デジタルスタイルデザインのための 形状変形*

Shape Deformation Techniques for Digital Style Design

小林一也**

Kazuya G. KOBAYASHI

Key words

FFD (Free-Form Deformation), Laplacian mesh processing, physically based model, tensegric modeling, fusion operation

1. はじめに

本稿では、デジタルスタイルデザインにおける形状変形を支援する技術について、主なものについて述べる。その上で、モデリングシステムとして望まれる機能について考察する。なお、ここに挙げる事例は、ごく一部のものであり、網羅的ではないことに注意されたい。

機械系の3次元CADシステムでは、もっぱら境界表現のソリッドモデルが用いられており、面の幾何はNURBSなどの曲面式で表現され、加工情報の作成や強度評価のモデル生成に用いることができる。データ交換の国際規格STEP¹⁾²⁾は、製品モデルの形状を中立的な形式で表現でき、多くの製造現場で活用されている。このことから、曲面式を幾何にもつソリッドモデルは製品の最終形状の表現としては十分であるといえる。

しかしながら、デザインの変更がダイナミックかつ頻繁に生じるような意匠デザインにおいては、必ずしも使い勝手が良いとはいえない。例えば、複数のトリム曲面を接平面連続でつないで、なめらかな形状を表している場合を考えると、曲面の連続性を保ったまま自由に變形することは非常に困難である。一方、3次元デジタル化の普及により、実物から形状データを作成することが容易になった。実物の表面をサンプリングして得た点群データをもとに、微小三角形の集合で形状を表すメッシュモデルがよく用いられる。メッシュモデルでは、頂点の幾何で稜線・面の幾何を表すため、複数の頂点の位置座標を適切に変更することで變形操作を実現する。面の数(ポリゴン数)が多いほ

ど形状は曲面に近づくが、一般的なPC環境では百万ポリゴンほどのモデルが限界である。この他に、ソリッドモデルからメッシュモデルを生成することもできる。

すなわちデジタルスタイルデザインでは、メッシュモデル、それも三角形が規則的に並んでいないようなメッシュを主な變形対象とすることが現実的と考えられる。実際のデザインでは、變形の前後でメッシュデータを整える形状処理が必要である。その内の幾つかは実用システムで使われており、例えば、三角形が欠落・干渉しているメッシュの修正、微小な起伏を取り除く平滑化、ポリゴン数を減らしてデータを小さくするメッシュ削減、三角形の密度・縦横比・価数を制御するリメッシュ、メッシュを近似する曲面の生成、などがあるが、本稿では割愛する。

2. なめらかな變形

Barr³⁾は、局所的な變形や大域的な變形として、曲げ・ねじり・引っ張りなどを提案した。メッシュモデルを粘土とすると、手でこねて造形する作業がイメージできる。

図1に、メッシュモデルの「馬」の變形例を示す。左図の馬の首や脚を曲げたものが右図である。首全体の變形は大きいですが、首筋の起伏の特徴は損なわれておらず、變形していない胴体や頭部とも「なめらか」につながっている。この「なめらかさ」は、變形前の特徴を保ったまま、

図1 メッシュモデルの變形の例

*原稿受付 平成19年10月4日

**正会員 富山県立大学工学部機械システム工学科 (富山県射水市黒河 5180)

小林一也

1989年東京大学大学院精密機械工学専攻修了、工学博士。1990年より富山県立大学。主な専門は、形状処理と生産システム。STEP(製品モデルデータの交換標準)の形状表現の分冊(ISO10303-42)の審議・JIS化に関わる。

図2 FFDによる変形の原理

隣り合う微小三角形間に極端な折れ曲がりがないことを指す。すなわち、メッシュ上の各頂点について、その周辺の頂点を含む近似曲面⁴⁾を考えると、頂点における法線と曲率が計算でき、隣接する頂点間で法線・曲率の変化が小さいことをいう。

このような変形をするには、多数のメッシュ頂点を適切な方法でまとめて動かす必要がある。また、ユーザがどの程度の入力操作で実行できるかも重要である。すなわち、変形の範囲・変形の方法・残すべき特徴を指定し、直感的に理解できるロケータ操作（マウスなど）で、十分早い応答速度で結果が提示されることである。

2.1 多重解像度表現⁵⁾の利用

十分に細かいメッシュモデルを、稜線を取り除く操作（Edge Collapse）で面数を削減していくと、細かい高解像度のモデルから粗い低解像度のモデルへの系列ができる。操作履歴を用いることでデータ量が圧縮でき、短時間で任意の解像度を復元できる。このとき、適当な粗さのモデルでメッシュを変形してから細かいモデルを復元すれば、粗さに応じた変形範囲をもつ操作が可能となる。しかし、変形範囲を限定したり、応答の良い直感的な操作の実現は難しいと考えられる。また、ユーザの変形意図に適した低解像度メッシュが得られるとは限らないこともある。

2.2 スケルトン⁶⁾による操作

線分や四角形といった、代表的な形状をメッシュモデルとはほぼ同じ位置に重ねて配置し、それらを形状の「骨格」である操作ハンドルとして変形を制御する。変形の具体的な計算は、次に述べる FFD などを利用する。メッシュ形状から骨格を自動的に作る場合は、必ずしもユーザの使いやすいハンドルになるとは限らない。

2.3 FFD⁷⁾（自由形状変形, Free-Form Deformation）

図2に示すように、変形対象のメッシュモデルを完全に含む格子を用意し、その格子を歪めることで変形操作を行う。変形前の格子が立方体と同相とするならば、格子がちょうどベジエ立体（Bezier volume）となるように制御点を生成する。（ベジエ立体とは、ベジエ曲面を積み重ねたような幾何要素であり、縦・横・高さ方向に立体的に配置した制御点により空間中の体積を表現する。）次に、メッシュの各頂点について、3次元座標値からベジエ立体のパラメータ値を計算しておく。変形後の格子から制御点の配置を定め、先のパラメータ値を与えることで、各頂点の新たな座標値が求められる。ユーザが格子をうまく扱うの

(a) 計算の過程

(b) 変形後の頂点位置の計算

図3 t-FFDによる自由形状変形

は難しいので、スケルトンなどの操作ハンドルが必要となる。格子の粗さによって、変形の局所性が異なってくる。また、格子の境界を横切る方向でのなめらかさは、ベジエ立体の次数や内部制御点の配置方法により変化する。一方、実装の容易さから、3次元CGアニメのキャラクターデザインなどで、広く用いられている。

数多くの FFD の改良版が考案されており、平行六面体に限らない格子や、ベジエ立体以外の関数の利用⁸⁾、格子の代わりに任意位相の三角形集合を操作ハンドルとする t-FFD⁹⁾ などがある。t-FFD の処理を図3(a)に示す。B が制御ポリゴン、M が変形対象のメッシュで、B'、M' が変形後である。B の各三角形には影響範囲があり、(1) 範囲内のメッシュ頂点を各三角形の局所座標でパラメータ化し、三角形からの距離に応じた重みを影響関数（距離で単調減少）で計算する。(2) 変形後の B' の各三角形の局所座標で、パラメータからメッシュ頂点を再生し、(3) 重みによる加重平均で変形後の頂点位置を求める（図3(b)）。従来の FFD と異なり、制御ポリゴンはメッシュを完全に含んでいなくてもよいので、様々な変形ハンドルが設定できる。

2.4 ラプラシアン変形¹⁰⁾

この手法は、メッシュの頂点間や三角形間の連続性を表すラプラシアンを、誤差最小となるように、変形後の各頂点の位置座標を未知数として解く手法である。操作ハンドルを必要とせず、線形近似により高速で解けることから、近年、様々な試みがなされている。Masuda ら¹¹⁾は、頂点の重み付けを工夫することで、メッシュ上に設定した変形

図4 ラプラシアン変形の例^{*1}

図5 プレストレス構造体のテンセグリティ変形

領域について、なめらかで形状特徴を保持した実時間の操作を実現している。変形領域が回転を含む場合でも、自然な変形ができる（図4）。

ラプラシアンは、頂点周辺が二多様体接続のときに定義できるので、ノイズや穴開き箇所の多いメッシュでは、なめらかな変形が困難な場合もある。

3. 力学変形シミュレーション

3次元形状の様々な変形操作を行うのに、より少ない入力力で実現したい、という相反する要求がある。そこで、実世界と同じように、力学的な変形をシミュレートできれば、直感的な操作法になると考えられる。すなわち、材質と境界条件を与え、支配方程式を有限要素法などで解くことで変形後の形状が得られる。デジタルスタイルデザインを支援するには、大きな変形量でも安定して解ける必要があり、実世界ではありえないような物性定数の材質を仮定するか、解法の厳密さを犠牲にして安定して解が求まるモデルを採用する必要がある。

3.1 有限要素法の高速解法¹²⁾

剛性マトリクスの方非線形方程式を線形近似することで、高速に変形結果を得る手法である。動的に変形領域の大きさを切り替えることで、局所的な変形にも対応できる。体積を一定に保持する制約下では、大きい変形量では歪みが生じる。

3.2 バネ-質点系モデル¹³⁾

変形対象をバネと質点の格子構造でモデル化し、拘束条件に対し、各質点のつり合いの位置を方程式解法や繰り返しの計算で求める。実装は比較的容易であるが、局所的な変形の実現や振動の制御に工夫が求められる。

3.3 テンセグリティ・モデリング

剛体棒・弾性紐・ジョイントからなるテンセグリティ

図6 補正下着による人体胸部の変形例

（Tensegrity）構造¹⁴⁾を、力学モデルに用いて、t-FFDと組み合わせた手法。図5に、テンセグリティの一種であるプレストレス構造体の変形を示す。両端と中間のジョイント（丸印）を拘束し、ジョイント間を接続する剛体棒（太線）が弾性紐（細線）でつり合いの位置となるように、繰り返し計算で解いている。この構造を、任意位相の三角形メッシュ上に配置し、t-FFDの制御ポリゴンとすることで、擬似的な力学変形が可能となる。

その応用として、図6に示すような、補正下着による人体形状の変形シミュレーションを実現した¹⁵⁾。図の左Mはデジタイザにより取得した人体形状、Bは人体の特徴点（腋下、乳頭、ウエストなど）に合わせてサイズを整えた制御ポリゴンである。Bの内側にテンセグリティ構造を生成し、大きな変形が起きない部分（背中、肩、腋など）を固定する。図の右側は3種類の異なったタイプの下着で補正を行った際に予想される胸部の変形結果である。下着は線状の拘束で表現し、一定以上の長さになると、テンセグリティ構造を締め付けるように作用する。このとき、制御ポリゴンが囲む体積を一定にするように、テンセグリティ構造のジョイントに外力を発生している。これは、オーダーメイドの補正下着を販売している北陸エステアール協同組合^{*2}と筆者らとの共同研究であり、将来は、店頭での受注時に補正結果を顧客に提示することを目指している。

4. メッシュの合成・接合

単一のモデルを対象としたものではなく、複数のメッシュを合成したり、切り離してつないだりする操作も有用であろう。メッシュどうしが滑らかに接合するには、和などのブーリアン集合演算では不十分である。

4.1 メッシュ間融合演算¹⁶⁾

二つのメッシュ間の中間形状を作り出す操作で、混ぜ合わせの比率を任意に選べる。形状特徴間の対応関係を指定することで、自然なモーフィングが可能となっている。また、メッシュ間のなめらかな接合にも応用できる。

4.2 テンセグリティ構造の分離・接合¹⁷⁾

*1 東京大学大学院 工学系研究科 環境海洋工学専攻・増田宏様よりご提供

*2 <http://www.str.or.jp/> 人体形状データは金谷誠様よりご提供

図7 テンセグリティ構造の接合による変形

テンセグリティ構造を内側に生成したメッシュを用意し、稜線に沿ってメッシュの一部をテンセグリティ構造ごと切り取る。同様のモデルをもう一つ用意し、切り口に沿って接合し、つり合いの状態を求めると、接合部付近がなめらかに変化する形状が得られる（図7）。

5. ま と め

以上、デジタルスタイルデザインにおいて形状変形を支援する技術について概観した。これらの技術は、CGアニメーションの分野で取り入れられているものもあるが、すべてが実用に供しているわけではない。様々な変形手法を容易に実装できるソフトウェア環境があれば、実際のデザイン現場で試みに使うことができ、実用化へ向けたフィードバックともなる。そのような基盤的かつ実用的なデジタルスタイル・モデリングシステムの開発が望まれる。

参 考 文 献

- 1) 木村文彦, 小島俊雄: 製品モデル表現とその利用技術—STEP, 日本規格協会, (1995).
- 2) M.J. Pratt: Introduction to ISO 10303—the STEP Standard for Product Data Exchange, ASME J. of Computing & Information Science in Engr., (2001).
- 3) A.H. Barr: Global and Local Deformations of Solid Primitives, SIGGRAPH' 84, (1984) 21.
- 4) W. Welch and A. Witkin: Free-Form Shape Design Using Triangulated Surfaces, SIGGRAPH' 94, (1994) 247.
- 5) M. Eck, T. DeRose, T. Duchamp, H. Hoppe, M. Lounsbery and W. Stuetzle: Multiresolution Analysis of Arbitrary Meshes, SIGGRAPH' 95, (1995) 173.
- 6) D.W. Storti, G.M. Turkiyyah, M.A. Ganter, C.T. Lim and D.M. Stal: Skeleton-Based Modeling Operations on Solid, 4th Sympo. on Solid Modeling & Appl., (1997) 141.
- 7) T. Sederberg and S. Parry: Free-Form Deformation of Solid Geometric Models, Computer Graphics, **20**, 4 (1986) 151.
- 8) 吉田典正, 加納顕也, 北嶋克寛: ガウス関数に基づく Free-Form Deformation, 精密工学会誌, **65**, 7 (1999) 971.
- 9) K.G. Kobayashi and K. Ootsubo: t-FFD: Free-Form Deformation by Using Triangular Mesh, 8th Sympo. on Solid Modeling & Appl., (2003) 226.
- 10) O. Sorkine: Laplacian Mesh Processing, Eurographics 2005, (2005) 53.
- 11) H. Masuda, Y. Yoshioka and Y. Furukawa: Preserving Form Features in Interactive Mesh Deformation, Computer-Aided Design, **39**, 5 (2007) 361.
- 12) S. Capell, S. Green, B. Curless, T. Duchamp and Z. Popovic: Interactive Skeleton-Driven Dynamic Deformations, SIGGRAPH' 02, (2002) 586.
- 13) M. Desbrun, P. Schroeder and A. Barr: Interactive Animation of Structured Deformable Objects, Graphics Interface' 99, (1999) 1.
- 14) D.E. Ingber: The Architecture of Life, Scientific American, **278** (1997) 48.
- 15) K.G. Kobayashi, T. Ichizawa and K. Ootsubo: Tensegric-Modeling-Based Soft Tissue Deformation for Shaping-Undergarments, Computer-Aided Design & Appl., **3**, 1-4 (2006) 359.
- 16) 金井崇, 鈴木宏正, 三谷純, 木村文彦: 局所的3次元モーフィングに基づく3角形メッシュの融合演算, 情報処理学会論文誌, **41**, 3 (2000) 541.
- 17) 大坪克俊, 小林一也: TGMによるバーチャルクレイモデリング (第2報) —t-FFDの適用—, 2007年度精密工学会春季大会学術講演論文集, (2007) 51.