

スペクトル分解を用いた3次元メッシュのモーフィング

川井 雅典¹ 大淵 竜太郎²

k5215@kki.yamanashi.ac.jp, ohbuchi@acm.org

¹山梨大学 大学院工学研究科 電子情報工学専攻

²山梨大学 工学部 コンピュータ・メディア工学科
山梨県甲府市武田 4-3-11

要旨

本論文では、ポリゴンメッシュ形状の「周波数」領域で形状補間を行うモーフィング手法を提案する。本手法は、形状の「周波数」表現の領域で補間を行うことで、形状の詳細（「低周波」成分）と概形（「高周波」成分）を個別に制御することを目的とする。不規則サンプルデータである3次元メッシュにはフーリエ変換が存在せず、古典的な意味での周波数領域は存在しない。本手法では、フーリエ変換の代わりにメッシュのスペクトル分解を用いてスペクトル係数を求め、これを用いて形状を補間した。この他、本手法では、メッシュの一部のみ補間を進め、例えば耳だけが人から虎に変化する効果を実現し、また、3つ以上の元メッシュの間での補間も実現した。

3D-Mesh Morphing Based On Mesh Spectral Analysis

Masanori Kawai¹, Ryutarou Ohbuchi²

k5215@kki.yamanashi.ac.jp, ohbuchi@acm.org

¹Electrical Engineering and Computer Science, Yamanashi University

²Computer Science Department, Yamanashi University

4-3-11 Kofu, Yamanashi, Japan.

Abstract

This paper presents a shape morphing method that interpolates shapes in their “frequency” domain. Using the “frequency” domain approach, coarse (“low-frequency”) and detail (“high-frequency”) shape features can be interpolated independently. Due to its irregular sampling, a mesh does not have its Fourier-transform based frequency domain representation. We employed mesh spectral analysis instead to derive spectral coefficients for shape interpolation. Other features of the proposed method include spatially localized morphing, that could morph, for example, only the ear of a face from a human into a tiger, and multi-target morphing, which could interpolate between more than two shapes.

1. はじめに

補間変形とは、モーフィング (morphing または metamorphosis) と呼ばれ、ある形状から別の形状になめらかに形状を変形させる手法である。現在さまざまな手法による形状モデル間の移行、3次元モーフィングが研究されている。また、これらの技術は、映画・CM・アニメーション等の分野でも用いられている。

1.1 既存のモーフィング手法

既存のモーフィング手法は、大きく分けて2つに分類できる[1]。1つは volume data を基にした手法で、違った位相を持つ形状間や複雑な形状間でも結果が得られる。もう1つは境界表現を基にした手法である。世の中のデータのほとんどが境界表現で定義されており、そのため境界表現によるモーフィング手法が多く研究されている。

境界表現を用いた手法は、2つの問題を解決

する必要がある。1つはメッシュ間において頂点の1対1の対応関係を構築し補間メッシュを生成することである。もう1つは対応関係が構築された頂点を補間することで中間形状を生成することである。これらはそれぞれ対応問題、補間問題と呼ばれている[2]。

これまでのメッシュモーフィングに関する研究の多く[2, 3, 4]は前者の対応問題を主題としている。従来手法の共通点として、補間メッシュを生成するために合成操作を用いる点が挙げられる。合成操作とはメッシュの和をとるもので、ソースモデルとターゲットモデル両方の頂点接続性を持った補間メッシュを生成する操作である。しかしこの合成操作には、計算量が大きくなる、補間メッシュの頂点数が膨大になる、メッシュ構造が不規則になる、歪んだ三角形が生成される、等の問題が存在する。その結果、合成操作による補間メッシュは3次元形状の質が低下し、補間制御が困難となる。

合成操作を必要としないモーフィングの研究も

道川ら[5]や Emil Praun ら[8]によって発表されている。道川らは、共通の補間メッシュを、入力形状に対する近似誤差を評価しながら、再メッシュ化を用いて作っている。

1.2 本研究のモーフィング手法

本論文は、ポリゴンメッシュに基づく境界表現で定義された形状を対象とし、以下の様な特徴をもつモーフィング手法を提案する。

- 細かい形状特徴だけを先に変形させるなど、形の詳細度(周波数成分)に応じた進行度の制御を可能とする。
- 周波数成分により補間式を変えることで、変形の制御を可能とする。
- 形状の一部のみの変形や、形状の一部を強調してからの変形など、領域ごとに変形の制御を可能とする。

規則サンプルデータである2次元画像には、周波数領域への変換であるフーリエ変換が存在する。しかし不規則サンプルデータである3次元メッシュには、「周波数領域」への変換手法が存在しない。

そこで、本研究では類似したものとしてスペクトル分解という、一種の周波数領域への変換を用いて、周波数の概念を持った「変換領域」での補間処理を可能とした。また、領域分割(後述)により、モデルの一部のみ(例えば、耳だけ、鼻だけ)のモーフィングが可能となる。

補間メッシュの生成手法は、道川ら[5]と似ている。再メッシュ化に関しては、道川らの適応的手法のほうが優れているが、補間手法が異なる。道川らが頂点座標をそのまま補間しているのに対し、本手法では、周波数領域へ変換してから補間を行っている。細分割により再メッシュする手法では、ベースメッシュが入力メッシュに近いことが望ましい。入力メッシュとかけ離れたものであると、結果の質が悪化するためである。

2.モーフィングアルゴリズム

2.1 本手法の概略

- i) 共通メッシュによるソースモデルとターゲットモデルのリメッシング
 - ・ベース補間メッシュの作成
 - ・細分割近似
- ii) スペクトル領域での形状補間
 - ・領域分割
 - ・スペクトル分解
 - ・スペクトル係数補間
 - ・スペクトル合成

・ベース補間メッシュの作成

ベース補間メッシュは、ソースモデル・ターゲットモデルそれぞれに対してある程度の特徴を考慮し作成する。生成される2つのベース補間メッシュは、同じ頂点数、同じ頂点接続性を持つ。

今回は、ベース補間メッシュを手動で作成した(図2B)。

・細分割近似

同一の頂点接続性を持つベース補間メッシュを再帰的に細分割しそれぞれの入力モデルに近似させることで、ソース、ターゲット両モデルを同一の頂点接続性を持ったメッシュで再現する。

補間メッシュを生成するには次の2つの処理を行う。まず、ベース補間メッシュの各三角形面(パッチ)に1対4細分割を行う。次に、新しく生成された頂点を入力モデルの表面に配置する。これらの処理を繰り返すことによってベース補間メッシュを入力モデルに近似させていく。

ベース補間メッシュを level0(L0)とし、細分割を行うたびに level を上げていくことにする。

実際の処理の様子を以下に示す。

入力モデルを M, ベース補間メッシュを B とする(図1(a))。

1. B に1対4細分割を行う(図1(b))。
2. B の頂点 $v_i (i=1, 2, \dots, n)$ に接する面の法線ベクトルの平均を取り、その平均を頂点 v_i の法線ベクトルとする。
3. v_i からその頂点の法線ベクトル方向の延長線と M の表面との交点を求める(図1(c))。求めた交点を補間メッシュの頂点とする。

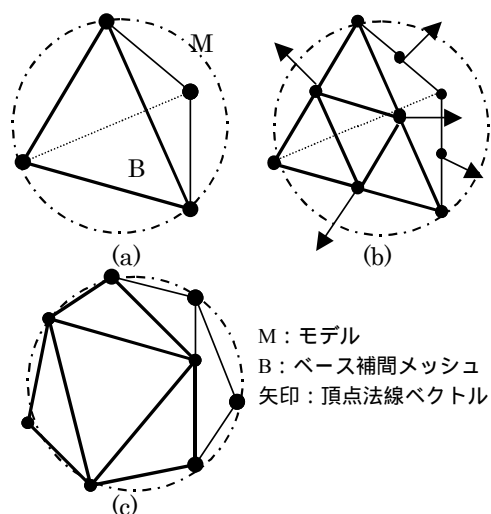


図1. 近似処理の例

・メッシュのスペクトル分解

頂点数が n 個ある 3 次元メッシュのスペクトル分解のアルゴリズムを次に示す。

1. メッシュの接続関係から求められるメッシュラプラシアン行列を計算する(後述)。
2. メッシュラプラシアン行列を固有値分解し、固有値と固有ベクトルを取得する。
3. 固有値の小さい順に固有ベクトルをソートする(小さい固有値に対応する固有ベクトルがメッシュの概形を表す)。
4. 固有ベクトルを正規化し基底ベクトル $\mathbf{e}_i (i=1, 2, \dots, n)$ を得る。
5. 固有ベクトルに頂点座標を射影して、メッシュのスペクトル係数を得る。ある頂点の座標値を $\mathbf{v}_i = (x_i, y_i, z_i)$ とし、基底ベクトルを \mathbf{e}_i とすると、次式(1)の関係が成り立つ。

$$(x_1, x_2, \dots, x_n)^T = \alpha_1 \mathbf{e}_1 + \alpha_2 \mathbf{e}_2 + \dots + \alpha_n \mathbf{e}_n ,$$

$$(y_1, y_2, \dots, y_n)^T = \beta_1 \mathbf{e}_1 + \beta_2 \mathbf{e}_2 + \dots + \beta_n \mathbf{e}_n , \quad (1)$$

$$(z_1, z_2, \dots, z_n)^T = \gamma_1 \mathbf{e}_1 + \gamma_2 \mathbf{e}_2 + \dots + \gamma_n \mathbf{e}_n .$$

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ はスカラー値であり、この値をスペクトル係数と呼ぶ。

メッシュラプラシアン行列にはいくつかの定義があるが、我々は Bollbás [6] のメッシュラプラシアン行列 (Kirchhoff (キルヒホフ) 行列) と Laplacian 行列 [7] を用いた。Kirchhoff 行列は、対称行列になるため、比較的安定で効率的な固有値分解のアルゴリズムが存在すると言う利点がある。

キルヒホフ行列 \mathbf{K} は

$$\mathbf{K} = \mathbf{D} - \mathbf{A}$$

で定義される。 \mathbf{A} はポリゴンメッシュの頂点の隣接行列で、以下のように定義される。

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{頂点 } i, j \text{ が隣接} \\ 0 & \text{その他} \end{cases}$$

\mathbf{D} は対角行列で、その対角要素 $D_{ii} = d_i$ は頂点 i の次数である。

Laplacian 行列 \mathbf{L} は

$$\mathbf{L} = \mathbf{I} - \mathbf{R}\mathbf{A}$$

で定義される。 \mathbf{I} は単位行列、 \mathbf{A} は隣接行列、 \mathbf{R} は次数 d_i の逆数を対角成分に持つ対角行列である。

本手法では、ソースモデルとターゲットモデルの補間メッシュが、同じ頂点接続性を持っている。そして、固有ベクトルは、頂点接続性のみ依存している。従ってどちらか一方の固有値分解を行い、その結果を他方に適用することができるので、計算時間を短縮することができる。

・領域分割

メッシュの頂点数が増えると、スペクトル分解のために行う固有値分解の計算に、膨大な時間がかかってしまう。また、頂点数が千個を超えると、固有値分解の解が不安定になる等の問題がある。

そこで、頂点数が数千個以上のメッシュに対し、スペクトル分解を行う場合、メッシュを頂点数数百程度以下のポリゴンからなる領域に区分し、それぞれの領域に対し個別にスペクトル分解を行う。これにより計算時間を大幅に短縮することが可能である。また、領域分割を利用して、モデルの一部のみのモーフィングを制御することも可能となる。今回は、ベース補間メッシュの頂点を特徴点とし、そこから全ての頂点を覆うまで領域を拡張していくことで、領域分割を行った。

・補間方法

リメッシュした 2 つの補間メッシュから求めたスペクトル係数を線形補間することで、中間形状を求める。ソースモデル(0)からターゲットモデル(1)までの間を 50 等分、さらに外挿し、モーフィング範囲を (-0.5) ~ (1.5) と拡張した。スペクトル係数は低周波成分(全体の 1%, 2%, 5%, 10%, 20%, 50%), 高周波成分(全体の 1%, 2%, 5%, 10%, 20%)に、変化させられるようにした。また領域分割を利用することによって、モデルの一部のみの変形も可能である。

3. 結果

3.1 細分割と近似処理

図 2 は入力メッシュ、ベース補間メッシュ、各 level(1~4)の補間メッシュ、表 1 は各メッシュの頂点数 (v)、面数 (f) や処理時間を表にしたものである。表 1 より、細分割近似処理にかかる時間は非常に短く、レベルにはあまり関係ないといえる。それに比べ、スペクトル分解にかかる時間は、レベルが上がるごとに増え、表 1 からわかるように、500 頂点を超えるあたりから、急激に増えていく。しかし、領域分割を行うことで、10 時間以上かかった L4 のスペクトル分解を、約 6 分に短縮することができる。

venus モデルの再分割処理に時間がかかっているのは、入力モデルの情報を読み込むのに時間がかかるためである。

補間メッシュはレベル 3 (L3) 以上になると元モデルにだいたい近似する。近似処理は、ベース補間メッシュの頂点数を増やすことで、より近似度をあげることができる。

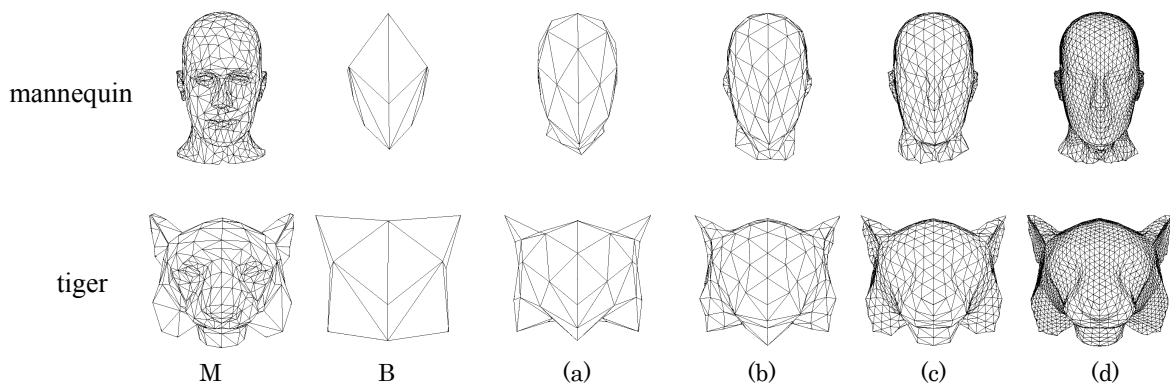


図 2 . 細分割近似処理結果 M:入力モデル B:ベース補間メッシュ (a)~(d):補間メッシュ

表 1 細分割近似処理の結果 マシンスペック : CPU P 933MHz メモリ : 256MB

size	M	B	L1(a)	L2(b)	L3	L4(d)	L4(d)
mannequin	v:690, f:1376	v:15 f:26	v:54 f:104	v:210 f:416	v:834 f:1664	v:3330 f:6656	v:3330 f:6656
tiger	V:255, f:504						
venus	v:2000						
細分割近似							
mannequin			0:00:00	0:00:00	0:00:01	0:00:01	分割有り
tiger			0:00:01	0:00:00	0:00:01	0:00:01	
venus			0:00:06	0:00:06	0:00:06	0:00:10	
スペクトル分解			0:00:00	0:00:09	0:10:09	12:12:33	0:05:30

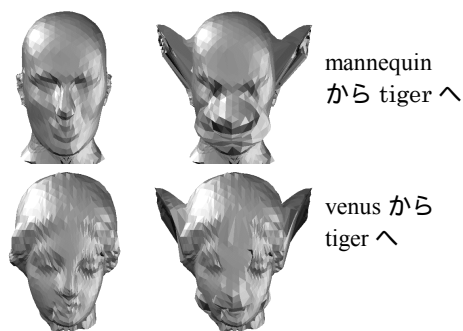


図 3 . 部分モーフィング (耳・鼻部)

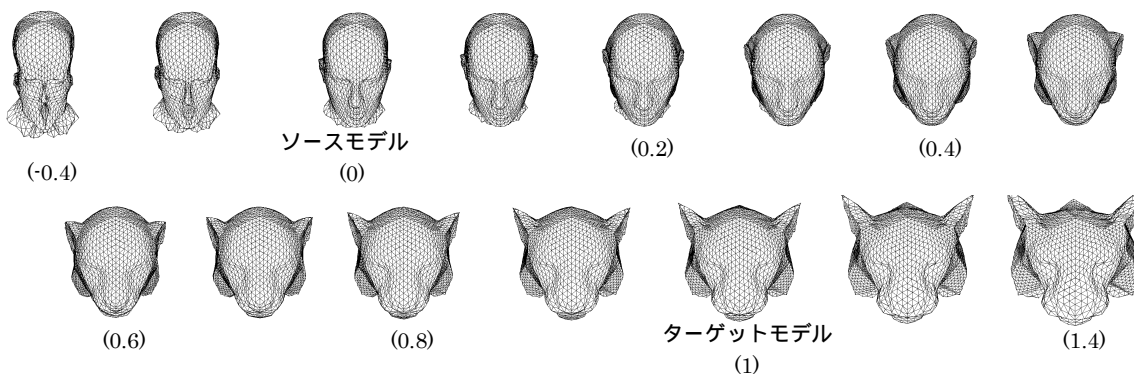


図 4 . モーフィング結果

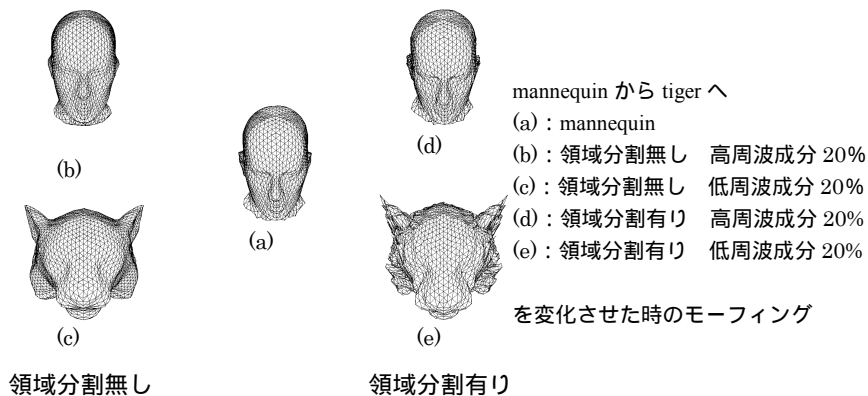


図 5 . 周波数成分指定モーフィング

3.2 モーフィング

- ・ 補間メッシュ L4(v3330,f6656)を使用
- ・ キルヒホフ行列 \mathbf{K} による固有値分解
- ・ ソース(mannequin)からターゲット(tiger)へのモーフィング

全スペクトル係数による変形は、滑らかに実行させることができた。結果は、領域分割の有無、固有値分解に用いた行列(キルヒホフ行列 \mathbf{K} 、ラプラス行列 \mathbf{L})の違いに明確な差は出なかった。特に領域分割有り時の領域の境界上に何らかの影響が出ると懸念していたが、全くといっていいほど影響はなかった(図 4)。

しかし、周波数成分指定によるモーフィングでは、領域分割の有無で差が出た(図 5)。

領域分割ありの場合、低周波成分 20%以上でだいぶターゲットモデルに近づくが、稜線部分がだいぶ粗くなっている(図 5(e))。高周波成分のほうも 20%位から耳などのメッシュの細かい部分が荒くなってしまっている(図 5(d))。領域分割なしの場合の低周波成分 20%だと、かなりターゲットモデルに近づく(図 5(c))。

これは、領域分割後での「周波成分の 20%」が、既にモデル全体の持つ周波成分を持ち得ない小さな領域での 20%なので、領域分割なしほどモデルを表現できないからである。

図 6 は領域分割有りの時の mannequin から tiger への周波数成分指定 (0-1%, 0-2%, 0-5%, 0-10%, 0-20%, 0-50%, 1-2%, 2-5%, 5-10% 10-20%, 20-50%, etc) モーフィングの結果を示す。図 6 から、1%分を抜いた場合の変形ではどれもソースモデルに近い形となっており、含まれる高周波成分が増えるに従い、細かい部分がターゲットに近づいて行くことが見て取れる。これらにより、低周波成分が、モデルの概形を、高周波成分がモデルの詳細を表現していることが確認できる。

3.3 部分モーフィング

図 3 は mannequin と venus の耳と鼻の部分のみを tiger モデルに変形させたものである。耳や鼻の部分のみが 1 つの領域となっていないため、多少不自然になっている。この結果は、領域分割の仕方によって大きく変わると考えられる。また、領域分割は、ベースメッシュに関係してくるので、ベースメッシュ生成の時点から考慮に入れる必要がある。

3.4 マルチターゲットモーフィング

従来の合成操作を基にする補間メッシュでは、頂点や面の数が膨大になってしまい 2 つ以上のモデル間でのモーフィングが、困難であった。し

かし、本手法による補間メッシュを用いれば、実現することができる。

4.まとめと今後の課題

本研究の手法により、変換領域(周波数領域)による補間変形を実現することができた。これにより、周波数成分によるモーフィングの制御が可能となった。また、領域分割を利用することで、計算時間の短縮や部分モーフィングが可能となった。今後は、補間式によるモーフィングの制御を行い、今回実現できた手法を組み合わせることで、新たなモーフィングが実現できないか調査する。

また、本手法により補間メッシュを生成するための合成操作で生じる、計算が困難、面数が膨大となる、構造が不規則になる等の問題も一様解決したが、道川らや Praun らのように誤差の評価を入れるなど改善の余地がある。

本研究の手法を生かすために、今後なすべきことは多い。特に重要なのは領域分割の方法である。今回はベース補間メッシュの頂点を中心に領域を広げていく手法を用いた。これをベース補間メッシュの三角形面(パッチ)を領域として分割することで、次のような効果を得ることができる。第 1 に、固有値分解に要する計算時間の短縮である。スペクトル分解の結果は、頂点の接続性で一意に決まる。従ってパッチを領域として分割できれば、どんなにパッチが細分割されていても、計算は最低 1 回、つまり同じレベルのパッチには、計算結果をそのまま適応できる。第 2 に、パッチ同士を対応づけることで補間制御がより容易に行える等である。

また、スペクトル分解の結果を用いて、適応的に細分割近似が行えないか実験中である。

5.参考文献

- [1] F. Lazarus, and A. Verroust. Three-dimensional metamorphosis: a survey. *The Visual Computer*, 14:373-389, 1998. Springer-Verlag.
- [2] J. R. Kent, W. E. Carlson, and R. E. Parent. Shape transformation for polyhedral objects. *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH 92)*, pp. 47-54. ACM Press, New York, 1992.
- [3] T. Kanai, H. Suzuki, and F. Kimura. Metamorphosis of arbitrary triangular meshes. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 20:62-75, April 2000.
- [4] T. Kanai, H. Suzuki, and F. Kimura. Three-dimensional Geometric Metamorphosis based on Harmonic Maps. *The Visual Computer*, Vol.14, Issue 4, pp.166-176, 1998.
- [5] T. Michikawa, T. Kanai, M. Fujita, and H. Chiyokura. Multiresolution Interpolation Meshes. in *the Proceedings of the Pacific Graphics 2001*.

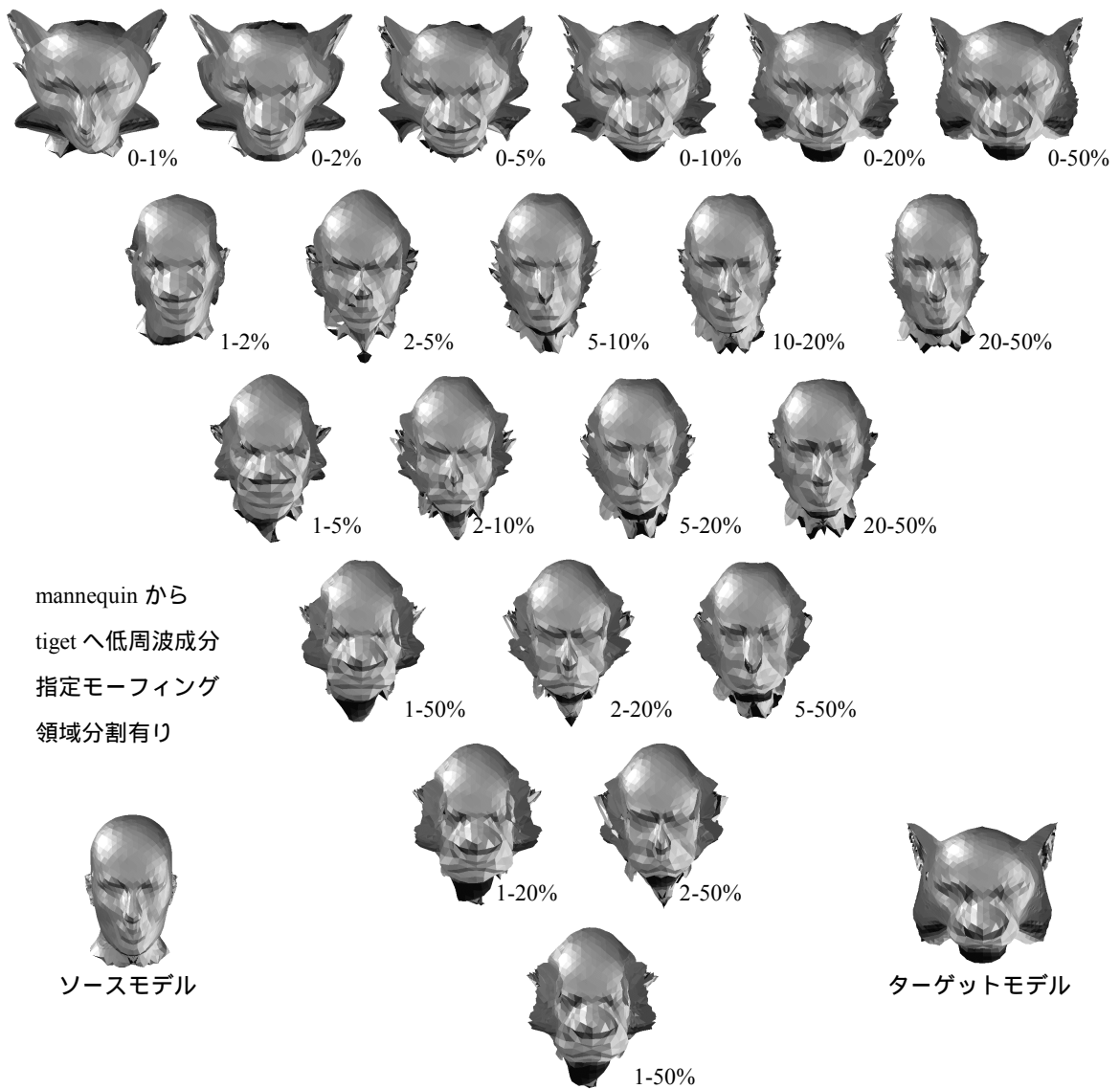


図 6.低周波数成分指定モーフィング

- [6] B. Bollobás, *Modern Graph Theory*, Springer, 1998.
- [7] Zachi Karni, Craig Gotsman, Spectral Compression of Mesh Geometry, *Proceedings of the SIGGRAPH 2000*, pp. 279-286, July 2000, New Orleans, U. S. A.
- [8] Emil Praun, Wim Sweldens, Peter Schröder. Consistent Mesh Parameterizations. *Proceedings of SIGGRAPH 2001*, 12-17 August 2001, Los Angeles, California.