4次元陰関数を用いた時系列連続断層画像の形状表現

渡部 広志 Hiroshi WATABE
金井 崇 Takashi KANAI

近藤 邦雄 Kunio KONDO
道川 隆士 Takashi MICHIKAWA

大竹 豊 Yutaka OHTAKE

概要: 連続断層画像は近年の測定技術の進歩により様々な場面で取得されるようになった。連続断層画像の例として医療の現場で使われるMRIやCT、工業製品の開発、改良のためのCTの利用などが挙げられる。こういった連続断層画像の応用技術の可能性の一つとして、動きを持つ形状の可視化がある。例えば物体の時間的な形状変化を表す、時系列をもった連続断層画像に対するモデリングと可視化といったものである。本論文では、4次元陰関数を用いた時系列を持つ連続断層画像のモデリングおよび可視化手法を提案する。提案手法は、2値化した連続断層画像に対して、SLIM曲面と呼ばれる陰関数曲面を当てはめることで4次元陰関数曲面モデルを生成する。提案手法により、任意の時間における3次元形状が簡単に計算できる4次元陰関数曲面モデルが得られる。そして本手法を用いた実験により動きを持つ形状の可視化に対する有用性を示した。

キーワード: 形状処理／陰関数曲面／位相変化

1. はじめに

近年、測定機器の発達により、生物細胞などの非常に小さい対象の振る舞いを3次元でかつ時系列に記録した4次元の連続断層画像が取得できるようになった。これらを用いて、今まで未知であった細胞の振る舞いに関する性質など、新しい知見が得られる可能性がある。しかし、得られたデータは、2次元画像の集合であり、そこから性質を把握するのは難しい。得られた画像を、アニメーションなどを用いて可視化できれば、細胞の振る舞いを俯瞰的に観察することができ、新たな知見の発見に役立つ可能性がある。3次元画像を用いた形状モデリングは、これまでも医療分野、工業分野において活発に行われている。本研究の対象となる動的な生物細胞画像は、これらと比較して以下の特徴を持つ。

- 画像に動きが存在する
- 細胞分裂時において位相の変化が発生する
- 断層画像に存在するノイズの量が多い
- 工業製品と異なり、エッジのない、滑らかな曲面で構成される

以上の要件を満たすモデリング手法はほとんど存在しない。モデリングの際にはこれらの特徴を考慮し、かつさまざまな可視化に適応しうるデータ形式のモデルを生成することが必要とされる。

本研究では、時系列を持つ連続2値画像を対象とした、4次元モデリング手法を提案する。4次元モデリン

グは、3次元空間に時間軸の値を考慮した空間に陰関数曲面を当てはめる方法で行う。本手法は、一定の時間間隔でサンプリングされた連続断層画像に対し2値化を施した時系列連続2値画像を入力とする。2値画像に対して、位相の変化するデータとの親和性が高い陰関数を直接当てはめることで4次元モデリングを行う。陰関数には、コンパクトな陰関数曲面として知られるSLIM曲面を4次元に拡張して用いた。本手法で得られたモデルの可視化は、パラメータとして時刻を与えることで容易に行われる。本論文では、いくつかの例題に提案手法を適用し、その有用性および特徴について考察を行った。

以下、2節では、本研究で用いる陰関数に関連する従来研究、3節では、3次元形状を現す連続断層画像に対する陰関数当てはめ、および時系列データへの拡張について述べる。4節では、提案手法を用いた実験例と、実験例の考察を述べる。最後に5節で、本論文のまとめと今後の展望について述べる。

2. 陰関数に関する従来手法

本節では、まず、本研究で用いる陰関数表現について述べる。次に陰関数を用いた様々な形状モデリング手法の特徴とSLIM曲面モデリング、そしてそれらのモデルの可視化手法について述べる。

2.1. 陰関数による形状表現

$f(x, y) = 0$ という記述で表現される関数を陰関数という。陰関数は、物体の表面からの距離によるスカラー場を形成することで、物体の内外の判別が可能なモデルを表現する。陰関数 $f(x, y) = 0$ では各点 (x_i, y_i) に対し $f(x_i, y_i) = 0$ を物体の表面、 $f(x_i, y_i) < 0$ を物体の内部、 $f(x_i, y_i) > 0$ を物体の外部と定義することでソリッド（固体）表現を行う。図1に、物体の表面からの距離によるスカラー場の例を示す。

図1 物体の表面からの距離を表すスカラー場の例

図 2 SLIM 曲面モデリングを用いた 2 次元データに対する陰関数曲面の当てはめ

2. 2. 陰関数を用いた形状モデリング

陰関数 ($f(x, y) = 0$) は以下の特徴を持つ。

- 物体の内外の識別が可能
- 集合演算による複数物体の衝突、分離など位相が変化する現象を容易に表現可能

3 次元上の離散データを元に陰関数曲面を当てはめ形状を表現する手法はいくつも存在するが、本研究ではその中の一手法である Sparse Low-degree Implicit (SLIM) 曲面モデリング^[1]を元に、4 次元の陰関数曲面の当てはめを行う。SLIM 曲面モデリングは大竹らによって提案された Multi-level Partition of Unity Implicits (MPU) によるモデリング^[2]の改良手法である。

SLIM 曲面モデリングでは物体の表面 (前景と背景の境界) 上のみ配置し、球の内部に陰関数により曲面を当てはめて形状を表現している (図 2)。SLIM 曲面は以下のような特徴を持つ。

- 物体中の全ての点を用いて形状を表現する MPU に比べデータが軽量
- 各近似関数ごとに異なる大きさの球を用いることにより、精度を保ったデータ量の軽量化が可能
- 滑らかな表面
- 低次多項式近似で、モデルの表面の曲率や法線を簡単かつ高品質に導出
- 従来手法^{[2],[3]}のように内外判定において、大規模連立方程式を解く必要がないため高速に計算可能
- GPU を用いた高速レンダリングが可能^[4]

SLIM 曲面は、物体の表面上の点のみを候補に陰関数曲面の当てはめを行う。物体中のすべての点を候補にして曲面の当てはめをする手法に比べ、軽量なデータでモデルが表現できる。関数を当てはめるための候補となる点が物体中の全点を候補とする場合に比べ少ないため、当てはめに用いる時間の短縮も期待できる。また、近似がしやすい形状であればより大きい球を当てはめ、近似が困難な形状であればより小さい球をあてはめて関数の影響範囲を定めることで、近似関数の精度を保ちながら、無駄の少ないデータで形状の表現をすることが可能

である。さらに、曲面の近似に用いる関数に低次多項式を用い、複数の近似関数がある領域では関数のブレンディングを利用するためモデルの表面を滑らかに表現できる。関数による形状表現の為、モデルの表面の曲率や法線が容易に高品質なものを導ける。曲率は NPR (陰付けや特徴抽出)、法線はレンダリングなどさまざまなモデルの表現に用いられ、これらの見積もりが容易であることは可視化に適したモデルであるといえる。SLIM は RBF に比べ描画力において劣るとされるものの、計算量の少なさが利点とされるモデリングであり、大規模な入力データへの対応が可能である。

2. 3. 可視化手法

陰関数の可視化には、大別して二種の手法が用いられる。一つは、レイキャスティング (Ray Casting) 法やレイトレーシング (Ray Tracing) 法などの画素毎に視線から光線を飛ばし、物体との交点を求めることで陰関数曲面を直接描画する手法である。

もう一つは、マーチングキューブ (Marching Cube) 法^[5]に代表される等値面生成手法を用いてポリゴンを生成し、それを表示する手法である。マーチングキューブ法は抽出点が格子状の点を利用するためシャープなエッジの描画力が弱いなどの問題点がある。拡張マーチングキューブ (Extend Marching Cube) 法^[6]は、シャープなエッジの表現を出来るように拡張された手法であるが、処理の前提条件としてシャープなエッジの箇所の情報を得る必要があった。デュアルカンタリング (Dual Contouring) 法^[7]は前処理の必要なくマーチングキューブ法において困難であったシャープなエッジの表現を可能としている。

3. 陰関数曲面の当てはめ

本節では、連続断層画像で表された 3 次元の形状及び時系列連続断層画像で表された 4 次元の形状に対する陰関数曲面モデルの生成と可視化について述べる。

3. 1. 提案手法の概要

図 3 陰関数曲面当てはめの処理概要

図 3 に陰関数曲面当てはめの処理概要を示す。3 次元の陰関数曲面モデル生成の際には、入力に連続断層画像

を用いる。まず、連続断層画像を2値化により連続2値画像に変換する必要がある（図3(1)）。入力画像中のノイズは2値化処理により除去する。本研究では、簡単のために連続断層画像の2値化はすでに行われているものとする。次に、連続2値画像に対し、SLIM曲面の生成アルゴリズムにより陰関数曲面モデルを生成する（図3(2)）。処理(2)の詳細については3.2., 3.3.節にて述べる。最後に、処理(2)で生成されたモデルを可視化する（図3(3)）。

4次元の陰関数曲面モデルの生成の際には、入力データとして一定の時間間隔でサンプリングされた、時系列連続断層画像を用いる。まず、それぞれの時間における連続断層画像を、2値化により連続2値画像に変換することで時系列連続2値画像を生成する。次に、時系列連続2値画像に対して4次元の陰関数曲面を当てはめることで、離散時間値間の物体の挙動を補完する、動的な形状に対するモデルを構築する。最後に、生成したモデルに対しさまざまなアプローチでもって物体の変化や動きがわかる可視化を行う。

3.2. 陰関数の当てはめ

本小節では、曲面近似の際に用いる陰関数の導出手法について述べる。

SLIM曲面において、一つの関数の影響する領域は、関数当てはめの中心点 p から半径 r の球の範囲である。前景と背景の境界上に複数の球をばら撒き、それらの内部における形状を、それぞれ曲面で近似する（図2）。3次元の形状に対する関数当てはめでは、求める関数の近似を、以下の3変数2次多項式を用いて表す。

$$\begin{aligned} Q(x, y, z) = & Ax^2 + By^2 + Cz^2 \\ & + Dxy + Eyz + Fzx \\ & + Gx + Hy + Iz + J \end{aligned} \quad (1)$$

球内の点 $\mathbf{x}_i$ について、物体の内部の点であれば $Q(\mathbf{x}_i) = r$ 、物体の外部の点であれば $Q(\mathbf{x}_i) = -r$ とする。球の内部の全点に対してこの評価を行うと、係数 $A, B, C, D, E, F, G, H, I, J$ に関する多項式が得られる。それをまとめることで得られる連立方程式を解くことで、係数の値が得られる。

4次元の形状に対する関数当てはめにおいては、SLIM曲面における関数の影響領域である球として、 x, y, z, t 軸方向に半径 r の範囲を被覆する4次元の球を用いる。4次元の形状に対する関数当てはめでは、求める関数の近似を、以下の4変数2次多項式を用いて表す。

$$\begin{aligned} Q(x, y, z, t) = & Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dt^2 \\ & + Exy + Fxz + Gxt + Hyz + Iyt + Jzt \\ & + Kx + Ly + Mz + Nt + O \end{aligned} \quad (2)$$

3次元の形状に対する関数当てはめと同様の手法で式2

の係数の値を求める。

当てはめた曲面の評価には、関数の影響範囲である球の内部において内外のずれが生じている点における誤差の二乗和を用いる（式3, 図4）。

$$E(x_i) = \sum_{\mathbf{x}_i \in \text{inside}} (Q(\mathbf{x}_i) - r)^2 + \sum_{\mathbf{x}_i \in \text{outside}} (Q(\mathbf{x}_i) + r)^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

内外が反転している点で、ゼロレベルまでの距離を測る

図4 誤差評価

3.3. 陰関数曲面モデル生成アルゴリズム

本小節では、入力である連続2値画像から、出力である陰関数曲面モデルを生成するためのアルゴリズムについて述べる。

まず連続2値画像からボクセルモデルを作成し、前景と背景の境界上の点を曲面近似に用いる球の中心点候補として抽出する。以下、抽出した点の集まりを中心候補点群、中心候補点群の一要素を中心候補点と呼ぶ。各中心候補点には、初期値として0を取る重みを設定する。SLIM曲面では関数ごとに異なる大きさの球を必要とするため、関数の影響範囲を求めるにあたり2分法を用いる。関数の影響範囲と近似関数を求めるために、まず中心候補点群から中心候補点 p_i を無作為に選択し、 p_i を中心に大小2つの半径をもつ球を置く。式3により求められる半径 r における近似関数の誤差の値を $E(r)$ 、パラメータとして与えた誤差の理想値を E_{ideal} とした時、

$$E(r_S) < E_{ideal} < E(r_L) \quad (4)$$

となる2つの半径 r_S, r_L を求める。

そして、中心点 p_i 、半径 $r_M = (r_S + r_L)/2$ の球の内部の全点をサンプリングする。全サンプリング点を用いて、3.2.節で述べた方法によって得られた連立方程式を、最小二乗法を用いて解くことで $Q(\mathbf{x}_i)$ の係数を求める。 $Q(\mathbf{x}_i)$ を用いて式3に従い誤差 $E(r_M)$ を評価し、 $E(r_M) < E_{ideal}$ であれば $r_S = r_M$ 、 $E(r_M) \geq E_{ideal}$ であれば $r_L = r_S$ として新たな r_S, r_L を定める。

これを $r_L - r_S$ が閾値以下となるまで繰り返し、求められた r_S を関数の影響範囲である球の半径 r_i と定める。ここで誤差 $E(r_M)$ を理想誤差 E_i に近づけるように r_M を変化させながら関数の当てはめを繰り返し行うことで、精度を保ちつつデータ量を小さくしたモデルの構成ができる。また近似関数の精度を抑えることで、物体表面のノイズの除去の効果が得られる。

半径 r_i が求められたら、点 p_i との距離が r_i 以下の中心候補点に対して、半径 r_i に比例し点 p_i からの距離に

反比例するような重み関数を用いて重みに加算を行う。重みが一定値を超えた点を中心候補点群から取り除くことで、近似関数の無駄な重複を省くことができる。以上の処理を、中心点候補がなくなるまで繰り返すことで陰関数曲面モデルが作成される。

3. 4. 3次元陰関数曲面モデルの可視化

可視化は、ポリゴン化手法の一つであるデュアルカンタリング法^[7]を用いる。提案手法により作成したモデルでは、物体が薄い箇所において、陰関数が断裂する場合がある。図5(a)に例を示す。これは、関数の影響範囲の球がそれぞれ半径を超えて乖離することに起因する。レイキャスティング法などの陰関数を直接可視化する手法の場合、断裂する箇所において物体が閉じていない形状として可視化される。本研究ではポリゴン化を行うことにより、断裂のある陰関数を用い、閉じた形状を表現する(図5(b))。

図5 断裂箇所(a)とそのポリゴン表現(b)

4. 形状モデル生成の実験と考察

本節では、提案手法を用いて作成した陰関数曲面モデルを用い、可視化を行った結果を示す。また、提示した画像から考えられる特徴について、考察を行う。

4. 1. 実験方法

時系列連続2値画像から4次元の陰関数曲面を生成する。次に生成されたモデルの、時間をパラメータとして与えた際に得られる形状を表示して評価を行う。出力画像は陰関数曲面を元にデュアルカンタリングを用いてポリゴン化を行い、表示する。

実験に当たって使用した環境を以下に示す。

CPU: PentiumM 1.69GHz

OS: WindowsXP

メモリ: 1GB

コンパイラ: cygwin gcc-3.4.3

4. 2. 実験結果

本小節では、入力データである時系列連続2値画像を用いた4次元陰関数曲面モデルの生成実験結果について述べる。

4. 2. 1. 位相変化のある4次元形状

図6に、8の字形状からトーラスへのモーフィングデータを表す時系列連続2値画像の一部を示す。図7に位相が変わる例題として、8の字形状からトーラスへのモーフィングデータを示す。この例題は、 $t = [0, 1]$ において等間隔に21の連続2値画像のサンプルを作成し、それらを入力として生成した4次元陰関数曲面モデルの可視化結果である。一つの連続2値画像は、縦横が347×347の2値画像347枚により構成される。図6は図7で示された陰関数曲面モデルの生成に用いられた時系列連続2値画像の、 $t = 0$ における連続2値画像の $z = 150$ から $z = 179$ に相当する2値画像である。

図6 [例1]8の字形状からトーラスへのモーフィングデータの時系列連続2値画像の一部

図7 [例1]8の字形状からトーラスへの変化を示す4次元陰関数の出力画像

図7からわかるように、位相の変化する形状も特別な処理を必要とせず表現できることがわかる。図7最上図中央左では、形状の表面に著しい凹凸が確認できる。これは単位時間当たりの形状の変化が大きいため、形状の変化を滑らかに表現する陰関数を当てはめることが出来ず、別の時間における表面を示す陰関数の残滓が、ノイズのように出現しているためと考えられる。対策としては、単位時間当たりの形状の変化を小さくするためにより時間方向の刻みが多い入力を用いる、あるいはパラメータとして与える誤差の理想値をより大きくすることで一つ一つの近似関数の影響範囲を大きくすることが考えられる。しかし前者の対処法は入力データに依存するため効果的な対処とは考えられず、後者の対処法の場合、誤差の理想値を大きくすることで全体的に入力データの再現性が低下することが懸念される。入力データにおける時間当たりの変化が大きすぎる場合、この手法では有効なモデリングができないと考えられる。

4. 2. 2. 分裂する球体

図8に、基礎的な位相の変化を含む形状変化である球体の分裂を表現したモーフィングデータを示す。この例題は、 $t = [0, 1]$ において等間隔に100の連続2値画像のサンプルを作成し、それらを入力として生成した4次元陰関数曲面モデルの可視化結果である。一つの連続2値画像は、縦横が 100×100 の2値画像100枚により構成される。図8からわかるように、時間方向のサンプリングを十分に行うことでノイズ、誤差の少ない出力を得られることがわかる。

図8 [例2] 球の分裂を示す4次元陰関数の出力画像

4. 2. 3. ドラゴン形状の内部表現

図9に、ドラゴン形状 (stanford Dragon) を元 to 作成された連続2値画像の一部を示す。図10に、等距離場生成手法により、ドラゴン形状を元 to 作成された11の連続2値画像を入力として生成した4次元陰関数曲面モデルの可視化結果を示す。一つの連続2値画像は、縦横が 512×512 の2値画像233枚により構成される。図9は、図10で示した陰関数曲面モデルの生成に用いられた時系列連続2値画像の、 $t = 0$ における連続2値画像の $z = 70$ から $z = 99$ に相当する2値画像である。

図9 [例3] ドラゴンの変形を示す時系列連続2値画像の一部

図10 [例3] ドラゴンの変形を示す4次元陰関数の出力画像

図10からわかるように、このドラゴンのモデルは入力データにおける単位時間当たりの形状の変化量が小さいため、入力の再現性の高い出力であることが確認できる。また、 $t = 0$ (図10左上) 及び $t = 1$ (図10右

下) 以外の出力結果より, 入力 of 連続 2 値画像が存在しない時間における形状も生成が可能であることが確認できる. しかし, 図 10 下列中央左, 下列中央右に, 一部孤立した領域に形状が生成されている. これは消失しつつある箇所 of 出力であると考えられる. 消失過程 of 箇所を含む形状を元にモデルを生成する場合, こういったノイズと考えられる出力が生まれる場合がある. 陰関数では, このようなノイズへの対処は難しく, 除去が必要であればポリゴン化時にノイズを描画しないような処理が必要である.

表 1 に, 各実験例 of 陰関数曲面モデル生成処理 of 実行時間, 中心候補点数, 近似曲面数を示す. 例 1 は 8 の字からトーラスへのモーフィングデータを元にしたモデリング, 例 2 は球 of 分裂を表すモーフィングデータを元にしたモデリング, 例 3 は Stanford Dragon を元にしたモデリングにおけるデータを示すものである. 中心候補点数は, 入力 of 連続 2 値画像における前景と背景 of 境界に相当する点 of 個数であり, 前景 of 表面積に比例する. 近似曲面数は, 出力 of 4 次元陰関数曲面モデルに含まれる陰関数曲面 of 数である. 近似曲面数は, 中心候補点数と, 関数による形状表現 of 困難さに応じて増加する.

表 1 各実験例 of 実行時間とデータ量

実験例	処理時間	中心候補点数	近似曲面数
例 1	76.92 分	2284790	113338
例 2	18.72 分	2129526	69017
例 3	119.73 分	5790727	78651

5. おわりに

本論文では時系列を持つ連続断層画像によって表された時間によって形状が変化する物体に 4 次元 of 陰関数曲面を当てはめ, 物体 of 形状変化を表現できるモデル生成手法を提案した. 提案手法により, 任意 of 時間における 3 次元形状を表現することが可能なモデルを構築することができた.

参考文献

[1] Y. Ohtake, A. Belyaev and M. Alexa: Sparse Low-degree Implicit Surfaces with Applications to High Quality Rendering, Feature Extraction, and Smoothing. In Eurographics Symposium on Geometry Processing(2005)

[2] Y. Ohtake, A. Belyaev, M. Alexa, G. Turk and H.-P. Seidel: Multi-level Partition of Unity Implicits. In ACM SIGGRAPH(2003)

[3] J. C. Carr, R. K. Beatson, J.B. Cherrie, T. J. Mitchell, W. R. Fright, B. C. McCallum and T. R. Evans: Reconstruction and Representation of 3D Objects with Radial Basis Functions. In ACM SIGGRAPH(2001)

[4] T. Kanai, Y. Ohtake, H. Kawata, K. Kase: GPU-based Rendering of Sparse Low-degree Implicit Surfaces. In 4th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and the Southeast Asia (GRAPHITE 2006)

[5] W. E. Lorensen and H. E. Cline A high resolution 3D surface construction algorithm. In ACM SIGGRAPH(1987)

[6] L. P. Kobbelt, M. Botsch, U. Schwanerke and H.-P. Seidel: Feature sensitive surface extraction from volume data. In ACM SIGGRAPH(2001)

[7] T. Ju, F. Losasso, S. Schaefer and J. Warren: Dual Contouring of Hermite Data. In ACM SIGGRAPH(2002)

著者紹介

渡部 広志 : 埼玉大学情報システム工学科
近藤 邦雄 : 埼玉大学理工学研究科
大竹 豊 : 理化学研究所 VCAD モデリングチーム
金井 崇 : 東京大学大学院総合文化研究科
道川 隆士 : 東京大学先端科学技術研究センター