三角形メッシュによる自由形状モデリング

Free Form Modeling with Triangular Meshes

鈴木 宏正 Hiromasa SUZUKI

Keywords

形状モデリング／三角形メッシュ／自由形状／コンピュータグラフィックス
Geometric Modeling / Triangular Mesh / Free Form / Computer Graphics

1. はじめに

自由形状モデリングという言葉は、「自由な形を、自由にモデリングできる」というような意味で使っている。²⁷⁾ 正確な定義はできないが、本稿で述べる自由形状とは、3次元形状であって、その主要な構成面が平面や円柱面などの単純な解析曲面だけでは表現できないような形状を意味している。例としては、家電品などの意匠形状や、3次元CGキャラクターアニメーションに現れる人物や生物などの形である。

近年特にアニメーションの高品質化や、インターネットの3次元コンテンツの普及にともない、自由形状モデルの作成技術に対する要求が高まり、様々な研究が行われている。このような形状モデルの表現には、いわゆるポリゴンモデルと呼ばれる多面体モデルや、NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) 曲面が用いられるが、近年特に、ポリゴンモデルでも、すべての面が三角形の三角形メッシュモデルに対し興味深い技術が現れている。

三角形メッシュは、CGの分野で最も普及しているデータ形式であり、特徴として、○グラフィックスハードウェアに適している、○グラフィックスライブラリのサポートを受けられる、○曲面モデルや多面体モデルからの変換が容易である、などが挙げられる。また、データ構造がシンプルであるために、○アルゴリズムの自由度が高く、研究者の興味を引いているという点が挙げられよう。

このような技術は、市販のCG作成ソフトウェアの“モデリング”機能として、着々と実装され提供されており、研究から実用へのタイムギャップが短くなっていることも指摘しておこう。一方、このように進歩を遂げているCGソフトウェアを意匠設計に利用し始めているデザイナーも増えている。²¹⁾ 従来のCADやCAID (Computer Aided Industrial Design) システムは、形状モデルを精度のよく作り込んでいくことはできても、形をいろいろと考える発想支援には使いづらかった。また、

図1 三角形メッシュのデータ構造

三角形メッシュは機械デザインには精度が悪くて使えないというのも定説であった。しかし、デザイナーからは、概形でもよいから自在に形状を表現したいという要求が高まっており、それに対して自由形状モデリング技術は、有効であると考えられる。

ここで、準備として、三角形メッシュモデルについて簡単に述べておこう。図1に示すように、三角形メッシュはすべての面が三角形の多面体（三角形面多面体）である。モデルは境界表現の立体と同様に位相要素（頂点、辺、面）が作るグラフ構造で表現する。面の周りの頂点を順に列挙することによって、辺の情報を省略する場合もある。また、頂点は3次元の座標値をもつ。面の法線は3頂点から計算することができる。レンダリングのために頂点における法線を定義する場合もある。なお、興味のある読者はJavaで書いた初心者向けプログラムを公開しているので参考にされたい。²⁸⁾

2. 研究トピックス

本節では、この分野の代表的なトピックスについて概観し、また、参考文献を紹介する。文献の数はかなり多いのであるが、良くまとまっているものとしてACM（米国計算機科学会）SIGGRAPHという国際会議の

コースノート（講習会資料）や、サーベイが充実している文献を中心に紹介したいと思う。

2-1. メッシュ編集 (Mesh Editing)

多面体モデルの変形を行う処理。変形グリッドを用いた FFD (Free Form Deformation) や、多面体間の補間を行う Metamorphosis, あるいは、伸したりひねったりするように変形する Sculpting がある。このような処理は市販ソフトに、「変形ツール」などの名前で実装されている。この分野に関しては、残念ながら体系的にまとまった文献は少ないが、比較的新しいものとしては、文献^{6), 14)}が参考になるだろう。また、三角形メッシュにありがちな凸凹を滑らかにしたり、粗いメッシュを丸めて滑らかにする処理に Smoothing がある。¹⁸⁾

2-2. 簡略化 (Simplification) と多重詳細度 (LOD, Level of Detail)

形状を保存しつつ、面数を減らす処理を簡略化という。この簡略化によって、面数の多いモデルから、少ないモデルまでの詳細度の異なるモデルが得られる。これによって、表示などを高速化するために、視点からの距離などに応じて動的に詳細度を変える手法を LOD という。例えば、Microsoft 社の DirectX に実装されていると言われる Hoppe の PM (Progressive Mesh) がある。⁹⁾ PM では、粗いメッシュと、それを詳細化する操作の列として、メッシュ情報を表現する。ネットワークで転送するような場合は、最初に粗いメッシュだけを送って、概略形状を表示しておき、時間経過とともに、次第にメッシュが詳細化するというようなことができる。

さらに、最近注目を集めているのが、この詳細度の階層を利用してモデル修正を行うもので、大域的な変形は詳細度の低いメッシュで行い、局所的な変形は高いメッシュで行うようにする。これを、Multi-Resolution Editing という。この分野の研究については文献¹⁾によくまとめられている。

2-3. 圧縮と透かし

一方、三角形メッシュで複雑な形状を表現しようとすると、面数が非常に多くなりデータ量が大きくなってしまふ。PM のような表現はデータ圧縮の効果があることも知られているが、メッシュデータ圧縮については、より効率のよい方法が提案されている。²⁾ また、ネットワーク上でメッシュデータを流通させる場合、その著作権が問題となる。画像データなどでは、電子透かし (water marking) を入れる技術が利用されているが、メッシュデータに対しても、いくつかの技術が発表されている。^{5), 20)}

2-4. 曲面復元・フィッティング (Surface Recovery, Surface Fitting)

複雑な形状モデルを生成するための方法として、3次元形状スキャナーによって実体モデルを計測し、その点群データからモデルを生成する方法（曲面復元）が注目されている。主としてコンピュータビジョンの分野で研究が行われてきたが、近年、CG キャラクターのメッシュ生成への応用が注目されており、研究としては、陰関数法⁷⁾や Crust アルゴリズム⁴⁾が優れている。6節で筆者らの方法^{17), 23), 26)}を紹介する。

また、このような方法で得られたメッシュは通常数千から数十万個程度の面数になってしまう。上記の簡略化も重要であるが、メッシュから B スプライン曲面などの曲面パッチを生成することも有用な方法である。メッシュに曲面をはりつけることから、曲面フィッティングと呼ばれることがある。曲面としては、通常 B スプライン曲面などのパラメトリック曲面が使われるが、パッチ境界の定義と、三角形メッシュとパッチの対応付け（パラメタライゼーション）とが重みのないフィッティングのポイントになる。そのために、7節で述べるようなメッシュ整列化 (Remeshing) を行ってからフィットさせることもある。Eck,⁸⁾ Krishnmurthy,¹²⁾ DSI,¹³⁾ などが優れた研究として挙げられよう。拙著²⁵⁾も参考にしてほしい。

2-5. 細分割曲面 (Subdivision Surface)

多面体を細分割してゆき、無限回の細分割の極限として曲面を定義しようとするもの。実際に無限回の細分割は不可能であるが、収束性が良いために、数回の細分割で、かなり滑らかな多面体を生成するのに用いる。細分割曲面は、多面体にパラメトリック曲面のもつ大域的な形状制御性を与えるものと理解することができる。これによって、詳細な多面体を大域的な制御のもとに生成することが可能になり、複雑で高品質な多面体生成手法として大きな注目を集めている。これについては5節で詳しく述べる。文献³⁾にまとめた記述がある。

以下では筆者の研究室で行ってきた研究からいくつか紹介してみたいと思う。

3. メタモルホシス

メタモルホシスは、3次元立体のモーフィングであり、二つのメッシュが与えられた時に、その間を補間し、中間形状を得るものである。図2は、ウサギ (M^1) からトラ (M^2) に変形した例である。¹⁰⁾ この処理は、 M^1 のそれぞれの頂点を M^2 のある位置に写像することに

図2 メタモルホシス

図3 メッシュ間の対応関係

他ならない。つまり、図2に示すように、 M^1 の頂点が、 M^2 上のどの位置に対応するかというメッシュ間の対応を決めてやればよい。それが決まれば、その2点の間を線形補間することによって中間形状を得ることができる。

このような対応付けは、三角形メッシュに大域的なパラメータを導入することによって行える。具体的には、図3の左上に示すように、 M^1 を2次元平面上に展開する。(なお、ここでは簡単のためにメッシュは円盤と同相としている。) この2次元図形 H^1 は、もとの三角形メッシュと同じグラフ構造をしており、頂点の位置が2次元平面上の凸多角形(この例では三角形)内に写像されたものである。このような写像は調和写像という方法によって計算することができる。

このようにすると、 M^1 の頂点の2次元平面上の座標が決まる。一方 M^2 に対しても同様にして H^2 を計算する。そうすると、この両者を重ね合わせることによって、 M^1 の頂点が M^2 のどの三角形面に含まれ、その重心座標がいくつになるかを計算することができるので、それによって、 M^2 の頂点の位置を算出することができる。同じ処理を、 M^2 の頂点に対しても行い、それらの M^1 上の対応位置を求めればよい。

メタモルホシスをメッシュの一部分に適用することで、あるメッシュの一部分を他のメッシュに埋め込むことができる。我々はこれをメッシュフュージョンと呼んでいる。¹¹⁾ 図5は、ヘリコプターの前面に鷲の頭を張り付けたものである。基本的な考え方は同じであるが、接合部を滑らかにするために、接合部において何点かを指定し、その点が一致するように位置、スケール、輪郭の

図4 調和写像によるパラメタライゼーションとその重ね合わせ

図5 メッシュフュージョン

変換を行っている。

4. メッシュドラッグング

メタモルホシスやフュージョンは、大域的にメッシュを変形することができる。一方、メッシュの一部を微妙に修正したいというような要求もある。基本的には頂点の位置を移動すればよい。このような操作を行うのに、最も直感的なのはドラッグングであろう。これをメッシュに応用したのがメッシュドラッグングである¹⁵⁾。図6は、ボトル形状の上についたS形のフィーチャーをドラッグングによって移動、あるいは回転したものである。

これまでも頂点の位置を少しずつ移動することによってメッシュを修正することは行われてきたが、操作が煩雑だったり、三角形が歪んだり、また重なってしまったりするという問題があった。この方法は、三角形の集まった領域であるフィーチャーをまとめて移動することができる。図7に示すように、移動に伴って歪んでしまうフィーチャーと移動しない周辺部との間の三角形を検出し、大きくなりすぎた三角形は分割し、また、小さくなったり歪みが大きくなった三角形は消去する。この処理を適応的リメッシングと呼んでおり、移動とリメッシングとを繰り返すことによってドラッグングを行う。

図6 メッシュドラッグ

図7 動的リメッシング

5. 細分割曲面

細分割曲面 (subdivision surface) の歴史は古く、1978年の Catmull & Clark と Doo & Sabin の論文にまで遡ることができる。細分割曲面とは、多角形をあるルールに従って分割を繰り返してゆくと、その極限において滑らかな曲面に収束するというものである。例えば、図8は三角形メッシュに対して用いられる4対1細分割と呼ばれる分割方法で、各辺を二つずつに分割し、中点を結ぶことによって、一つの三角形を四つに分割してゆくものである。ここで元からあった頂点を偶頂点、分割によって辺に挿入された頂点を奇頂点という。このような分割を繰り返してゆく。

頂点に接続する辺の数を、頂点の価数 (valence) というが、細分割で生成される奇頂点の価数はすべて6となる。また逆に細分割する前のメッシュの頂点の価数は、細分割によっても変わらない。価数が6以外の頂点を異常点 (extraordinary point) というが、細分割を行う前のメッシュの異常点は、細分割後も残ることになる。

さて、辺や面を分割した後に、頂点の座標も修正を行う。つまり、偶頂点の座標を変更し、奇頂点の座標を定義する。図9に示すように、偶頂点の座標は、その頂点の周りの偶頂点の座標と、それ自身の座標との重み付き平均として計算する。また、奇頂点の座標は、奇頂点が接続する細分割前のメッシュの面の偶頂点の座標の重み付き平均で計算する。図9は、その計算に用いる頂点と、それに対する重みを表しており、細分割マスクと呼ばれる。

このように、メッシュを分割する規則と頂点の座標を計算する規則を合わせて細分割スキームという。これに

図8 4対1細分割

図9 細分割マスク

図10 細分割メッシュ

は様々なものがある。例えば Catmull & Clark のスキームは、四角形面のメッシュに対するもので、初期多面体を制御点とする B スプライン曲面に収束することが知られている。ここに示したものは Loop³⁾によるものである。

このように細分割曲面は細分割の極限によって曲面を定義するものであるが、収束が十分に速いので、数回の細分割だけでも、かなり滑らかなメッシュを生成することができる。研究の多くは、この特徴を使って、粗な多面体からメッシュを生成することを目的としている。図10は、我々の提案している細分割スキームで、偶頂点の座標を保持する補間型細分割というタイプである。^{16), 19), 24), 29)} また、場所に応じてマスクを調整することによって角ばった部分を保存したり、また、必要なところだけ細分割する非一様分割なども可能である。

6. 曲面復元

3次元形状スキャナーなどで測定した点群データから曲面 (メッシュ) を生成するのが復元処理である。スキャナーの原理については省略するが、レーザー光を投

図11 測定点群からのメッシュ復元

射し、それをカメラで観測することによって、3次元物体の表面上の点群を比較的短時間で測定することができる。測定点の並び方を仮定してメッシュを生成する方法（構造化法）と、しない方法（非構造化法）がある。非構造化法は、複数方向からのデータの合成が容易であり、測定器の測定原理に対する一般性も高いという特徴がある。

図11は、非構造化データに対する手法を示したものである。ここでは、測定点群を直接に使ってメッシュを生成するのではなく、まず、点群を3次元のボクセル空間に配置することから始める。その点群を測定したときのレーザー光源の位置が分かっているので、光源から点群までは空領域であると言える。そこで、測定点を含むボクセルから、光源の位置までのボクセルに空のラベルをつける。さらに測定点を含むボクセルは、物体表面にあるので、境界というラベルをつけ、さらにボクセルの中心に対しては、点群の平均平面からの距離を計算しておく。通常、測定は、物体の全周をカバーするために複数の方向から行われるので、それぞれの方向からの測定に対して、このようなボクセルデータを生成し、それらを合成することによって、境界ボクセルとその中心における測定データからの距離が計算される。このようにして、空間格子上に距離値が計算され、それをポテンシャル値とする場が定義される。マーチングキューブ法という手法によって、このポテンシャル場のゼロ曲面に相当するメッシュを生成する。

図12 測定点群と復元メッシュ

図13 メッシュ復元の例

上記のプロセスは、データのノイズに強い、測定データが得られないような部分があっても、穴を埋め合わせられるなどの特徴がある。図12に点群と、生成したメッシュと、さらにそれを簡略化したメッシュの例を示す。また、図13はいくつかの生成例を示す。

7. リメッシング

前節の曲面復元は、デザイナーが粘土などで模型を作り、それを測ることによってメッシュモデルを生成することができるという強力な方法である。しかし、その一方、メッシュが自動的な処理で生成されるので、生成されたメッシュは必ずしもレンダリングなどの処理に適したものになっていないことが多い。例えば、顔のアニメーションなどで、メッシュの面数の制限がある場合には、よく動く唇や目の付近のメッシュを細かくし、額などを少なくする必要がある。また、表示の質を向上させるために、面の方向を揃えたり、指定されたメッシュの切り方にする必要がある。また、前述のように、曲面をフィッティングする際には、頂点が格子状に並んでいた方が都合がよい。

このように、メッシュの形を保存したまま、メッシュの並び方のパターンを変えることをリメッシングという。図14は、その例を示したものである。²²⁾リメッシングを行うには、3節で示したように、メッシュのパラメタライゼーションを行う必要がある。前述の調和関数による

図14 リメッシングの例

方法も考えられるが、ここでは様々な拘束条件を付加できる方法として、DSI (Discrete Smooth Interpolation)¹³⁾という方法を使っている。また、Krishnamurthy¹²⁾は、スプリングメッシュという方法を提案し、格子状のリメッシングとそれに基づくBスプライン曲面フィッティングを行っている。なお、図14に示すように、リメッシングによってメッシュの詳細度も変化させることができる。

8. まとめ

自由形状モデリングに関して、メッシュ関連の研究を中心に紹介した。前半では研究の現状を網羅的に紹介することはできなかったが、最新の代表的な研究成果は、ACMやIEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 米国電気電子学会)を中心とした米国系の学会やジャーナルに集中して発表されるので、興味のある方は参考文献に示したような資料を手始めとして調査されるとよい。

また、後半では筆者らのグループが進めている研究について紹介させていただいた。正直に言って、三角形メッシュ関係で、これだけのテーマが残されているとは思っても見なかった。これも、インターネットやマルチメディアでの3次元空間情報に対する要求が高まっているからであり、従来の狭い意味でのCADやCGの枠を大きく超えて発展しようとしている。本稿が、特に若い研究者の動機付けとなり、より多くの研究者がこの分野に興味をもってもらえれば幸いである。

参考文献

- 1) Multiresolution Surface Modeling, ACM SIGGRAPH '97 Course Note 25, (1997).
- 2) 3 D Geometry Compression, ACM SIGGRAPH '98 Course Note 21, (1998).
- 3) Subdivision for Modeling and Animation, ACM SIGGRAPH '98 Course Note 36, (1998).
- 4) N. Amenta, M. Bern, and M. Kamvysselis : A New Voronoi-Based Surface Reconstruction Algorithm, Proc. ACM SIGGRAPH '98, pp. 415-422 (1998)
- 5) O. Benedens : Geometry based Watermarking of 3 D Models, IEEE CG & A, Vol. 19, No. 1, pp. 46-55 (1999)
- 6) J. R. Bill et al. Sculpting Polygonal Models using Virtual Tools. Proc. Graphics Interface '95, pp. 272-279, (1995).
- 7) B. Curless and M. Levoy : A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images, Proc. ACM SIGGRAPH '96, pp. 303-312, ACM Press (1996).
- 8) M. Eck and H. Hoppe : Automatic Reconstruction of B-Spline Surfaces of Arbitrary Topological Types, Proc. ACM SIGGRAPH '96, pp. 325-334 (1996)
- 9) H. Hoppe : Progressive Meshes, Proc. ACM SIGGRAPH '96, pp. 99-108, (1996).
- 10) T. Kanai et al. : 3 D Geometric Metamorphosis based on Harmonic Map, The Visual Computer, 14-4, pp. 166-176 (1998) <http://www.riken.go.jp/lab-www/mat-fab/personal/kanai/Gmorph.html>
- 11) T. Kanai, H. Suzuki, J. Mitani and F. Kimura, Interactive Mesh Fusion Based on Local 3 D Metamorphosis, to appear in Graphics Interface '99, (1999)
- 12) V. Krishnamurthy and M. Levoy : Fitting Smooth Surface to Dense Polygon Meshes, Proc. ACM SIGGRAPH '96, pp. 313-324 (1996)
- 13) B. Lévy and J. L. Mallet : Non-Distorted Texture Mapping for Sheared Triangle Meshes, Proc. ACM SIGGRAPH '98, pp.343-352 (1998)
- 14) R. MacCracken and K. I. Joy : Free-Form Deformations with Lattice of Arbitrary Topology, Proc. ACM SIGGRAPH '96, pp. 181-188 (1996)
- 15) H. Suzuki et al. : Interactive Mesh Dragging with Adaptive Remeshing Technique, Proc. Pacific Graphics '98, IEEE CS Press, pp. 188-197 (1998).
- 16) H. Suzuki, T. Yamamoto, T. Kanai and F. Kimura, Subdivision-based Mesh Refinement for Rapid Prototyping, 6 th IFIP TC 5 / WG 5. 2 Int. Workshop on Geometric Modelling, Fundamentals and Applications, pp. 255-266, (1998).
- 17) H. Suzuki, T. Kanai, Y. Kandori, K. Toki, M.

- Terasawa and F. Kimura, Triangular Mesh Modeling for Archaeological Applications, M. J. Pratt, R. D. Sriram and M. J. Wozny eds, Product Modelling for Computer Integrated Design and Manufacture, Chapman & Hall, pp. 82-93, (1997)
- 18) G. Taubin : A Signal Processing Approach to Fair Surface Design, Proc. ACM SIGGRAPH '95, pp. 351-358, (1995).
 - 19) W. Welch and A. Witkin : Free-Form Shape Design Using Triangulated Surfaces, Proc. ACM SIGGRAPH '94, pp. 247-256, (1994)
 - 20) B. L. Yeo and M. M. Yeung : Watermarking 3 D Objects for Verification, IEEE CG & A, Vol. 19, No.1, pp. 36-45 (1999)
 - 21) 伊丹：発想支援のための3次元ツール活用のおすすめ，日経CG，1998年12月号，pp.147-151（1998）
 - 22) 河野他：形状特徴を考慮した三角形メッシュの再構成 1999年度精密工学会春季大会（発表予定），（1999）
 - 23) 神鳥他：測定点群からの三角形メッシュ生成（第2報）－初期メッシュの改良法－精密工学会誌，Vol.64, No. 10, pp. 1471-1476 (1998)
 - 24) 鈴木他：Welch / Witkin の薄板曲面近似を用いた三角形メッシュモデリング，精密工学会誌，Vol. 63, No.1, pp. 45-49 (1997)
 - 25) 鈴木：CGにおける形状再構成技術，日本設計工学会誌，Vol. 32, No. 10, pp. 392-400 (1997)
 - 26) 鈴木他：測定点群からの三角形メッシュ生成（第1報），空領域削除法と陰関数再構成法による初期メッシュ生成，精密工学会誌，Vol. 64, No. 9, pp. 1314-1319 (1998)
 - 27) 鈴木：自由形状モデリング，1998年度精密工学会秋季大会学術講演論文集，p. 89 (1998)
 - 28) 三谷：Java で3D表示しよう．<http://www.cim.pe.u-tokyo.ac.jp/~mitani/Java/java3d/index.html>
 - 29) 山本他：三角形メッシュモデル細分割手法の拡張と評価，精密工学会誌，Vol. 65, No. 3, pp. 386-390 (1999)

●1999年2月15日受付

すずき ひろまさ

1957年生まれ。1986年東京大学大学院博士課程修了・工学博士。1987年東京大学助手（教養学部情報・図形科学教室），1988年東京大学講師（同）1990年東京大学助教授（同），1994年東京大学助教授（精密機械工学専攻），現在に至る。形状モデリング，CAD / CAM システムの研究に従事。

受賞：(社)精密工学会論文賞（1982年3月，1987年3月），(社)精密工学会学会賞（1994年3月）。