

平成 21 年 6 月 26 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18500092
 研究課題名(和文) 仮想手術で変形する軟組織の高速可視化のための、
 非構造格子データの正規格子化
 研究課題名(英文) Generation of regular-grid data from irregular/non-grid data
 to visualize transformable soft tissues in virtual operation
 研究代表者
 田中 覚 (TANAKA SATOSHI)
 立命館大学・情報理工学部・教授
 研究者番号：60251980

研究成果の概要：

本研究は、ボリュームデータを、格子構造の情報に頼らずに精密に補間して高品質なスカラー場を生成し、これを医療手術(のシミュレーション)等で変形する軟組織の可視化に利用する技術を開発したものである。補間手法としては、入力 of 離散スカラー値分布に関して、正規格子データにおける均一な分布であっても、また、非正規格子/非格子データにおける不均一分布であっても適用可能な「ボリューム MPU 法」を開発した。これにより、正規格子データが手術シミュレーションによって変形して非正規格子データになっても、精密な補間と高品質な可視化が可能になった。また、可視化に関しては、ボリュームデータの標準的な可視化手法であるレイキャスティング法とボリューム MPU 法の親和性が良いことを確認した。加えて、大規模データの可視化に適した「モンテカルロ法に基づくポイント・グラフィックス」等を開発し、これらをボリュームデータ等値面の高品質可視化や半透明な透過的可視化に応用する手法を開発した。さらに、開発した手法の構造解析への応用についても追求し、その有効性を確かめることができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,700,000	0	1,700,000
2007 年度	800,000	240,000	1,040,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,000,000	390,000	3,390,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：ボリュームデータ、補間、格子構造不依存、可視化、高品質、圧縮

1. 研究開始当初の背景

計測技術の進歩、そして計測データを処理する計算機の性能向上により、大量の 3 次元点群を補間して計算機内に形状復元する技

術に対する要求が高まっていた。例えば、曲面の復元に関しては、レーザ光線を使ったレンジセンサのデータから文化遺跡等の形状を復元する技術への要求であり、ボリューム

データの復元に関しては、CT スキャナなどのデータから人体の病巣などを再構成して可視化する技術への要求である。

曲面の高品質補間に関しては、2003 年に大竹等により、大量点群に適用可能な方法として「MPU 法」が発表され、注目された。一方、ボリュームデータの高品質補間に関しては、正規格子データに関しては、スプライン補間が主に用いられている。非正規格子データに関しては、スプライン補間は適用可能である。しかし、スプライン補間には、点群密度に大きな偏りがある場合には適用が困難、計算速度が遅い、正規格子データと非正規格子データでは計算プログラムを大きく変える必要がある、微分データでは品質が低下する、などの不十分な点がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記のような現状認識に立ち、曲面の補間で成功した MPU 法を拡張・改良することで、スプライン補間の欠点を克服した新しい高品質ボリュームデータ補間法を開発することである。さらに、開発した補間法を活かすボリューム・グラフィックスの手法も合わせて開発する。開発手法の適応対象としては、人体を記述する非正規格子型または非格子型のボリュームデータを取りあげる。これは、計算機内の仮想手術にともなうデータの加工により、CT など得られた正規格子データが非正規格子データに変換されることを想定したものである。

3. 研究の方法

(1) MPU 法の改良と拡張(ボリューム MPU 法)

MPU 法の基本的な考え方は以下のとおりである。まず、点群データが存在する全空間(の外接直方体)を立方体形状にスケール変換して正規化する。次に全空間を、8 分木を用いて、適切な大きさの小立方体領域になるまで再帰的に分割する。空間を分割する度に、各小立方体領域を囲む球形領域(「球形サポート」)に含まれる点群データに対して、2 次の「局所補間関数」 $Q_i(x)$ (i は小領域の番号)での補間を試みる。補間が指定精度を満たせばこれを採用、満たさなければ空間分割を継続する。ここで精度の検証は、入力データの点群位置で $Q_i(x)$ を評価することで行う。こうして、MPU 法の出力として、適応的に定められた大きさの小立方体領域の集合と、それらの各々に登録された 2 次関数群 $\{Q_i(x)\}$ および球形サポート群が得られる。以下では 2 次関数と球形サポートの情報を登録した小立方体領域を「MPU セル」と呼ぶ。図 1 に、MPU 法における分割の概念図を示す。正方形は MPU セル、円は球形サポートを表す。

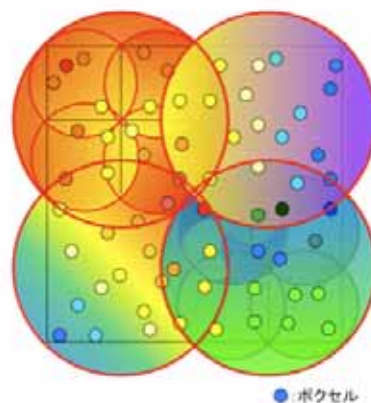


図 1 MPU 法の空間分割

補間関数 $f(x)$ の値は以下のように評価される。まず、評価点 x を含む球形サポート群が登録された MPU セルを全て取り出す。次に、取り出した MPU セルが持つ局所補間関数 $Q_i(x)$ の値をそれぞれ評価し、得られた評価値を平均する。各球形サポート内でのみゼロでない値を持つ「コンパクトサポート関数」 $\varphi_i(x)$ を重みと重み付き平均である。これを式で表すと以下ようになる：

$$f(x) = \sum_i Q_i(x) \varphi_i(x)$$

ここで和は、(上記の意味で) 評価点 x に関係する MPU セルに関してとる。このように、各局所領域で適宜に平均を取ることで、精度と滑らかさの双方に優れた補間が実現する。

本研究では、上記のような従来の MPU 法を、ボリュームデータに適用できるように改良・拡張する。従来の MPU 法は、ボリュームデータに適用するには、補間能力が不足している。また、ボリュームデータは大規模データであることが多いため、できるだけメモリ使用量の少ない補間計算を行うことが望ましい。さらに、全空間を立方体形状にスケール変換することは、スカラー場の分布を歪めることになり、補間スカラー値そのものを出力とすべきボリュームデータの補間には適さない。そのため、以下の改良を行った：

- (a) 全空間を立方体形状に正規化するスケール変換は行わない。これにより、MPU セルは直方体形状、サポートは楕円面形状となる。
- (b) 全空間が細長いまたは薄い直方体形状である場合には 2 分木と 8 分木を併用する。まず、常に最長辺を 2 分割するような 2 分木による分割を行い、小直方体領域の最長辺と最短辺の比が分割によって 1 に近づく間、これを続行する。その後は 8 分木による分割に切り替える。これにより、MPU セルを立方体に近づけることができ、補間精度が向上する。
- (c) 局所補間関数 $Q_i(x)$ の生成においては、ゼロ次、1 次、2 次、3 次の順に低次式から補間

を試み、できるだけ低い次数で補間を行う。これにより、メモリ効率が向上する。(d)コンパクトサポート関数 $\phi_i(x)$ としては、3 次の B-Spline 関数を用いる。これにより、補間場 $f(x)$ は 2 階微分まで連続となり、高品質な補間が実現する。

なお、以下では、従来の MPU 法と区別するために、提案手法を「ボリューム MPU 法」と呼ぶことにする。

(2) モンテカルロ・ボリューム・グラフィックス法

ボリューム MPU 法が生成する高品質な補間場を、可視化に有効利用する一例として、メトロポリス法に基づく新しいモンテカルロ・ボリューム・グラフィックス法(MCVG)を開発した。MCVG は、ボリュームデータのカラー値分布(またはそれを伝達関数で変換した分布)を確率密度分布と見なし、これに従って空間を確率的にサンプリングし、得られたサンプル点を画像平面に投影することで可視化を行うものである。可視化の注目点の近傍を集中的にサンプリングすることが可能であり、大規模データの効率的可視化に適している。

MCVG における確率的なサンプリングの基礎となる確率密度関数として、従来の 3 重線形補間場を採用することは好ましくない。補間場が滑らかでなく、それに由来する疑似的な極小点が多数存在し、それがサンプル点の時間発展を妨げるからである。滑らかな補間場を生成するボリューム MPU 法は、MCVG に適した補間法と言える。なお、滑らかさという点では、スプライン補間も優れた補間法である。しかし、ボリューム MPU 法の方が、滑らかさにおいても計算速度においても優れている。

(3) 構造解析への応用

構造解析では、空間を適当な小領域に分割した上で、小領域ごとに積分などの計算を行う。このため、構造解析の精度は、空間分割に大きく依存する。そこで、ボリューム MPU 法で得られた空間分割を利用する。これは、低次の関数で補間できる程度に変動が穏やかな小領域に分割された空間を構造解析に利用することを意味し、ひとつの適応的な構造解析手法と言える。本研究では、とくに、複雑形状の分析に適した構造解析手法であるメッシュフリー法を取り上げる。

4. 研究成果

(1) MPU 法の改良と拡張(ボリューム MPU 法)

人体及び科学研究における大規模データにボリューム MPU 法を適用し、その有効性を確認した。図 2(左)はプラズマの四面体格子データ、図 2(右)は人体足部のランダム

な離散点群で定義された非格子データを、それぞれボリューム MPU 法で補間し、可視化したものである。図 3 は地球規模の海流データを補間し、可視化したものである。

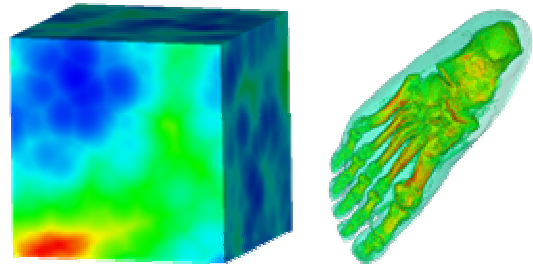


図 2 非正規格子データの可視化

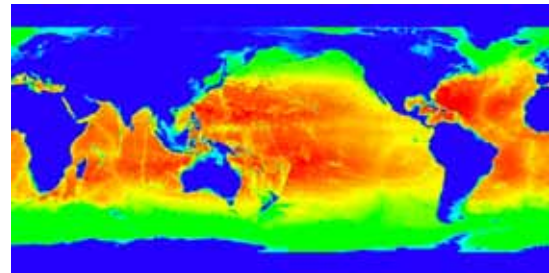


図 3 海流データの可視化

(2) モンテカルロ・ボリューム・グラフィックス法

正規、非正規格子型のボリュームデータを補間し、これを確率密度関数として MCVG を実行し、その有効性を確かめた。図 4 は人体の足部を、骨の部分を中心サンプリングして可視化した者である。また、並列処理の効率が極めて高いことを確かめた。

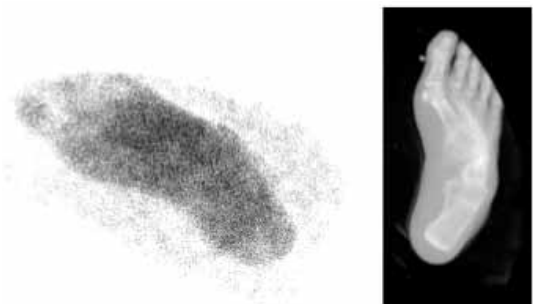


図 1 MCVG 法の実行例

(3) 構造解析への応用

ボリューム MPU 法の空間分割で得られる小領域を、複雑形状に適用可能な構造解析手法として最近注目されている「メッシュフリー法」に応用できることまでを実証した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計10件)

木村彰徳, 八田拓也, 市村智和, 仲田晋, 田中覚, "複雑な陰関数曲面モデルの確率過程的並列サンプリング," 電子情報通信学

会論文誌, Vol. J92-D, No.3, pp.439-442, 2009. 査読有り。

J. Allison, M. Asai, G. Barrand, M. Donszelmann, K. Minamoto, J. Perl, S. Tanaka, E. Tcherniaev, J. Tinslay, "The Geant4 Visualisation System," Computer Physics Communications, Vol.178, pp.331-365, 2008. 査読有り。

Kyoko Hasegawa, Susumu Nakata, Satoshi Tanaka, "A Fast Solver for 3D Meshless Analysis Based on RPIM," Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol.56, pp439-444, 2007. 査読有り。

小嶋一行, 岡将史, 柴田章博, 仲田晋, 田中覚, "陰関数曲面上における粒子拡散法を用いた高密度・大量点群のポリゴン化," 可視化情報学会論文集, Vol.27, No.9, pp.77-83, 2007. 査読有り。

Akinori Kimura, Ayumu Saitoh, Takashi Sasaki, Satoshi Tanaka, "gMocren: a visualization tool for Genat4 medical applications," Int. J. of Computer Assisted Radiology and Surgery, Vol.2, pp. 459-460, 2007. 査読有り。

Yoshitomo Jo, Masafumi Oka, Akinori Kimura, Kyoko Hasegawa, Ayumu Saitoh, Susumu Nakata, Akihiro Shibata, Satoshi Tanaka, "Stochastic Visualization of Intersection

Curves of Implicit Surfaces," Computers & Graphics, Vol.31, No.2, pp. 230-242, 2007. 査読有り。

Kyoko Hasegawa, Susumu Nakata, Satoshi Tanaka, "Meshless Method for Structural Analysis Based on Surface Reconstruction," Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol.55, pp.247-252, 2006. 査読有り。

Akinori Kimura, Satoshi Tanaka, Takashi Sasaki, "A Visualization Tool for Geant4-Based Medical Physics

Applications," International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, Vol.1, pp.462-463, 2006.

査読有り。

長谷川恭子, 仲田晋, 田中覚,

"曲面モデルに基づくメッシュレス解析のための節点生成," 計算数理工学論文集, Vol.6, No.1, pp.61-64, 2006. 査読有り。

藤本大地, 伊東拓, 仲田晋, 北川高嗣, 岡将史, 田中覚, "MPU法に基づく色情報付き陰関数曲面の生成,"

電子情報通信学会論文誌, Vol. J89-D, No.6, pp.1391-1402, 2006. 査読有り。

[学会発表](計17件)

塚本勇介, 片岡慎二, 伊藤慎, 長谷川恭子, 田中覚, 仲田晋, "Volume MPU法を用いた格子構造に依存しないデータ補間," 第71回情報処理学会全国大会, pp.4-297-4-298, 滋賀, March 10-12, 2009. 査読無し。

伊藤慎, 片岡慎二, 塚本勇介, 長谷川恭子, 仲田晋, 田中覚, "MPU法に基づく大規模ボリューム・データの補間とデータ圧縮," 可視化情報全国講演会(釧路2008)講演論文集, pp175-176, 北海道, October 11-12, 2008. 査読無し。

中島英雄, 仲田晋, 田中覚, "モンテカルロ・ボリューム・グラフィックスのための確率微分方程式を用いたサンプリング," 第27回日本シミュレーション学会大会発表論文集, pp303-306, 滋賀, June 19-20, 2008. 査読無し。

宮本純子, 坂本尚久, 小山田耕二, 田中覚, "サブピクセル法を取り入れたモンテカルロ・ボリューム・グラフィックス," 第27回日本シミュレーション学会大会発表論文集, pp307-310, 滋賀, June 19-20, 2008. 査読無し。

A.Kimura, T.Sasaki, S.Tanaka, "Volume Visualization Driver in Geant4 for Radiotherapy Simulation," IEEE Nuclear Science Symposium Conference, October 2008. 査読有り。

A.Kimura, T.Aso, A.Saitoh, K.Hasegawa, T.Sasaki, S.Tanaka, "DICOM Handling Tools for Geant4-based Radiotherapy Simulation," CARS 2008 - Computer Assisted Radiology and Surgery 22nd International Congress and Exhibition 2008, Barcelona (Spain), June 2008. 査読有り。

Koji Koyamada, Naohisa Sakamoto, Satoshi Tanaka, "A Particle Modeling for Rendering Irregular Volumes," International Conference on Computer Modeling and Simulation (UKSIM

2008), Cambridge, England, April 13, 2008. (International Conference on Computer Modeling and Simulation, pp.372-377, 2008.) 査読有り。
Naohisa Sakamoto, Koji Koyamada, Ayumu Saito, Akinori Kimura, Satoshi Tanaka, "Multi-Volume Rendering Using Particle Fusion," IEEE VGTC Pacific Visualization Symposium 2008, Kyoto, Japan, March 5 - 7, 2008. 査読有り。

Ayumu Saitoh, Akinori Kimura, Takashi Sasaki, Satoshi Tanaka, "gMocren: High-Quality Volume Visualization Tool for Geant4 Simulation," IEEE Nuclear Science Symposium, Honolulu, Hawaii, October 29-November 2, 2007. 査読有り。

Akinori Kimura, Ayumu Saitoh, Tsukasa Aso, Takashi Sasaki, Satoshi Tanaka, "Requirements in Modeling and Visualization for Geant4-Based Radiotherapy Simulation," IEEE Nuclear Science Symposium, Honolulu, Hawaii, October 29-November 2, 2007. 査読有り。

Satoshi Tanaka, Takuya Hatta, Frederika Rambu Ngana, Ayumu Saitoh, Naohisa Sakamoto, Jorji Nonaka, Koji Koyamada, "Grid-independent Metropolis sampling for volume visualization," 6th EUROSIM Congress on Modeling and Simulation (EUROSIM 2007), Ljubljana, Slovenia, September 9-13, 2007. 査読有り。

A. Kimura, A. Saitoh, T. Sasaki, S. Tanaka, "gMocren: a visualization tool for Geant4 medical applications," Computer Assisted Radiology and Surgery, 21st International Congress and Exhibition (CARS 2007), Berlin, Germany, June 27-30, 2007. 査読有り。

Masafumi Oka, Susumu Nakata, Satoshi Tanaka, "Preprocessing for accelerating convergence of repulsive-particle systems for sampling

implicit surfaces," IEEE SMI '07 (Shape Modeling International 2007) Lyon, France, June 13-15, 2007. 査読有り。
Naohisa Sakamoto, Jorji Nonaka, Koji Koyamada, Satoshi Tanaka, "Particle-based Volume Rendering," Asia-Pacific Symposium on Visualization 2007, Sydney, New South Wales, Australia, February 5-7, 2007.

査読有り。

Naohisa Sakamoto, Jorji Nonaka, Koji Koyamada, Satoshi Tanaka, "Volume Rendering Using Tiny Particles," IEEE International Symposium on Multimedia (ISM2006), San Diego, California, USA, December 11-13, 2006. 査読有り。

Frederika Rambu Ngana, Takuya Hatta, Naohisa Sakamoto, Jorji Nonaka, Satoshi Tanaka, Koji Koyamada, "Volume Rendering with a Grid-Independent Illuminant Particle Model," IEEE Visualization 2006, Baltimore, Maryland, USA, October 29-November 3, 2006. 査読有り。

Akinori Kimura, Satoshi Tanaka, Ayumu Saitoh, Takashi Sasaki, "GRAPE: A visualization tool for Geant4-based medical physics applications," IEEE Nuclear Science Symposium 2006, San Diego, California, USA, October 29-November 4, 2006. 査読有り。

【その他】

可視化情報学会第19期学会賞(論文賞)
(雑誌論文 に対して)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 覚 (TANAKA SATOSHI)
立命館大学・情報理工学部・教授
研究者番号: 60251980

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし