大規模 CT データからの中立ボクセル抽出法

Medial Voxel Extraction from Large CT data

道川隆士・東京大学

Takashi MICHIKAWA, The University of Tokyo

中崎瞬・東京大学

Shun NAKAZAKI, The University of Tokyo

鈴木宏正・東京大学

Hiromasa SUZUKI, The University of Tokyo

Key Words: *volume data, medial voxels, out-of-core, large models*

We present a method for medial voxel extraction from large volumetric models. Our method first computes distance fields computed by our previous work. Next, we evaluate each voxel by pseudo geodesic distance of nearest boundary points of it. Since this computation is completely local, our algorithm is sequential algorithm and efficient for large data. We also demonstrate results of medial voxel extraction from large volumetric models.

1. はじめに

近年の CT 計測技術の計測により、機械部品を高解像度で計測できるようになった。その結果、鋳造品の鋳造巣の観察や CAD モデルとの比較といった簡単な用途に限らず、構造解析用のメッシュ作成など高度な応用が可能になりつつある[7]。ボリウムからメッシュを構築する方法として、Marching Cubes 法[3]が有名であるが、この手法は、閉じたメッシュを作成するため、薄板形状を表すデータには適していない。薄板形状のボリウムデータから薄板を抽出するには、オブジェクトの中心を通る「中立面」を計算することが有効である。中立面は、数学上の定義「物体境界の2点以上が外接する球の中心点の集合」に従うと、ノイズの影響を受けやすい。工学応用を考えた場合、1枚の面で表現されているほうが良い。Prohaska らの提案した測地線計測に基づく判定手法[6]は、ノイズの多いボリウムデータに適した手法である。Fujimori らは、Prohaska らの手法を拡張して、端部まで中立面が拡張されるようにしている[1]。

このように、CT 画像の応用分野の広がりに伴い、多くの基盤技術が開発されているにもかかわらず、実用化という面で見た場合、問題は多い。そのうちの一つに大規模化がある。CT 計測技術の進歩により、大きな機械部品を高精度で測ることができるようになってきている。たとえば、CT データのサイズで 4 GB を超えるようなデータを取得できるようになっている。このようなデータに対して、従来のアルゴリズムを直接適用ことは、メモリの制約上不可能である。

本稿では、大規模ボリウムデータを対象とした中立ボクセル抽出手法を提案する。本手法は、距離場に基づく計算方法を採用しており、従来手法におけるサイズの問題を解決している。始めに、大規模ボリウムデータを対象とした距離変換手法[5]によって距離場を計算する。距離は、スカラ値としてではなく、最近境界点までのベクトルで表現する。次に、最近境界点までのベクトルを用いて測地線距離を擬似的に計算し、その長短で中立ボクセルを分類する。この操作は、局所的な情報のみによって計算できることからボリウムデータのサイズに依存しない手法である。

本稿では、実際に機械部品の CT 画像に対して本手法を適用することで本手法の有用性を検証する。

2. アルゴリズム

Fig.1 に本手法の概要を示す。入力はボリウムデータである。これを、物体の境界を表す適切な閾値で 2 値化して、2 値データを取得する。これに対して、Michikawa らの提案した大規模ボリウムデータに対する距離変換手法[5]を適用して、距離場を計算する。この時、距離場は、スカラ値ではなく、最近ボクセルまでの差分ベクトルで表現する。このベクトル場を用いて、中立ボクセルを計算する。ベクトル場の双対をなす点について近接する 8 個のベクトルを取り出す。この 8 個のベクトルの中で最も角度が離れているベクトルのペアについて、仮想的な測地距離を計算する。そして、その大小によって中立ボクセルを判定する。

Fig. 1 アルゴリズムの概要

以下、各ステップについて詳細を述べる。

2-1. 大規模ボリウムデータからの距離場生成手法

距離場を計算することを一般的に距離変換と呼ぶ[2]。本節では、この距離変換を大規模化させた Out-of-Core 距離変換について述べる(Fig.2)。

Out-of-core 化に際して重要となるのは、如何にメモリ使用量を減らして計算するかにある。ここでは、軸に垂直な面でボリウムデータを分割し、クラスタと呼ばれる小領域を作成する。この時クラスタ間の通信を簡便にするため、インタフェースと呼ばれる重複領域も定義する。

距離変換は、クラスタに対して行う。各クラスタは MDD(minimum dirty distance) と呼ばれる優先順位を持っている。これは、クラスタ内で伝播されたボクセルの距離の最

Fig.2 out-of-core 距離変換の概要。(a) 入力データ。(b) クラスタ (緑) とインタフェース (青) に分解。(c) 初期化。(d) MDD が最少のクラスタ (赤) に対する距離変換の適用。(e) 近接クラスタへの伝播。(f)–(j) 繰り返し。(k) クラスタの合成。(l) 凡例。

小値である。この値が小さいと、周りのクラスタに伝播する可能性が高いと考えられる。よって、out-of-core 距離変換は、最小の MDD(MMDD)を持つクラスタに対して行う。それ以外のクラスタは、ハードディスクに保存されるため、必要なメモリは、CPU1 つにつきクラスタ 1 個分だけである。

クラスタに対する距離変換が終わると、そのクラスタの MDD=∞にする。そのクラスタは距離変換によって局所的に最適化されていることから、優先順位は最低であると考えられるためである。次に結果を隣接クラスタへ伝播させる。これにより、クラスタ間での距離値の一貫性を確保する。

以上の処理を MMDD = ∞になるまで繰り返すと各クラスタの距離値は最適値になる。繰り返し計算の終了後、クラスタを合成することで、計算は終了する。

2-2. 擬似測地線を用いた中立ボクセル計算手法

前節で計算された距離場を用いて中立セルを計算する。計算は、Prohaska らの最近点間の測地線距離に基づく手法[6]を利用する。ただし、測地線の計算には、グラフ構造が必要であり、大規模なデータでは計算できないことから、距離場を利用した局所的な測地線の見積もりにより中立ボクセルの判定を行う。

中立セル抽出において、2 最近点間の測地線の経路は重要ではない。むしろ、測地線距離がユーザ入力 of 閾値 ε より、大きい小さいかがわかればよい。本研究では、測地線距離を大まかに見積もる方法を用いて中立ボクセルの判定を行う。ここで求める測地線を擬似測地線と呼ぶ。

本研究では、Fig.3 に示すような格子状に定義された距離場の双対にあたるセルを中立ボクセルの判定に用いる。通常の近接セルが 26 個になるのに対して、近接セルの数を少なくすることができるためである。各セル p について、隣接するボクセル p' に割り当てられている距離ベクトルのペアの中で最も角度の大きいもの(a,b)を選ぶ。擬似測地線 $\bar{g}(p)$ は、(a,b)の円弧として以下のとおり定義する(Fig.4)。

$$\bar{g}(p) = d(p)\theta$$

θ は、(a,b) のなす角度である。計算で用いるのは局所的な情報であり、Dijkstra 法の最短経路算出アルゴリズムで用い

Fig.3 通常の 26 近傍(左)と双対セルの 8 近傍(右)

Fig.4 擬似測地線

る様な大域的な情報は必要とせず、ユーザが指定した閾値 ε に対して、 $\bar{g}(p) > \varepsilon$ を満たすかどうかによって判定する。

こうして得られる擬似測地線は、必ず実際の測地線 $g(p)$ よりも小さいことが保証される。もし、 $\bar{g}(p) > g(p)$ である場合は、測地線の経路が半径 $d(p)$ の円の内側を通ることとなり、距離場の定義に反する。このことは、擬似測地線で計算した全ての中立ボクセルは、Prohaska の手法においても中立ボクセルとして判定されることを意味する。

3. 実験結果

CT 画像(324x965x708)に対して本手法を適用した結果を Fig.5 に示す。実験は、Windows 上 (CPU:Xeon3.0GHz *2) 上で行い、計算時間は 17 分であった。ただし、全ての中立ボクセルを取りきれているわけではなく、一部において穴が確認できる。これは、式 1 の θ が小さい場合(2π)に起きるものである。

また、この中立ボクセルを用いて中立面を計算した結果を Fig.6 に示す。ここでは、本手法で得られた中立ボクセルを点群とみなし、Ohtake らのポリゴン化手法[4]を適用した。この手法は、点群が多少疎な部分においても補完するため、本手法のように、若干点群の粗密が発生する場合に有効であるが、非多様体部分では正しくメッシングされない。これは、Ohtake らの手法が二多様体を前提としているためであり、これを我々の問題に適用するためには、改良が必要である。

4. まとめ

本稿では、大規模ボリュームデータからの中立ボクセル抽出手法について述べた。本手法で述べた擬似測地線を用いた判定方法は、完全に局所的な評価によって行われるため高速である。また提案した枠組は、従来の測地線ベースの中立セル判定法と比較して計算量を大幅に削減できることから大規模データにおいても現実的な時間で計算できることが期待できる。

今後の展望としては、擬似測地線で取りきれていない中立ボクセルの抽出方法の確立があげられる。特に、対象が大きくなると膨大な計算量を必要とする測地線計算については、大幅な最適化が必要になると考えられる。また、得られた中立ボクセルを用いて中立面を取り出す方法も今後の課題として挙げられる。特に非多様体部分の処理は、従来の手法では処理できないことから大きな課題である。

参考文献

1. T. Fujimori, Y. Kobayashi and H. Suzuki, Separated Medial Surface Extraction from CT Data of Machine Parts. *Lecture Notes in Computer Science(Proceedings of 4th International Conference on Geometric Modeling and Processing)* 4077 (July), 313- 324,2006
2. M. W. Jones, A. Bærentzen and M. Sr'a mek, 3D distance fields: Techniques and applications. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 12, 4 (July/August), 581-599, 2006
3. W. E. Lorensen, , and H. E. Cline, Marching Cubes: A High Resolution 3d Surface Construction Algorithm. *SIGGRAPH Comput. Graph.* 21, 4, 163-169,1987
4. Yutaka Ohtake, Alexander Belyaev, and Hans-Peter Seidel, A Composite Approach to Meshing Scattered Data, *Graphical Models.* 68(3), 255-267, 2006
5. T. Michikawa, K. Tsuji, T. Fujimori and H. Suzuki, Out-Of-Core Distance Transforms. *In Proceedings of the 2007 ACM Symposium on Solid and Physical Modeling*, 151-158, 2007
6. S. Prohaska, and H.-C. Hege, Fast Visualization of Plane-Like Structures in Voxel Data. *In IEEE Visualization '02*, 29-36,2002
7. H. Suzuki, Convergence Engineering Based On X-Ray CT Scanning Technologies. *In Proceeding of JSME Digital Engineering Workshop*, 74-77,2005

(a) 入力データ

(b) 中立ボクセル

(c) 切断面

Fig. 5 計算結果

Fig. 6 ポリゴン化の結果