研究員．1994 年立命館大学理工学部情報学科教授．CG, CV, VR, 3 次元画像通信の研究に従事．IEEE, 電子情報通信学会各会員．
