

形状モーフィングにおける位相変化の制御

爰島 快行[†] 高橋 成雄[‡] 大淵 竜太郎^{*}

kokojima@ail.cs.gunma-u.ac.jp takahashis@acm.org ohbuchi@acm.org

[†] 群馬大学工学部情報工学科

[‡] 群馬大学総合情報処理センター

^{*} 山梨大学工学部コンピュータ・メディア工学科

本報告では、位相の異なる2つの3次元ポリゴンメッシュのモーフィングを行う新しい手法を提案する。本手法では、まず、位相変化のパターンを表すキーフレームを生成し、入力メッシュ間に挟み込む。そして、入力メッシュとキーフレームを4次元四面体メッシュで補間し、その等位面を切り出すことによってモーフィングを抽出する。キーフレームは、入力メッシュそれぞれに同相な2つのメッシュから成り、位相の変化を一意に橋渡しする役割をもつ。本手法の特長は、キーフレームを用いることにより、起こりうる多数の位相変化の中から、ユーザの求めるパターンを明示的に指定できることである。

Controlling Topological Evolution in Shape Morphing

Yoshiyuki Kokojima[†] Shigeo Takahashi[‡] Ryutarou Ohbuchi^{*}

kokojima@ail.cs.gunma-u.ac.jp takahashis@acm.org ohbuchi@acm.org

[†]Department of Computer Science, Gunma University

[‡]Computer Center, Gunma University

^{*}Department of Computer and Media Engineering, Yamanashi University

This report presents a new shape-morphing method that interpolates two 3D polygonal meshes that may differ in surface topology. Our method first generates a keyframe which represents a path of topological evolution in the 3D mesh. The meshes and keyframe are then interpolated by using a 4D tetrahedral mesh, which yields a shape-morphing sequence by extracting a series of isosurfaces. The keyframe consists of two meshes each of which is homeomorphic to one of the two input meshes, and hence can bridge the gap between the two input meshes having different topological types. A major advantage of this shape morphing method is its ability to uniquely and explicitly specify a path of topological evolution among an arbitrary number of possible alternatives by using a set of user-specified keyframes.

1 はじめに

近年の映画やテレビ番組、ゲームなどでは、モーフィングを用いて迫力ある視覚効果がつくりだされている。また、このような娯楽分野だけでなく、メディカルビジュライゼーションなどの医用分野においても、モーフィングの技術が応用されている。

従来のモーフィングの研究は、2次元画像を対象としたものが多かったが、近年では、3次元形状を対象とした様々な論文が発表されてきている。その中でも特に、ポリゴンメッシュ間の対応付けの問題に関しては、数多くの研究が行われている。例えば、Kanaiら[1]やGregoryら[2]は、2つのポリゴンメッシュを球面やディスクに埋め込み、その中でメッシュ

間の対応をとることによってモーフィングを行った。また、Leeら[3]は、2つのポリゴンメッシュを多重解像度表現に変換し、低解像度レベルのメッシュ間で対応付けを行った。しかしこれらの手法では、モーフィングの対象となる2つのポリゴンメッシュの位相¹が等しいことを仮定していた。

位相の異なるポリゴンメッシュ間のモーフィングについては、DeCarloら[4]が、中間形状を用いて位相変化を指定できる手法を提案した。しかし、この手法はある特定の位相変化のパターンしか考慮しておらず、それぞれのパターンに対してアドホックに中間形状を生成している。これに対して、Turkら[5]は、2つのポリゴンメッシュを補間する4次元の

¹曲面の種数を表す

陰関数を求め、その等位面を切り出すことによってモーフィングを行った。この手法は、位相の変化を自動的に生成することができるが、その反面、起こりうる多数の位相変化の中から、ユーザの求めるパターンを明示的に指定することはできない。

そこで本報告では、先に提案した手法 [6, 7] に基づき、位相の異なるポリゴンメッシュ間のモーフィングを行う新しい手法を提案する。本手法では、まず、位相変化のパターンを表すキーフレームを生成し、入力メッシュ間に挟み込む。そして、入力メッシュとキーフレームを4次元四面体メッシュで補間し、その等位面を切り出すことによってモーフィングを抽出する。ここで、キーフレームは、入力メッシュそれぞれに同相な2つのメッシュから成り、位相の変化を一意的に橋渡しする役割をもつ。本手法の特長は、キーフレームを用いることにより、起こりうる多数の位相変化の中から、ユーザの求めるパターンを明示的に指定できることである。

なお、本報告では、モーフィングの対象となるポリゴンメッシュは閉曲面に限定する。また、閉曲面は向き付け可能 (orientable) であり、メビウスの輪やクラインの壺を含まないとする。この仮定の下で考えられるすべての位相変化のパターンを提示し、それを伴うモーフィングを実現することも、本報告の目的のひとつである。

2 位相変化の分類

位相変化のパターンは、ポリゴンメッシュを補間する4次元超曲面上に生じる臨界点の種類に応じて分類できる。ここで、4次元超曲面における臨界点とは、図1のように、時間軸に関する等位面が分裂・併合を起こす点と定義される。3次元曲面の場合は、頂上 (peak)・峠 (pass)・谷底 (pit) の3種類の臨界点が存在するが、4次元超曲面の場合は4種類の臨界点 C_3, C_2, C_1, C_0 が存在する。

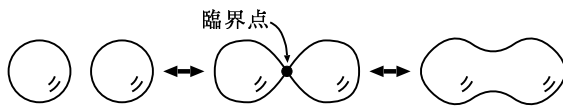


図 1: 臨界点

Fomenko ら [8] によると、これら C_3, C_2, C_1, C_0 の生じる位相変化は、図2のような位相ハンドル H_3, H_2, H_1, H_0 を等位面に付加することによって引き起こすことができる。例えば、位相ハンドル H_3 は、図3のように新しく球面が現れる位相変化を引き起こす。逆に、 H_0 は図4のように既存の球面を

消滅させる。

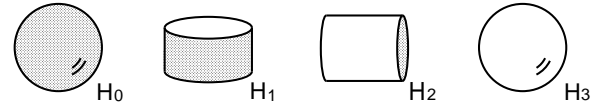


図 2: 位相ハンドル

位相ハンドル H_2 と H_1 の場合は、等位面の3次元空間への埋め込みを考慮に入れると、その振る舞いはかなり複雑になる。Shinagawa ら [9] は、2次元輪郭線の位相変化を記述する際に、木 (tree) を用いて輪郭線の包含関係の埋め込みを表現している。本報告でも、これと同じように3次元等位面の包含関係を考慮して、臨界点付近の振る舞いを考えていく。

まず、位相ハンドル H_2 は、図5のように等位面の2部分を併合して1つにする。しかしこの併合は、2部分の属する等位面が連結でない場合 (図5(a), (b)) と連結である場合 (図5(c), (d)) の2通りに分けることができる。さらに、前者は、2つの等位面に包含関係がない場合 (図5(a)) とある場合 (図5(b)) に、後者は、等位面の内側で併合する場合 (図5(c)) と外側で併合する場合 (図5(d)) に分けることができる。位相ハンドル H_1 は、 H_2 と逆の変化を引き起こすため、図6のように分類することができる。

以上の考察より、図3~6はすべての位相変化のパターンを示していることが分かる。これらのパターンを組み合わせることにより、どんな複雑な位相変化でも表現することが可能である。ただし、曲面は3次元空間内に埋め込み可能、つまり等位面同士は臨界点以外では交差しないと仮定し、位相の変化無しに結び目のある輪がほどけることはないとする。

3 アルゴリズム

本手法のアルゴリズムは6つのステップから成る。

1. 多重解像度解析: ポリゴンメッシュを多重解像度の系列に変換する。
2. キーフレームの生成: 位相変化のパターンを表す中間形状を生成する。
3. 四面体メッシュの生成: ポリゴンメッシュとキーフレームを四面体パッチで補間し、4次元のメッシュを生成する。
4. 四面体メッシュの細分割: 四面体メッシュを細分割し、補間表現の自由度を大きくする。
5. 四面体メッシュの平滑化: 四面体メッシュを平滑化し、滑らかな補間を求める。



図 3: H_3 による位相変化



図 4: H_0 による位相変化

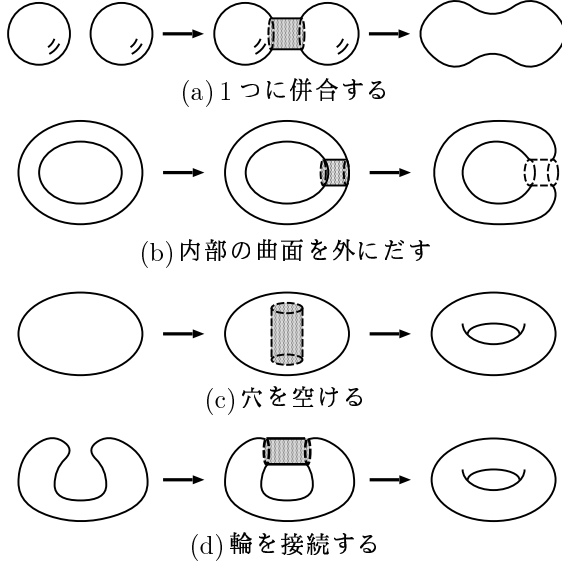


図 5: H_2 による位相変化

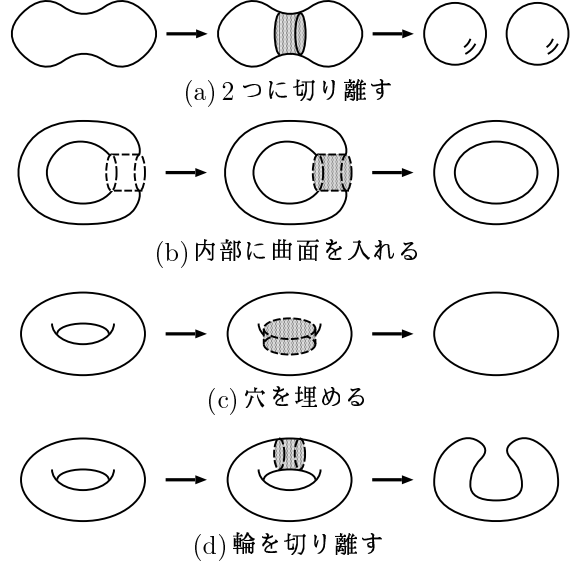


図 6: H_1 による位相変化

6. モーフィングの抽出: 四面体メッシュの時間軸に関する等位面を求め、モーフィングを抽出する。

以下の節で、各ステップごとに説明を加えていく。なお、本報告では、モーフィングの対象となる2つのポリゴンメッシュを M_s, M_t , 補間の進行度を表す時間軸を t と表記する。

3.1 多重解像度解析

本ステップでは、 M_s, M_t に MAPS [10] を適用し、多重解像度の系列 M_s^i, M_t^i に変換する。例えば、トーラスと球のモーフィングを行う場合は、図7のような系列を生成する。

このような系列が得られると、最も低レベルなポリゴンメッシュ M_s^0, M_t^0 のみを補間して、それを細分割していくことにより、高レベルの補間を求められるようになる (図7)。この結果、アルゴリズムの計算量が大きく減少する。例えば、ステップ2では、 M_s^0 と M_t^0 の間に挟むキーフレームだけを生成すればよいし、ステップ3では、 M_s^0 と M_t^0 の間にだけ四面体パッチを埋め込めばよい。

また、ステップ5において、解像度レベルごとに異なる平滑化を行うことにより、モーフィングの過

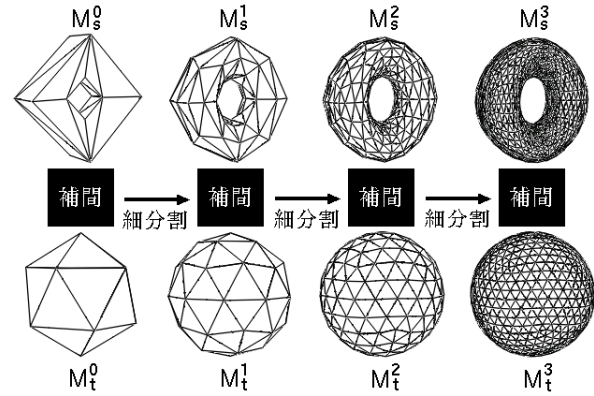


図 7: トーラスと球の多重解像度の系列

程を詳細度制御できるという利点もある [7]。

3.2 キーフレームの生成

本ステップでは、位相変化のパターンを表す中間形状を生成する。本報告では、この中間形状をキーフレームと呼ぶ。

キーフレームは、 M_s^0 に同相なポリゴンメッシュ K_s と、 M_t^0 に同相なポリゴンメッシュ K_t の2つから成る。ただし、これら2つのメッシュの幾何形状は完全に等しく、稜線の連結性のみが異なるため、 M_s^0 と M_t^0 の位相の違いを一意に橋渡しすることが

できる。

トーラスと球のモーフィングを例にとると、キーフレームを生成する手順は以下のようになる。

1. 位相変化のパターンの選択: 穴を埋める位相変化のパターン (図 6(c)) を選択する。
2. 位相ハンドルの生成: 図 8 のように、トーラス M_s^0 の穴をつくる面 (図中の色付き部分) を選択する。位相ハンドルは、これらの面を覆う閉曲面として生成される。なお、ここで選択した M_s^0 の面を接着面と呼ぶ。

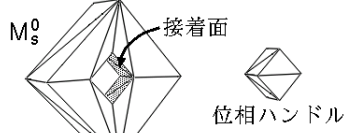


図 8: 位相ハンドルと接着面

3. 臨界点の指定: 臨界点の 4 次元座標を、トーラスの穴の中心に指定する。
4. K_s の生成: 図 12(d) 左のように、 M_s^0 の接着面上にある頂点 (図中の白点) を臨界点の座標に移動する。
5. K_t の生成: 図 12(d) 右のように、 M_s^0 に位相ハンドルを付加して、その接着面を削除することにより、 M_t^0 と同相なポリゴンメッシュ \tilde{M}_t^0 を生成する。そして、接着面上にあった頂点 (図中の白点) を臨界点の座標に移動する。

図 12(d) において、キーフレーム K_s, K_t の幾何形状は完全に等しいが、 K_s はトーラスの穴が空いたままの位相をもち、 K_t は穴が埋まった後の位相をもっている。これにより、トーラスから球への位相変化を一意に橋渡しすることが可能になる。

残りの位相変化のパターンについても、同様な手順でキーフレームを生成することができる。例えば、図 4, 図 5(a), 図 6(b), 図 6(d) の位相変化を引き起こすキーフレームは、それぞれ、図 12(a), (b), (c), (e) のように生成できる。

なお、キーフレームは後のステップで平滑化されるため、その幾何形状に本質的な意味はない。したがって、 M_t^0 にあわせてキーフレームの幾何を調整する必要はない。また、ステップ 1 で M_s を多重解像度の系列に変換する際、あらかじめ、 M_s^0 に接着面を残しておくようにする。

3.3 四面体メッシュの生成

本ステップでは、まず、 M_s^0 と M_t^0 の間に時間軸 t を加えた 4 次元空間を考え、その間にキーフレーム K_s, K_t を挟み込む。そして、 $M_s^0 - K_s$ 間と $K_t - M_t^0$ 間に四面体パッチを埋め込むことにより、 $M_s^0 - M_t^0$ 間を 4 次元の四面体メッシュで補間する。

例えば、トーラスと球のモーフィングの場合は、図 9 のように四面体パッチを埋め込む。ここで、キーフレームは、トーラス M_s^0 からは K_s として見え、球 M_t^0 からは K_t として見えることに注意する。 M_s^0 と K_s , M_t^0 と K_t はそれぞれ同相であるから、[6] で提案した手法を用いて四面体パッチを埋め込むことができる。この結果、トーラスと球の間に図 10 のような四面体メッシュが生成される。

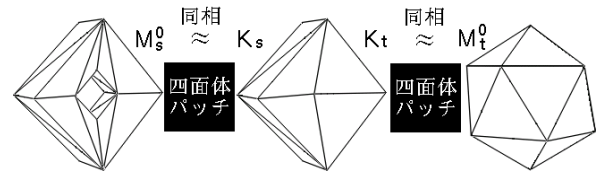


図 9: 四面体パッチの埋め込み

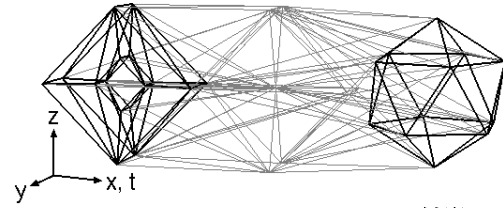


図 10: 四面体メッシュ (t を x に射影)

3.4 四面体メッシュの細分割

本ステップでは、四面体メッシュに含まれる各四面体パッチに対して、1-to-8 細分割 [11] を行う。この結果、四面体メッシュの形状表現の自由度が大きくなり、より複雑な補間を表現できるようになる。例えば、図 10 の四面体メッシュを 3 回細分割すると、図 11 が得られる。

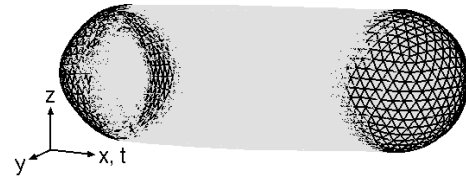


図 11: 細分割レベル 3 の四面体メッシュ

3.5 四面体メッシュの平滑化

本ステップでは、四面体メッシュを平滑化し、滑らかな補間を求める。平滑化の計算は、Taubin の局所平滑化 [12] を用いて行う。ただし、 M_s, M_t に属

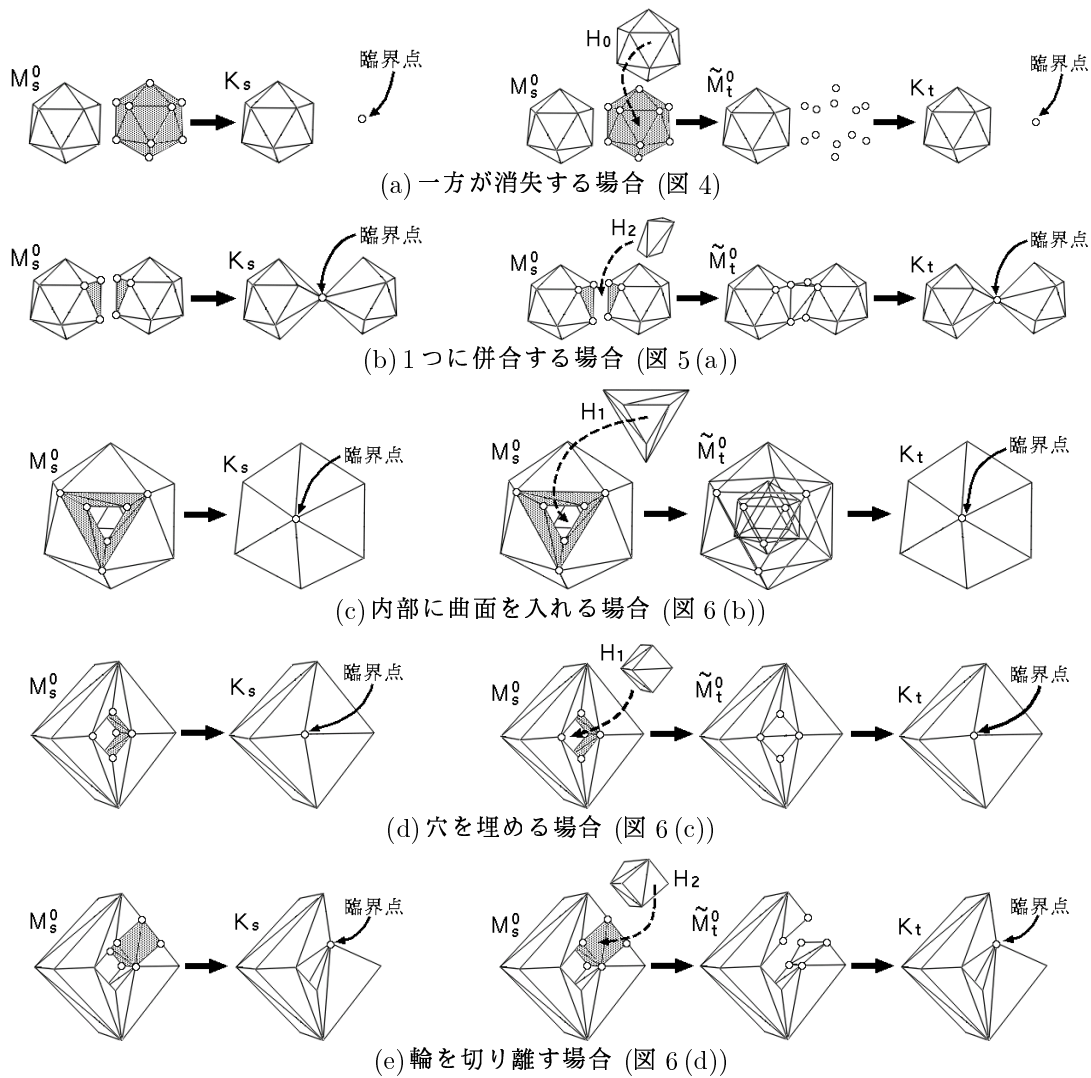


図 12: キーフレームの生成

する頂点と臨界点については、平滑化後も位置を変えないようにする。それ以外の頂点については、幾何制約を課して平滑化することにより、補間過程での軌跡を制御することができる [6, 7].

3.6 モーフィングの抽出

本ステップでは、四面体メッシュの時間軸に関する等位面を求め、モーフィングを抽出する。四面体メッシュの等位面とは、各四面体と曲面 $t = \text{const.}$ の交差点を結ぶ三角形の集合である。

4 実験

前節で述べたアルゴリズムを C++ と OpenGL 互換ライブラリ Mesa, GUI ツールキット fltk を用いて実装し、モーフィングの実験を行った。使用した計算機は、CPU Intel Pentium III 700MHz, メモリ 512MB の Linux マシンである。

図 4, 図 5 (a), 図 6 (b), 図 6 (c), 図 6 (d) の位相変化を伴うモーフィングを、それぞれ、図 13 (a) ~ (e) に示す。これらの結果を得るのに要した計算時間は、ひとつあたり約 10 分であった。

5 まとめ

本報告では、まず、考えられるすべての位相変化のパターンを提示し、それらが、位相ハンドルによって引き起こされることを示した。そして、この位相ハンドルを用いてキーフレームを生成することにより、起こりうる多数の位相変化の中から、ユーザの求めるパターンを明示的に指定できる手法を提案した。最後に、提案手法を実装して実験を行い、指定通りに位相が変化するモーフィングを生成した。

今後の課題には、位相変化のパターンを直感的に指定できるインターフェースや、キーフレームを半自動で生成するツールを実装することがあげられる。

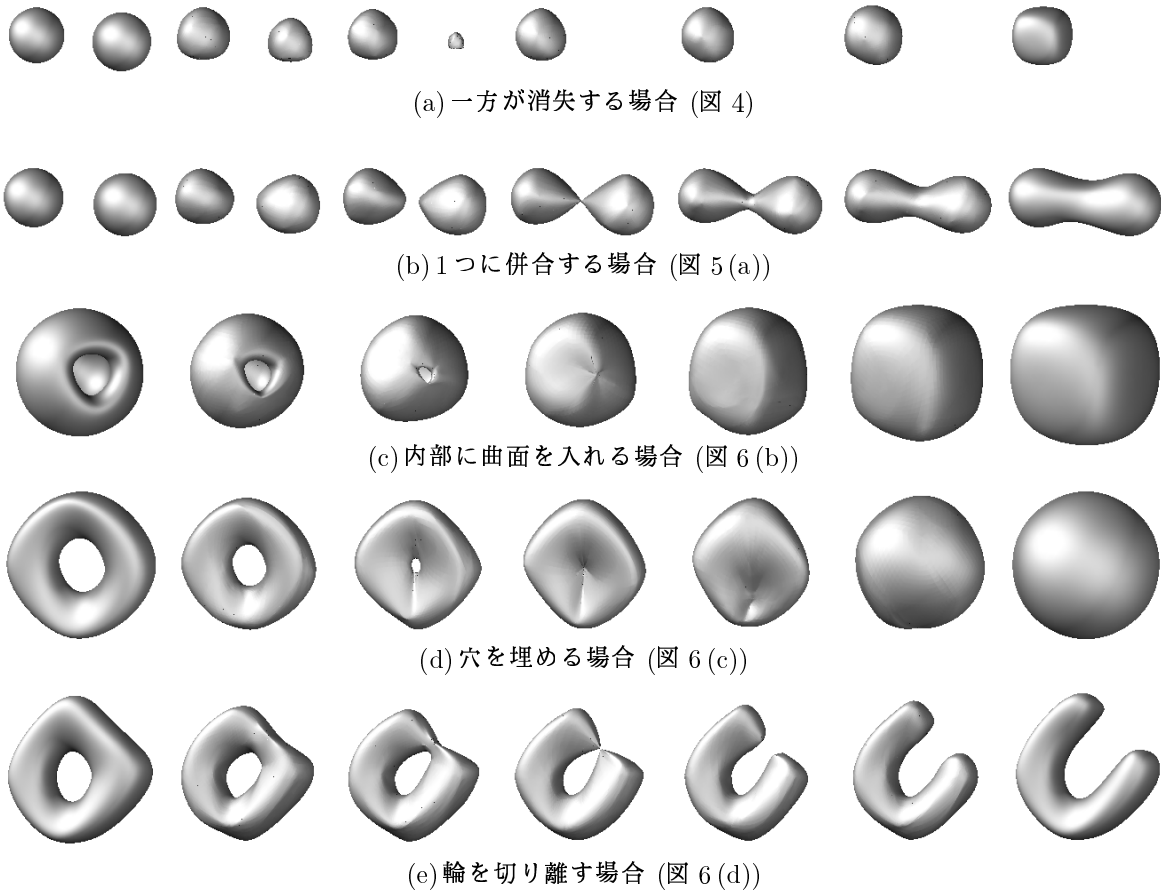


図 13: モーフィング結果

謝辞 本研究の一部は、文部省科学研究費補助金 (課題番号 12680432, 12780185), 中山隼雄科学技術文化財団, 栢森情報科学振興財団の助成によった。

参考文献

- [1] T. Kanai, H. Suzuki, and F. Kimura. Metamorphosis of arbitrary triangular meshes. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 20(2):62–75, 2000.
- [2] A. Gregory, A. State, M. Lin, D. Monocha, and M. Livingston. Feature-based surface decomposition for correspondence and morphing between polyhedra. In *Computer Animation '98*, pages 64–71. IEEE Computer Society Press, 1998.
- [3] A. W. F. Lee, D. Dobkin, W. Sweldens, and P. Schröder. Multiresolution mesh morphing. In *Computer Graphics (Proceedings Siggraph '99)*, pages 343–350, 1999.
- [4] D. DeCarlo and J. Gallier. Topological evolution of surfaces. In *Graphics Interface '96*, pages 194–203, 1996.
- [5] G. Turk and J. F. O'Brien. Shape transformation using variational implicit functions. In *Computer Graphics (Proceedings Siggraph '99)*, pages 335–342, 1999.
- [6] 愛島 快行, 大淵 竜太郎, 高橋 成雄. 細分割メッシュを用いた形状モーフィング. *Visual Computing/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム'2000 予稿集*, pages 71–76, Jun. 2000.
- [7] R. Ohbuchi, Y. Kokojima, and S. Takahashi. Blending shapes by using subdivision surfaces. to be published in the *Journal of Computers and Graphics*, Vol. 25, No. 1, Feb. 2001.
- [8] A. T. Fomenko and T. L. Kunii. *Topological Modeling for Visualization*, chapter 6, pages 105–125. Springer-Verlag, 1997.
- [9] Y. Shinagawa, Y. L. Kergosien, and T. L. Kunii. Surface coding based on morse theory. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 11(5):66–78, Sep. 1991.
- [10] A. W. F. Lee, W. Sweldens, P. Schröder, L. Cowsar, and D. Dobkin. MAPS: Multiresolution adaptive parametrization of surfaces. In *Computer Graphics (Proceedings Siggraph '98)*, pages 95–104, 1998.
- [11] D. Moore. *Graphics Gems III*, chapter V.9. Subdividing Simplices, pages 244–249. Academic Press, 1992.
- [12] G. Taubin. A signal processing approach to fair surface design. In *Computer Graphics (Proceedings Siggraph '95)*, pages 351–358, 1995.