

格子密度による可変歩幅ボリューム・レイ・キャストイング

石崎 裕 牧野 光則

中央大学理工学部電気・電子工学科

現在、科学技術分野を中心に様々な分野でボリューム・ビジュアライゼーション技術が利用されている。本稿では、3次元離散空間に不規則な分布をしている非構造格子データを対象にレイ・キャストイングを用いて可視化を行う。非構造格子は疎密のあるデータ（格子）分布をしているため、レイの追跡の際サンプリング間隔を一定にすると、データの欠落が起り信頼性の低い画像となるか、または必要以上の計算を行い効率的ではなくなる。そこで、本稿ではデータの疎密に合わせてサンプリング間隔を変えることにより、可視化を効率的に行い、かつ、データ欠落のない信頼性の高い画像を生成する手法を提案する。

An Adaptive Volume Rendering Algorithm for Scattered Data

Hiroshi Ishizaki and Mitsunori Makino

Faculty of Science and Engineering, Chuo University

In this paper, a volume ray casting algorithm is proposed, which visualizes scattered data. In the first place, the data space is subdivided until each distance between the scattered data in the subspace can be assumed as almost the same. Secondly, a set of tetrahedron is constructed in each subspace. Then, in order to avoid both missing data by too longer stepsize of ray and prolix computation by too shorter stepsize, the stepsize is adaptable for the distance between volume data. In this method, a effective image can be generated efficiently.

1 はじめに

一般に可視化(ボリューム・レンダリング [1][2])の対象となるボリューム・データは、専門の計測機器や数値シミュレーションの結果から得られる場合が多い。これらのデータは補間によって空間中に規則正しく分布する構造格子データに変換され、これによりボクセル・データが構成される。この構造格子データ変換の際、必ず補間誤差が発生する。そこで、計測装置等より得られたデータを補間せずにボクセル・データを定義すれば、ボクセル構成時における補間誤差は発生しない。このとき、データは不規則に存在する。したがって、非構造格子データが可視化の対象となる。

非構造格子を扱った研究では、四面体を用いた高速化手法 [3]、等値面生成 [4] などが報告されているが、生成画像の精度に関するものは少ない。また、構造格子データにおいては、不透明度に着目してレイのサンプリング間隔を変えながら光線追跡を行う適応的な手法 [5] が幾つか報告されているが、非構造格子については報告されていない。非構造格子では3次元データが不規則に分布しているので、レイ・キャストリングを用いて可視化する際、本来ならばレイのサンプリングもデータの疎密を考慮して行うべきである。ところが、多くの場合レイのサンプリング間隔は一定に設定されている。これは画像に現れる色のむらを防ぎ、画像の安定性をよくするためである。しかし、データが疎の部分では必要以上の計算をしなければならない。データの量が小さければそれほど問題ではないが、数値流体解析のシミュレーションの場合など、非常に大量のデータを可視化する際には無視できない。本稿では非構造格子をレイ・キャストリングを用いて可視化する際、サンプリング間隔をデータ分布に合わせて設定することにより、データが疎な部分での冗長なサンプリングを避け、かつ、密な部分でのデータの欠落を防ぐことにより信頼性の高い画像を効率的に生成する手法を提案する。

2 アルゴリズムの概要

本稿で提案する手法の概要は以下の通りである。

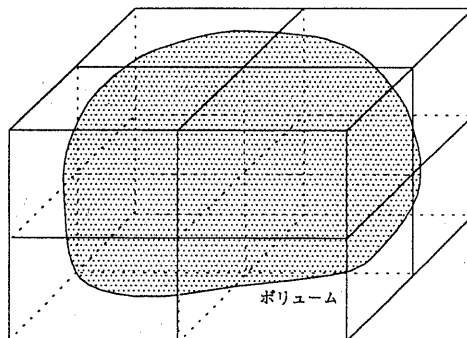


図 1: 空間分割

1. (前処理)

レイ・キャストリングにより光線追跡を行う前に、ボリューム空間を等分割することにより、データが一様とみなせる小空間を作る。次に、分割された小空間内にデータが平均してどの程度の距離で分布しているのかを算出する。

2. (ボクセル・データの構成)

疎密のあるデータを四面体格子を用いて定義する。

3. (光線追跡) 前処理で求めたデータ分布情報を基に、サンプリング間隔を更新しながら光線追跡を行う。

以下、詳細を順次述べる。

3 前処理

データ分布を考慮してレイのサンプリングを行うにあたり、可視化の対象となるデータが3次元空間中にどのように分布しているかを把握する必要がある。ところが、これを完全かつ正確に把握することはほとんど不可能である。そこで、全体的には疎密のあるデータ分布をしても、局所的にはほぼ一様となる空間が存在するとみなし、図1のように空間を等分割する。当然ながら、分割された小空間内に存在するデータに著しく疎密がある場合もあるので、小空間内が一様とみなせるまで空間分割を再帰的に行う必要がある。

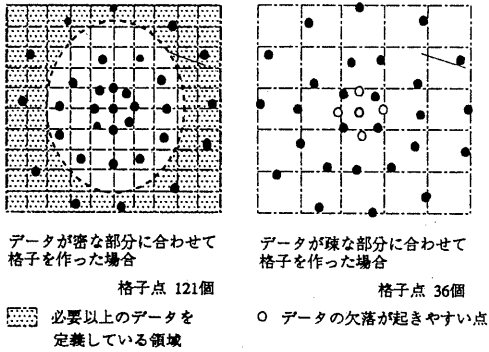


図 2: 疎密のあるデータを構造格子で定義した場合

次に、分割された小空間内にどの程度の密度でデータが分布しているかを調べる。初めに、分割された空間内に存在する格子の数をもって密度を計る指標とすることを考える。このとき、次のような問題が生じる。ボリュームが定義されている空間の境界が存在する小空間では、実際のデータ分布より疎であるとみなされるので、光線追跡の際データの欠落が生じやすくなり、本稿の目的に沿わなくなる。そこで、それぞれの小空間において、その中に存在する格子がどの程度の距離で分布しているかを指標とする。実際には、それぞれの格子について、最も近くに存在する格子までの距離を求め、小空間内に存在する全ての格子の平均値をとる。この部分は手間を要するが、一度計算させてしまえば、視点を変えるなどの同じデータに対する可視化の場合、データの量が大きく、疎密の差が激しい程、一般のレイ・キャスティングと比較してより短時間で精度の高い画像を生成できる。

4 ボクセル・データの定義

非構造格子データは格子密度がボリューム空間内で一様でない。このため、正方格子になるようにボクセル・データを再構成するには、図2の左図のように格子間隔をデータ分布の最も密な領域に、合わせて作らなければならない。密な領域に合わせないと、ボクセル・データ構成段階でデータの欠落が生じる確率が高くなり、データを忠実に可視化出来な

くなる(図2の右図)。一方、格子が疎な領域では余分なデータを持つことになる。余分なデータを持つということはメモリの浪費であると同時に、必要以上のボクセルに対し光線追跡を行うことになるので、計算量の増大を招く。

有限要素法の結果、計算流体解析のシミュレーション結果の可視化など非構造格子データを扱う分野では、データは四面体格子を用いて定義される。四面体は最も基本的な多面体であり、空間を隙間なく埋める性質があるため、非構造格子データの定義には最適である。また、その構造の単純さより高速な補間(内挿)ができ、これを利用して高速な光線追跡が可能である[6]。このような性質があるため、四面体格子を用いた高速化手法など様々な研究がなされている[3][4]。

そこで、本稿では非構造格子データを四面体格子を用いて定義する。信頼性の高い画像を生成するためには、内挿に適した四面体格子を作る必要がある。内挿は、内挿される点に最も近い4点で行うことが望ましい。すなわち、内挿に最も適しているのは、正四面体のように最小角が最大となる四面体である。逆に、偏平な四面体を用いて内挿を行うと補間時に数値誤差が入りやすいので期待した内挿値が得られず、その結果生成する画像の精度が著しく低下する。

このため、精度の高い画像を生成するためには、形の良い四面体格子を生成することが要求される。これらの条件を満たすように四面体格子を生成するには、一般にDelaunay網[7][8]が向いており、広く用いられている。

5 光線追跡

生成する画像の精度を上げるためには、レイのサンプリング間隔を非常に細かく設定すれば良い。画像の精度と安定性だけに限れば、この方法が最も確実な方法である。しかし、レイのサンプリングは細かければ細かいほど必ず精度が上がるというわけではない。むしろ、サンプリング間隔をある幅以下にしても生成する画像の精度は変わらない。すなわち、無駄な計算をすることになり、効率的とはいえない。そこで本稿では、前処理によって求めたデータの分布情報を基に、格子が密なところでは細

かく、疎なところでは粗くサンプリングを行う。本稿では、分割された小空間内でのデータ分布は一様とみなしているため、それぞれの小空間内では等間隔でサンプリングを行う。

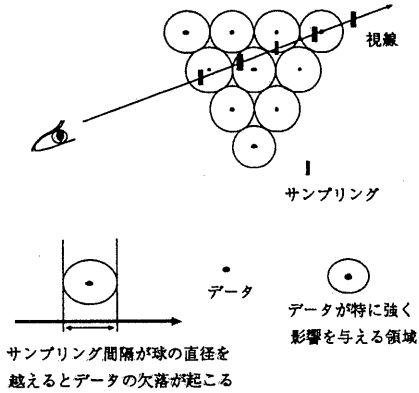


図 3: データ分布のモデル

図 3 は分割された小空間内におけるデータ分布をモデル化したものである。図 3 の球はその中心に存在する格子が内挿をする際特に強い影響を与える領域である。また、球の半径は前処理で求めた格子間距離の平均値の二分の一である。本稿では、データの欠落は格子の存在を無視したときに生じると考える。このような空間をレイが通過する際、レイが通過した球内で、少なくとも一回サンプリングを行えば、球の中心に存在する格子を考慮できる。しかし、球内で必ず一回サンプリングが可能なサンプリング間隔を予め設定するのは困難である。そこで、レイがどのように球上を通過しても、絶対にサンプリングが出来ない状況を考える。これは、サンプリング間隔を球の直径以上としたときである。これより、本稿ではサンプリング間隔は球の直径以下とする。但し、サンプリング間隔を球の直径以下に設定すれば、絶対にデータの欠落が起こらないというわけではなく、確率的に起こりづらくなるということである。

一方、このようにサンプリング間隔を変えながらレイの追跡を行うと、生成する画像の安定性を損ねる場合がある。すなわち、サンプリング間隔を図 3 の球の直径以下で自由に設定すると、隣のレイとのサンプリングの歩調が大幅にずれ、このため、

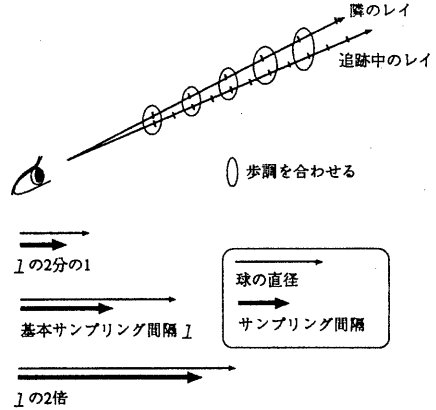


図 4: サンプリング間隔

生成する画像に色のむらが著しく観察される。そこで、サンプリング間隔を変えながらも、なるべく隣のレイとの歩調が合うように設定することが望ましい。本稿では、図 4 のように基本サンプリング間隔 l を設定し、小空間の球の直径以下に設定したサンプリング間隔 t を以下の手順で再決定する。

サンプリング間隔の設定

$s = l$ とし、小空間で設定すべきサンプリング間隔を t とする。

1. $s > t$ の場合

- (a) $s = \frac{s}{2}$ とし s と t を比較する
- (b) $s \leq t$ の場合サンプリング間隔を s に設定する。
- (c) $s > t$ の場合 (a) に戻る。

2. $s < t$ の場合

- (a) $s = s * 2$ とし s と t とを比較する。
- (b) $s < t$ の場合 (a) に戻る。
- (c) $s > t$ の場合サンプリング間隔を $\frac{s}{2}$ に設定する。
- (d) $s = t$ の場合サンプリング間隔を s に設定する。

3. $s = t$ の場合サンプリング間隔を s に設定する。

このようにサンプリング間隔を設定することにより、データの欠落と画像に現れる色のむらを抑えることができる。光線追跡はそれぞれの小空間内で設定されたサンプリング間隔に従って行い、データを可視化する。

6 評価

6.1 計算の手間

サンプリング間隔を変化させながら光線追跡を行う場合、不透明度を求める際に指数関数を用いる。このため、サンプリングに費やす計算時間はサンプリング間隔が一定の時と比べて、数倍かかる。本稿のアルゴリズムの場合、空間分割を極端に細かくしない限り、レイが小空間を更新しながら進む手間は、従来の手法と比較してそれほど変わらない。(等分割の回数を k とすると、小空間を一回更新する際の手間は $k + \alpha$ となる。但し、 α は、サンプリングを一回行う手間より小さい) すなわち、サンプリング間隔を可変にする場合と、一定とする場合の計算の手間の差は、大部分が不透明度を求めるときの差である。このことより、データを可視化するときの計算の手間は、総サンプリング数によって決まるので、可変歩幅で省略できるサンプリングの回数が多い場合と、本アルゴリズムはその有効性を増す。あるいは、不透明度の連続性を犠牲にし、テーブルを用いることで、不透明度を求める時間をサンプリング間隔が一定の場合と同程度にできる。この場合は、サンプリングを省略した分の時間だけ効率化できる。

6.2 画像の精度

データの欠落を避けるという点では、サンプリング間隔を一定で非常に小さく設定した場合に生成される画像に近いものが得られた。しかし、生成画像に色のむらが現れてしまうという問題がある。輝度の変化が小さいところでは、さほど問題にはならないが、急激に変化している色の境界付近では、むらが著しくなり画像が見づらくなる。この部分の解決は今後の課題である。

7 まとめ

本稿では、レイ・キャスティングによる非構造格子データの可視化について効率的でデータ欠落のない精度の高い画像を生成する手法を提案した。本手法では、ボクセル・データ構成の際に補間を行わないため、この時点での誤差は発生しない。また、データを非構造格子で持つため、メモリの節約ができる。このことがボクセル追跡における交差判定の回数を減らすことになり、計算の効率化が図れる。レンダリングにおいては、格子密度に応じたサンプリングを行うことで、データの欠落と冗長なサンプリングを防ぐことが出来る。この結果、データ量、レンダリングに要する計算量の効率化が図られ、信頼性の高い画像が得られる。

一方、サンプリングを可変に設定しているため、生成画像に色のむらが現れてしまう。また、空間分割の停止基準についてもさらに検討する必要がある。これらは今後の研究課題である。

謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費補助金奨励研究(A)の援助を受けた。

参考文献

- [1] Arie Kaufman, "Volume Visualization", IEEE Computer Society Press (1991).
- [2] 藤代 一成, 茅 暁陽: "ボクセル集合モデルと可視化の枠組", PIXEL '92 5, No.116, pp.127-132 (1992).
- [3] Koji Koyamada, Sakae Uno, Akio Doi and Tatsuo Miyazawa: "Fast Volume Rendering by Polygonal Approximation", Journal of Information Processing, Vol. 15, No.4, pp.534-544 (1992).
- [4] A. Doi and A. Koide: "An Efficient Method of Triangulating Equi-Valued Surface by Using Tetrahedral Cells, IEICE Transactions, Vol. E74, No. 1(1991).

- [5] M. Levoy: "Efficient Ray Tracing of Volume Data", ACM Trans. on Graphics, Vol. 9, No. 3, pp. 245-261 (1990).
- [6] 小山田耕二, 宮澤達夫: "FEM シミュレーション結果のためのポリウムレンダリングアルゴリズム", 情報処理学会論文誌, Vol.32, No.5, pp.560-569 (1991).
- [7] 伊理正夫, 腰塚 武志: "計算幾何学と地理情報処理 第2版", 共立出版株式会社 (1993).
- [8] 杉原 厚吉: "計算幾何工学", 培風館 (1994).