

画像モーフィングにおける変化率制御の一手法

大坪 夕真[†], 金田 和文[†] 山下 英生[†]

画像モーフィングは、コマーシャルや映画の映像特殊効果等に多用されており、コンピュータグラフィックスにおいて重要な技法の1つとなっている。2次元モーフィング手法であるフィールドモーフィング手法の1つに、微小線分をグループ化した特徴曲線を用いた手法がある。本論文では、画像変化のバリエーションの増加を目的とし、形状と色の変化率を3次元空間で定義された図形によって制御する手法を提案する。すなわち、提案手法では、2次元データである特徴曲線より作成した3次元幾何モデルをFree-Form Deformationを用いて変形する。そして、変形したモデルを曲面等で切断したときに得られる断面を基に、形状変化の制御を行い、色の変化率制御では、切断に用いる面の高さより各ピクセルでの混合率を決定する。さらに、形状と色の変化率の制御を統一的行う、ボリュームデータの変形手法と比較、検討を行い、提案手法の特徴、ならびに有用性を明らかにする。

A Method of Transition Control for an Image Morphing

YUMA OTSUBO,[†] KAZUFUMI KANEDA[†] and HIDEO YAMASHITA[†]

Image morphing is often used for visual effects in TV commercial messages and films, and is one of important techniques in computer graphics. In 2D morphing, an improved method of a field morphing using feature curves has been developed. The proposed method uses a 3D geometric model made of feature curves, and the 3D model is cut by a curved surface to generate various kinds of transitions between source and target images. The 3D model is also deformed using Free-Form Deformations. In the proposed method, the blending rate at each pixel is determined by the height of the cutting surface. We also discuss another method of transition control. This method uses a volume data and deforms the volume with a FFD. Using the FFD, time and spatial transitions can be controlled at the same time. We compare the proposed method and the volume deformation method, and clarify the features and the usefulness of the proposed method.

1. はじめに

画像モーフィングは、コマーシャルや、映画の映像特殊効果等に多用されており、コンピュータグラフィックスにおいて重要な技法の1つとなっている。画像モーフィングについては、文献1), 2)において系統的に分類され、各手法の特徴が詳述されている。その中でも、Beierらによるフィールドモーフィング手法³⁾は、2つの画像間の特徴を直線の線分を使って対応付けし、それらの線分間の変位により変形を行う方法であり、シンプルな処理により優れたモーフィングを行うことのできる手法である。そして、曲線状の領域境

界を持つ画像に対しても境界部での輪郭のにじみを生じさせずモーフィング画像を作成するために、その手法を曲線状の特徴が利用できるように拡張した手法⁴⁾が開発されている。しかし、これらの手法では、ソース画像からターゲット画像への変化率は、画像空間中のどの位置においても同一であり、変化に富んだモーフィングを行うことができなかった。

本論文では、画像変化のバリエーションを増加させるために、文献4)の手法を拡張し、形状と色の変化率を制御することのできる手法を提案する。すなわち、提案手法では、画像モーフィングにおいて2次元空間に存在する特徴曲線に、新たに高さ方向に時間軸 t を加えることで、3次元幾何モデルを作成し、このモデルをさまざまな面で切断することにより、形状の変化率制御を行う。

形状モーフィングにおいて、変形を制御する時間軸を加えた空間でモーフィングを行う手法がTurkらによって提案されている⁵⁾。その手法では、陰関数を用

[†] 広島大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Hiroshima University
現在、トッパン・フォームズ株式会社
Presently with TOPPAN FORMS CO., LTD.
現在、広島工業大学工学部
Presently with Faculty of Engineering, Hiroshima Institute of Technology

いて点列を補間することにより4次元空間中にモデルを生成している。また、爰島らや Ohbuchi らは細分割メッシュを用いてモデルを生成し、これを等位面で切断することによって補間形状を得る方法を提案している^{6),7)}。

しかし、3次元幾何形状モーフィングで用いられたそれらの手法をそのまま画像モーフィングに用いることはできない。これは、幾何形状モーフィングでは変形途中の形状のみを取り扱うのに対し、画像モーフィングでは領域境界を表す特徴を媒介として用い、それを変形させることにより画像中の領域の滑らかな変化を実現しているため、領域境界部分の取扱い方が異なるためである。具体的には、陰関数を用いる手法では、点列を滑らかな関数で補間する場合が一般的であり、画像モーフィングにおける特徴曲線を構成する点列の対応関係を考慮して3次元モデルを作成することが難しい。また、画像モーフィングにおけるソースとターゲット画像中の領域輪郭線の構成点を結んだ三角形ポリゴンを細分割メッシュモデル用いて変形させた場合、切断面の高さを変えながらモデルを連続して切断したとき、断面を構成する微小特徴線分の長さが三角形の頂点部分と底辺部分で大きく異なるため、ワーピング後の形状に時間的なブレが発生し、不自然なモーフィングアニメーションが作成されてしまうことがある。さらに、画像モーフィングでは、形状変形だけでなく色の混合率の制御も同期して行う必要があるにもかかわらず、これらの幾何形状モーフィング手法では形状と色の変化率の同期をとることができない。

場所ごとに画像変化の速度を制御する手法として、画像モーフィングの一手法である、メッシュモーフィングにおいては、ソース画像、ならびにターゲット画像における、それぞれのメッシュの対応する制御点どうしを結んだ線それぞれについて、変化の速度を指定する手法が提案されている⁸⁾。しかし、この手法を特徴曲線を用いたフィールドモーフィングに適用する場合、特徴曲線を構成する多数の点に対して、変化速度を設定することは多大な労力が必要である。また、フィールドモーフィングでは、一般に、輪郭部分が特徴として指定される場合が多く、このとき、輪郭内部の色補間が適切に行えない場合がある。

時間軸を加えた補間形状を定義する空間をB-Splineを用いて歪ませ、時間軸一定の平面で切断して、形状変化率制御を行う手法も提案されている^{6),7)}。これらの手法は、切断に平面を用いることにより、処理時間に関しては有利となるが、その反面、直感的な操作性は低下する。

本論文では、アニメーションを作成した際に、特徴曲線を構成する微小線分が伸縮を起こさないようにするため、3次元幾何モデルとして、ソース画像とターゲット画像における特徴曲線の対応する構成点どうしを1対1で線分あるいは曲線で結んだワイヤフレームモデルを用いる。また、形状および色の変化率の制御を1枚の平面または曲面で一元的に扱うことにより、ユーザが直感的に変化率の制御を行うことができる方法を提案する。すなわち、形状に関しては、3次元幾何モデルを平面あるいは曲面で切断したときの断面形状を求めることにより、色に関しては、その切断面の高さを求めることにより制御を行う。この3次元幾何モデルをFree-Form Deformation⁹⁾(FFD)を用いて変形させ、そして、変形した幾何モデルを切断し、このときに得られた断面に基づいて、ワーピング(幾何形状変形)を行うことにより、さらに変化に富んだ形状変形を行うことができる。なお、幾何モデルの切断には計算時間の短縮をはかるため、Bezier Clipping法¹⁰⁾を用いる。

さらに、形状と色の変化率制御を統一的行う手法として、複数枚の画像から作成したボリュームを用いる手法について述べ、本論文で提案する3次元幾何モデルを用いる手法との比較、検討を行う。これにより、特徴曲線に基づいて作成した3次元幾何モデルを用いる提案手法では、領域境界部の輪郭のにじみを生じることなく画像モーフィングを行うことができることが確認された。

2. 2枚の画像間での変化率制御

2.1 提案手法の概要

提案手法では、ソース画像とターゲット画像中の特徴を微小線分として抽出し、それらをグループ化して、微小線分近似した特徴曲線とする⁴⁾(図1参照)。まず、ソース画像ならびにターゲット画像の特徴曲線から3次元空間中に幾何モデルを作成し、FFDによるモデルの変形を行う(STEP1)。そして、それを平面または曲面で切断したときに得られる断面より、ワーピング画像の特徴曲線を作成する(STEP2)。そして、作成した特徴曲線を用いて、ソースあるいはターゲット画像から対応するピクセルを求め、ワーピング画像を作成する(STEP3)。最後に、3次元幾何モデルの切断に用いた面により、画像の各ピクセルにおいて色の混合率を決定し、作成した2枚のワーピング画像の輝度補間(ブレンディング)を行い、モーフィング画像を作成する(STEP4)。提案手法では、STEP3での幾何形状変形と、STEP4での画像間の輝度補間を

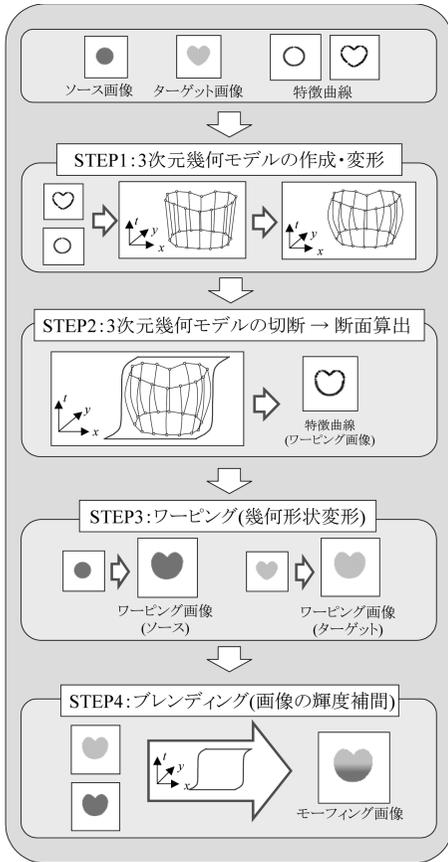


図1 概略処理手順
Fig. 1 Flow of the proposed method.

統一的方法で制御することができる。

2.2 3次元幾何モデルを用いた形状の変化率制御

ワーピング画像の特徴曲線の形状変化を制御するため、2次元空間上の特徴曲線に、新たに高さ方向の時間軸 t を加え、3次元空間中に幾何モデルを作成する。ここで、一連の微小線分列の始点と終点を結ぶ線分と、各微小線分とのなす角がしきい値を超えないように、あらかじめ微小線分列をグループ化したものを特徴曲線とよぶ⁴⁾。

3次元空間において、ソース画像とターゲット画像の特徴曲線をそれぞれ $t = 0.0$ と $t = 1.0$ に配置する。次に、ソース画像とターゲット画像の特徴曲線の構成点数の整合を行う(図2参照)。これは、特徴曲線を構成する点列間の長さの時間的変動によりワーピング後の画像の時間的なブレの発生を抑えるため、ソース画像とターゲット画像の特徴曲線の各構成点間の比を一定に保って1対1に対応付けするためである。

構成点数の整合処理は、まず図3に示すように、一方の特徴曲線の構成点から特徴曲線の始点と終点を結

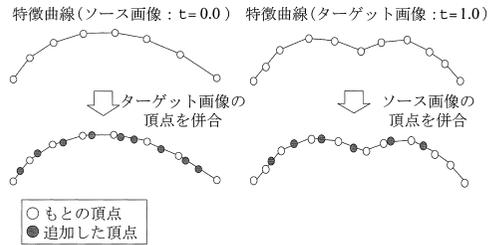


図2 特徴曲線の構成点数の整合
Fig. 2 Merge points compositing feature curve.

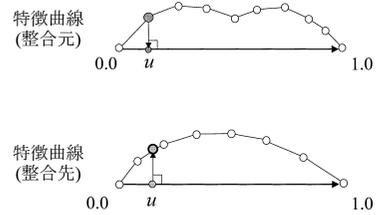


図3 構成点数の整合処理
Fig. 3 Process of merge points.

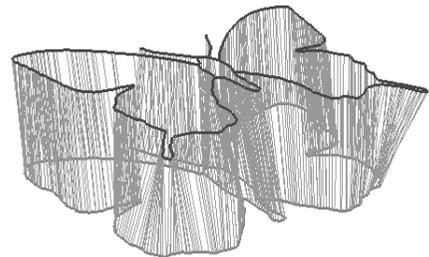


図4 3次元幾何モデル(ワイヤフレームモデル)
Fig. 4 3D geometric model (Wireframe model).

ぶ線分上へ垂線を下ろす。そして、特徴曲線の始点から、垂線の足までの長さを求め、特徴曲線の始点から終点を結ぶ線分の長さを基準として正規化した値 u を求める。次に、他方の特徴曲線において、始点と終点を結ぶ線分において、この線分の長さを1に正規化したとき、始点から長さ u となる点から垂線を立ち上げ、この垂線と、微小特徴線分と交差する点に新たに構成点を加える。この処理を特徴曲線を入れ替えて再度繰り返すことにより、両者の構成点数を一致させる。整合後のソース画像とターゲット画像の対応する構成点どうしを順番に結ぶことにより3次元幾何モデルを作成する(図4参照)。

この3次元幾何モデルに対し、FFDを用いてモデルの変形を行う(図5参照)。ここで、時間軸 t には影響を与えず、形状変形だけを制御するために、FFD格子は x, y 軸方向のみ移動可能とする。これにより、

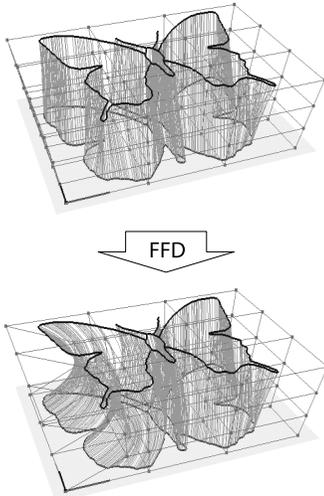


図5 FFDによる3次元幾何モデルの変形
Fig.5 Model deformation using a FFD.

対応するソース画像とターゲット画像の特徴曲線の対応する構成点を結んでいた線分が曲線に変換される。すなわち、形状を画像空間において、線形変化だけでなく、非線形的に変化させることが可能となる。

次に、変形された3次元幾何モデルを平面または曲面で切断し、断面形状を求める。ここでは、処理の簡単化のため、FFDにより変形させられた曲線を微小線分により近似し、平面、あるいは曲面との交点を求める。切断面が平面の場合にはBezier Clipping法¹⁰⁾を用いて交点計算を効率的に行うこともできる。

切断面が曲面の場合には、B-Spline曲面を用いてモデルを切断する。入力されたB-Spline曲面を複数のBezier曲面パッチに変換し、変換したBezier曲面と、変形後のモデルを構成する微小線分との交点をBezier Clipping法により算出する。この処理をすべての対応する特徴曲線の構成点のペアについて行うことにより、断面形状を算出することができる。ここで、得られた断面は3次元空間中に存在するため、これを xy 平面に射影する(t 座標を除く)ことにより、ワーピング画像の特徴曲線を求める。このようにして得られた特徴曲線に基づいて、文献4)の手法を用いてソースとターゲット画像に対し、ワーピング処理を行う。

提案手法では、3次元幾何モデルの一部にFFD格子を設定することにより、局所的な変形も可能である。このとき、FFD格子を設定した領域境界での連続性を確保するために、境界面上に存在するFFD格子以外の格子点だけを移動して変形を行う。また、複数のFFDを適用することにより、形状変形を場所ごとに異なることも可能である。局所的に急激な変形を行う必

要がある場合には、ガウス関数に基づくFFD手法¹¹⁾等の局所制御に優れたFFD手法を用いることも可能である。

2.3 モデル切断面を用いた色の変化率制御

ブレンディング処理では、画像中のピクセル (x, y) における色の混合率を求めるため、3次元幾何モデルの切断に用いた面での t 座標値を算出する。面上の t 座標値は、 $t = 0.0$ と $t = 1.0$ において、同一の (x, y) 座標を持つ2点を結ぶ線分とBezier曲面との交点を算出することにより求められ、交点算出には3次元幾何モデルの切断の際と同様、Bezier Clipping法を用いる。この処理を各ピクセルについて行うことにより、ソース画像とターゲット画像のブレンド比をピクセルごとに求める。そして、ワーピング処理が施された後のソース画像とターゲット画像の各ピクセルの値を、このブレンド比を用いて混合することによりモーフィング画像を作成する。

3次元幾何モデルの切断に、 xy 平面に平行でない平面や曲面を用いることにより、場所ごとに形状の変化率を制御することが可能となる。それと同時に、ブレンディング処理においても、切断に用いる面の t 座標値が場所ごとに変化するため、色の変化率制御も可能である。すなわち、色の変化率制御においては、切断面の t 座標値がブレンド比を表す。また、提案手法により、FFDによる変形を行わず、さらに xy 平面に平行な平面を切断面として用いた場合には、文献4)の手法と等価な結果を得ることができる。

2.4 ブレンディング処理における高速化

ブレンディング処理では、すべてのピクセルについて、曲面上での t 座標値を算出しなければならず、Bezier Clipping法を用いてもなお、計算時間がかかってしまう。具体的には、3章の適用例で示すモーフィング画像を作成する際、全体の処理時間に対してブレンディング処理時間が90%以上を占める。ブレンディング処理の高速化を図るために、図6に示すように、画像を4分木データ構造を用いてアダプティブに分割し、分割した各小領域の頂点での t 座標値を用いて、その内部の t 座標値を双一次補間により求める。

領域の分割条件には、各領域を構成する四辺形における、各辺の中点でのBezier Clipping法で求めた t 座標値と、頂点の t 座標値から線形補間により求めた t 座標値との差、ならびに、四辺形領域の重心における、Bezier Clipping法で求めた t 座標値と頂点の t 座標値より双一次補間で求めた t 座標値との差を用いる(図7参照)。補間領域を構成する四辺形における各辺の中点 $C_i (i = 0, 1, 2, 3)$ でのBezier Clipping法

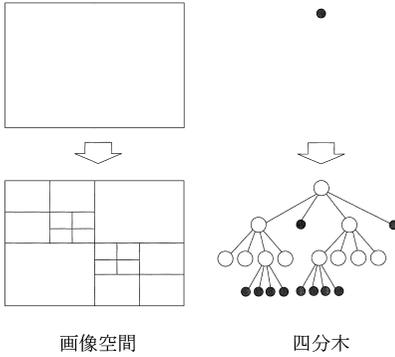


図 6 ブレンド計算のための補間領域の分割
Fig.6 Subdivision of area for blending.

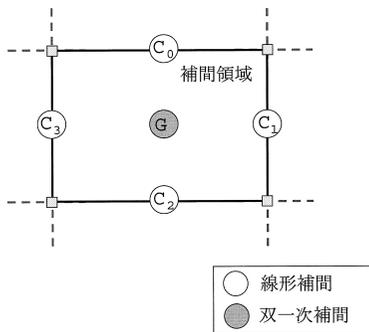


図 7 領域の分割条件
Fig.7 Condition of subdivision.

により求めた t 座標値を t_{C_i} ，線形補間により求めた t 座標値の値を t'_{C_i} とする．また，四辺形の重心 G での Bezier Clipping 法により求めた t 座標値を t_G ，双一次補間により求めた t 座標値の値を t'_G とする．このとき，以下の条件をいずれか 1 つでも満たす場合には，領域を 4 つの小領域に分割する．この処理を再帰的に繰り返すことにより領域の分割が行われる．

$$|t_{C_i} - t'_{C_i}| < \Delta t \quad (i = 0, 1, 2, 3) \quad (1)$$

$$|t_G - t'_G| < \Delta t \quad (2)$$

ここで， Δt は領域分割のための閾値である．

3. 適用例

提案手法を用いて作成したアニメーションの数フレームを図 8，図 9 に示す．図 8 において，(a)，(b) はそれぞれ，ソース画像，ターゲット画像であり，(c) はソース画像とターゲット画像の特徴曲線より作成した 3 次元幾何モデルである．そして，このモデルに対し，左の羽の部分に FFD 格子を設置し，制御点を移動させることで，(d) に示すように，変形途中の形状を縮小させた．この変形させた 3 次元幾何モデルを， xy 平面に平行な平面 ($t = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$) でそれぞ

表 1 ブレンド処理時間の比較
Table 1 A comparison of blending time.

	図 (c)	図 (e)	図 (g)
提案手法 (秒)	0.36	0.55	0.36
各ピクセルで Bezier Clipping 法を適用 (秒)	31.93	30.75	30.67

使用計算機：CPU Intel Xeon 1.7 GHz，メモリ 1 GB

れ切断し，このとき得られたモーフィング画像をそれぞれ (e) ~ (h) に示す．右の羽と比較して，左の羽は，(e) から (h) に向かうにつれ，徐々に小さくなりながら変化し，その後，元に戻りながら変化する画像が得られている．

図 9 では，図 8 と同様，(a)，(b) はそれぞれソース画像，ターゲット画像である．この例では，領域境界の輪郭だけでなく，髪の上部に髪の伸び方を表す 2 本の特徴曲線が設定してある．そして，ソース画像とターゲット画像の特徴曲線より作成した 3 次元幾何モデルを曲面で (c)，(e)，(g) の順番に切断し，このとき得られたモーフィング画像を (d)，(f)，(h) に示す．(d)，(f)，(h) と向かうにつれ，まず，頭部のみがソース画像からターゲット画像と変化し，その後，胴体の部分がターゲット画像へ変化する画像が得られている．

また，図 9 の例において，提案手法におけるブレンド処理時間は，各ピクセルで Bezier Clipping 法を行った場合と比較して約 55 倍から 90 倍の高速化が実現できている (表 1 参照)．

4. ボリュームを用いた変化率制御方法との比較

4.1 ボリュームを用いた変化率制御方法

画像モーフィングにおける変化率制御を実現するための手法として，複数枚のモーフィング画像から作成したボリュームデータに対して FFD を施す手法も考えられる．本節では，その方法と提案手法との比較・検討を行う．

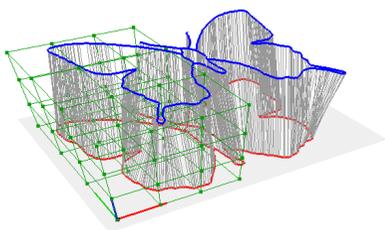
ボリュームを用いたモーフィングの変化率制御手法として，3 次元幾何モデルを用いた手法と同様に，ソース画像，ターゲット画像，そして，それぞれに対応する特徴曲線を入力として与える (図 10 参照)．そして，変化率の制御を行わない，従来のモーフィングにより，複数枚のモーフィング画像 (以下，中間画像とよぶ) を混合率を変えながら作成し， xyt の 3 次元空間中において，それらを $t = 0$ から順に並べる (STEP1)．これらの中間画像は，離散的な 3 次元空間中で (R, G, B) の色を持ったボリュームデータと見なすことができる．



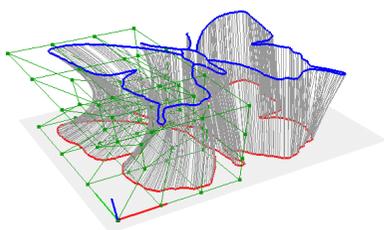
(a) ソース画像



(b) ターゲット画像



(c) モデル変形前



(d) モデル変形後



(e) $t = 0.2$



(f) $t = 0.4$



(g) $t = 0.6$



(h) $t = 0.8$

図 8 適用例 1 (FFD によるモデル変形を用いたモーフィング)

Fig. 8 Example 1 (Image morphing using a FFD for a model deformation).



(a) ソース画像



(b) ターゲット画像

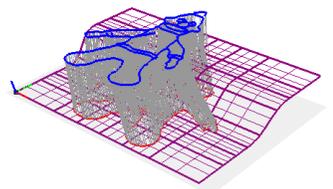
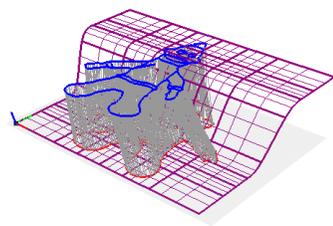
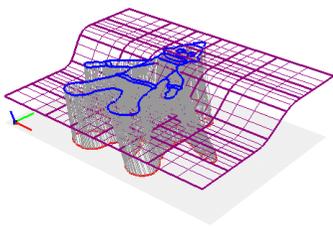
(c) $t = 0.25$ (d) $t = 0.25$ (e) $t = 0.5$ (f) $t = 0.5$ (g) $t = 0.75$ (h) $t = 0.75$

図 9 適用例 2 (モデルの切断に曲面を用いたモーフィング)

Fig. 9 Example 2 (Image morphing using curved surface for cutting model).

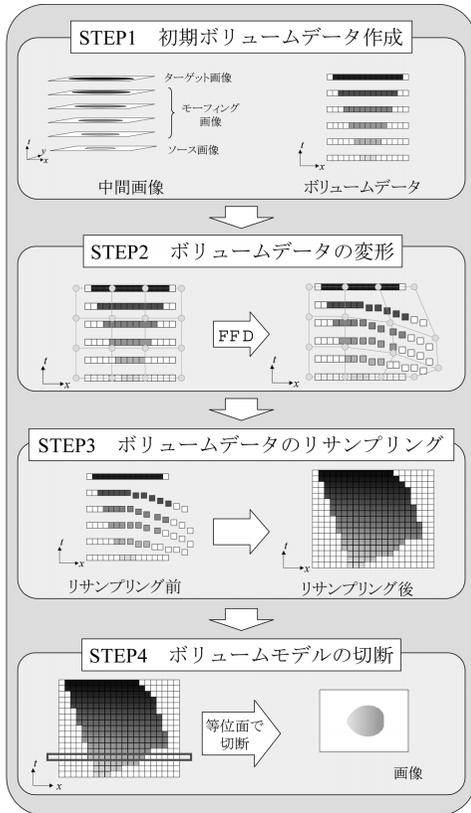


図 10 ポリウムを用いた制御方法の概略
Fig. 10 Morphing using volume data.

次に、作成したポリウムデータを FFD により変形を行う (STEP2)。この FFD 変換により、空間を歪ませ、サンプル点を補間することによりリサンプリングを行い、ポリウムモデルを再構成する (STEP3)。

最後に、再構成したポリウムモデルについて、 $t = const$ の水平面で切り出し、そのときに得られる断面画像がモーフィング画像となる (STEP4)。

4.2 リサンプリングの際のポリウムデータの補間

ポリウムデータの補間では、計算点から設定した距離範囲内に存在するサンプル点のみを用いて補間を行うことにする。補間では、まず、それぞれのサンプル点について、重み w を算出する。

$$w(\text{length}) = \frac{1}{a \cdot \text{length}} \quad (3)$$

ここで、 length は計算点からサンプル点までの距離を表す。また、 a 、 b は任意定数であり、経験的に値を設定する。この重み関数により、計算点に最も近いサンプル点の色が計算点の色に強く影響する。そして、次式を用いることにより、計算点における色 (C_R, C_G, C_B) を算出する。



図 11 色の境界部がぼやける例
Fig. 11 An example of boundary fading.

$$C_\lambda = \frac{\sum_i w_i C_{\lambda,i}}{\sum_i w_i} \quad (\lambda = R, G, B) \quad (4)$$

ここで、 $C_{\lambda,i} (\lambda = R, G, B)$ は補間に用いるサンプル点 i が持つ色、 w_i は、式 (3) で算出した各サンプル点における重みである。

4.3 3次元幾何モデルを用いる提案手法との比較

まず、ポリウムと FFD を用いて、画像モーフィングの変化の制御を行う際の利点として、FFD 制御格子により、“ xy 空間における変形制御”と“場所ごとにおける変化率制御”が同時に行える点があげられる。よって、変化に富んだモーフィングを簡便に行いたい場合には、ポリウムモデルを用いる方が良い。

しかし、ポリウムモデルの変換後には、中間画像の幾何的特徴を保持していないため、リサンプリングを行った際、図 11 に示す蝶の羽の左側のように、モーフィング画像の境界部がぼやけてしまうという問題がある。この問題を解決するための方法としては、リサンプリングにインバースマッピングを用いてポリウムモデルを再構築する方法があげられる。しかし、インバースマッピングを行う場合、FFD の逆問題を解く必要があり、きわめて困難である。また、ポリウムを用いる手法では、時間軸 t 方向における FFD 制御点の数は有限であり、さらに、FFD 制御点の移動によるポリウムデータの変形の影響は FFD 格子全体に及ぶため、特定の場所でのモーフィング比率を指定することが困難であるといった問題もある。

一方、本論文で提案する 3 次元幾何モデルを用いる変化率制御方法では、時間、空間の制御を別々に制御することが可能であるため、場所ごとにおける変化率を特定したアニメーションを作成しやすいという特長がある。すなわち、時間的あるいは、空間的なモーフィングの変化率を細かく設定して、制作者の希望どおりに制御を行い、モーフィング画像を作成したい場合には、提案手法の方が優れている。作成されるモー

フィング画像についても、モデル切断により、モーフィング画像の特徴を作成し、この幾何的な特徴形状に合わせて、画像をマッピング(ワーピング)するため、図 11 に示すような、モーフィング画像がにじむという現象は起こりにくい。

計算時間の比較については、計算機には CPU Intel Xeon 1.7 GHz、メモリ 1 GB を搭載したものを使用し、図 8 (a), (b), (d) に示すソース画像、ターゲット画像、ならびに FFD 格子を用いて、ポリウムを用いる手法と提案手法のそれぞれについてモーフィング画像を作成した。同一条件での比較を行うため、両者の手法とも文献 4) のワーピングの高速化を行っていない。ポリウムを用いる方法では、画像を 1 枚作成するにあたり、約 20 秒かかるのに対し、提案手法では、約 9 秒でモーフィング画像を作成することができ、計算時間の点においても有利であることが分かる。

5. む す び

本論文では、3次元幾何モデルを曲面等で切断することにより、形状や色の変化率を場所ごとに制御する手法を提案した。提案手法では、ソース画像、ならびにターゲット画像の特徴曲線から作成した3次元幾何モデルを作成し、それを FFD により変形することにより、画像の空間的な変化を制御する。また、変形したモデルを曲面等で切断することにより、形状変化の時間的な制御を行う。これにより、画像モーフィングにおける形状と色の変化率制御を統一かつ直感的に行うことができる。

さらに、画像モーフィングの変化率制御の別アプローチであるポリウムデータと FFD を用いる方法と、提案した3次元幾何モデルを用いる手法との比較、検討を行い、提案手法の特徴を明らかにし、その有用性について述べた。

今後の課題としては、FFD 制御格子や切断曲面等の入力を行うユーザインタフェースの作成があげられる。さらに、さまざまな切断曲面に対して、時間的に滑らかなモーフィングアニメーションを実現するための切断面の移動方法の開発を行う必要がある。また、入力画像が3枚以上のモーフィングにおける画像変化の制御手法の検討や開発もあげられる。

参 考 文 献

- 1) Wolberg, G.: *Digital Image Warping*, IEEE Computer Society Press (1990).
- 2) Wolberg, G.: Image Morphing: A Survey, *The Visual Computer*, Vol.14, No.8/9, pp.360-372

(1998).

- 3) Beier, T. and Neely, S.: Feature-Based Image Metamorphosis, *Computer Graphics*, Vol.26, No.2, pp.35-42 (1992).
- 4) 金田和文, 陸野将弘, 山下英生: 線分近似した特徴曲線に基づく画像モーフィング, *画像電子学会誌*, Vol.29, No.4, pp.320-329 (2000).
- 5) Turk, G. and O'Brien, J.F.: Shape Transformation Using Variational Implicit Functions, *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, 1999, pp.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 グラフィックスと CAD 合同シンポジウム 2000*, pp.71-76 (2000).
- 7) Ohbuchi, R., Kokojima, Y. and Takahashi, S.: Blending Shapes by Using Subdivision Surfaces, *Computers & Graphics*, Vol.25, No.1, pp.41-58 (2001).
- 8) Nishita, T., Fujii, T. and Nakamae, E.: Metamorphosis using Bezier Clipping, *Pacific Graphics 93*, pp.162-173 (1993).
- 9) Sederberg, T.W. and Parry, S.R.: Free-Form Deformation of Solid Geometric Models, *Computer Graphics*, Vol.20, No.4, pp.151-160 (1986).
- 10) Nishita, T., Sederberg, T.W. and Kakimoto, M.: Ray Tracing Truncated Rational Surface Patches, *Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp.337-345 (1990).
- 11) 吉田典正, 加納顕也, 北嶋克寛: ガウス関数に基づく Free-Form Deformation — 対話的なモデル変形のための基礎理論, *精密工学会誌*, Vol.65, No.7, pp.971-975 (1999).

(平成 15 年 12 月 1 日受付)

(平成 16 年 9 月 3 日採録)



大坪 夕真

昭和 54 年生。平成 14 年広島大学工学部第二類(電気系)卒業。平成 16 年同大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程前期修了。現在、トッパン・フォームズ(株)勤務。在学中はコンピュータグラフィックスに関する研究に従事。



金田 和文 (正会員)

昭和 34 年生。昭和 57 年広島大学工学部第二類 (電気系) 卒業。昭和 59 年同大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年中国電力 (株) 入社。昭和 61 年広島大学工学部第二類 (電気系) 助手。平成 7 年同大学助教授。この間、平成 3 年より 1 年間米国ブリガムヤング大学へ出張。コンピュータグラフィックス、画像処理の研究・開発に従事。工学博士。画像電子学会、電気情報通信学会、電気学会、ACM 各会員。



山下 英生 (正会員)

昭和 16 年生。昭和 39 年広島大学工学部電気工学科卒業。昭和 43 年同大学大学院修士課程修了。同年広島大学工学部電気工学科助手。平成 4 年同教授第二類 (電気系) 電気機器工学教育科目担当。平成 16 年広島工業大学工学部知的情報システム工学科教授。この間、昭和 56 年 2 月より 1 年 6 カ月間アメリカ・クラークソン工科大学へ出張。主として、有限要素法による電気機器の電界・磁界解析、逆問題解法サイエンティフィックビジュアライゼーションに関する研究に従事。工学博士。電気学会、電子情報通信学会、日本シミュレーション学会、日本 AEM 学会、日本計算工学会、画像電子学会、日本工業教育協会、IEEE 各会員。