B 8 0 6

MPU 法に基づく非正規格子型ボリウムデータの補間

塚本 勇介*(立命館大学大学院), 片岡 慎二(立命館大学大学院), 伊藤 慎(立命館大学大学院),
長谷川 恭子(科学技術振興機構), 仲田 晋(立命館大学), 田中 寛(立命館大学)

Interpolation of Irregular-grid Volume Data based on the MPU method

Yusuke TSUKAMOTO, Shinji KATAOKA, Shin ITO,
Kyoko HASEGAWA, Susumu NAKATA and Satoshi TANAKA

ABSTRACT

Recently, requirements for visualizing irregular-grid volume data, by which we mean volume data consisting of non-cubic cells or without cell structure, are increasing. For example, volume data treated in the structural analysis often have the tetrahedral cell structure. And geological data such as underground pressure distribution sometimes do not form any cell structure, that is, they are scattered-point data. On the other hand, many of volume visualization methods rely on the cubic (or possibly rectangular) cell structure of given volume data. Therefore, it is hard to visualize non-cubic-cell or non-cell volume data with satisfactory speeds, especially for large-scale data. In this paper we propose a method (the Volume MPU method) to interpolate discrete volume data without depending on their cell structures. Once the interpolation is done, we can execute resampling to generate cubic-structural data with arbitrary resolution. It should also be remarked that the interpolated field and its gradient field are continuous in the whole space. It leads to high-quality resampling and visualization. We present several examples of applying our method to 2D and 3D volume data and demonstrate its effectiveness.

Keywords: MPU method, Volume graphics, Implicit surface, Interpolation

1. 序 論

ボリウムグラフィックスは、対象の内部構造やその振る舞いを可視化する技術であり、科学・工学の様々な分野における有効な視覚的洞察手段である¹⁾。対象となるボリウムデータには、立方体型あるいは直方体型の格子構造をとる正規格子型データ、それ以外（四面体型など）の格子構造をとる非正規格子型のデータ、そして、格子構造を持たない非格子構造型データが存在する。以下では、簡単のため、非正規格子型データと非格子型データを合わせて、「非正規格子型データ」と呼ぶ。

近年、非正規格子型データの処理・可視化の要求が高まっている。たとえば、しばしば構造解析で扱われるボリウムデータは四面体格子構造をとる非正規格子型データである。また、地下圧力分布のような地質学的データは格子構造をとらない離散点群データであり、これも非正規格子型データである。一方、ボリウムデータの可視化手法の多くは、対象が正規格子型データであることを前提としている。したがって、大規模な非正規格子型データを十分な速度で可視化することは難しい。

本論文では、2003 年に Ohtake らによって提案された Multi-level Partition of Unity (MPU) 法²⁾を応用し、格子構造に依存しないボリウムデータの補間手法として、Volume MPU 法を提案する。提案手法では、全空間で微分まで連続である良質なスカラー場を生成する。これを用いることにより、リサンプリングによる正規格子型データの生成、高品質な可視化などが可能となる。

2. Volume MPU 法とボリウムデータの補間

Volume MPU 法が生成する連続スカラー場 $f(\mathbf{x})$ は

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \varphi_i(\mathbf{x}) Q_i(\mathbf{x}), \quad (1)$$

の形で定義される。ただし $\varphi_i(\mathbf{x})$ は $f(\mathbf{x})$ の評価点 $\mathbf{x}$ が含まれる領域の局所補間関数 $Q_i(\mathbf{x})$ を滑らかに重ね合わせるためのコンパクト・サポート関数である。Volume MPU 法では要求した補間精度が満たされるまで空間の再分割と補間関数の生成を再帰的に行う。最後に各領域で得られた補間関数を滑らかに結合することで、全空間を記述する連続スカラー場 $f(\mathbf{x})$ を構成する。

局所補間関数 $Q_i(\mathbf{x})$ は、次数が高いほど自由度が高く各局所領域に含まれる離散的なボクセルデータを補間

Fig. 1 Visualization of input volume data.

しやすい反面、保存しなければならない係数は増大する。本研究では $Q_i(\mathbf{x})$ として 0~2 次関数及び不連続関数の 4 種類を用いている。不連続関数とは、局所領域内に含まれる各ボクセルを、そのスカラー値の最大値と最小値への近さにより 2 つのグループに分割し、それぞれのグループで補間を行うものである。補間結果は、各領域の補間関数 2 つと境界関数の計 3 つにより構成される。領域の補間を行う際には 0 次、1 次、2 次、不連続関数の順に $Q_i(\mathbf{x})$ の補間精度評価を行い、補間精度が許容誤差に満たされた段階でこれを採用する。次数の低い補間関数から補間を試みることによって、メモリ負荷の小さい補間を実現できる。

Volume MPU 法において $f(\mathbf{x})$ の評価に必要な情報は $Q_i(\mathbf{x})$ のみであり、入力点群を必要としない。よって、入力点群は $f(\mathbf{x})$ を構成後は破棄することができ、メモリを節約することができる。また、 $f(\mathbf{x})$ 評価の際には必要な局所領域の $Q_i(\mathbf{x})$ のみ評価すればよいので、評価計算は高速となる。以上のことから数百万点にも及ぶ大規模点群に適用が可能となる。

上記の Volume MPU 法の手順では、格子構造の情報を全く用いていない。実際、前処理でボクセルを 8 分木に格納した後では、格子構造の種類、有無に関わらず、全く同じソースコードでの計算が可能である。

3. 検証実験

本研究で用いた対象データを Fig. 1 に示す。対象データ tooth, foot はともにランダムな位置にボクセルが存在する非正規格子型データであり、ボクセル数は 30M 点である。非正規格子型データでは、ひとつのボクセルが 3 次元座標と 1 つのスカラー値の情報をもつ。tooth の各ボクセルは 10~253 のスカラー値をもち、foot の各ボクセルは 10~159 のスカラー値をもつ。本研究では、両データのスカラー値を 256 階調に正規化したデータを用いた。データサイズは、両データともにボク

セルが C 言語における float 型のスカラー値であるため、 $4 \times (\text{ボクセル数}) \times 4 [\text{byte}]$ となり、約 458[MB] である。

本研究における入力・出力データのスカラー値誤差を、 ± 2.0 の許容誤差を設定し検証を行った。誤差は、入力データの各ボクセルのスカラー値と各ボクセルの座標 $\mathbf{x}$ における $f(\mathbf{x})$ の評価値との差である。計算環境は CPU が Intel Xeon 3.9GHz、主メモリが 16GB、コンパイラが gcc 3.4.6 である。

誤差評価の結果を Table 1 に示す。補間により構成された連続スカラー場の可視化結果は、入力データと同等の結果となり正しく生成できたため、ここでは省略する。

Table 1 Evaluation error between input data and output data.

不連続関数		あり	なし
tooth	最小誤差	0.0	0.0
	最大誤差	44.2	2.00
	誤差平均	3.86×10^{-2}	3.32×10^{-2}
foot	最小誤差	0.0	0.0
	最大誤差	54.5	2.00
	誤差平均	2.19×10^{-2}	2.97×10^{-2}

Table 1 より、不連続関数を適用すると最大誤差が大きくなっていることがわかる。この原因としては、不連続関数を適用する場合に生成される境界関数のために、本来分けられるグループと異なるグループに分類され、本来保管されるべき関数と異なる補間関数によって評価される値が存在するためである。このような誤差が大きくなる箇所は大変少ないため、同表からわかるとおり誤差平均は小さくなる。従って、精度よく空間が保管されていることがわかる。

4. 結論

提案手法により、非正規格子型データを正確に補間し、リサンプリングすることにより正規格子化することができた。提案手法により得られた品質がよく、解像度の高い正規格子データに対しては、様々な既存手法が適用できる。これにより、高品質な可視化や物理解析などが可能になる。

今後は、大規模な非格子格子型データを補間する実験を進める予定である。

参考文献

- 1) C.D. Hansen and C.R. Johnson: The Visualization Handbook, Academic Press, Elsevier Inc. (2005)
- 2) Y. Ohtake, A. Belyaev, and M. Alexa, G. Turk, and H.-P. Seidel: Multi-level Partition of Unity Implicits, ACM Transactions on Graphics, Vol.22, No.2 (2003) pp.463-470.