

形状特徴の詳細度を考慮した3次元メッシュモデルの補間変形

川井 雅典¹ 向山 明夫¹ 大淵 竜太郎²
k5215@kki.yamanashi.ac.jp, k7186@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

本研究は、ポリゴンメッシュ形状を「周波数」の概念を持った変換領域において、形状特徴の詳細度を考慮した補間変形を実現することを目的としている。しかし3次元メッシュには、古典的な意味での周波数領域は存在しない。そのため本手法ではメッシュのスペクトル分解という手法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。しかし、スペクトル分解には大変時間が掛かった。さらにスペクトル分解処理時間の短縮のために我々が導入したメッシュの領域分割は補間形状の質を低下させる場合があった。本論文では、スペクトル分解の中心となる固有値検査アルゴリズムの高速化と領域分割手法の変更により、補間形状の質を改善する手法を提案する。

A Spectral-Domain 3D Mesh Shape Interpolation with Detail Control

Masanori Kawai¹, Akio Mukaiyama¹, Ryutarou Ohbuchi²
k5215@kki.yamanashi.ac.jp, k7186@kki.yamanashi.ac.jp, ohbuchi@acm.org
¹Graduate School of Eng., Yamanashi University
²Computer Science Department, Yamanashi University
4-3-11 Kofu, Yamanashi, Japan.

Abstract

We have previously reported a shape interpolation algorithm that is based mesh-spectral domain representation of three-dimensional mesh shapes. The method is capable of controlling how various “frequency” components of the shapes are to be blended. A drawback of the algorithm is the high computational cost due to the eigenanalysis required for the mesh spectral decomposition. In this paper, we report on an improved shape interpolation algorithm that employs a sophisticated numerical technique to reduce the computational cost of eigenanalysis and its impact on quality of the interpolated meshes.

1. はじめに

近年、ゲームや映画・アニメーションの分野における3次元CGの重要性が高まっている。この3次元CGの技術の1つに補間変形(morphing または metamorphosis)と呼ばれるものがある。これは、異なる形状を途中の形を補間しながら変形させる技術である。現在様々な手法による形状間の移行、3次元モーフィングが研究されている。

我々は、リサンプリングを用いたモーフィング(後述)を研究している[6]。我々の手法では、形状の詳細度を考慮したモーフィングを可能としたが、メッシュのスペクトル分解(後述)に大量の時間がかかる問題があった。本論文では、スペクトル分解の計算時間短縮手法について述べる。

1.1 既存のモーフィング手法

現在使用されている3次元モデルは、その殆ど

が境界表現(面・辺・頂点 etc.)で定義されたものである。そのため、境界表現による3次元モデルの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3次元モデルに対するモーフィング手法では、2つの問題を解決する必要がある[1]。1つはメッシュ(モデル)間において、頂点や辺などに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。

これまでのメッシュモーフィングに関する研究の多く[1, 2, 3]は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あげられる。合成操作とは、対象となる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併せ持った補間メッシュを生成する操作である。これらの

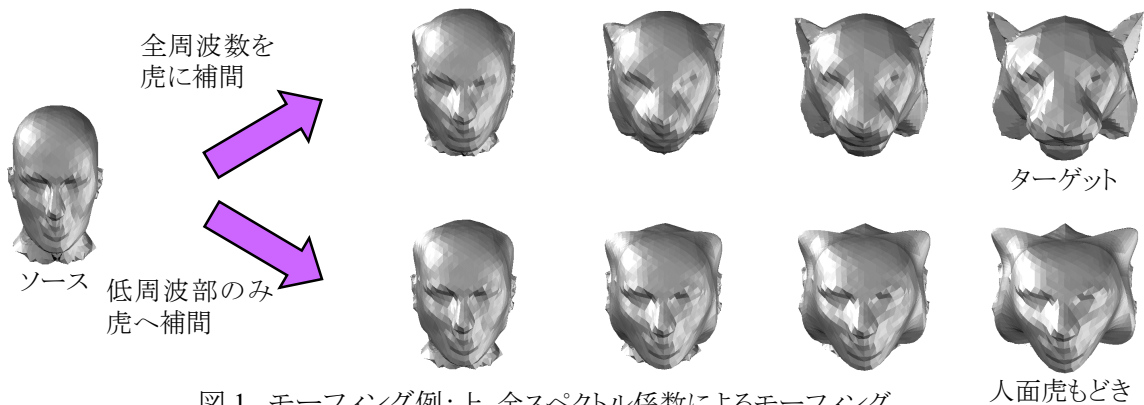


図 1. モーフィング例: 上 全スペクトル係数によるモーフィング
下 低周波部 1%だけを変化させたモーフィン

手法は、補間メッシュにより、正確に対象モデルを再現できるという利点がある。しかし、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等の問題がある。

最近では、合成操作を用いず、リサンプリングを用いた手法[4, 5, 6]が発表されている。この手法はまず、共通(頂点数・頂点接続性が同一)のベース補間メッシュを用意する。次にベース補間メッシュを細分割しながら、対象(ソース・ターゲット)モデルに近似させる。最後に出来上がったそれぞれの補間メッシュ(頂点数・頂点接続性が同一)を用いて補間を行う手法である。この手法では、補間メッシュが規則的な構造で扱いやすく、合成操作ほど頂点数が増加することがない。しかし、入力モデルに対する近似精度が悪くなってしまうという問題がある。

1.2 先行研究のモーフィング手法

我々の手法[6]では、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ている。補間メッシュの生成には、リサンプリングを用いる手法をとっている。簡単に説明すると、①ベース補間メッシュを細分割(1対4細分割)する、②入力モデルに近似する、という処理を繰り返すことにより、補間メッシュを作成する。また、形状の補間は、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」で行

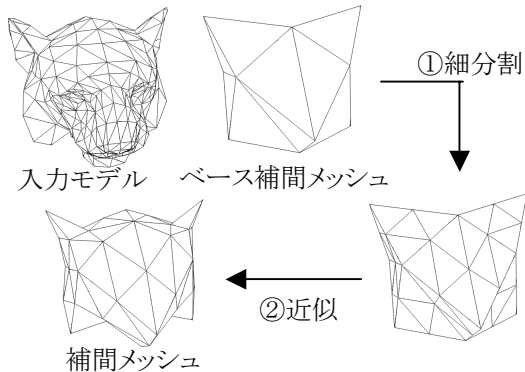


図 2. 補間メッシュの生成

っている。これにより、形状の詳細度に応じた変形の制御を可能としている。

メッシュのスペクトル分解は、頂点数が増加すると処理時間が長くなる。特に、スペクトル分解中の固有値分解は、モデルの頂点数を n とすると計算時間は約 $O(n^3)$ となる(図 3)。

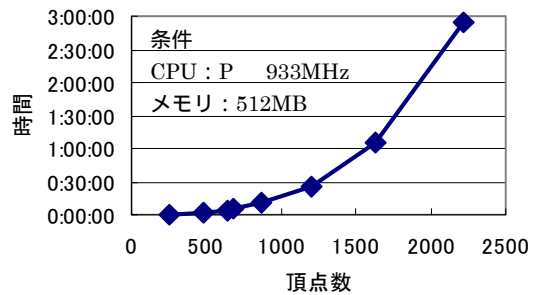


図 3. 頂点数と計算時間

そこで、我々は計算時間を短縮するために領域分割を利用している。領域分割とは、メッシュを頂点数数百程度のポリゴンからなる領域に区分することである。先行研究[6]では、ベース補間メッシュの頂点を特徴点とし、そこから領域を広げていくことで、領域分割(特徴点分割)を行っていた(図 4)。

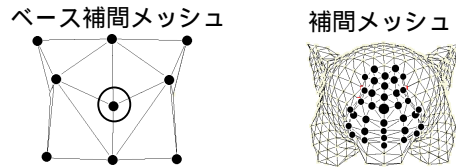


図 4. 特徴点分割の例
ベース補間メッシュの丸で囲まれた特徴点の領域に属する頂点のみを強調

特徴点分割を行うことにより、スペクトル分解にかかる時間を大幅に短縮することができた。結果も、全スペクトル係数によるモーフィングでは、領域分割の有無による違いはなかった。さらに、領域分割を行うことにより、部分モーフィングが容易になった。しかし、係数指定によるモーフィング

(図 1 上の変形)では、領域分割ありの場合、領域の境界上で不連続になり、別の結果となってしまった(図 5)。

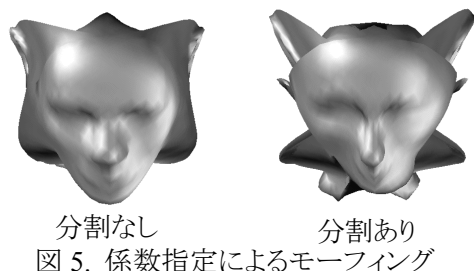


図 5. 係数指定によるモーフィング

2. 本論文の目的

本論文では、新たな領域分割手法を提案し、境界線上での影響を改善する。また、固有値分解のアルゴリズムを改善することで計算時間の短縮を実現し、その影響について報告する。

2.1 領域分割の改善

先行研究[6]で行っていた、特徴点分割(図 4)では、頂点数・頂点接続性が領域により異なるため、領域ごとに固有値分解を施す必要があった。

そこで本論文では、ベースメッシュの各三角形面が、1つの領域となるような分割(「パッチ分割」と呼ぶ)を行った(図 6)。このパッチ分割を用いることで、各領域の頂点数・頂点接続性が同一となる。よって、1つの領域に対して固有値分解を行い、その計算結果を他の領域に適用することができれば、同様の分割手法(1対4細分割)を用いているパッチ領域に計算結果を適用することができ、固有値分解の計算が1度ですむ。

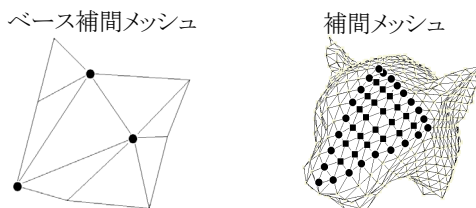


図 6. パッチ分割の例
ベース補間メッシュの三角形領域に属する頂点のみを表示

2.2 固有値分解手法の改善

本手法では、高速に固有値分解を行うために、Lanczos 法の応用である Arnoldi 法[7]を用いた。Lanczos 法は、大規模な行列に対し効率よく固有値分解を行う手法である。我々がこれまで使用していた Householder 法と Jacobi 法の組み合わせが全ての固有値と固有ベクトルを求めるのに対して、Lanczos 法は指定された一部の固有値を求める。従って、固有値(とそれに対応する固有ベクトル)の数を固有値分解する行列と共に指定する。例

えば、 $2n$ 個の固有値を求めるように指定すると、固有値が最も小さい方から n 個、最も大きい方から n 個、合計 $2n$ 個の固有値とそれに対応する固有ベクトルの近似値を求める。我々の場合は、求めた固有ベクトルが直交する必要があるため、固有ベクトルが直交するように求める手法である Arnoldi 法を用いた。本論文では、Arnoldi 法を含んだライブラリ[8]を用いた。

また、Lanczos 法は、指定する固有値の総数が大きければ、小さいおよび大きい固有値とそれに対応する固有ベクトルがある程度正確に求めることができる。先行研究から形状の概形を小さい固有値(低周波成分)がより大きく影響を与えていることがわかっている。このことから Arnoldi 法による固有値分解は、形状に対しより強い影響力をもつ固有値を優先的に計算するのに好都合であると考えられる。

3. 実験結果

3.1 領域分割

今回適用したパッチ分割の結果を、特徴点分割・領域分割なしのときの結果と比較した。補間メッシュはベース補間メッシュ(頂点数:15)に4回細分割を行ったもの(頂点数:3330)を使用した。

全スペクトル係数を用いての変形では、領域分割なし、特徴点分割を行ったもの、パッチ分割を行ったものの3つの条件において明確な差は出なかった。しかし、係数指定による変形では図7のような差がでた。

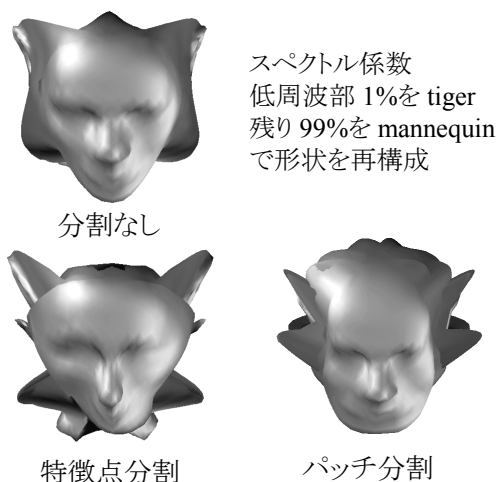


図 7. 係数指定によるモーフィング結果

領域分割の有無により結果に影響が出てしまう原因の1つは、領域分割により各領域の境界が不連続となってしまったためであると考えられる。もう1つは、モデル全体でのスペクトル係数の数%と、各領域でのスペクトル係数の数%の和では、使用

するスペクトル係数の総数は同じとなるが、形状の再構成能力に違いが出るためと考えられる。特に領域分割時の数%には、領域分割なしの場合における高周波成分に相当する係数を含んでしまう可能性がある。パッチ分割においては、境界上の不連続性は解消できたが、分割なしのモデルと同じ結果にはならなかった。

各条件のときの計算時間は表 1 のようになる。

表 1. 補間メッシュの計算時間

	領域数	各領域の頂点数	計算時間
分割なし	1	3330	7h41m15s
特徴点	15	200~300	1m39s
パッチ	26	153	2s

条件 CPU: Athlon XP 1900+ メモリ: 1.5GB

特徴点分割では、各領域内の頂点数・頂点接続性は領域によって異なるため、すべての領域に対して固有値分解を行う必要がある。しかし、パッチ分割では、各領域が同じ頂点数・頂点接続性を持つため 1 つの領域の計算結果を他の領域に適用できるため、1 つの領域に対してのみ固有値分解を行うだけでよい。

しかし、パッチ分割の頂点数の総和と分割なしの頂点数の総和は等しくならない。これはパッチ分割では、各領域の頂点数・頂点接続性を等しくするため、領域境界上の頂点が、複数の領域に属する。これにより、パッチ分割では、領域による部分モーフィングを行うには、領域の境界上にある頂点に対する処理が必要となる。

3.2 Arnoldi 法による固有値分解

Arnoldi 法による固有値分解では、分解する行列のほかに、計算する固有値の数も引数として与える必要がある。固有値は、小さい固有値とそれに対応する固有ベクトル・大きい固有値とそれに対応する固有ベクトルが交互に求められる。

本実験では小さい固有値とそれに対応する固

有ベクトルのみでモデルの再構成を行うことにした。そこで、様々な条件のもとでの計算を行い、その結果と処理時間を比較した。

まず、Arnoldi 法による固有値分解と、我々が使用していた Householder 法+Jacobi 法(以後 HJ 法)による固有値分解の差を調べた。表 2 は HJ 法を用いて再構成したモデル(以後「比較モデル」と呼ぶ)と、各条件における Arnoldi 法を用いて再構成したモデルの、各頂点のユークリッド距離の平均を出したものである。

33 個のスペクトル係数を用いて再構成したモデルと比較モデルを比較した場合、Arnoldi 法による分解量が 10%のときの値は 0.05348 となっており、20%以上のときの値は、0.01473 となっている。これは、Arnoldi 法による分解量が 20%を超えると、低周波に相当する固有値 33 個の値が収束し、再構成されるモデルが同一となるためである。同様に、固有値 166 個が収束するのは、分解量が 30%を超えたとき、固有値 333 個が収束するのは分解量が 40%を超えたときといえる。これらにより Arnoldi 法による固有値分解は、分解量が増加するほど、小さいまたは大きい固有値とそれに対応する固有ベクトルが安定するといえる。

表 3 と図 8 は比較モデルと、Arnoldi 法によるソースモデル・ターゲットモデルを比較したものである。表 3 より、固有値をより多く用いてモデルを再構成したほうが、比較モデルとの頂点間のユークリッド距離の平均が小さくなっている。また図 8 から、分解量が大きくなるほど比較モデルに近い形になることが見てとれる。これらのことより、Arnoldi 法によるモデルの再構成は、分解量が大きくなるほど、比較モデルに近づくといえる。

図 9 は、係数指定モーフィングを行ったときの結果である。Arnoldi 法による分解量 50%のモデルは、見た目では、HJ 法によるモデルと殆ど区別がつかない。また、表 4 より、分解量 50%の計算時間は、HJ 法の約 20 分の 1 となっている。これらにより、Arnoldi 法による固有値分解の高速化はかなり有効であるといえる。

表 2. Householder 法+Jacobi 法による再構成モデルとの差(頂点間のユークリッド距離の平均の差)

		モデルの再構築に使用した係数の数(全係数の%)				
		33(1%)	66(2%)	166(5%)	333(10%)	666(20%)
分解量: Arnoldi 法により求める固有値の数(全体の%)	10%	0.05384	0.05717	0.06256	—	—
	20%	0.01473	0.01473	0.02408	0.02828	—
	30%	0.01473	0.01473	0.01473	0.01947	—
	40%	0.01473	0.01473	0.01473	0.01478	0.01731
	50%	0.01473	0.01473	0.01473	0.01473	0.01540

表 3. Householder 法+Jacobi 法と Arnoldi 法によるソース・ターゲットモデルの差
(頂点間のユークリッド距離の平均の差)

		使用した 係数の数	再構成モデル		
			ソース	ターゲット	
分解量: Arnoldi 法に より求める固 有値の数 (全体の%)	10%	166	0.06309	0.07785	
	20%	333	0.02675	0.03096	図 5(a)
	30%	499	0.01771	0.01803	
	40%	666	0.01222	0.01285	図 5(b)
	50%	823	0.01013	0.01038	図 5(c)

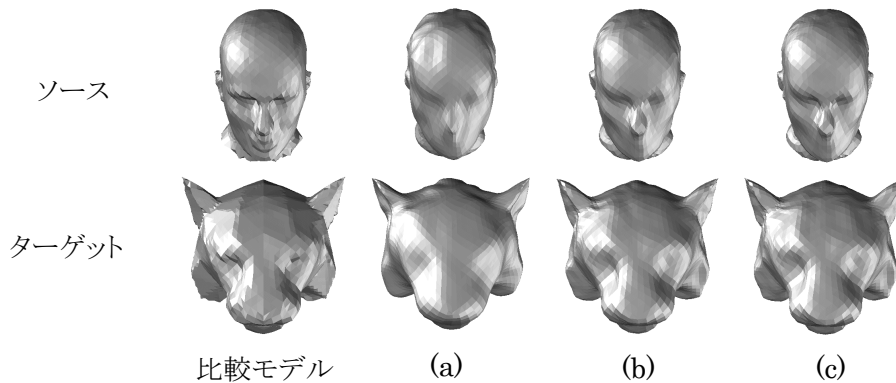


図 8. Householder 法+Jacobi 法と Arnoldi 法によるソース・ターゲットモデル

しかし、分解量が小さくなるにつれ、モデルの再構成能力が低下することが前項の差分評価や図 8 から見てとれる。このことから Arnoldi 法による固有値分解を適用するには、分解量をある程度大きくとり計算を行う必要がある。

4. まとめと今後の課題

本稿では、新たな領域分割手法と、Arnoldi 法による固有値分解の高速化について述べた。

新たな領域分割により各領域に対して行うはずの固有値分解を、1 つの領域に対してのみ行い、他の領域には、計算結果を適用するだけになった。さらに、違うモデルに対しても同じ分割回数の領域に対してならば、予め計算しておいた結果を用いることで、再び固有値分解を行う手間を省くことができた。

また、Arnoldi 法を用いることで、領域分割を行わずに、計算時間を短縮することができ、HJ 法を用いた時の結果に近い形状を再構成することができた。特に、周波数帯指定モーフィングにおいても、分解量を 40% (使用係数 20%) 程度にすれば、通常の固有値分解を行ったときの結果と殆ど変わらないことが確認できた。

今後、さらに大規模で、複雑なメッシュモデルに対し Arnoldi 法を用いた場合の影響についての実験を行う。また、大規模で複雑なモデルを補間メ

ッシュにより再現できるよう、リサンプリング手法の改善を行う。

謝辞

本論文のモーフィングプログラムの基となった gmtools を提供していただき、またディスカッションに参加していただいた東京大学の 高橋 成雄 助教授に感謝する。

参考文献

- [1] 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.
- [2] T. Kanai, H. Suzuki, and F. Kimura. Metamorphosis of arbitrary triangular meshes. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 20:62-75, April 2000.
- [3] 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.
- [4] T. Michikawa, T. Kanai, M. Fujita, and H. Chiyokura. Multiresolution Interpolation Meshes. in the *Proceedings of the Pacific Graphics 2001*.
- [5] Emil Praun, Wim Sweldens, Peter Schröder. Consistent Mesh Parameterizations. *Proceedings of SIGGRAPH 2001*, 12-17 August 2001, Los Angeles, California.
- [6] 川井 雅典, 大淵竜太郎. スペクトル分解を用い

表 2. Arnoldi 法による固有値分解

マシンスペック CPU : Athlon XP 1900+ メモリ : 1.5GB

	係数の使用量	係数の数	全体からの割合	計算時間	
Arnoldi 法	5%	167	5%	54s	図 6(d)
	10%	333	10%	2m46s	
	15%	500	15%	6m20s	図 6(c)
	20%	666	20%	12m22s	
	25%	833	25%	21m32s	図 6(b)
	50%	1665	50%	4h35m14s	
Householder 法+Jacobi 法		3330	100%	7h41m15s	図 6(a)

係数の使用量:
モデルの再構成に
使用する係数が全
体の何%に相当す
るか
係数の数:
モデルの再構成
に使用する係数
(固有値)の数
全体からの割合:
使用する係数が
全体の何%に相
当するか

低周波 0~1%を
ターゲットモデル
残りをソースモデル

低周波 0~2%を
ターゲットモデル
残りをソースモデル

低周波 0~5%を
ターゲットモデル
残りをソースモデル

低周波 0~10%を
ターゲットモデル
残りをソースモデル

低周波 0~20%を
ターゲットモデル
残りをソースモデル

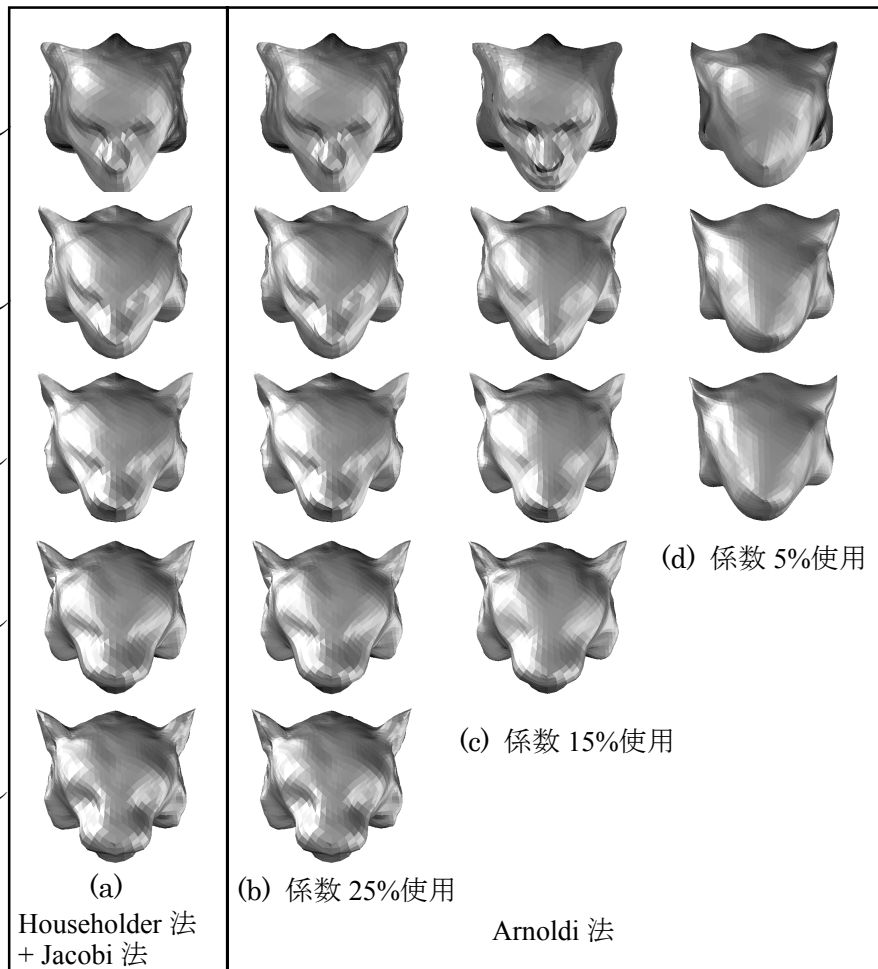


図 9. Arnoldi 法によるモーフィング結果