

# 視覚的特徴を考慮した3次元モデルの変形手法

本田 浩一郎<sup>†</sup> 増田 宏<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 東京大学大学院情報理工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

<sup>‡</sup> 東京大学大学院工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail: <sup>†</sup> koichiro@ui.is.s.u-tokyo.ac.jp, <sup>‡</sup> masuda@nakl.t.u-tokyo.ac.jp

**あらまし** メッシュ変形技術は3次元メッシュのモデリング手法として非常に有用である。その際、元のモデルの特徴的な形状を保存することが必要となるが、従来、変形時において特徴の指標とされてきた離散平均曲率法線では局所的な形状しか検出することができなかった。本稿では、視覚的な特徴を考慮した指標に採用することによって大域的な変化をも検出し、それをインタラクティブな変形を行える線形フレームワークに最小二乗制約として導入することによって、誰もが手軽で直感的な変形を行うことのできる手法を提案する。

**キーワード** コンピュータグラフィックス, モデリング, デフォメーション, 特徴抽出

## Constrained Laplacian Mesh Deformation with Visual Saliency Analysis

Koichiro HONDA<sup>†</sup> and Hiroshi MASUDA<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

<sup>‡</sup> Graduate School of Engineering, The University of Tokyo 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

E-mail: <sup>†</sup> koichiro@ui.is.s.u-tokyo.ac.jp, <sup>‡</sup> masuda@nakl.t.u-tokyo.ac.jp

**Abstract** Mesh deformation technique becomes increasingly important in 3D modeling, since we can obtain the desired shape easily by deforming existing models. When we deform a model, the details of the shape should be preserved, but traditional approaches called interactive Laplacian deformation, which encode details as discrete mean curvature normals, do not necessarily preserve features and their encoding algorithm does not consider human perception. In this paper, we introduce visual saliency of 3D models to interactive Laplacian framework as a least square constraint to deform a model in more intuitive way.

**Keyword** Computer Graphics, Modeling, Deformation, Visual Saliency

### 1. はじめに

近年の情報処理技術の発展により、様々な分野で3次元モデルが利用されるようになった。それに伴い、使用目的や求められる処理手法には多様化が進み、専門的な知識を持たない個人ユーザも増加している。3次元モデルを製作する過程において、既存モデルを再利用することは手間を省く一つの方法である。再利用時には目的の形状に合わせて元のモデルを変形することが必要であるが、その際、元のモデルの特徴をよく保存しつつ、意図する形状に変形することは非常に重要であるといえる。

しかし、特徴的な形状を保存するためにはいくつかの弊害がある。3次元モデルの特徴とは、物体表面の部分的な凹凸として認知されるが、モデルによって凹凸が複雑に変化していたり、大小の異なる凹凸が組み合わせられていたりするため、ユーザが特徴と認める凹凸を指定することは容易ではない。従来の変形フレ

ームワークで用いられてきた特徴の指標である離散平均曲率法線は、局所的なメッシュ構造からのみ算出される指標であり、比較的大きなスケールの特徴は考慮することは出来ない。

そこで本稿では、人間の視覚の認知モデルに類似したアルゴリズムを採用することによって、大小に関わらず特徴と認める領域を特定し、選択的に変形度合いを変化させることによって、より自然で直感的な変形を実現する。

### 2. 関連研究

コンピュータグラフィックスの分野において、様々な3次元モデルの変形手法と、それに付随する形状の特徴を符号化する手法が盛んに研究されてきた。

3次元モデルの変形手法については大別して、自由形状変形、多重解像度編集、微分表現を用いた変形の3つがある。

自由形状変形[10]は、対称の物体が存在する3次元

空間を変形することで間接的に形状を変形するが、直感的に変形することが難しく、変形に幾何的な制約を与えることも困難である。

多重解像度編集[2][3]では、対象となるメッシュを「幾何的な信号」と見立てて、ベースとなる形状と数段階の詳細形状に分離し、ベースの形状に対して変形を行う手法である。

微分表現を用いた変形[1][7][11][13]では、メッシュの各頂点で計算された離散平均曲率法線をできるだけ保存するように変形を行う。この手法では保存式を線形近似することでマウス動作に追従できる速度での計算が可能となることが知られている。また、この手法では目的関数を最小にする頂点座標を計算するため、頂点間で定義された任意の制約式を目的関数に組み込めるといった利点がある。

特徴を抽出する方法については、対象や応用目的に依存するため汎用的な手法があるわけではないが、特徴領域の抽出するためによく用いられるものにはメッシュセグメンテーション[5]がある。また、特徴を抽出するために視覚的認知の計量モデルを用いた指標を算出する手法もある。この手法では主に2次元画像に対して用いられていたが[4]、3次元モデルに応用されたものにはLeeらの研究[6]がある。本研究ではこの手法をベースに特徴量を算出している。

### 3. 変形手法の概要

本研究では、微分表現を用いたメッシュ変形フレームワークに対し、視覚的特徴を定量する指標を導入することによって、直観的に自然な特徴保存とインタラクティブな動作を兼ね備えたメッシュ変形を実現する。

以下、本章では離散平均曲率法線を保存した、基本となる変形フレームワークについて説明する。

#### 3.1. 基本的なアルゴリズム

本手法では、曲面の平均曲率と法線を掛け合わせた平均曲率法線を保存するように変形を行う。平均曲率法線の定式化は3.2項で述べる。

またその際に、マウスに追従して動くハンドル領域と変形中に形状が変化しない固定領域を制約として与え(3.3項)、さらに視覚的特徴を考慮した相対位置保存制約を与える(3.4項)。各制約には必要に応じて回転量の補間を行う(3.5項)。

以上の制約を1つの線形システムとして記述し、マウス操作に応じて、その都度最小二乗法によって近似的に頂点座標が求まる(3.6項)。

#### 3.2. 離散平均曲率法線の定式化

平均曲率法線は連続面において定義されているものであるが、離散的なメッシュモデル上については、Meyerら[9]によって近似式が提案されており、 $A_i$ を頂

点 $\mathbf{p}_i$ に関するボロノイ面積、 $N(i)$ を頂点 $\mathbf{p}_i$ の1近傍頂点の集合、 $\Lambda$ をメッシュ全体の頂点集合とするとき、頂点 $\mathbf{p}_i$  ( $i \in \Lambda$ )での離散平均曲率法線は式(1)で表すことができる。

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

ここで、 $\delta_i$ は平均曲率 $\kappa_i$ と法線 $\mathbf{n}_i$ の積であり、 $\alpha_{ij}$ と $\beta_{ij}$ は稜線 $(i, j)$ の対角である。変形の前においてこの離散平均曲率法線を保存することで、形状の特徴を適度に保った変形を行うことができる(図1)。なお、 $R_i$ は回転行列であり、マウス操作に応じて適切に離散平均曲率法線を回転する(3.5項にて詳述する)。



図1 Sorkineらの平均曲率法線を用いた変形[11].

#### 3.3. 変形時の位置制約

前項で示した離散平均曲率法線の保存式は、求める頂点の数よりも少ないため解が求まらない。従って何らかの制約式を導入しなければならない。位置制約はユーザが画面上で指定するもので、変形中に変化させない固定点制約とマウスに追従させるハンドル制約があるが、これらの頂点の座標値はいずれも既知である。従って、これを $\mathbf{u}_i$ とおき、位置制約を与える頂点集合を $\Lambda_p$ とおけば、導入する制約式は以下ようになる。

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{u}_i \quad i \in \Lambda_p \quad (2)$$

#### 3.4. 視覚的特徴を考慮した相対位置保存制約

3.2項で述べた離散平均曲率法線を保存することで表面の局所的な凹凸は保存することができるが、大域的な特徴を検出・保存することはできない。本項ではLeeら[6]の提唱した視覚的特徴の計量モデルに基づき、大小様々な特徴を保存する制約を提案する。

##### 3.4.1. 特徴量の算出

各頂点 $i$ における平均曲率を $\kappa_i$ とする。また $i$ からある距離近傍 $\sigma_k$ を考え、 $\sigma_k$ 内に存在する頂点集合を $N(\mathbf{p}_i, \sigma_k)$ とするとき、距離に関する減衰関数 $\theta$ を用いて次のような関数を考える。

$$G(\mathbf{p}_i, \sigma_k) = \frac{\sum_{\mathbf{p}_j \in N(\mathbf{p}_i, \sigma_k)} \kappa_i \theta(\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|^2)}{\sum_{\mathbf{p}_j \in N(\mathbf{p}_i, \sigma_k)} \theta(\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|^2)} \quad (3)$$

本研究では  $\theta$  にガウス関数を用いている. この  $G$  は距離  $\sigma_k$  の近傍までの平均曲率の影響を足し合わせている事になる. そしてこの  $G$  に対して, さらに

$$S_{i,k}(\mathbf{v}_i, \sigma_k) = |G(\mathbf{v}_i, \sigma_k) - G(\mathbf{v}_i, 2\sigma_k)| \quad (4)$$

なる関数  $S_{i,k}$  を考えると, 狭い範囲 ( $\sigma_k$ ) の影響から広い範囲 ( $2\sigma_k$ ) を除去していることになる. すなわち, あるスケール  $\sigma_k$  でみたときの, いわば「大域的な離散平均曲率」の分布が得られることになる. これを様々な距離近傍にわたって算出すれば, 各スケールでの凹凸の激しさを表すことになる.

各スケール  $k$  での  $S_{i,k}$  を全頂点にわたって算出した後, それらの最大値  $M_k$  と平均値  $m_k$  の差の 2 乗  $(M_k - m_k)^2$  をかけて各頂点について  $S_{i,k}$  を足し合わせると, 全てのスケールの影響を考慮した特徴量  $S_i$  が算出できる. すなわち, 最終的な特徴量は

$$S_i = \sum_k S_{i,k} (M_k - m_k)^2 \quad (5)$$

として求められる.

Dragon モデルにおける  $S_i$  の分布を図 2 に示す. 局所的で単調な鱗の凹凸は平均曲率分布では高い値を示しているが特徴量では減衰している. 逆に, 比較的大きな特徴である前足や鬣の部分は高い値を示している.

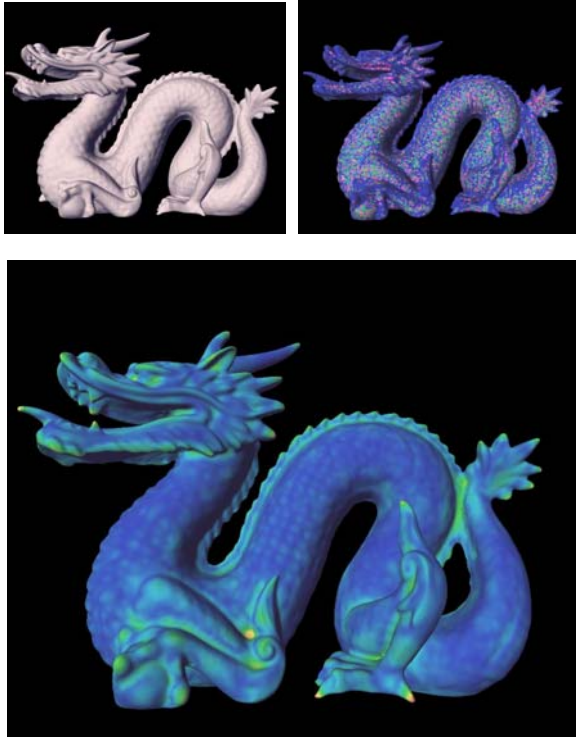


図 2 Dragon の特徴量  $S_i$  の分布. 左上: 元のモデル. 右上: 離散平均曲率の分布. 下: 特徴量分布.

### 3.4.2. 相対位置保存制約としての導入

前項で算出した特徴量  $S_i$  を制約として変形フレームワークに導入することを考える. ここでは頂点間の相対位置を保存する制約として導入を考える. Masuda ら [8] や Yoshioka ら [12] は相対位置を保存する制約を制約付き最小二乗法としてフレームワークに導入することで, 厳密に形状を保存する手法を提案した. 本研究では, 特徴量に応じて形状の保存度合いを変化させるため, 特徴量を重みとした相対位置保存制約を, 他の制約と同等に最小二乗制約として取り扱う. すなわち, 変形前の頂点座標を  $\hat{\mathbf{p}}_i$ , 稜線  $(i, j)$  の集合を  $E_f$  とし,

$$S_i \{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) - \mathbf{R}_i(\hat{\mathbf{p}}_i - \hat{\mathbf{p}}_j)\} = 0 \quad (i, j) \in E_f \quad (6)$$

を最小二乗制約として導入する. なお,  $\mathbf{R}_i$  は回転行列である.

### 3.5. 回転量の補間

平均曲率法線の保存式は, 平均曲率の値が保存できても, 法線をマウス操作に応じて適切にさせなければ自然な変形とはならない. 相対位置の保存制約に関しても同様のことがいえる. 従って, 離散平均曲率法線や相対位置ベクトルに対し, 回転量を保管する行列  $\mathbf{R}_i$  を掛ける必要がある.

$\mathbf{R}_i$  は各頂点での回転軸  $\mathbf{n}_i$  と回転角  $\theta_i$  で一意に定まる. そこで,  $\mathbf{m}_i$  を純四元数,  $\theta_i$  を実数として回転を四元数で表現する. このとき四元数の対数を  $\mathbf{r}_i$  とおき, 以下の式を各頂点に割り当てる.

$$\mathbf{r}_i = \ln(\cos \frac{\theta_i}{2} + \mathbf{m}_i \sin \frac{\theta_i}{2}) = \frac{\theta_i}{2} \mathbf{m}_i \quad (7)$$

各頂点での  $\mathbf{r}_i$  は, 回転量を滑らかに補間するように決める. そのために, 位置制約と相対位置保存制約に対応して, 以下の二つの回転の制約式を設定する.  $\mathbf{c}_j$  はユーザ操作によって指定される回転量である.

$$\begin{cases} \mathbf{r}_j = \mathbf{c}_j & (j \in \Lambda_p) \\ \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j = 0 & ((i, j) \in E_f) \end{cases} \quad (8)$$

### 3.6. 頂点座標の計算

制約式の個数は変数である頂点座標よりも多いので, 最小二乗法を用いて頂点座標を算出する. 以上 3.2 項から 3.5 項で述べた全ての制約式を定式化すると式 (9)(10) のようになる.

はじめに以下の式 (9) を解いて回転行列  $\mathbf{R}_i$  を求め, 式 (10) に代入したのち, 式 (10) を解いて頂点座標を計算する.

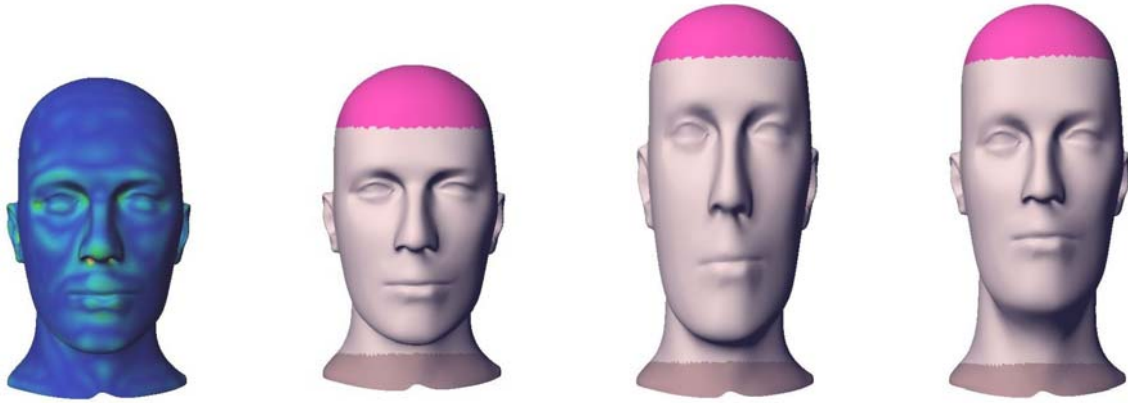


図 3 Man の変形. 左上: 元モデル. 右上: 特徴量分布. 左下: 制約なし. 右下: 本手法.

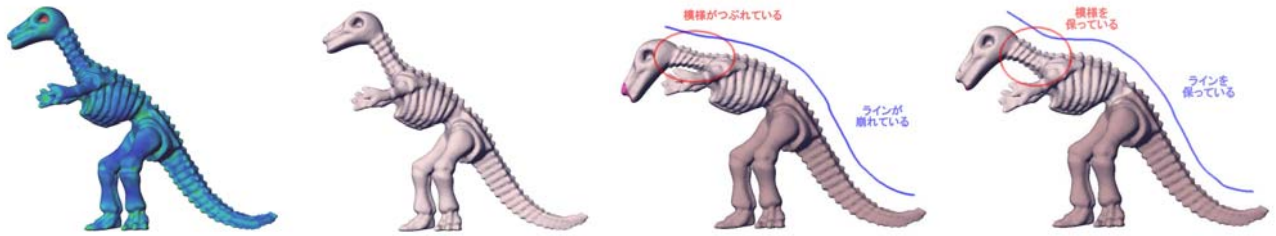


図 4 Dinosaur の変形. 左上: 変形前. 右上: 特徴量分布. 中央: 制約なし. 右: 本手法.

$$\sum_{i \in \Lambda} \|L(\mathbf{r}_i)\|^2 + \omega_u \sum_{j \in \Lambda_p} \|\mathbf{r}_j - \mathbf{c}_j\|^2 + \omega_p \sum_{f \in \Lambda_f} \sum_{(i,j) \in E_f} \|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|^2 \rightarrow \min \quad (9)$$

$$\sum_{i \in \Lambda} \|L(\mathbf{p}_i) - R_i \delta_i\|^2 + \omega_u \sum_{j \in \Lambda_p} \|\mathbf{p}_j - \mathbf{u}_j\|^2 \quad (10)$$

$$+ \omega_p \sum_{f \in \Lambda_f} S_f^2 \sum_{(i,j) \in E_f} \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j - R_i(\hat{\mathbf{p}}_i - \hat{\mathbf{p}}_j)\|^2 \rightarrow \min$$

ここで  $w_u, w_p$  は重みである. また  $\Lambda_f$  は  $E_f$  に属する稜線に接続している頂点の集合である. 式(9) (10) は,  $\mathbf{p}_i$  に関する1つの線形システムとして構成されるため, 行列表現を用いて  $M\mathbf{x} = \mathbf{b}$  と記述すると, 以下の様に表せる.

$$\|M\mathbf{x} - \mathbf{b}\|^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

この解は, 次式の解として得られる.

$$M^T M \mathbf{x} = M^T \mathbf{b} \quad (12)$$

$M^T M$  は正定値対称行列なので, 前処理として Cholesky 分解を施しておけば, ユーザがリアルタイムに変更する  $\mathbf{u}_i, \mathbf{c}_i$  に対して, 式(9) (10)の解を非常に高速に計算できる.

#### 4. 結果と考察

本手法に基づいて既存モデルを変形した例として, 比較的単純な凹凸をもったモデルとして Man モデル (図 3), 複雑な凹凸を持ったモデルとして Dinosaur モデルを取り上げる (図 4).

図 3 の Man の変形では, 特徴量を考慮した制約を加

えない場合, 目や鼻など各パーツがハンドルにつられて伸びてしまっており, 輪郭が変わっているが, 制約を加えた場合には各パーツの形状も保っており, バランスのとれた変形が実現している.

図 4 の Dinosaur においても同様に, 既存手法では肋骨の間隔や背骨のラインがつぶれてしまうところを, 特徴量を考慮した制約を加えることで, それらの特徴がよく保存された変形が実現しており, それによって手の位置も適切な姿勢に移動している.

両モデルともに視覚的に見て特徴と感ずる領域がそのまま保存されているといえる.

本手法における目的の1つに異なるスケールの特徴が混在した場合に, 適切に考慮がなされるか, ということがあげられる. 図 5 に異なる大きさの凹凸を持つモデルに対して, 平均曲率分布と特徴量の分布を示した. 平均曲率分布では, 小さい凹凸しか検出することができていない. これは式(1)からもわかるように, 算出される離散平均曲率の値は1近傍頂点からの影響しか受けなためである. 一方, 特徴量分布では大きな凹凸を検出する事が出来ているが, 小さな凹凸も同時に安定した値を示していることがわかる. これは, 式(5)における非線形の足し合わせの際に,  $S_{i,k}$  の分布にばらつきがあるスケール (即ち特徴が認められるスケール)  $k$  が存在すると, 最終的な特徴量  $S_i$  も比較的高い値を示すためであると思われる.

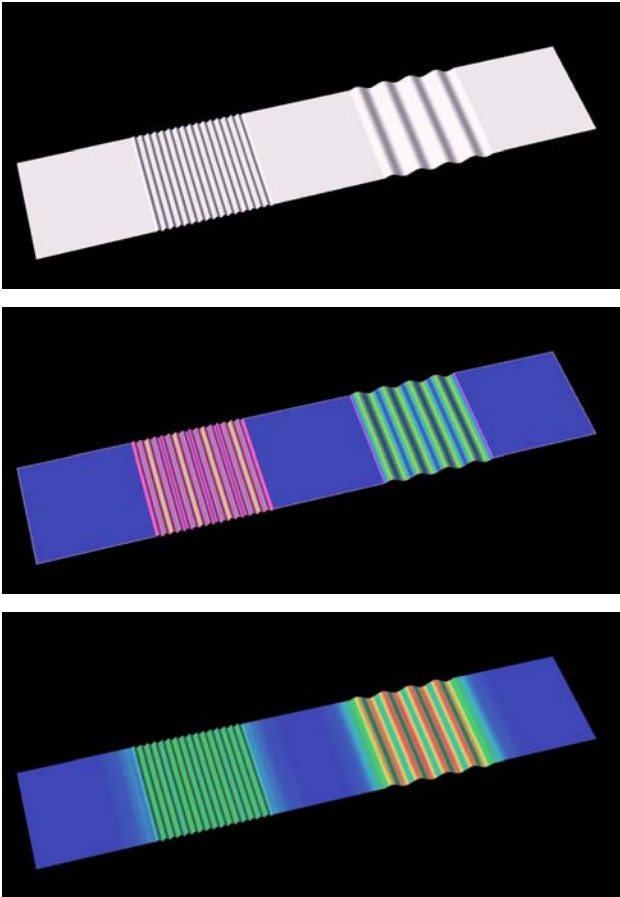


図 6 異なる大きさの凹凸に対する平均曲率と特徴量の分布. 上: 元のモデル. 中央: 平均曲率分布.  
下: 特徴量分布.

## 5. まとめと今後の発展

本稿では, 視覚的な注意に基づいて特徴領域を選択的に保存するインタラクティブな変形を行う手法を提案した. また, 変形のしやすさを制御することによって, 詳細形状をよりよく保存した変形が可能になった.

今後の発展としては, 特徴領域を考慮した平滑化やデフォルメ等への応用, また GPGPU 等による計算を高速化, 大規模モデルへの処理を行えるようにしたい.

## 文 献

- [1] M. Alexa, : “Differential coordinates for local mesh morphing and deformation.” *The Visual Computer*, 19(2):pp.105-114(2003)
- [2] M. Botsch, L. Kobbelt, : “An intuitive framework for real-time freeform modeling.” In *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, ACM Press, pp.630-634(2004)
- [3] M. Botsch, L. Kobbelt, : “A remeshing approach to multiresolution modeling.” In *Symposium on Geometry Processing*, pp.189-196 (2004)
- [4] L. Itti, C. Koch, E. Niebur, : “A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis.” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 20, 11, pp.1254-1259(1999)
- [5] S. Katz, A. Tal, : “Hierarchical mesh decomposition using fuzzy clustering and cuts.” *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH)*, 22(3):pp.954-961(2003)
- [6] C.H. Lee, A. Varshney, D.W. Jacobs, : “Mesh Saliency.” *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH)*, 24(3):pp.659-666(2005)
- [7] Y. Lipman, O. Sorkine, D. Cohen-Or, D. Levin, C. Rössl, H.P. Seidel, : “Differential coordinates for interactive mesh editing.” In *Proceedings of Shape Modeling International*, IEEE Computer Society Press, pp.181-190(2004)
- [8] H. Masuda, Y. Yoshioka, Y. Furukawa, : “Preserving Form-Features in Interactive Mesh Deformation.”, In *Lecture Notes on Computer Science 4077 (Geometric Modeling and Processing)*, pp.207-220(2006)
- [9] M. Meyer, M. Desbrun, P. Schröder, A.H. Barr, : “Discrete differential-geometry operators for triangulated 2-manifolds.” In *Visualization and Mathematics 3*, Hege H.-C., Polthier, K., (Eds.), Springer-Verlag, Heidelberg, pp.35-57(2003)
- [10] T.W. Sederberg, S.R. Parry, : “Free-Form Deformation of Solid Geometric Models.” In *Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, ACM Press, pp.151-160 (1986)
- [11] O. Sorkine, D. Cohen-Or, Y. Lipman, M. Alexa, : “Laplacian Surface Editing.”, In *Proceedings of Eurographics*, pp.175-184(2004)
- [12] Y. Yoshioka, H. Masuda, Y. Furukawa, : “A Constrained Least Squares Approach to Interactive Mesh Deformation.”, *IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications*, pp.153-162(2006)
- [13] Y. Yu, K. Zhou, D. Xu, X. Shi, H. Bao, B. Guo, H.Y. Shum, : “Mesh editing with Poisson-based gradient field manipulation.” In *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH)*, 23(3): pp.644-651(2004)