

三角メッシュを入力とした曲面再構成のための 四角パッチ構築方法

伊藤 貴之* 山田 敦* 古畑 智武** 井上 恵介* 嶋田 憲司**

*日本アイ・ビー・エム(株) 東京基礎研究所

**カーネギーメロン大学 機械工学科

{itot, ayamada, inouek}@jp.ibm.com tomotake@andrew.cmu.edu shimada@cmu.edu

細かい三角メッシュや点群を入力として粗い曲面パッチに変換する曲面再構成技術は、データ量の削減やCAD形状モデルとの整合性において利点がある。筆者らは、まず曲面パッチの位相が与えられたものとして、それを入力データである点群にフィッティングする曲面再構成方法を提案している。本報告では、曲面の連続性や滑らかさを向上することを目的とした、四角形曲面パッチの位相構築方法を提案する。本手法では細かい三角メッシュを入力とし、それをいくつかの帯状領域に分割し、それぞれの領域を粗い四角形に分割することで、規則性の高い四角パッチの位相を構築する。前述の手法と本手法を組み合わせることで、曲面再構成の一連の処理が自動的に実現される。

Rough Quadrilateralization for Surface Reconstruction from a Fine Triangular Mesh

Takayuki Itoh* Atsushi Yamada* Tomotake Furuhashi**
Keisuke Inoue* Kenji Shimada**

*IBM Research, Tokyo Research Laboratory

** Mechanical Engineering, Carnegie Mellon University

Surface reconstruction is a technique for converting fine geometric models such as triangular meshes or unorganized points into a smaller number of curved surface patches. We have reported a component technique for surface reconstruction that fits given surface patches into a set of points. In this paper we propose another component technique that automatically constructs the topology of quadrilateral surface patches. Given a fine triangular mesh, the technique first divides the mesh into several belt-like subregions, and then divides each subregion into quadrilateral patches. Fully automated surface reconstruction can be implemented by combining the two component techniques.

1. はじめに

曲面再構成 (Surface Reconstruction) [Baj95] [Eck96] [Kri96] は、細かい三角メッシュや点群を入力して、少数の曲面パッチに変換する技術である。曲面再構成は、データ量の削減や、市販 CAD システムとの整合性において利点がある。筆者らは、曲面再構成技術の一種として、細かい点群を入力し、あらかじめ生成された四角形パッチをフィッティングすることで、点群が表す形状を曲面パッチで表現する手法を提案している [Yam99b]。

連続性や滑らかさの点で高品質な曲面形状を得るためには、正方形に近い四角形曲面パッチを生成することが好ましいことが容易に推測できる。本報告では、曲面再構成技術によって、十分に高品質で、かつデータ量の少ない形状表現を実現するために、曲面パッチに対して以下の条件を仮定する。

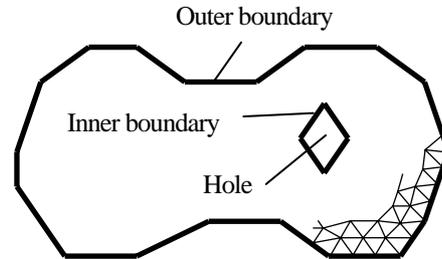
- 条件 1:** 曲面パッチは四角形である。また、トリムは用いない。
- 条件 2:** 曲面パッチは入力した三角メッシュ要素に比べて十分大きい。
- 条件 3:** 四角形曲面パッチの4頂点の角度は直角に近いことが好ましい。そのためには、滑らかな曲線を形成する領域境界上においては、パッチ頂点は2枚のパッチに共有されることが望ましい。また、領域内部においては、パッチ頂点は4枚のパッチに共有されることが望ましい。

上記の条件1および条件3は、有限要素解析の四角メッシュに求められる条件に類似している。そこで本報告では、有限要素解析の分野で最も有用な手法のひとつである Advancing Front Method [Bla91] に類似したアルゴリズムを用いて、四角形曲面パッチの位相を構築する手法を提案する。

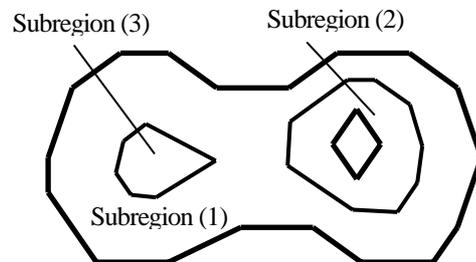
Advancing Front Method は、与えられた領域の境界線に沿って一列にメッシュ要素(例えば四角形要素)を生成し、その内側に同様に一列にメッシュ要素を生成し... という処理を、領域がメッシュ要素で埋め尽くされるまで反復する手法である。この手法を適用することで、領域境界上の多くのメッシュ頂点が2個の四角形要素に共有され、領域内部の多くのメッシュ頂点が4個の四角形要素に共有された、良好な四角メッシュを生成することができる。その反面、入力形状の最も内側に歪んだ領域が残ったときに、歪んだメッシュ要素が生成されやすく、最悪の場合メッシュ要素の生成に失敗する、という問題点がある。

本報告で提案する手法は、細かい三角メッシュを入

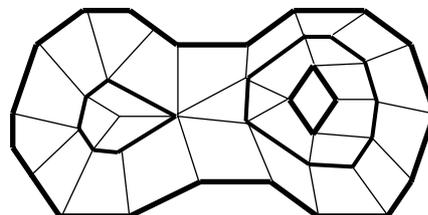
力として、そのメッシュ要素よりも十分粗い四角形パッチを、領域境界に沿って整列するように生成する。また、入力データである三角メッシュの構造を利用して、Advancing Front Method の問題点である「内側の領域におけるメッシュ要素の歪み」も同時に改善する。



(a) 入力三角メッシュの例



(b) 三角メッシュの帯状領域への分割



(c) 帯状領域のパッチへの分割

図1 本手法の概要

本報告で提案する手法の概要を図1に示す。図1(a)のような三角メッシュを与えられたとして、本手法はまず図1(b)に示すように、三角メッシュを構成するメッシュ要素を、メッシュの領域境界に沿って、いくつかの帯状領域に分割する。続いて図1(c)に示すように、それぞれの帯状領域を切断してパッチに分割する。この手順によって、Advancing Front Method によって生成されるメッシュのように、領域境界に整列したパッチを生成することができる。また本手法では、領域の内側にいたるまで歪みの少ない帯状領域を生成するので、Advancing Front Method の問題点である内側の要素の歪みも低減することができる。

2. 実装

2.1 三角メッシュの帯状領域への分割

図 1(b) に示した通り、本手法ではまず、三角メッシュを領域境界に沿った帯状領域に分割する。

まず本手法では、入力三角メッシュを構成する要素辺の中から、三角形要素1個のみに接する要素辺を抽出する。抽出された要素辺を隣接関係にしたがって一続きに探索することで、領域境界を構成するいくつかのループを抽出することができる。

続いて本手法では、 n 番目の境界ループから m 個の三角形要素を隔てて位置する三角形要素に、 $s_{m,n}$ という分類をつける。三角形要素の分類の例を図 2(上)に示す。この図から、同じ分類をもつ三角形要素が領域境界に沿った一列の層を形成することがわかる。

続いて本手法では、図 2(下)に示すように、三角形要素層をノードとし、三角形要素層の隣接関係をアークとするグラフ構造を構築する。

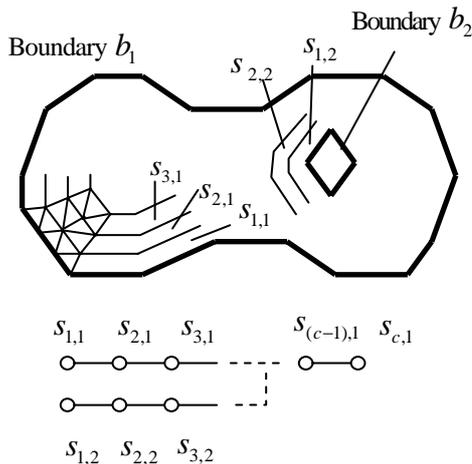


図2 境界からの距離による三角形要素層の生成

続いて、このグラフを構成するノードを、以下の手順により数個のグループに分類する。

- 1) 隣接ノードを1個だけ持つノードは、その隣接ノードと同じグループに配属する。
- 2) 構成ノード数がユーザー指定値より少なく、かつグループ外の隣接ノードを1個だけ持つグループがあれば、その隣接ノードを同じグループに入れる。
- 3) 1)2) の処理を終えた後に、まだグループに入っていないノードがあれば、それを近隣グループに入れる。

以上の手順により本手法では、ユーザー指定値に近いノード数のグループを生成する。このとき各々のグループは、ほぼ均一な太さの帯状領域を形成する。

本手法で生成されるノードグループおよび帯状領域の例を図3に示す。図3(下)は、図2(下)に示したグラフを構成するノードを、 r_1, r_2, r_3 の3個のグループに分類した例である。各々のグループを構成する三角形要素の集合が、図3(上)に示す3個の帯状領域となっている。

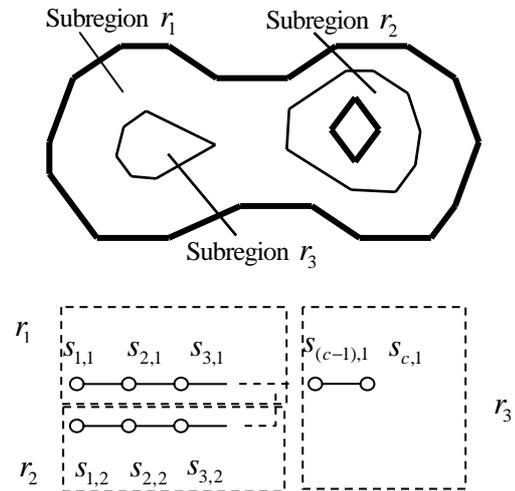


図3 帯状領域の生成

2.2 帯状領域の分割によるパッチ生成(1)

続いて本手法では、図 1(c)に示した通り、帯状領域を分割してパッチを生成する。なお、以下のアルゴリズムの詳細は [Ito00] に説明されている。

本手法によって生成される帯状領域の多くは、1個の穴をもつ。このような形状の帯状領域に対して、本手法では以下の手順により帯状領域を分割してパッチを生成する。

- 1) 帯状領域を構成する三角形要素を探索し、内側および外側の境界を構成する要素辺を抽出し、ループを構成する。
- 2) 領域外側の境界ループのメッシュ頂点を数個おきを選択し、それらを連結するパッチ辺を生成する(図 4(左)参照)。ただし、境界ループを共有する隣接帯状領域がすでにパッチに分割されているときは、そのパッチ辺をそのまま用いる。
- 3) 2)で生成された領域外側のパッチ頂点から、領域内側のループに向かうパッチ辺を生成する(図 4(中)参照)。
- 4) 3)で生成された領域内側のパッチ頂点を連結して、パッチ辺を生成する(図 4(右)参照)。

以上のアルゴリズムにより、本手法では以下の3種類

のパッチを生成する。

- a) 外側ループの頂点2個と、内側ループの頂点2個を連結してできる、四角形パッチ。ほとんどの帯状領域において、このパッチが最も多く生成される。
- b) 外側ループの頂点3個と、内側ループの頂点1個を連結してできる、四角形パッチ。
- c) 外側ループの頂点2個と、内側ループの頂点1個を連結して出来る、三角形パッチ。

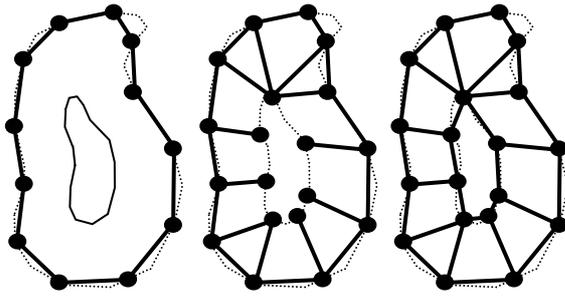


図4 穴を1個もつ帯状領域のパッチへの分割

帯状領域が複数の穴をもつ場合には、1) で複数の内側境界ループが生成される。このような場合には、複数の内側境界ループを接続する一つの大きなループを生成し、これを内側ループとみなしてパッチを生成する(図5参照)。

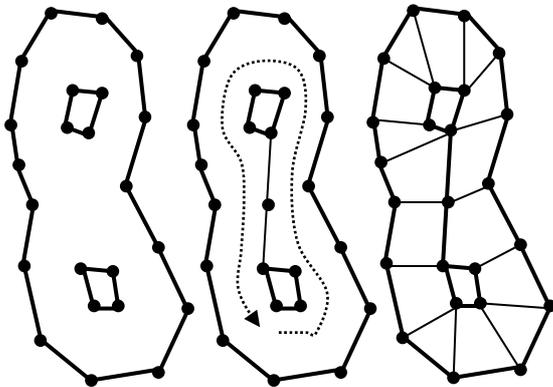


図5 穴を複数もつ帯状領域のパッチへの分割

2.3 帯状領域の分割によるパッチ生成(2)

2.2 では、穴をもつ帯状領域の分割について述べたが、最も内側の帯状領域は穴を持たない場合が多い。この場合に本手法では、まず帯状領域を構成する三角形要素に対して細線化処理を適用して、三角形要素辺で構成される骨格線を抽出する。続いて、この骨格線を面積ゼロの内側ループとして、2.2 と同様な手

法で帯状領域の外側の境界線と内側ループを結ぶパッチ辺を生成し、帯状領域をパッチに分割する。

図6は、このアルゴリズムで生成される骨格線およびパッチの例である。帯状領域が小さい場合には、図6(左)に示すように、骨格線が1頂点となる場合も多い。帯状領域が細長い場合には、図6(右)に示すように、骨格線が領域中心を表す曲線となる。

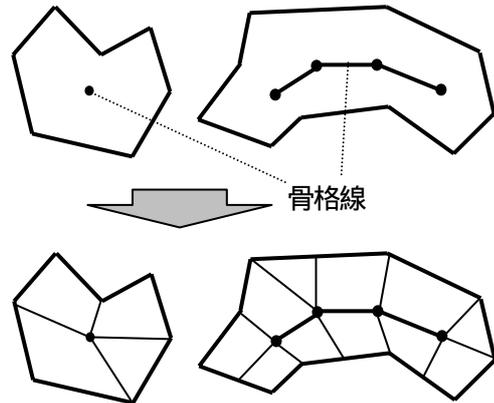


図6 穴を持たない帯状領域の分割

2.4 後処理

以上の処理によって、入力形状である三角メッシュは、多数の四角形パッチと少数の三角形パッチに分割される。筆者らの実装では、以上のパッチを図7に示すテンプレートで分割して四角形パッチにする。続いて、入力形状である三角メッシュのメッシュ頂点を点群とみなして、[Yam99b] に示す手法を用いて四角形パッチを点群にフィッティングすることで、曲面再構成を実現する。

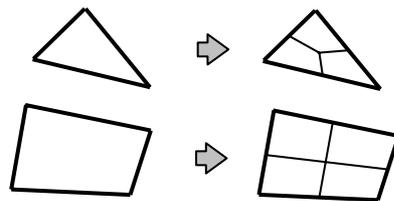


図7 三角形・四角形混合パッチの四角形パッチへの変換に用いるテンプレート

3. 従来手法

代表的な曲面再構成技術における、四角形曲面パッチの位相構築方法について述べる。

[Baj95] では、入力データである点群を結ぶ四面体メッシュを生成し、点群が表す物体の境界面に当たるメッシュ面群を選択する。続いて、その面群に十分近く、かつ G1 連続であるパッチを、四面体との交差面の集

合で表す。パッチは三角形と四角形の混合になり、しかも点群と同等の密度で生成される。

[Kri96] では、曲面パッチの位相は自動生成しないかわりに、曲面パッチの境界線をユーザーに指定させる GUI の例を提示している。

[Eck96] では、入力データである点群を結ぶ三角メッシュを単純化し、その結果としてできたラフな三角メッシュの三角形要素をペア化して四角形パッチに変換している。この方法は、点群より十分に粗く、かつ正方形に近い良質な形状の四角形を優先的に生成することができる。しかし、1章で示した「条件3」を満たすような位相が構築されるとは限らない。

4. 実行例

筆者らは本手法を含む一連の曲面生成技術、CAD における接続面(フィレットなど)の自動生成の目的ですでに実装し、実用している。

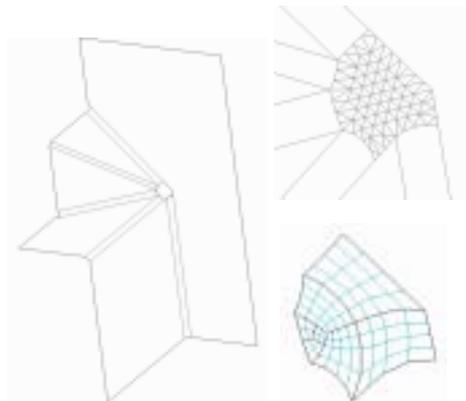


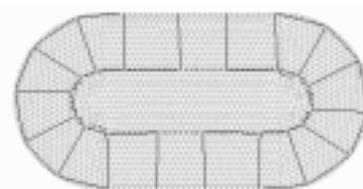
図8 本手法の実用例

本実装によって生成された曲面の例を図8に示す。図8(左)は、10枚の曲面を持ち、その中心部に穴を持つ CAD データの例である。本実装ではまず、図8(右上)に示すように、該当領域に細かい三角メッシュを生成し、それを [Yam99a] に示す手法で滑らかな曲面形状に変形する。さらに、図8(右下)に示すように、本手法を用いて細かい三角メッシュを四角形パッチに変換し、[Yam99b] に示す手法を用いて四角形曲面パッチを完成する。

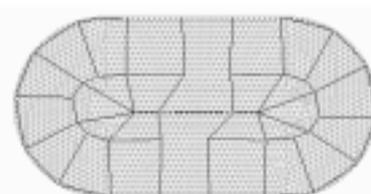
一般的に、図8(左)の中心部のような込み入った形状に対して、市販の CAD システムで曲面を作成するには、熟練が必要である。製造業の設計現場では、このような曲面の作成に非常に大きな作業行程を要しているのが現状である。本実装は、このような形状に対して曲面を自動生成できるので、製造業の設計現場に

おける作業行程の短縮への貢献が期待できる。

続いて、本手法による四角形パッチの生成過程を図9に示し、従来手法による四角形パッチ生成結果と比較する。図9(a)は、入力三角メッシュを2つの帯状領域に分割し、外側の帯状領域をパッチに分割した例である。図9(b)は、内側の帯状領域に対して細線化手法を適用して骨格線を生成し、それを面積ゼロの内側ループとみなしてパッチを生成した例である。図9(c)は、[Yam99b] に示す手法を用いて四角形パッチを曲面パッチに変換した例である。図9(d)は、本手法を用いずに、従来手法([Eck96] に類似した手法)を用いて四角形曲面パッチを生成した例である。この実行例から、本手法が従来手法と比べて、良好な形状をもつ四角形曲面パッチを生成できていることが視覚的に判断できる。他の CAD データにおいても同様な結果を得ることができた。



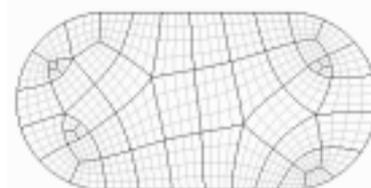
(a) 本手法による四角形パッチの生成過程(1)



(b) 本手法による四角形パッチの生成過程(2)



(c) 本手法による四角形曲面パッチ生成結果



(d) 従来手法による四角形曲面パッチ生成結果

図9 本手法および従来手法の実行例

続いて、本手法および従来手法で生成した四角形曲面パッチの滑らかさを、数値的に比較する。表 1 は、4種類のCADデータに対して、本手法および従来手法で曲面を生成し、その曲率半径の最小値を測定した結果である。4種類のCADデータすべてにおいて、本手法で生成した曲面は、従来手法で生成した曲面と比較して、曲率半径の最小値が大きかった。このことから本手法は、従来手法と比べて滑らかな曲面を生成していることがわかる。

表1 曲率半径の最小値の比較

	従来手法	本手法
データ1	4.3	4.5
データ2	3.1	10.2
データ3	6.7	7.6
データ4	1.3	12.8

続いて、本手法で生成した曲面の連続性を、数値的に評価する。表2は、本手法で生成された曲面に対して、隣接四角形曲面パッチの共有辺上での法線方向のブレ角の最大値(単位は degree)を求めたものである。この結果から、本手法で生成された曲面は、隣接パッチ間でのG1連続性をほぼ達成していることがわかる。

表2 隣接パッチ共有辺上での法線方向のブレ角

データ1	データ2	データ3	データ4
0.012	0.017	0.009	0.076

5. むすび

本報告では、細かい三角メッシュを入力して、それを粗い四角形パッチ群に変換する手法を提案した。本手法は、領域境界に沿って整列した良好な位相構造の四角形曲面パッチを生成することにより、正方形に近い良質な四角形曲面パッチを生成することができた。また、本報告の実行例により、本手法が曲面再構成技術における曲面の滑らかさや連続性を向上させていることを示すことができた。

筆者らは本技術を、CADにおける接続面(フィレットなど)の自動生成の目的ですでに実用している。一方、本技術を Visualization や Rapid Prototyping などの目的で用いるためには、以下の要求に対して考察する必要がある。

- ・ 閉曲面を構成する三角メッシュへの対応。

- ・ 曲率が部位によって大きく変わるような形状に対して、適応的な大きさでパッチを生成する要求への対応。
- ・ あえて接線不連続な頂点(または線)を表現したい場合への対応。

本技術に対して以上の要件を対応することは、少なくともアルゴリズム的には困難ではない。そこで今後の発展として、以上の要件を対応した上で、CGのコンテンツでよく用いられている三角ポリゴンデータに対して曲面再構成を試みるのが考えられる。

参考文献

- [Baj95] Bajaj C. L., Bernardini F., and Xu G., Automatic Reconstruction of Surfaces and Scalar Fields from 3D Scans, Proceedings of SIGGRAPH '95, pp. 109-118 (1995).
- [Bla91] Blacker T. D., and Stephenson M. B., Paving: A New Approach to Automated Quadrilateral Mesh Generation, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 32, pp. 811-847 (1991).
- [Eck96] Eck M., and Hoppe H., Automatic Reconstruction of B-Spline Surfaces of Arbitrary Topological Type, Proceedings of SIGGRAPH '96, pp. 325-334 (1996).
- [Ito00] Itoh T., Yamada A., Furuhashi T., Inoue K., and Shimada K., Rough Quadrilateralization of Triangular Meshes via Belt-like Subregioning for Surface Reconstruction, IBM Japan, TRL Research Report, RT-0354 (2000).
- [Kri96] Krishnamurthy V., and Levoy M., Fitting Smooth Surfaces to Dense Polygon Meshes, Proceedings of SIGGRAPH '96, pp. 313-324 (1996).
- [Yam99a] 山田, 嶋田, 古畑, Hou K., 離散的なバネモデルを用いた滑らかな曲線、曲面生成手法, 情報処理学会グラフィクスとCAD / Visual Computing 合同シンポジウム '99, pp. 43-48 (1999).
- [Yam99b] 山田, 古畑, 伊藤, 嶋田, 離散的なバネモデルを用いた曲線曲面の点群へのあてはめ, 情報処理学会グラフィクスとCAD 研究報告, 99-CG-96, pp. 31-36 (1999).