

2 値化ボクセルモデルに対するエッジ保存型平滑化法線の単純な決定法

Simple Method for Determining Edge-preserving Smoothed Normal Vectors of Binary Voxel Models

ソソラバラム バトゥジャルガル, グンジェー ゴリーグ, 藤本 忠博, 千葉 則茂
岩手大学工学部

アブストラクト

本論文では, ボクセル空間で表現される 2 値化されたスカラデータに対して, 表面の再構成を行うアルゴリズムを提案する. 提案する手法では, 滑らかな表面を構成するため, 近傍のボクセルの法線の平均化により, 各ボクセルの法線の平滑化を行う. ただし, 対象物の角などに相当するエッジ部分については, 単純な平滑化を行わず, その状態に応じてエッジ部分を残すように法線の平滑化を行う. 具体的には, 近傍ボクセルの法線を重み付き平均化する際の重みとしてガウス関数を基本として用い, 近傍のボクセル間の距離や法線ベクトルの方向により重みの値を決定して平滑化を施すことでエッジが保存される. 最後に, いくつかの実験例により本手法の有効性を示す.

1. まえがき

ボクセルで表現されるスカラデータには, 大別すると以下のようなものが挙げられる.

(1) 濃度分布のような連続的なスカラ空間を正方格子点上でサンプリングしたもので, スカラ空間としては, 医用画像などの 3 次元画像, 数値計算で得られた電界や圧力などのスカラ空間, パーティクルにメタボールを割り当てて得られるスカラ空間, などがある.

(2) 内部外部のように 3 次元物体やモデルを 2 値化サンプリングしたもので, 3 次元画像を領域分割した表現, 物体のボクセル表現やオクトリー表現, セルオートマトンなど単純なアルゴリズムにより生成される形状パターン, などがある.

本論文では(2)を前提に, 表面の再構成を行うアルゴリズムにおいて最も大切な処理である法線を定める方法に対して, 2 値のボクセル

データで表される形状のエッジを保存しながら法線ベクトルをスムージングする単純な方法を提案し, その効果を示す.

サーフェースデータに対して, 法線ベクトルをベースに滑らかな表面を再構成する研究は以前から, 数多くのもが存在している [1-3]. 一方, ボクセルデータに対しては法線ベクトルを求める手法が多数提案されている [4-10]. そして特に L. Neumann ら [5] の提案した手法ではボクセルデータに対して法線ベクトルの計算と平滑化を同時に行う. しかし, 実行時の計算時間については記述されていない. また, 著者の知る限りでは, ボクセルデータに対して, エッジ部分を保存して法線ベクトルを平滑化する研究はされていない.

本手法では, Bilateral Filter [11] の考えに基づき, 2 値のボクセルデータによる表面の法線ベクトルに対して, エッジ部分を保存

した平滑化を行う。Bilateral Filter は Tomashi らにより提案された画像におけるエッジ保持平滑化フィルタである。Bilateral Filter が輝度差に着目するのに対して、本手法では法線ベクトルの方向差に着目する。

以下では、まず表面再構成を行うアルゴリズムの概要を示し、次にアルゴリズムのステップごとについてその詳細を説明する。さらに、このアルゴリズムに基づくいくつかの実験例により手法の有効性を示し、最後に今後の課題について言及する。

2. 提案手法

提案する表面の再構成を行うアルゴリズムは次の4つのステップから成り立つ。

- Step1. 2 値のボクセルデータの準備
- Step2. 法線ベクトルの計算
- Step3. エッジを保った法線ベクトルのスムージング
- Step4. レンダリング

これらの各ステップの詳細は以下のようである。

Step1: 2 値のボクセルデータの準備

対象とする 3D モデルなどから 2 値のボクセルデータを生成する。あるいは、2 値のボクセルデータを読み込む。

Step2: 法線ベクトルの計算

それぞれのボクセルを中心として、適当な微分フィルタを適用し、スカラ場の勾配ベクトルを求める。ここでは、図 1 に示すように、Sobel オペレータを 3 次元に拡張したフィルタ [2] を用いた。ボクセル (x, y, z) のスカラ値を $f(x, y, z)$ とすると、その x 方向の勾配は次式で表される。

$$n_x = 1f(x-1,y-1,z-1) + 2f(x-1,y-1,z) + 1f(x-1,y-1,z+1) \\ + 2f(x-1,y,z-1) + 3f(x-1,y,z) + 2f(x-1,y,z+1) \\ + 1f(x-1,y+1,z-1) + 2f(x-1,y+1,z) + 1f(x-1,y+1,z+1)$$

$$-(1f(x+1,y-1,z-1) + 2f(x+1,y-1,z) + 1f(x+1,y-1,z+1) \\ + 2f(x+1,y,z-1) + 3f(x+1,y,z) + 2f(x+1,y,z+1) \\ + 1f(x+1,y+1,z-1) + 2f(x+1,y+1,z) + 1f(x+1,y+1,z+1))$$

y 方向と z 方向の勾配についても同様である。

Step3: エッジを保った法線ベクトルのスムージング

本手法は、輝度値に対する Bilateral Filter [11] の考え方を、2 値のボクセルデータによる法線ベクトルに適用したものである。提案フィルタでは、重みとしてガウス関数を基本として用い、それを表面の法線ベクトルの平滑化に適用する際に、近傍のボクセル間

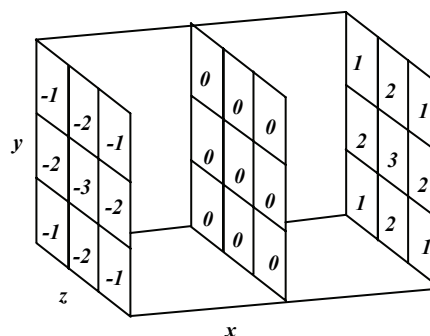


図 1 3次元 Sobel オペレータ [4]

の距離や法線ベクトルの方向を調べて、重みの調整をしながら平滑化を施すことでエッジをぼかさないようにする。注目ボクセル i での平滑化された法線ベクトル N_i を次式で決定する。

$$N_i = \frac{\sum_{j \in G_i}^n W(i, j) N_j}{\sum_{j \in G_i}^n W(i, j)} \quad (1)$$

ここで、 j は注目ボクセル i の近傍ボクセル、 N_j は近傍ボクセル j での平滑化前の法線ベクトルである。また、 G_i は $|N_j| \neq 0$ という条件を満たす注目ボクセル i の近傍ボクセル j の集合である。

$W(i, j)$ は重みであり、式 (2), (3), (4)

に示すように、ボクセル*i, j*間の距離 d_{ij} に依存する重み W_x とボクセル*i, j*における平滑化前の法線ベクトルの方向差（なす角度） θ_{ij} に依存する重み W_θ の合成からなる。

$$W(i, j) = W_x(i, j)W_\theta(i, j) \quad (2)$$

$$W_x(i, j) = e^{-\alpha \cdot d_{ij}^2} \quad (3)$$

$$W_\theta(i, j) = \begin{cases} e^{-\beta \cdot \theta_{ij}^2} & \theta_{ij} \leq \Psi \\ 0 & \theta_{ij} > \Psi \end{cases} \quad (4)$$

ここで、パラメタ α , β と閾値 Ψ によりフィルタの効果を調整することができる。式(3)により、重み W_x はボクセル*i, j*間の距離 d_{ij} が小さいほど増加する。一方、式(4)により、ボクセル*i, j*の法線間の角度 θ_{ij} が Ψ 以下の場合には、その角度が小さいほど重み W_θ は大きくなる。また、角度 θ_{ij} が Ψ より大きな場合には、重み W_θ は0とする。これにより、注目ボクセル*i*に対して、より近い距離にあり、また、法線の方向差がより小さなボクセル*j*の重み $W(i, j)$ が大きくなる。式(1)による平滑化を反復回数Mだけ反復することで、目的とする平滑化された法線 N_i が求められる。

Step4 : レンダリング

本研究では、ボクセルをポイント（スプラット）とみなし、Step3で求めた法線を用いて、スプラッティングによるボリュームレンダリングを行う[12]。

3. 実験例

図 2-5 に本手法を適用した実験例を示す。使用した環境は CPU が PENTIUM4 1.7GHz, 主記憶が 1 GB である。処理速度を表 1 に示す。法線ベクトルの計算や平滑化の処理は CPU 上で行い、一方、レンダリングには GPU を用いた。

図 2 の円筒形状は、なめらかに法線が変化する側面を持ち、かつ、側面と底面は直角なエッジを持つ。図 3 の“けん玉”のモデルは、エッジの角度の小さな部分を持つ。Step2 により得られる平滑化していない法線ベクトルでは、図 2 (a)、図 3.1 (a)に見られる階段状の模様が表面上に生じている。

表 1. 計算時間（秒）

モデル (ボクセル 解像度)	法線ベクトルの 計算時間 (秒)	平滑化			レンダリング
		M=1	M=10	M=20	
円筒(図.2) (128x128x128)	3	4	26	43	0.2
けん玉(図.3) (128x256x128)	7	11	98	175	0.3
MRI データ (図.4) (256x256x256)	26	123	1180	2240	0.8

図 2 (b)、図 3.1 (b)に、法線ベクトルの方向差を考慮した式(4)を用いず、式(3)のみを重み W として用いた場合の結果を示す。反復回数 $M = 20$, α と β の値を 0.0005 とした。また、式(1)における近傍ボクセルの集合 G_i としては、注目ボクセル*i*を中心とする $3 \times 3 \times 3$ 個のボクセルをとった。円筒表面の縞模様（アーティファクト）を解消することができているが、エッジの部分もぼかされてしまっている。一方、図 2 (c)、図 3.1 (c) に示す提案手法による結果ではエッジが保存されていることがわかる。図 3.2 では、2 値化したけん玉データに対して、閾値 Ψ の値を 20° から 45° まで 5° おきに与えて本手法を適用した場合の結果を示す。目視により、この例では閾値 Ψ の値は 30° 付近でエッジが最もよく保存されている。図 4 では、2 値化したMRIデータに対して、閾値 Ψ の値を 35° とし、本手法を適用した場合の結果を示す。図 3.3 では、 Ψ は固定で α , β のみ変化させた際の処理結果を

示す. α , β の値が大きくなるにつれて階段状の様子が表面上に目立つようになる。これは、式 (2), (3), (4) より, α , β の値が大きくなるにつれて, 重み $w(i, j)$ が小さくなり, 周囲のボクセルの法線ベクトルとの平滑化の度合いが弱まるためと考えられる。

4. まとめ

本論文では, 内部外部のように 3 次元物体やモデルにおける 2 値のボクセルデータにより表面の再構成を行うアルゴリズムを提案した。また, 実験例により, エッジが保存されていることがわかる。今後の課題としては, 閾値の自動的な決定法や平滑化の計算の高速化を図るため, GPU 上での実装などが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は, 科学研究費補助金 (基盤研究(B)16300021) による。

参考文献

- [1] Yuzhong Shen, Barner K.E, “Fuzzy vector median-based surface smoothing”, Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions, Vol. 10, pp. 252-265, 2004.
- [2] J. Tohka, “Surface smoothing based on a sphere shape model”, Proceedings of the 6th Nordic 2004, Signal Processing Symposium, pp. 17-20, 2004.
- [3] T. Bulow, “Spherical diffusion for 3D surface smoothing”, Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on Vol. 26, pp. 1650-1654, 2004.
- [4] 高木幹雄, 鳥脇純一郎, 田村秀行 “画像処理アルゴリズムの最新動向”, pp. 93-94. 1986.
- [5] L. Neumann, B. Csebfalvi, A. Konig, and E. Groller “Gradient estimation in volume data using 4D linear regression,” Computer Graphics Forum, Vol. 19, pp. 351-358, 2000.
- [6] D. Cohen, A. E. Kaufman, R. Bakalash, and S. Bergman, “Real Time Discrete Shading”, The Visual Computer, Vol. 6, pp. 16-27. 1990.
- [7] M. S. Levoy, “Display of Surfaces from Volume Data”, IEEE Computer Graphics and Applications, pp. 29-37, 1988.
- [8] K. H. Hohne, R. Bernstein, “Shading 3D Images from CT using Gray-level Gradients”, IEEE Transactions on Medical Imaging, MI-5(1), pp. 45-47, 1986.
- [9] R. Yagel, D. Cohen, A. Kaufman, “Normal Estimation in 3D Discrete Space”, The Visual Computer, Vol. 8, pp. 278-291, 1992.
- [10] S. Li, K. Mueller, “Spline-based gradient filters for high-quality refraction computations in discrete datasets”, Proc. Eurograph. IEEE VGTC Symposium on Visual., pp. 217-222, 2005.
- [11] C. Tomasi and R. Manduchi, “Bilateral filtering for gray and color images”, Proc. 1998 ICCV, India, 1998.
- [12] G. Zorig, T. Fujimoto and N. Chiba, “Point Splatting Based on Translucent Shadow Mapping and Hierarchical Bucket Sorting”, 芸術科学会論文誌 Vol. 6, No. 1, pp. 21-36, 2007.

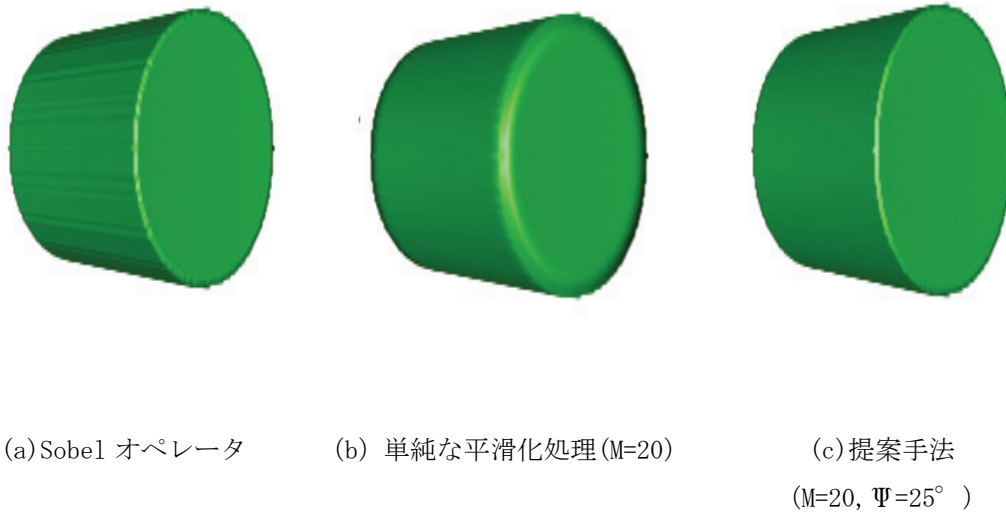


図 2 平滑化の例 (円筒モデル)

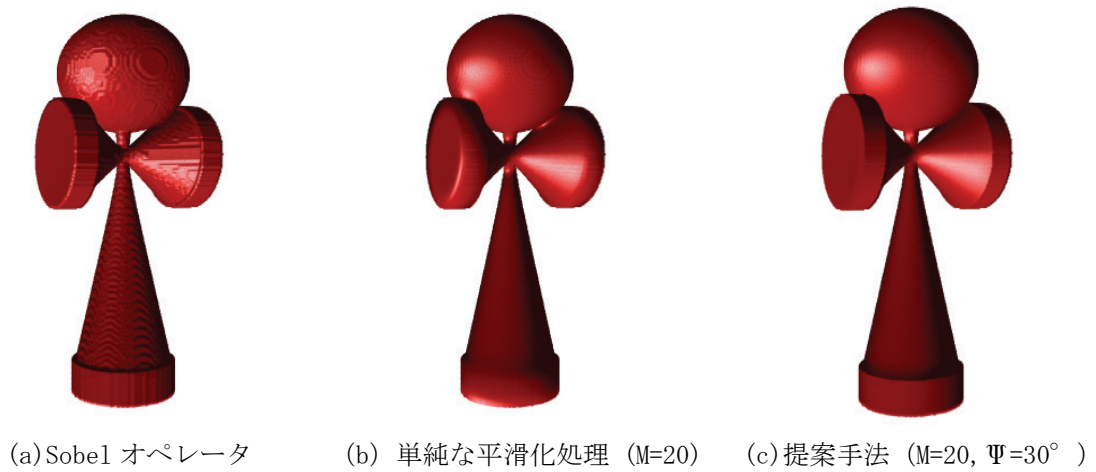


図 3.1 平滑化の例 1 (けん玉モデル)

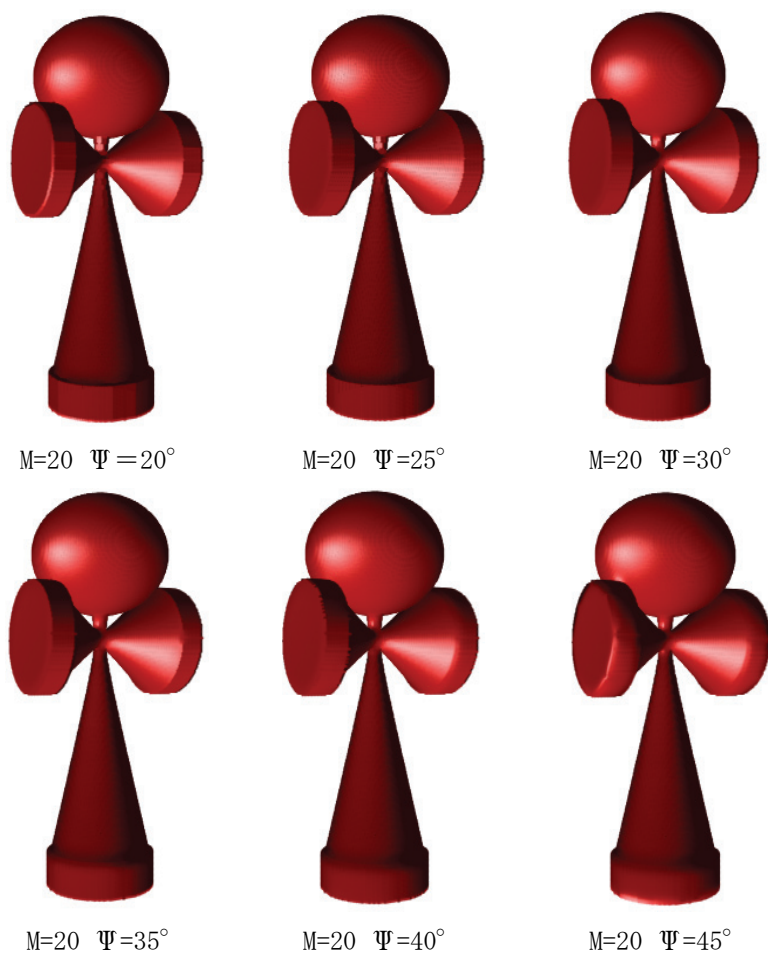


図 3.2 平滑化の例 2 (けん玉モデル)

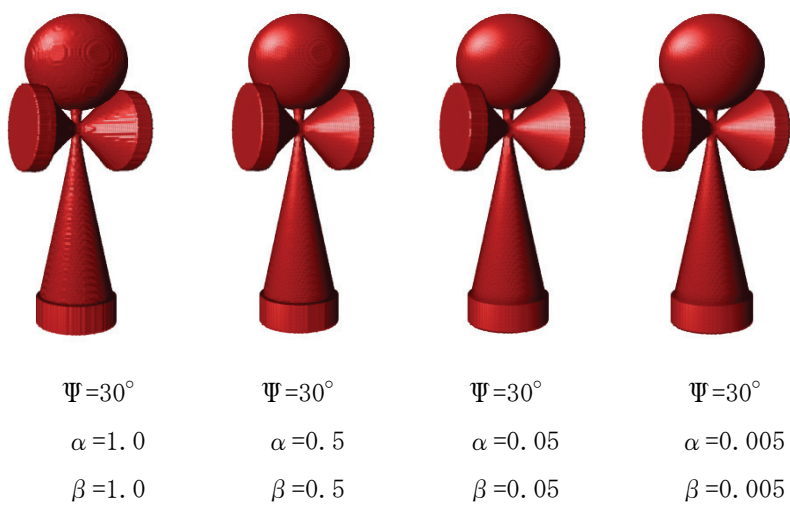
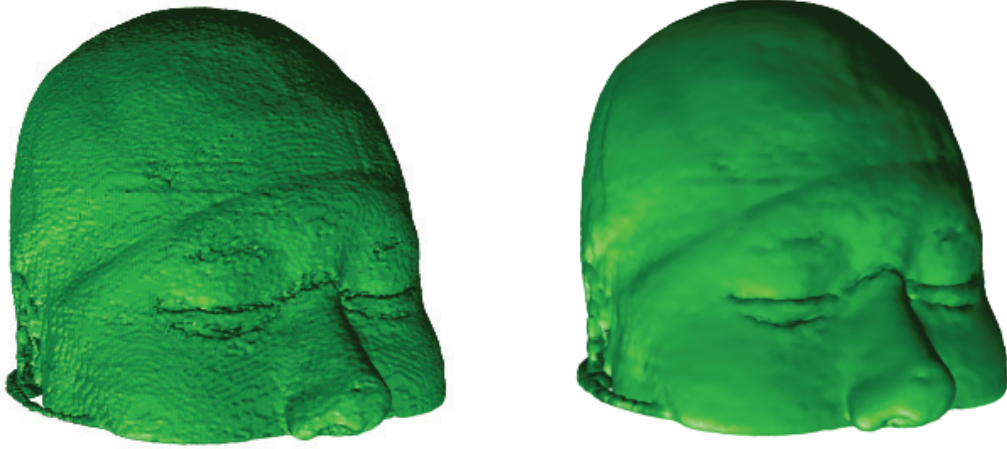


図 3.3 平滑化の例 3 (けん玉モデル)



(a) Sobel オペレータ

(b) 提案手法 ($M=20, \Psi=35^\circ$)

図 4 平滑化の例 (2 値の MRI モデル)