確率的ポイントレンダリングに基づく 3 次元融合画像の生成*

長谷川 恭子**

Generation of 3D Fusion Image Based on Stochastic Point-based Rendering

Kyoko HASEGAWA

1. 緒 論

医療分野では CT や MRI 等の普及により、人体内部の 3 次元データを容易に取得できるようになり、複雑な人体内部構造の可視化の要求が高まっている。一般に、3 次元ボリュームデータを可視化する手法としては、物体表面や等値面を可視化するサーフェスレンダリングと物体内部を直接可視化するボリュームレンダリングがある。物体内部を表現するためには、両可視化手法ともに半透明な可視化が必要となる。可視化手法としては、ボリュームレンダリングではレイキャスティング法が一般的に用いられ、サーフェスレンダリングでは、高速なレンダリング手法の開発が進められており、デプスピーリング法^{1,2)}は代表的な手法の 1 つである。一般的に半透明可視化を実現するためには、視線に沿って大量のポリゴンやサンプル点群をソートする必要がある、このソートが正しく実現できなければ正しい半透明効果を得ることができない。さらに、この並べ替えの計算量は n をサンプル点数とすれば $O(n \log(n))$ であるため、高精細な可視化であるほど急激に高くなる傾向にある。

並べ替えをせずにボリュームレンダリングが可能な手法として粒子ベースボリュームレンダリング³⁾がある。同手法では、物体内部の半透明な可視化は、不透明な発光粒子群の画像平面への投影と投影画像のアンサンブル平均で実現される。そのためソート処理が不要でありながら、従来の標準的なボリュームグラフィックス法であるレイキャスティング法と同等な半透明画像を生成できる。本研究では同手法をボリュームレンダリングだけでなくサーフェスレンダリングにも適用した、確率的ポイントレンダリング⁴⁾を開発し、本研究では粒子ベースボリュームレンダリングも含めて確率的ポイントレンダリングと呼ぶ。

本研究では、確率的ポイントレンダリングを用いてボリュームデータの 3 次元的な融合画像の生成を目的とす

る。融合画像としては、2 つの異なるボリュームデータからボリューム、サーフェス、断面、等高線を融合可視化し、さらに、異なる可視化対象についても融合可視化を行う。

2. 確率的ポイントレンダリング

確率的ポイントレンダリングは不透明な発光粒子群の画像平面への投影と投影画像の平均によって半透明画像を生成する手法である。本手法では、従来の半透明可視化において必須である描画プリミティブのソート処理を確率的な期待値計算に置き換えることでソート処理を不要にする。本手法の可視化手順は以下の通りである：

ステップ 1 (粒子生成)：可視化対象となるデータに基づいて粒子を生成する。生成される粒子は、中心の位置座標、色、法線をもち、粒子の大きさは画像平面上での投影像が 1 画素と同じ大きさであるとする。また、不透明度は粒子密度により決定され、密度の決定及び粒子生成手法については次節で詳述する。

ステップ 2 (粒子群分割)：生成した粒子群を複数の部分粒子群に分割する。ここで、各部分粒子群に含まれる粒子数は同一とし、統計的に互いに独立かつ同一な粒子密度をもつ。この部分粒子群の数をリピートレベル L_R と呼ぶ。

ステップ 3 (粒子投影)：各部分粒子群に対してそれぞれ、粒子の隠点消去処理を行い画像平面へ投影した中間画像を生成する。

ステップ 4 (画像平均)：各中間画像の輝度値を画素ごとに平均した平均画像を生成する。この平均画像における各画素値は視点から様々な距離にある粒子の色と背景色の期待値となる。

以上の 4 ステップによりソート処理が不要な半透明画像を生成することができる。

2.1 粒子密度による不透明度制御

確率的ポイントレンダリングでは、粒子密度に応じた粒子生成を行うことで、不透明度を制御することが可能である。本節では、可視化対象となる形状として、ボリューム、サーフェス、断面および等高線を対象とし、各々における粒子密度の決定と粒子生成手法について述

* 原稿受付 2016 年 8 月 8 日

** 正会員 立命館大学 情報理工学部
(〒 525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1,
E-mail : hasegawa@media.ritsumei.ac.jp)

べる。

2.1.1 ボリューム

可視化対象となる形状がボリュームの場合には、空間中に伝達関数で決定される不透明度分布に比例する密度分布で粒子を生成する。ここで、伝達関数とは CT や MRI などのボリュームデータの濃淡値と色・不透明度を対応付けるマッピングテーブルのことである。ボリュームデータにおいて確率的ポイントレンダリングを用いて可視化する場合には 3 次元的な不透明度分布 $\alpha_{3d}(\mathbf{x})$ を制御する。密度分布

$$\rho_{3d}(\mathbf{x}) = -\frac{\log(1 - \alpha_{3d}(\mathbf{x}))}{s_p \Delta t}, \quad (1)$$

に従って、メトロポリスサンプリング法や棄却サンプリング法などに基づく空間サンプリングを実行して粒子生成を行えば良い。ここで、 s_p は粒子断面積、 Δt はレイキャスティング法におけるレイ上のサンプリング間隔に対応するパラメタである。このため、ボリュームレンダリングの場合にはレイキャスティングと同様の可視化結果を得ることができる³⁾。

2.1.2 サーフェス

可視化形状がサーフェスの場合の粒子生成方法について述べる。等値面のような面上の濃淡値が一様である場合にはサーフェス上で定義される不透明度 α_{2d} に応じて一様な粒子密度で粒子を生成する。等値面はマーチングキューブ法を用いれば、ボリュームデータから容易に生成で可能である。これにより生成された等値面はポリゴン群からなるため、等値面の総表面積 s_A が計算できる。確率的ポイントレンダリングでは、サーフェス上に生成する粒子数 n は二項分布に基づく確率論から

$$n = -\frac{\log(1 - \alpha_{2d})}{\log(1 - s_p/s_A)} L_R, \quad (2)$$

で定義される⁴⁾。サーフェス上に粒子を生成するために本研究では、 s_A を正方形の面積と仮定して生成粒子の間隔 d を

$$d = \sqrt{\frac{s_A}{n}}, \quad (3)$$

で定義し、Fig. 1 (a)に示すようにポリゴンごとに粒子を生成する。本研究ではポリゴンごとに等間隔で粒子を生成するために、まずポリゴンのエッジ上に粒子を生成した後、ポリゴン内部に格子上に粒子を生成する。最後に、全てのポリゴン上に粒子を生成した後に全粒子をシャッフルする。これは確率的ポイントレンダリングのステップ2において各部分粒子群が統計的に互いに独立かつ同一になるようにするためである。

次に、ボリュームデータ内に等値面とは異なる適当な曲面を切り出して可視化するような、濃淡値が非一様なサーフェスの場合を考える。このとき粒子間距離を不透明度 α_{2d} の関数 $d(\alpha_{2d})$ であると定義する。Fig. 1 (b)に示すように、サーフェス上に生成した粒子から密度値を計算し、式(3)を用いて粒子間距離を決定する。不透明

Fig. 1 Creating particles on the polygon; (a) creating particles in case of uniform opacity, (b) creating particles in case of non-uniform opacity.

度はボリュームデータの濃淡値とその伝達関数により決定できる。これにより、サーフェス上の位置に依存して粒子密度が変更され、非一様な不透明度をもつサーフェスを可視化することができる。

2.1.3 断面

可視化形状がボリュームデータの断面の場合について粒子生成方法を述べる。まず、断面の不透明度が一様と仮定した場合には、断面上に断面積を s_A として式(2)で定義される粒子数の粒子を生成する。生成は、一様乱数を用いて断面上に一様に粒子を生成する。このとき粒子の色はボリュームデータとその伝達関数から決定できる。

次に、断面上の不透明度が非一様な場合について述べる。ボリュームデータのセルの断面積を s_A として、ボリュームのセルごとに粒子数を決定し、粒子を生成すれば非一様な不透明度をもつ断面が可視化できる。しかしながらボリュームデータが高解像度になると、断面積 s_A が粒子断面積 s_p より小さくなることもある。この場合、各セルにおける式(2)において粒子数の計算が不正確になる。そのため Fig. 2 (a), (b)のように、複数のセルから成る部分領域を定義する。それぞれの部分領域の面積を s_A として式(2)を用いて粒子数を計算することで、微小領域の内部では不透明度が一定であるが、スライス全体では不透明度が非一様となるスライス画像を生成することができる。このとき各部分領域では、含まれるセルの濃淡値と伝達関数とを対応付けて各セルの不透明度を決定する。本研究では、部分領域に含まれるセルの不透明度の平均を部分領域全体の不透明度とみなす (Fig. 2 (c)).

Fig. 2 Definition of the cell and subdomain for non-uniform transparent slice image; (a) cell, (b) subdomain, (c) final image.

2.1.4 等高線

可視化形状が断面上の等高線の場合について粒子生成方法を述べる。Fig. 3 (a)に示すように、断面上に等高

線を生成する．等高線を描画する場合，本研究では，等高線の面積 s_A を $s_A = (\text{等高線の長さ}) \times s_p$ で定義する．等高線の長さは各セルでの線の長さの総和で計算できるため，等高線上の粒子数及び粒子間隔はそれぞれ式(2)及び(3)で決定できる．これにより，Fig. 3 (b)に示すように，等高線上に粒子を配置することで，不透明度に応じた粒子密度で等高線を可視化することが可能である．このとき等高線線上の粒子の法線は断面の法線と同様である．また，サーフェスの場合と同様に，各部分粒子群が統計的に互いに独立かつ同一になるように粒子を生成後にシャッフルを行う．

Fig. 3 Creating particles on the contour line; (a) contour line, (b) sampling of a line.

2.2 融合可視化

確率的ポイントレンダリングの利点はソート処理が不要であるという点以外にもう1つある．それは融合可視化が容易であるという点である．前述の通り，確率的ポイントレンダリングでは，ボリューム，サーフェス，断面，等高線の全ての可視化対象データを一度粒子へ変換する．粒子データは接続情報もなく，位置情報のみであるため，統合が容易に行える⁵⁾．統合されたデータに対して，ステップ2から4を行えば容易に融合可視化が実現できる (Fig. 4)．さらに，ソート処理が不要であるため，複雑に交差する面があっても，正確に可視化することが可能である．

3. 融合画像の生成

確率的ポイントレンダリングでは，可視化対象を一度

Fig. 4 Fused visualization by combining with the particles.

粒子化することにより，どのようなデータに対しても融合可視化が可能である．本章では2つの異なるボリュームデータを用いて可視化対象となる形状が同一の場合と異なる場合のそれぞれの融合可視化結果を示す．本章を通して，特に記述がない場合の L_R は500である．

3.1 可視化対象となる形状が同一の場合

2つの異なるボリュームデータの融合画像を生成する．1つは人体胸部のCT画像から生成されたボリュームデータであり，確率的ポイントレンダリングでボリュームレンダリングした結果を Fig. 5 (a)に示す．一方のデータは人体胸部に重粒子線をあてた際の線量分布のシミュレーション結果であり同様にボリュームレンダリングした結果を Fig. 5 (b)に示す．それぞれの粒子生成に用いた伝達関数を Fig. 6に示す．Fig. 6では横軸がボリュームデータの濃淡値であり，各濃淡値における色(上部)及び不透明度(下部)を表している．Fig. 5 (a)及び(b)で生成した粒子数はそれぞれ，約5,600万点及1,000万点である．さらに，Fig. 7にボリュームレンダリングの融合可視化結果を示す．同図は Fig. 5に示す粒子を統合するだけで容易に結果を得ることができる．また，Fig. 5および Fig. 7では $L_R=200$ である．通常，

Fig. 5 Volume data sets; (a) Human-breast, (b) Dose distribution.

Fig. 6 Transfer function; (a) visualization for human-breast, (b) visualization for dose distribution.

Fig. 7 Result of fused visualization of volume rendering.

レイキャスティングを用いたボリュームレンダリングでは、異なるボリュームデータを融合して可視化する場合に、一方の情報を削除してレンダリングしたり、他方をオーバーレイしたりして描画されることが多い。しかしながら確率的ポイントレンダリングでは、Fig. 7 に示すようにデータの削除や変更なしに容易に融合可視化結果を得ることが可能である。

Fig. 8 に可視化対象がサーフェスの場合の可視化結果を示す。Fig. 8 (a) は人体胸部のボリュームデータにおける濃淡値がそれぞれ-141.3, 300.1, 741.5 の3つの等値面を描画しており、Fig. 8 (b) は線量分布のボリュームデータにおいて 3921.2, 588.8, 7842.4 の3つの等値面を可視化している。これらのサーフェスの不透明度は全て 0.2 であり、生成された粒子数は、人体胸部のデータ及び線量分布のデータに対してそれぞれ3等値面合わせて約 9,100 万点及び 430 万点である。Fig. 8 (c) は (a) 及び (b) を融合可視化した結果である。複雑に交差する様な面であっても、ソート処理の必要がない確率的ポイントレンダリングでは、位置情報が正確な可視化結果得られていることがわかる。

Fig. 9 は可視化対象として不透明度が一樣な $z = 25$ の断面の可視化結果である。Fig. 9 (a) に示す人体胸部の断面図において、ボリュームデータの濃淡値が-1024 以下のセルに対しては空気であると見なし粒子を除去した。Fig. 9 (a) 及び (b) の不透明度はそれぞれ 0.5 及び 0.3 であり、生成された粒子数はそれぞれ約 4,400 万点及び 1,100 万点である。同図における粒子の色は、Fig. 6 に示すボリュームレンダリングに用いた伝達関数

Fig. 8 Fused visualization of surface rendering; (a) human-breast, (b) dose distribution, (c) fused visualization.

の色を採用している。Fig. 9 (c) に示す融合可視化結果が示す通り、断面は平面で可視化されているため、断面同士の融合可視化結果は画像のオーバーレイと同様の可視化結果が得られている。

Fig. 10 には可視化対象が等高線の場合の可視化結果を示す。等高線の不透明度は全て 1.0 である。等高線は Fig. 9 に示す $z = 25$ の断面上で生成し、また、Fig. 8 で

Fig. 9 Fused visualization of slice surface rendering; (a) human-breast, (b) dose distribution, (c) fused visualization.

Fig. 10 Fused visualization of contour line rendering; (a).

可視化した等値面の値と同じ濃淡値で3本の等高線を描画する。粒子の色はボリューム及び断面と同様に伝達関数の色を採用した。Fig.10(a)及び(b)はそれぞれ人体胸部、線量分布のデータであり、生成した粒子数はそれぞれ約2,800万点及び270万点である。これらを融合可視化した結果をFig.10(c)に示す。以上より、可視化対象となる形状が同一の場合に容易に融合可視化が得られていることが分かった。

次に、Table 1 及び Table 2 に人体胸部および線量分布データのボリューム、サーフェス、断面、等高線における粒子生成速度及び可視化時間を示す。ここで用いた計算機環境は、CPUがIntel Core i7 (3.60 GHz)、メインメモリが64GB、グラフィックスカードがNVIDIA GeForce GTX780である。同表から分かる通り、粒子の生成時間は粒子数に依存しており、可視化対象における粒子の生成手法には依存していない。また、可視化時間をみると高速な可視化ができていていることが分かる。

3.2 可視化対象となる形状が異なる場合

Fig.11に可視化対象が異なる場合の融合可視化結果を示す。同図では、人体胸部のボリュームデータから生成したサーフェスと等高線および不透明度が非一様な断

Table 1 Time of creating particles in human-breast.

可視化対象	粒子数 [万点]	生成時間 [s]	可視化時間 [s]
ボリューム	5,600	10.78	0.08
サーフェス	9,100	11.14	0.41
断面	4,400	6.06	0.26
等高線	2,800	2.34	0.21

Table 2 Time of creating particles in dose distribution.

可視化対象	粒子数 [万点]	生成時間 [s]	可視化時間 [s]
ボリューム	1,000	1.88	0.08
サーフェス	430	0.53	0.04
断面	1,100	2.00	0.19
等高線	270	0.19	0.18

Fig.11 Fused visualization of surface, surface with non-uniform opacity and contour line.

面に加えて線量分布データから生成した断面を融合して可視化した結果である。全粒子数は約7,300万点である。同図から分かるように、様々な可視化対象のデータを融合しても前後関係に違和感のない可視化結果を得ることができている。

4. 結論

本研究では、確率的ポイントレンダリングを用いたボリューム、サーフェス、断面、等高線に対する粒子生成手法について述べた。さらに本手法では、粒子を混ぜ合わせるだけで融合可視化を容易に得ることが可能であり、本研究では、2つの異なるボリュームデータの融合画像の生成を行った。確率的ポイントレンダリングはソート処理が不要であり、かつ、融合可視化が容易であるため、異なるボリュームデータに対して、異なる可視化対象を可視化しても3次元的に正確な可視化結果を高速に得ることが可能であることを示した。

謝 辞

本研究を進めるにあたり素晴らしい研究環境を与えて頂くとともに、多大なるご指導・ご助言を賜りました立命館大学 田中覚教授に暑く御礼申し上げます。また、本研究結果はKyoto Visualization Systemを用いて可視化しており、貴重なご意見を頂きました京都大学 小山田耕二教授、神戸大学 坂本尚久氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Everitt, C.: Interactive Order-Independent Transparency, Technical report, NVIDIA Corporation (2001).
- 2) Bavoil, L., Myers, K.: Order Independent Transparency with Dual Depth Peeling, Technical report, NVIDIA Corporation (2008).
- 3) Koyamada, K., Sakamoto, N., Tanaka, S.: A Particle Modeling for Rendering Irregular Volumes, Proc. of the Int. Conf. Computer Modeling and Simulation (UKSIM 2008) (2008) pp.372-377.
- 4) Tanaka, S., Morisaki, A., Nakata, S., Fukuda, Y., Yamamoto, H.: Sampling Implicit Surfaces Based on Stochastic Differential Equations with Converging Constraint, Computers & Graphics, Vol.24, Issue 3 (2000) pp.419-431.
- 5) Hasegawa, K., Ojima, S., Shimokubo, Y., Nakata, S., Hachimura, K., Tanaka, S.: Particle-Based Transparent Fused Visualization Applied to Medical Volume Data, Int. J. Modeling, Simulation, and Scientific Computing, Vol.4, Suppl. 1 (2013) 1341003 (11 pages).