

## 形状ベース Voxel Stuffing

2E-4-3

立野 玲子<sup>†\*</sup>, 山口 裕美<sup>‡</sup>, 藤代 一成<sup>‡</sup>, 東 多恵子<sup>\*</sup>, 櫻庭 均<sup>‡</sup><sup>†</sup>財)東京都臨床医学総合研究所, お茶の水女子大学 <sup>\*</sup>大学院人間文化研究科, <sup>‡</sup>理学部 情報科学科

## 1 背景と目的

Magnetic Resonance Imaging(MRI)などの装置を用いた最先端の撮像技術では, 断像の平面解像度と同等の空間解像度で平行断像列(以下, 断像列と略す)の取得が可能となっている。しかし, この先端技術の利用は限られており, 広く実用されるまでには至っていない。日常的な臨床検査などでは, 粗な断像間隔で取得されているのが現状である。そのため, 得られた断像列をもとにしたボリュームビジュアライゼーションには, 未だ断像間の補間が必要である。また, 先端技術が実用化されたとしても, 過去から現在までの病態の経時的变化や死亡した患者の症例研究など, 過去に取得した粗な間隔の断像列の可視化が求められる状況は, 今後も予想される。

臨床検査では, 断像間の情報が欠落するのを防ぐために, 複数方向から断像列を取得している。著者らはこれまで, このように粗な間隔ではあるが, 複数方向からの断像列に基づく高品質ボリュームデータの再構成アルゴリズムとして *Voxel Stuffing* を開発してきた[1,2,3]。既報[3]では *Voxel Stuffing* によって, 規則格子系と直線格子系の両者において1方向からの断像列を1次補間によって再構成したボリュームデータより, 対象に忠実なボリュームデータが再構成できることが確かめられた。

*Voxel Stuffing*によって再構成された対象は定性的解析には充分耐えるものであったが, さらに解析を進めて体積の測定など, 対象の定量的解析を行うためには, これまでの再構成では不十分な場合が予測される。そこで, 本論文では先に提案されている形状ベース補間でのアプローチ[4]を *Voxel Stuffing* によって拡張し, 定量的解析にも対応できるように対象の表面をさらに忠実に再構成する形状ベース *Voxel Stuffing* アルゴリズムを提案する。本論文では, 議論を簡明にするために規則格子系 *Voxel Stuffing* に限定し, 直線格子系については別の機会に譲ることとする。

次節で *Voxel Stuffing* アルゴリズムと対象の表面を再構成するための形状ベース補間の概念を明らかにする。次に3節で形状ベース補間を採り入れて3方向からの断像列から形状を忠実に再構成する形状ベース *Voxel Stuffing* アルゴリズムを示す。4節でその基礎実験と結果を示し, 5節で考察と今後の課題を述べる。

## 2 再構成アルゴリズムの概念

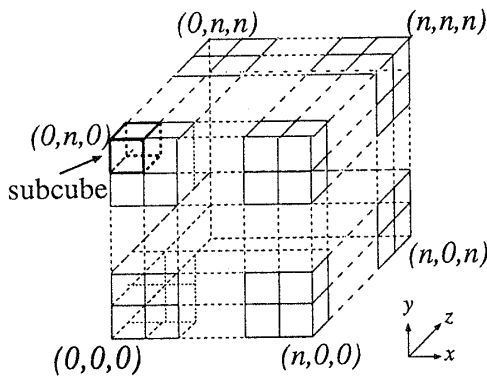
断像列としてサンプリングされた対象を忠実に再構成するという目的は共通であるが, 素材, 復元対象などを異にする, ふたつの再構成アルゴリズムを概観する。

## 2.1 Voxel Stuffing

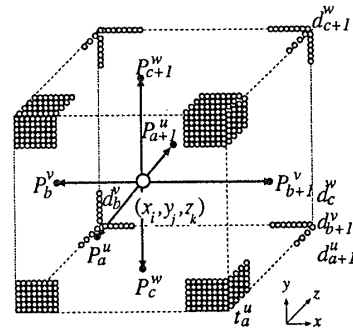
*Voxel Stuffing*は, 複数方向からの断像列としてサンプリングされ, 断像上の輝度値へと変換された対象を, 与えられたすべての断像列から再構成するアルゴリズムである[3]。ここでは, 次のような条件で3方向から断像列を取得したと仮定する。

- 単一の開始点をもつ同一空間から取得する。

Shape-Based Voxel Stuffing  
Reiko Minamikawa-Tachino<sup>†\*</sup>, Yumi Yamaguchi<sup>\*</sup>,  
Issei Fujishiro<sup>‡</sup>, Taeko Azuma<sup>‡</sup>, and Hitoshi Sakuraba<sup>†</sup>  
<sup>†</sup>The Tokyo Metropolitan Institute of Medical Science  
3-18-22 Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8613,  
Japan  
e-mail: {tachino, sakuraba}@rinshoken.or.jp  
Ochanomizu University  
2-1-1 Otsuka, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8610, Japan  
e-mail: {yumi, taeko}@imv.is.ocha.ac.jp, fuji@is.ocha.ac.jp



(a)3方向からの断像列



(b)サンプル点とボクセルとの位置関係

図1: Voxel Stuffingでのボリューム空間モデル

-画素間隔の整数倍をなす、一定の断像間隔で取得する。

-3方向の断像列は互いに直交する。

得られた断像列は規則格子系をなし、図1aに示すように隣接する6枚の断像によって囲まれる矩形領域 (subcube)が形成される。この領域の周囲にはサンプル点が稠密に存在しているが、内部にはサンプル点は全く存在していない。Voxel Stuffingは、その内部に周囲と等間隔にリサンプル点 (ボクセル) を稠密に配置することで内部を埋め尽くし、対象を再構成するアルゴリズムである。

$l (l=u,v,w)$ の方向から得られたインデックス  $n$ の断像をそれぞれ  $d_n^l (n=a,b,c)$ とする。配置されるボクセル  $(x_i, y_j, z_k)$ のフィールド値は、近隣のサンプル点の断像上での輝度値  $s(x_i, y_j, z_k)$ から強い影響を受ける。そこで、配置されるボクセルから周囲の断像へ下ろした垂線の足  $P_n^l(x_i, y_j, z_k)$  ( $P_n^l$ と略す) を近隣のサンプル点として選出する。サンプル点が及ぼす影響は、配置されるボクセルまでの距離  $h_n^l(x_i, y_j, z_k)$  ( $h_n^l$ と略す) に依存すると仮定した。配置されるボクセルのフィールド値は、これら6点の垂線の足での値に足までの距離による重みを付けて算出する。

フィールド値を求める関数  $f(x_i, y_j, z_k)$ は、ボクセルが断像上のサンプル点のときには、与えられた輝度値をフィールド値とする。

それ以外のときには、6点の値から算出する

が、その混合法については、数種類検討した中で、最も良好な結果が得られたものを以下に示す。

$$f(x_i, y_j, z_k) = \frac{1}{3} \left( \frac{v_x}{r_1} + \frac{v_y}{r_2} + \frac{v_z}{r_3} \right)$$

$$v_x = \sum_{n=a}^{a+1} \frac{s(P_n^u)}{(h_n^u)^2}, \quad v_y = \sum_{n=b}^{b+1} \frac{s(P_n^v)}{(h_n^v)^2}, \quad v_z = \sum_{n=c}^{c+1} \frac{s(P_n^w)}{(h_n^w)^2}$$

$$r_1 = \sum_{n=a}^{a+1} \frac{1}{(h_n^u)^2}, \quad r_2 = \sum_{n=b}^{b+1} \frac{1}{(h_n^v)^2}, \quad r_3 = \sum_{n=c}^{c+1} \frac{1}{(h_n^w)^2}$$

ここで、断像列に潜んでいる情報の連続性を重視して、まず、断像列ごとに値を求め、さらに3方向から同程度影響を受けたとしてその平均値をフィールド値としている。

## 2.2 形状ベース補間

1方向から粗な間隔で取得された断像列から形状を忠実に再構成するアルゴリズムとして、形状ベース補間がすでに提案されている[4]。可視化に先立って、一般には断像間を補間して新たに断像を求めた後に可視化の対象となる関心領域の分割が行われるが、ここでは、領域分割と補間の処理が同時に実行され、関心領域の境界面が距離ボリュームとして再構成される。

与えられた各断像において関心領域の閉じた輪郭はあらかじめ抽出されているとして、その関心領域の境界からの距離を示す距離ボリュームを再構成する。図2に示すように断像間に配置する任意のボクセルから断像へ下ろした垂線の足から各断像上輪郭までの最短距離を街区距離によって求

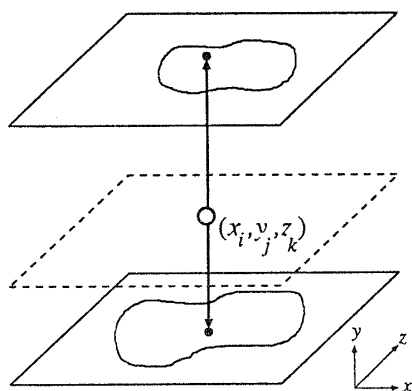


図2：形状ベース補間モデル

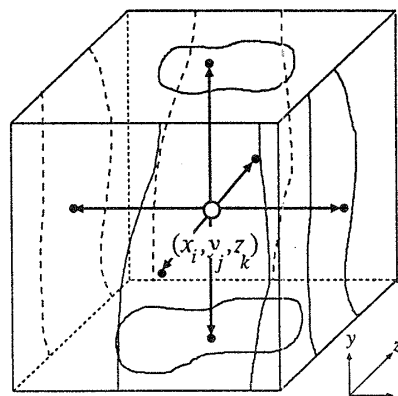


図3：形状ベース Voxel Stuffing モデル

める。最短距離は、その足が輪郭上であれば0、輪郭の内部であれば正整数、輪郭の外部であれば負整数とする。それらを1次、ないしはキュービックスプラインによって補間し、得られた距離を輪郭に付与されている輝度値に加えて、そのボクセルから輪郭までの推定最短距離とする。配置するすべてのボクセルに対して同様に推定最短距離を求めることによって、フィールド値が推定最短距離を示す距離ボリュームが再構成される。得られたボリュームに対してマーチングキューブ法 [5] により等値面を求めることで最短距離が0となるボクセルが関心領域の境界面として再構成される。

### 3 形状ベース Voxel Stuffing

形状ベース補間の概念に *Voxel Stuffing* のアプローチを導入することによって、粗な間隔による断像列でも3方向からの断像列を利用すれば、さらに高品質な表面形状が再構成できるアルゴリズムを検討する。3方向の断像列から得られる対象の輪郭情報をもとにして、*Voxel Stuffing* でのアプローチにより対象の表面形状を忠実に再構成する形状ベース *Voxel Stuffing* アルゴリズムを設計する。

#### 3.1 アルゴリズムの概念設計

形状ベース補間と同様に3方向からの断像列において各断像上での関心領域の閉じた輪郭はあらかじめ抽出されているとする。

配置されるボクセルから輪郭までの推定最短距離

は、輝度を補間する場合と同様に、配置されるボクセルとサンプル点間の距離に依存するとした。図3に示すように配置されるボクセルに隣接する近隣サンプル点としては、ボクセルから各断像へ下ろした垂線の足を選出した。配置されるボクセルにおける輪郭までの推定最短距離は、各垂線の足からその断像上の輪郭までの最短距離に、ボクセルからその足までの距離に応じた重みを付けて算出した。重み付けされた、6点の垂線の足での最短距離は断像列ごとに混合し、さらに3方向から同程度の影響を受けたとしてその平均をボクセルでの推定最短距離とした。対象の形状に関する情報は、同一方向から取得した断像に潜む可能性が高いとして、断像の連続性を重視した混合法を採用した。

#### 3.2 形状ベース Voxel Stuffing 再構成アルゴリズム

アルゴリズムの仮定として、各方向の各断像上で抽出されている閉じた輪郭に対して、どれとどれがどの関心領域を示しているかという関係が定義されているとする。さらに、各関心領域がどの矩形領域に現れているかも解析されているとする。

$l$ の方向から得られた、インデックス  $n$  で規定される断像上にインデックス  $\gamma$  の関心領域に対する閉じた輪郭  $\gamma M_n^l$  が存在しており、その輪郭には当初から値  $\gamma q_n^l$  が付与されているとする。また、その関心領域が現れている矩形領域はインデックス  $\delta$  で

```

begin
  for 注目する関心領域のインデックスを  $\gamma$  に設定する do {関心領域が尽きるまで繰り返す}
    for その関心領域に関する矩形領域のインデックスを  $\delta$  に設定する do
      {矩形領域が尽きるまで繰り返す}
      インデックス  $\delta$  の矩形領域において,  $\delta P_n^l$  に対して  $\gamma e_n^l$  を街区距離にて計測する
      if 断像上にボクセルを配置する then
         $g(x_i, y_j, z_k) = \text{if } (x_i, y_j, z_k) \text{ は } \gamma M_n^l \text{ の内部にある then } \gamma q_n^l + \gamma e_n^l$ 
                                                else  $\gamma q_n^l - \gamma e_n^l$ ;
      else {矩形領域内にボクセルを配置する}
         $s_n^l = \text{if } \delta P_n^l \text{ は } \gamma M_n^l \text{ の内部にある then } \gamma e_n^l \text{ else } -1 \times \gamma e_n^l$ ;
         $v_x = \sum_{n=a}^{a+1} \frac{\gamma q_n^u + s_n^u}{(\delta h_n^u)^2}$ ;  $v_y = \sum_{n=b}^{b+1} \frac{\gamma q_n^v + s_n^v}{(\delta h_n^v)^2}$ ;  $v_z = \sum_{n=c}^{c+1} \frac{\gamma q_n^w + s_n^w}{(\delta h_n^w)^2}$ ;
         $r_1 = \sum_{n=a}^{a+1} \frac{1}{(\delta h_n^u)^2}$ ;  $r_2 = \sum_{n=b}^{b+1} \frac{1}{(\delta h_n^v)^2}$ ;  $r_3 = \sum_{n=c}^{c+1} \frac{1}{(\delta h_n^w)^2}$ ;
         $g(x_i, y_j, z_k) = \frac{1}{3} \left( \frac{v_x}{r_1} + \frac{v_y}{r_2} + \frac{v_z}{r_3} \right)$ ;
      end_if
    end_for
  end_for
end

```

アルゴリズム 1 : 形状ベース *Voxel Stuffing* における距離ボリュームの再構成アルゴリズム

規定されているとする。さらに、その矩形領域は  $u, v, w$  の 3 方向から断像インデックス  $a, b, c$  と連続するインデックスで規定される断像で囲まれており、そこに配置するボクセル  $(x_i, y_j, z_k)$  から下ろした垂線の足を  $\delta P_n^l$  とし、そこから断像上の輪郭  $\gamma M_n^l$  までの最短距離を  $\gamma e_n^l$  とする。ボクセルから垂線の足までの距離は  $\delta h_n^l$  である。配置されたボクセルに対して輪郭までの推定最短距離を求める関数を  $g$  とし、距離ボリュームを再構成するアルゴリズムをアルゴリズム 1 に示す。ここでは、足が輪郭内部にある場合は、輪郭上にある場合を含むとしている。

#### 4 基礎実験と結果

形状ベース *Voxel Stuffing* の実装および評価実験に

は、SGI 社製 O2 システム (CPU : R5000, Clock : 180MHz, RAM : 64MB) を用いた。可視化には AVS5[6] を使用した。

ソースボリュームを円錐ソリッドとして、まず、1 方向から抽出した断像列に対して 1 次補間と形状ベース補間によって、得られた円錐の表面形状を比較した。次に、1 方向からと同様に抽出した 3 方向からの断像列に対して形状ベース *Voxel Stuffing* によって対象を再構成した。形状ベース補間と形状ベース *Voxel Stuffing* によって復元された対象の表面形状を比較した。

ソースボリュームは  $32 \times 32 \times 32$  のサイズをもち、フィールド値は 1 バイト符号なし整数値で表現されるデータとした。そこに、底円の半径が 16 で、高さが 32 の円錐をフィールド値 128 を充填させなが

ら描いた。x,y,zの各軸に沿って断像間隔8で32×32×4のサンプルを含む断像列を抽出した。

#### 4.1 1次補間と形状ベース補間の比較

1方向からの断像列の輝度値を1次補間してソースボリュームと等しいサイズのボリュームデータを再構成した。また、同一の断像列から抽出した輪郭を利用した形状ベース補間によってもソースボリュームと等しいサイズのボリュームデータを再構成した。円錐を描いた128をレベル値として、それぞれのボリュームからマーチングキューブ法[5]により等値面を求めた。

図4に示されるように、形状ベース補間では、断像列の抽出の方向によらず、1次補間に比べて円錐の母線が滑らかに復元されている。

#### 4.2 形状ベース補間と形状ベースVoxel Stuffingの比較

1方向の断像列から形状ベース補間によって、3方向の断像列から形状ベースVoxel Stuffingによって、それぞれソースボリュームと等しいサイズのボ

リュームデータを再構成した。得られたボリュームに対して、前述での実験と同様に等値面を求めた。

図5に再構成像を示す。xy平面から見た図において、形状ベース補間によって再構成した円錐の表面形状では、yz平面の断像列に基づく再構成像の母線に鋭角な凹凸が現れている。それに比べるとzx平面の断像列に基づく再構成像では、母線は滑らかである。これは、yz平面とzx平面における断像間での対象の変化量の差によっている。しかし、形状ベースVoxel Stuffingによって再構成された円錐では、母線が最も滑らかに再現されている。

zx平面から見た図において、形状ベース補間によって得られた表面形状では、母線が歪んだ円として再現されている。しかも、多角形として再現されている部分もある。さらに、zx平面の断像列に基づく再構成像では、厚みのない円錐として復元されている。一方、形状ベースVoxel Stuffingによって再構成された表面形状においては、母線は滑らかな円として再現されており、円錐は等しい厚みをもって復元されている。

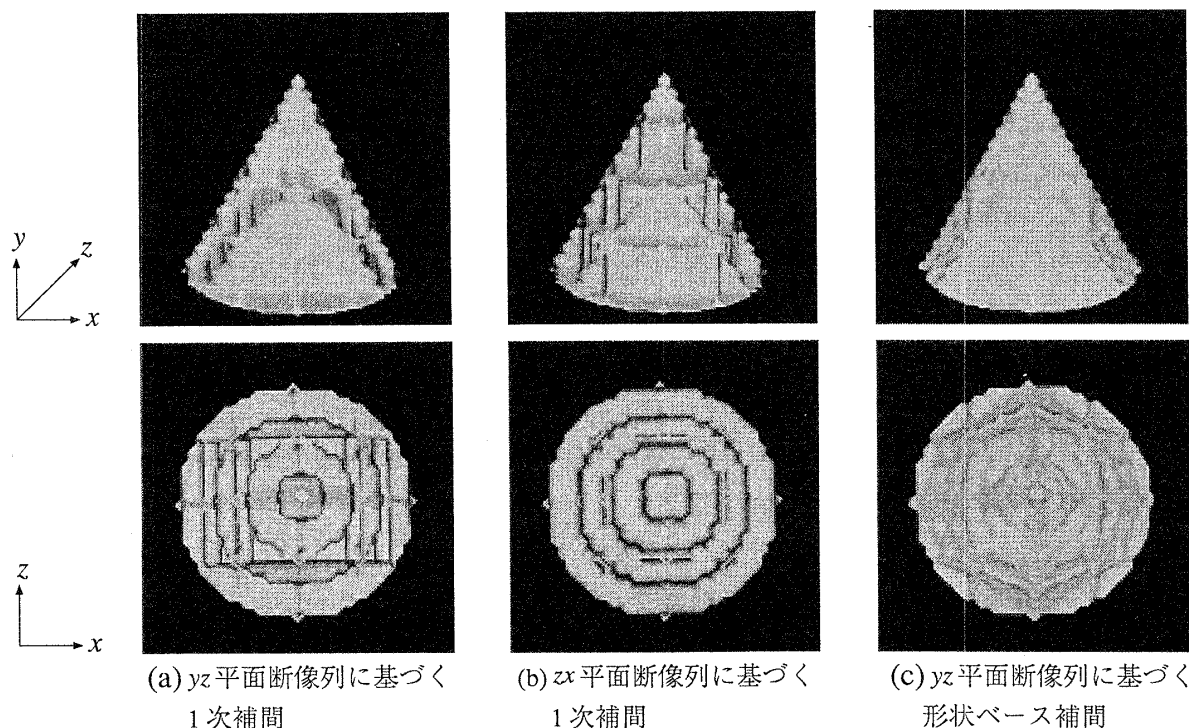


図4：1次補間と形状ベース補間による再構成

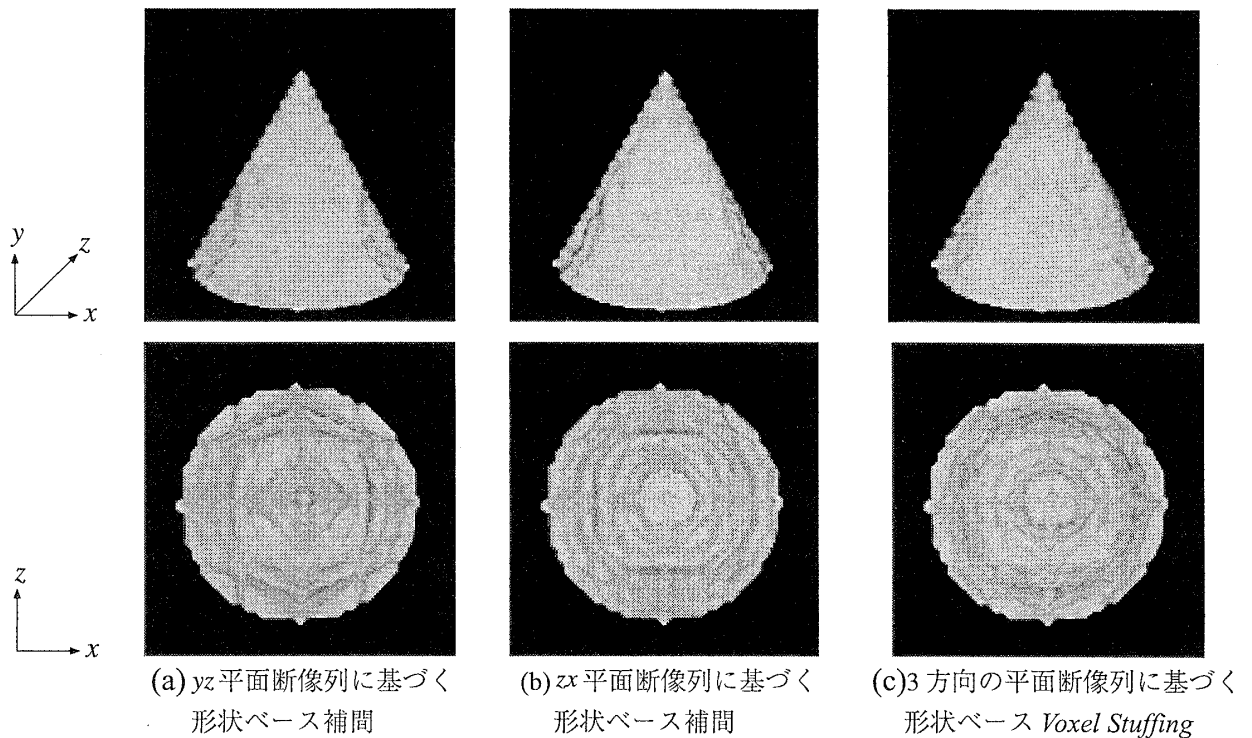


図 5 : 形状ベース補間と形状ベース *Voxel Stuffing* による再構成

## 5 考察と今後の課題

形状ベース補間と形状ベース *Voxel Stuffing* による再構成像の比較によって、対象の表面形状の忠実な復元における形状ベース *Voxel Stuffing* 再構成アルゴリズムの有効性が確認できた。このことにより、先に開発した *Voxel Stuffing* と形状ベース *Voxel Stuffing* の再構成アルゴリズムは、互いに相補的な関係にあることも確認できた。対象の解析において検討する属性に応じてこれらのアルゴリズムの選択が精度の向上に影響することが示唆された。

再構成したボリュームデータは定性的解析によって評価したが、今後は定量的解析を導入し、両者による評価を行う予定である。

さらに、輝度値によるボリュームと距離ボリュームで個別に表現されている特徴を統合させたボリュームを再構成し、複眼的に対象を観察できるように、*Voxel Stuffing* と形状ベース *Voxel Stuffing* を併せもつ再構成アルゴリズムの構築が今後の課題である。

## 参考文献

- [1] 立野玲子, 東多恵子, 櫻庭 均, 藤代一成, 複数の平行断像列に基づくボリュームデータの再構成, 情報処理学会 98-CG-89, 1998.2, pp. 23-30
- [2] 東多恵子, 立野玲子, 藤代一成, 3 方向平行断像列を使った高品質ボリュームデータの再構成アルゴリズム, 情報処理全国大会, 第 56 回, 6P-04, 1998.3
- [3] 立野玲子, 東多恵子, 山口裕美, 藤代一成, 櫻庭均, *Voxel Stuffing*: 複数の平行断像列からの高品質ボリュームデータの再構成, 画像電子学会情報処理学会 Visual Computing グラフィックスと CAD 合同シンポジウム' 99, 1999.6, pp.25-30
- [4] Raya S. P. and Udupa K. J.: "Shape-Based Interpolation of Multidimensional Objects," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 9, no. 1, pp. 32-42, March 1990.
- [5] Lorensen W. E. and Cline H. E.: "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," *ACM Computer Graphics*, vol. 21, no. 4, pp. 163-169, July 1987.
- [6] Upson C., et al.: "The Applications Visualization System: A computational Environment for Scientific Visualization," *IEEE Computer Graphics and Application*, vol. 9, no. 4, pp. 30-42, July 1989.