

意匠曲面のインタラクティブな変形操作とその評価

東京大学 ○小川健太, 増田宏

Interactive Mesh Deformation and Its Application to Industrial Design

○The University of Tokyo, Kenta Ogawa, Hiroshi Masuda

Recently, mesh deformation techniques have been intensively studied. Such methods are useful for supporting style design, in which geometric shapes are often modified and evaluated. However, very few papers discuss the quality of deformed surfaces so far, although surface quality is essentially important in industrial design. In our research, we investigate how mesh quality, including mesh sizes and aspect ratios, is related to surface quality and then we discuss problems to be solved.

1. 目的

製品開発の初期では詳細な3Dモデルが作成されないため、製品企画や概念設計段階で3Dモデルベースの検討を行うことは容易ではない。特に、意匠デザインにおいては、意匠とエンジニアリング双方の要求を擦り合わせるための試行錯誤を行うが、そうした調整には3Dモデルが十分活用できていないのが実情である。

そうした支援においては、既存モデルを簡単に改変できるメッシュモデル編集機能が有用であると思われる。メッシュモデルは、パラメトリック曲面のような正確さはないが、インタラクティブな変形が実現しやすいため、従来の方法では実現が困難だった分野を補完する意味で有用である。メッシュモデル編集技術としては、カットアンドペースト編集[1]とデフォーメーション技術[2]が研究されてきた。我々は、工学的な要求を満たすデフォーメーション手法として、厳密制約とフィーチャ制約を導入した手法を提案している。本稿では、デフォーメーションによって意匠設計を支援することを想定して曲面品質の評価と問題点の検討を行う。

2. デフォーメーション手法の概要

メッシュモデルにおいて、形状の詳細部を保持した形状編集手法が盛んに研究されている[3]。これらの手法では、メッシュの各頂点で、離散ラプラシアンを用いて平均曲率法線を算出する。

$$\kappa_i \mathbf{n}_i = \frac{1}{4A_i} \sum_{j \in N(i)} (\cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij}) (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) \quad (1)$$

ここで κ_i は平均曲率、 \mathbf{n}_i は法線ベクトル、 A_i はボロノイ面積である。特定頂点の位置を境界条件とし、変形の前で平均曲率をできるだけ保持するように最小二乗法によって頂点座標を決める。

ただし、意匠曲面は、自由曲面と形状特徴の組合せによって定義される。形状特徴とは、穴やリブ、意匠的な特徴稜線など、幾何と寸法で規定される部分形状である。そのため、意匠部品の変形では、寸法制約や形状特徴制約はできるだけ厳密に満たし、自由曲面部については元の曲率をできる限り保存することが求められる。

そこで、我々は制約を一律に最小二乗法で扱うことはせず、緩い制約式 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ と厳密制約式 $\mathbf{Cx} = \mathbf{d}$ に分けて考えた。厳密制約としては、以下に示す制約が与えられる。これらの線形式を行列 $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{M \times N}$ ($M \ll N$)を用いて $\mathbf{Cx} = \mathbf{d}$ とする。なお、式(2)、(3)において、 \mathbf{u} 、 \mathbf{v} は、ユーザ操作に応じてインタラクティブに変更される。

[位置制約] 3Dモデル上の一点が特定の座標に拘束される。一般には、三角形の頂点を \mathbf{p}_i 、 \mathbf{p}_j 、 \mathbf{p}_k とすると、三角形内部の一点の位置制約は以下の線形式となる。

$$\alpha \mathbf{p}_i + \beta \mathbf{p}_j + \gamma \mathbf{p}_k = \mathbf{u} \quad (\alpha + \beta + \gamma = 1) \quad (2)$$

[形状特徴制約] メッシュモデルの特定領域の形状を保持する。形状特徴領域のエッジの集合を Λ とすると、以下の線形式になる。

$$\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j = \mathbf{v} \quad ((i, j) \in \Lambda) \quad (3)$$

厳密制約を正確に満たし、緩い制約を最小二乗の意味で満たす解はLagrange未定数法を用いて以下の式で算出できる。ここで、未知数は $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 、 λ は未定数である。 $\{y_i\}$ 、 $\{z_i\}$ も同じ線形システムで算出できるため、ここでは \mathbf{x} についてだけ示す。

$$\min_{\mathbf{x}} \left(\frac{1}{2} \|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|^2 + \lambda^T (\mathbf{Cx} - \mathbf{d}) \right) \quad (4)$$

ここで、式(4)を \mathbf{x} と λ で偏微分し整理すると以下ようになる。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A}'\mathbf{A} & \mathbf{C}' \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}'\mathbf{b} \\ \mathbf{d} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式(5)を $\mathbf{M}\mathbf{x} = \mathbf{d}$ と書くと、 \mathbf{M} は、対称行列であるが正定値ではない。そこで、我々は、疎行列ソルバであるSuperLUを用いた。Fig. 1に式(5)のLU分解に要する時間を、緩い制約のみをCholesky分解ソルバTAUCSを用いて解く従来手法と比較して示す。我々の実験では、3~10万頂点程度であれば、厳密制約を導入しても、行列の分解が実用的な時間でできた。

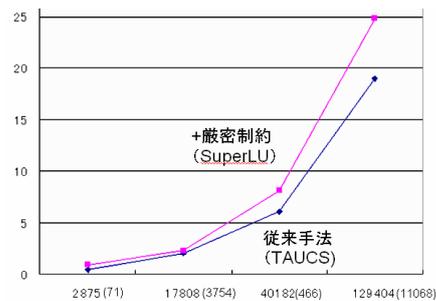


Fig. 1. 厳密制約を含む行列のLU分解。縦軸は計算時間(秒)、横軸は制約数(括弧内は厳密制約数)。

3. 曲面品質の評価

3.1. 曲面品質の評価方法

実際の製品における意匠曲面は、曲率分布に関しても高い曲面品質が要求されることが多い。本手法のように離散ラプラシアンを用いる場合、メッシュサイズやメッシュ品質による曲面品質への影響が懸念されるが、こうした評価は、これまでほとんど行われていなかった。そこで、我々は、実際に製品開発で用いられた自動車のバンパー部品を用いて、曲面品質を評価することとした。評価を行うメッシュモデルは、FEM で用いられるメッシュ作成ツールを用いて、パラメトリック曲面を含むサーフェスモデルから作成した。そして、2章で示したメッシュ変形手法を適用して、曲面品質に影響を及ぼす要因を調査した。

3.2. メッシュサイズの影響

メッシュサイズの影響を調べるために、Fig. 2 左に示す3種類のメッシュモデルに同一の変形を与え、バンパーの特徴を表現している等曲率線が保持されるか調べた。その結果、式(1)では、十分細かいメッシュであれば等曲率線はよく再現されているが、分割数が少なくなるに従って、等曲率線が消失していくことがわかった。

これは、式(1)では、各頂点のボロノイ領域での曲率分布を平均化してしまうため、十分小さいメッシュでなければ、曲率変化が大きな部分を再現できないためと考えられる。

一方で、メッシュ分割数が多くなると、前処理時間の増大やインタラクティブ変形の際の座標変換に要する計算時間が増大するという問題が生じる。そこで、我々は、曲率に応じたメッシュサイズにすることで、曲面品質を向上させる一方で、計算時間の増大を抑える方法を用いることとした。ここでは、Fig. 4 のグラフに示す関数を用いて、曲率が大きいほどメッシュサイズが小さくなるようなメッシュ分割を施した。その結果、Fig. 4 のような曲面品質を保った計算効率の良いメッシュモデルを作成することがわかった。

3.3. アスペクト比、底辺角度の影響

メッシュ品質として、アスペクト比、最大角度、最小角度を考え、その曲面品質への影響について調査した。その結果、Fig. 5 に示すように、メッシュ品質が低下した部分では、曲面に凹凸が生じる現象が生じた。この例では、バンパー左正面に縦縞、バンパー右正面に横縞のしわが現れた。この原因は、メッシュが鈍角となった際に、離散平均曲率法線の誤差が大きくなるためと考えられる。本来、式(1)は、歪んだ三角形を cotangent 項によって補正し、ボロノイ面積を用いて周辺頂点における曲率法線のウェイトを調整しているが、鈍角を含むメッシュの場合には、曲率に不連続性が生じてしまう。この問題は、フィレット箇所などで生じやすい。したがって、高品質な曲面を得るためには、鈍角を含まないメッシュを生成するか、鈍角に対応できる変形手法を開発することが必要である。

我々は、鈍角三角形による品質の劣化の主たる要因は、式(1)の cotangent 項によるものであると推測している。現在、より詳細な検討を行っているところである。

4. 結論と今後の展望

本稿では、現実の製品モデルを用いて、離散平均曲率法線を保存するメッシュ変形法の評価を行った。その結果、曲率に関連する曲面品質が初期のメッシュ品質に大きな影響を受けることを示した。また、曲率分布に応じたメッシュ分割によって、曲面品質を向上で

きることがわかった。現時点では、曲面品質向上には適切なメッシュ分割により対応せざるを得ないが、今後は、曲率制約や、離散曲率計算法、自動リメッシュなど、良質な意匠曲面を簡単に得るための手法の検討を行っていく予定である。

なお、本稿で用いたモデルは、三菱自動車工業㈱より提供頂いた。感謝の意を表す。

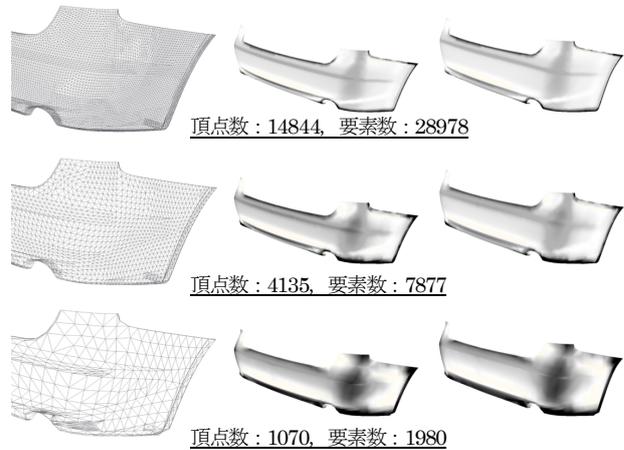


Fig. 2. メッシュサイズの違いによる平均曲率分布の比較 (左:メッシュ, 中:変形前の曲率分布, 右:変形後の曲率分布)

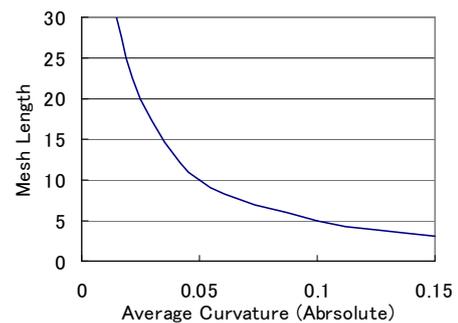


Fig. 3 平均曲率とメッシュサイズの関係グラフ

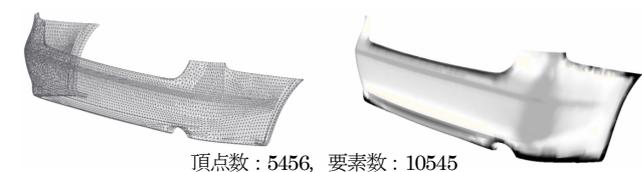


Fig. 4 曲率に従ったメッシュ分割と変形後の平均曲率分布

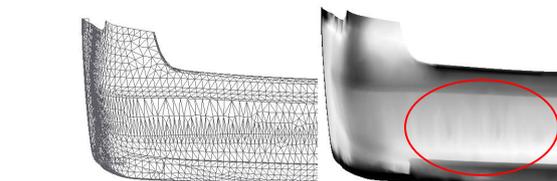


Fig. 5 低品質メッシュと平均曲率分布 (縦縞)

参考文献

1. H. Masuda, Y. Furukawa, Y. Yoshioka, "Volume-based Cut and Paste Editing for Early Design Phases," ASME DETC/CIE, Oct. 2004
2. H. Masuda, Y. Yoshioka, Y. Furukawa, "Preserving Form-Features in Interactive Mesh Deformation," GMP2006, July, 2006
3. O. Sorkine, "Laplacian Mesh Processing," STAR Proceedings of Eurographics, Sep. 2005